



Sobre la percepción de indicios en bocetos de ingeniería y su aplicación al modelado basado en bocetos

TESIS DOCTORAL

Autora: Raquel Plumed Ferrer

Director: Pedro Company Calleja

Castellón, Noviembre 2014



UNIVERSITAT
JAUME·I

Sobre la percepción de indicios en bocetos de ingeniería y su aplicación al modelado basado en bocetos

TESIS DOCTORAL

por

RAQUEL PLUMED FERRER

Director de tesis:

PEDRO COMPANYY CALLEJA

Castellón, Noviembre 2014

Agradecimientos

La elaboración de este documento, ha sido el resultado de unos años de mucho esfuerzo, concentración y aprendizaje, que de una manera u otra, ha marcado mi vida y me ha hecho crecer tanto personal como profesionalmente.

He de reconocer que todo este aprendizaje no hubiera sido posible sin la ayuda de mucha gente que me ha apoyado y me ha alentado en los momentos más duros. Por eso, quería aprovechar este momento para expresar mis agradecimientos, en primer lugar al Dr. Pedro Company Calleja, que me ha llevado de la mano durante todo este tiempo, y del que valoro toda su dedicación, esfuerzo y paciencia que ha tenido conmigo. Al Dr. Peter Varley, que siempre me ha brindado su apoyo cuando lo he necesitado, aportándome grandes conocimientos y consejos.

A los miembros del Departamento de Computer Science de la Universidad de Cardiff, y en especial al Dr. Ralph Martin, por ofrecerme la oportunidad de realizar una estancia en su universidad con todas las experiencias gratificantes que conllevó para mí.

A mis compañeros y compañeras del Área de Expresión Gráfica para la Ingeniería de la Universitat Jaume I, que siempre se han volcado cuando les he pedido ayuda y han colaborado desinteresadamente en muchos estudios de esta tesis. Y donde además he encontrado grandes amigos que me han apoyado y me han hecho siempre feliz.

A mi familia, que siempre me han ofrecido su apoyo incondicional. A mis padres que desde niña me han inculcado todos los valores y la educación que me han permitido llegar hasta aquí, a mi hermano al que admiro como a nadie. A mis tíos, primos, cuñada, sobrinos y abuelos que son mi fuerza y empuje.

Y a Raúl, cuyo apoyo, esfuerzo y cuidados en esta última etapa de la tesis han sido primordiales. Y con quien espero escribir muchas nuevas páginas en el día a día.

Gracias a todos.

Índice

GLOSARIO	1
RESUMEN	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	19
1.1 MOTIVACIÓN	19
1.2 PROPÓSITO Y OBJETIVOS DE ESTA TESIS	22
1.3 ÁMBITO Y DEFINICIONES	22
1.4 IMPLEMENTACIÓN.....	24
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	25
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	29
2.1 INTRODUCCIÓN.....	29
2.2 RECONOCIMIENTO DEL BOCETO	29
2.2.1 <i>Segmentación</i>	30
2.2.2 <i>Ajuste de Trazos en SBM</i>	31
2.2.2.1 Ajuste de líneas rectas.....	32
2.2.2.2 Ajuste de arcos de elipse.....	33
2.2.3 <i>Flujo de reconocimiento</i>	34
2.3 RECONOCIMIENTO DE INDICIOS.....	36
2.4 RECONSTRUCCIÓN.....	38
2.4.1 <i>Reconocimiento de elementos característicos 2D</i>	39
2.4.2 <i>Modelado CSG</i>	41
2.5 EXPERIMENTACIÓN.....	43
2.6 CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO 3. RECONOCIMIENTO DEL BOCETO: MÉTODOS PARA EL AJUSTE DE LÍNEAS RECTAS Y ARCOS ELÍPTICOS	47
3.1 INTRODUCCIÓN.....	47
3.2 AJUSTE DE SEGMENTOS DE LÍNEA BASADOS EN PERCEPCIÓN	50
3.2.1 <i>Geometría del ajuste de líneas rectas</i>	51
3.2.1.1 Experimento #1 para líneas rectas	51
3.2.1.2 Experimento #2 para líneas rectas	56
3.2.1.3 Métodos geométricos	57
Algoritmo de longitud de cuerda	57
Recta de regresión Ortogonal.....	58
Transformada Estándar de Hough	60
3.2.1.4 Comparación de parámetros geométricos con la percepción humana	61
3.2.1.5 Definición de métricas.....	62
Transformada de Hough Normalizada.....	63
Coeficiente de oblicuidad y Tolcob	64
Ajuste de las métricas:.....	65
3.2.2 <i>Percepción del ajuste de líneas rectas</i>	67
3.2.2.1 Experimento #3 para líneas rectas	67
3.2.2.2 Experimento #4 para líneas rectas	69
3.2.2.3 Experimento #5 para líneas rectas	70
3.2.3 <i>Algoritmo de ajuste de segmentos de recta basado en la percepción</i>	71
3.2.3.1 Suavizado	73

3.2.3.2	Ajuste del algoritmo	74
3.2.4	<i>Análisis</i>	75
3.2.4.1	Comportamiento general	75
3.2.4.2	Tiempos de ejecución.....	76
3.2.4.3	Análisis de sensibilidad	77
3.2.4.4	Casos patológicos	77
3.3	AJUSTE DE ARCOS ELÍPTICOS BASADO EN PERCEPCIÓN	79
3.3.1	<i>Geometría del ajuste de elipses</i>	79
3.3.1.1	Parámetros canónicos	80
3.3.1.2	Detección de puntos finales	81
3.3.2	<i>Percepción del ajuste de elipses</i>	82
3.3.2.1	Experimento #1 para arcos	83
3.3.2.2	Experimento #2 para arcos	84
3.3.2.3	Experimento #3 para arcos	85
3.3.2.4	Experimento #4 para arcos	86
3.3.2.5	Oscilaciones y ondulaciones.....	87
3.3.3	<i>Evaluación del trabajo previo</i>	88
3.3.3.1	Algoritmo de cinco puntos (5P).....	88
3.3.3.2	Ajuste de elipse directo (DIR)	89
3.3.3.3	Ajuste de Elipse Garantizado con la distancia de Sampson (GEF)	91
3.3.3.4	Tiempos de ejecución.....	91
3.3.4	<i>Algoritmo rápido y basado en la percepción humana para el ajuste de arcos elípticos</i>	93
3.3.4.1	Envolvente convexa	95
3.3.4.2	Remuestreo.....	96
3.3.4.3	Métricas rápidas para medir la calidad del ajuste.....	96
3.3.4.4	Suavizado	98
3.3.4.5	Evaluación del mérito del ajuste	98
3.3.5	<i>Análisis</i>	99
3.3.5.1	Ajuste de los parámetros	99
3.3.5.2	Comportamiento general	99
3.3.5.3	Validez de los algoritmos rápidos y menos precisos	101
3.3.5.4	Tiempo de ejecución	102
3.3.5.5	Casos patológicos	104
3.4	RECONOCIMIENTO DEPENDIENTE DEL CONTEXTO	104
3.4.1	<i>Experimento #1 de contexto</i>	104
3.4.2	<i>Flujos basados en considerar el contexto</i>	106
3.5	CONCLUSIONES.....	107

CAPÍTULO 4. RECONOCIMIENTO DE INDICIOS: AGRUPAMIENTO DE ARISTAS PARALELAS EN EL ESPACIO 109

4.1	INTRODUCCIÓN.....	109
4.2	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	111
4.3	SOBRE EL EMPLEO DE LA CONVERGENCIA EN TAREAS DE BOCETADO	112
4.3.1	<i>Experimento #1</i>	113
4.3.2	<i>Discriminación automática de convergencia en bocetos</i>	114
4.4	PERCEPCIÓN HUMANA DE PUNTOS DE FUGA	117
4.4.1	<i>Experimento #2</i>	117
4.4.1.1	Validación cualitativa de la primera hipótesis.....	118
4.4.1.2	Validación cualitativa de la segunda hipótesis	119
4.4.1.3	Validación cualitativa de la tercera hipótesis	120
4.4.2	<i>Parámetros y métricas de ajuste</i>	120
4.4.2.1	Grado de percepción (Det).....	121
4.4.2.2	Dispersión angular (AD).....	121

4.4.2.3	Dispersión (Disp)	121
4.4.2.4	Relación de distancias entre centroides (DRC).....	122
4.4.2.5	Dispersión de longitudes (LeD).....	122
4.4.2.6	Número de líneas (NL).....	123
4.4.2.7	Dispersión de localización (LoD).....	123
4.4.3	<i>Análisis</i>	123
4.4.3.1	Primera hipótesis	124
4.4.3.2	Segunda hipótesis	124
4.4.3.3	Tercera hipótesis	125
4.5	ALGORITMO DE AGRUPACIÓN DE LÍNEAS	125
4.6	OTROS INDICIOS INDIRECTOS DETECTABLES EN UN DIBUJO LINEAL	126
4.7	CONCLUSIONES.....	127
CAPÍTULO 5. RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D		129
5.1	INTRODUCCIÓN.....	129
5.2	TIPOS DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS	131
5.2.1	<i>Clasificación de Elementos característicos</i>	131
5.3	EXPERIMENTOS SOBRE EL RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D	134
5.3.1	<i>Experimento #1</i>	134
5.3.2	<i>Experimento #2</i>	137
	Ejemplo 1	138
	Ejemplo 2	139
	Ejemplo 3	140
	Conclusiones generales del experimento	142
5.4	DETECCIÓN DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D EN DIBUJOS LINEALES	142
5.4.1	<i>Escalones y Vaciados</i>	142
5.4.1.1	Búsqueda de elementos característicos candidatos	144
5.4.1.2	Filtrado de forma del subgrafo interno	144
5.4.1.3	Localización de la cara externa.....	145
5.4.1.4	Selección de la cara externa	145
5.4.1.5	Clasificación del elemento característico	146
5.4.2	<i>Otros elementos característicos</i>	147
	Nervios y divisores	147
	Guías y Ranuras	148
5.5	CONCLUSIONES.....	149
CAPÍTULO 6. CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D		151
6.1	INTRODUCCIÓN.....	151
6.2	ÁRBOL DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D	153
6.3	SELECCIÓN DEL ELEMENTO CARACTERÍSTICO 2D	154
6.4	SIMPLIFICACIÓN DEL DIBUJO DELINEADO	157
6.5	IMPLEMENTACIÓN DE LA RECURSIVIDAD	158
6.6	EJEMPLOS.....	159
6.7	CONCLUSIONES.....	160
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....		161
7.1	CONTRIBUCIONES ORIGINALES.....	161
7.2	PUBLICACIONES	161
7.3	TRABAJO FUTURO	164
BIBLIOGRAFÍA		167
ANEXO I: EXPERIMENTOS DE LA ETAPA DE RECONOCIMIENTO DE PRIMITIVAS		177

Caso 1	177
Caso 2	178
Caso 3	182
Caso 4	183
Caso 5	184
ANEXO II: EXPERIMENTOS DE LA ETAPA DE RECONOCIMIENTO DE INDICIOS INDIRECTOS.....	187
Caso 1	187
Caso 2	191
Caso 3	192
Caso 4	194
Caso 5	196
ANEXO III: EXPERIMENTOS DE LA ETAPA DE RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS 2D	
.....	201
Caso 1	201

Índice de tablas

Tabla 1	Resultados del experimento #1.....	52
Tabla 2	Correlación de Pearson entre parámetros de tolerancia y distancia de Hausdorff....	55
Tabla 3	Valores de los ángulos utilizados en el experimento	56
Tabla 4	Análisis Post-hoc, grupos homogéneos.....	57
Tabla 5	Comparación de los algoritmos con los resultados del experimento #1	62
Tabla 6	Correlación de Pearson entre los resultados de los algoritmos y el experimento #1	66
Tabla 7	Comparación de resultados entre NHT, Tol, COB y Tolcob, y el experimento #1.....	66
Tabla 8	Parámetros de los trazos de la evaluación de rectitud relativa	68
Tabla 9	Parámetros para los trazos de oscilación después de cuatro pasos de suavizado	74
Tabla 10	Figuras de mérito devueltas por el algoritmo	75
Tabla 11	Frecuencias de percepción de los experimentos y figuras de méritos devueltas por el algoritmo	76
Tabla 12	Parámetros del algoritmo y su rango recomendado de valores	77
Tabla 13	Tiempos de ejecución (en segundos) para las etapas principales	103
Tabla 14	Resultados del experimento de percepción de la escena.....	105
Tabla 15	Valores medios de AD para cada modelo	116
Tabla 16	Puntos de fuga percibidos.....	119
Tabla 17	Correlación de Pearson entre los parámetros	123
Tabla 18	Clasificación de los elementos característicos 2D.....	133
Tabla 19	Dibujos y elementos característicos percibidos por los encuestados.....	136
Tabla 20	Características de los trazos de los ejemplos.....	178
Tabla 21	Parámetros generales de cada familia.	178
Tabla 22	Valores de los ángulos utilizados en el experimento	179
Tabla 23	Resultados del análisis ANOVA para los trazos con oblicuidad igual a cero.	180
Tabla 24	Resultados del ANOVA para la segunda hipótesis	180
Tabla 25	Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 3.....	182
Tabla 26	Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 4.....	182
Tabla 27	Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 5.....	182
Tabla 28	Trazos de arcos ordenados por los sujetos en el experimento 1.....	183
Tabla 29	Trazos de arcos ordenados por los sujetos en el experimento 2.....	183
Tabla 30	Trazos de arcos cortos, ordenados por los sujetos en el experimento 3.....	184
Tabla 31	Trazos de arcos de diferentes longitudes, ordenados por los sujetos en el experimento 4.....	184
Tabla 32	Tabla de contingencia entre el ámbito de los encuestados y el empleo de convergencia	189
Tabla 33	Frecuencias esperadas	189
Tabla 34	Probabilidades de las tablas de contingencia derivadas 2x2	190
Tabla 35	Tabla de contingencia entre la complejidad del modelo y el empleo de convergencia	190
Tabla 36	Frecuencias esperadas	190
Tabla 37	Probabilidades de las tablas de contingencia derivadas 2x2	190

Tabla 38	Parámetros que influyen en la percepción de convergencia.....	196
Tabla 39	Direcciones de fuga percibidas.....	200

Índice de figuras

Figura 1.	Diagrama jerárquico que representa las diversas etapas (recuadro azul), sub-etapas (recuadro rojo) y tareas (recuadro verde) del proceso SBM propuesto	16
Figura 2.	Ejemplos típicos de bocetos de ingeniería que incluyen líneas rectas y arcos elípticos.	48
Figura 3.	Ajustar un trazo a una única macrolínea (izq.), en dos líneas segmentadas (centro) y muchas microlíneas (dcha.).....	48
Figura 4.	La influencia del contexto, no la geometría, hace que el arco rojo superior (izq.) se perciba como un arco.....	49
Figura 5.	Ejemplo de un trazo y su representación a partir de los puntos o nodos muestreados.....	52
Figura 6.	Colección de ejemplos para el experimento #1 de líneas rectas.....	52
Figura 7.	Ejemplo de trazo, su rectángulo delimitador y los valores del rango-x y rango-y ..	53
Figura 8.	Representación de la distancia de Hausdorff.....	54
Figura 9.	Rectángulo delimitador y recta de regresión.....	55
Figura 10.	Trazos que definen cada familia de líneas	56
Figura 11.	Regresión lineal simple (izquierda), regresión lineal ortogonal (derecha)	58
Figura 12.	(Izquierda) línea paramétrica y representación de Hough de un punto. (Derecha) conjunto de puntos colineales y su representación de Hough (curvas senoidales)	60
Figura 13.	Influencia del número de filas (correspondiente a la discretización de theta) sobre la diferencia entre la percepción humana (%Sí) y el algoritmo NHT (STIR).	64
Figura 14.	Influencia del número de columnas (correspondiente a la discretización de rho) sobre la diferencia entre la percepción humana (%Sí) y el algoritmo NHT (STIR)	64
Figura 15.	Coefficiente de Oblicuidad	65
Figura 16.	Ejemplos de trazos para la evaluación de rectitud relativa	68
Figura 17.	Ejemplos de trazos con oscilaciones para la evaluación de su rectitud relativa.	69
Figura 18.	Ejemplos de relaciones mútuas entre trazos	72
Figura 19.	Bandas de tolerancia mínima y máxima para los doce trazos de la figura 16	73
Figura 20.	Trazo con oscilaciones (izq.), trazo con oscilaciones tras cuatro iteraciones de suavizado (centro), y trazo similar sin oscilaciones (dcha.)	74
Figura 21.	Comparación del tiempo de ejecución entre los algoritmos de Tolerancia y NHT.	76
Figura 22.	Trazo 7 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax)	78
Figura 23.	Trazo 3 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax)	78
Figura 24.	Trazo -4 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax).....	78
Figura 25.	Trazo con retroceso, y su segmento de ajuste.....	78
Figura 26.	Elipse	80
Figura 27.	Conjunto de trazos empleados en la percepción de arcos elípticos.....	84
Figura 28.	Conjunto de trazos cortos empleados en la percepción de arcos elípticos.....	85
Figura 29.	Conjunto de trazos empleados en la percepción de arcos elípticos.....	86
Figura 30.	Ajustes dolicocefálicos del algoritmo 5P.....	89

Figura 31.	Dos arcos con un ajuste pobre según el método de Fitzgibbon (izquierda) y un mejor ajuste en sus extremos según el método de los cinco puntos (derecha).....	90
Figura 32.	Ajuste pobre de DIR debido a un mínimo local, que desaparece tras una rotación de 5°	90
Figura 33.	Una semilla inapropiada de DIR (izq.) conlleva grandes costes computacionales para obtener un ajuste de GEF válido (centro), que es reducido drásticamente tras remuestrear el trazo (dcha.)	91
Figura 34.	Comparación de los tiempos de ejecución entre todos los algoritmo para arcos cortos.	92
Figura 35.	Comparación de los tiempos de ejecución entre todos los algoritmo para arcos largos	92
Figura 36.	Trazo poligonal ajustado por 5P (izquierda), DIR (centro) y GEF (derecha).....	94
Figura 37.	Parámetros para determinar si el trazo representa un arco que cubre un pequeño ángulo de una elipse	97
Figura 38.	Trazo con ondulaciones y sin oscilaciones (izq.), trazo de oscilaciones regulares (centro), y trazo suavizado con oscilaciones tras dos iteraciones de suavizado (dcha.)	98
Figura 39.	Ajustes de 5P de los trazos del Experimento #1	100
Figura 40.	Ajustes de los trazos del Experimento #3	100
Figura 41.	Ajustes de los trazos del Experimento #5	100
Figura 42.	Medida de la banda de tolerancia con una buena estimación (izq.), y una mala estimación (dcha.).....	102
Figura 43.	Trazos d1(izq.) y d2 (dcha.) para comparar el comportamiento del algoritmo con arcos largos/cortos variando el número de puntos.	102
Figura 44.	Ajustes elípticos pobres para trazos compuestos.....	104
Figura 45.	Arco elíptico que abarca más de 360 grados	104
Figura 46.	Dibujos para el experimento de percepción del contexto	105
Figura 47.	Perspectiva lineal con uno (izq.), dos (centro) y tres (dcha.) puntos de fuga... ..	111
Figura 48.	Cuña con dos puntos de fuga principales y un punto de fuga oblicuos.....	112
Figura 49.	Perspectiva lineal de un prisma con un punto de fuga externo (izq.) e interno (dcha.) al objeto.	112
Figura 50.	Modelos utilizados en el experimento, en orden creciente de dificultad de (a) a (c).	113
Figura 51.	Dibujos lineales, vectorizados manualmente	115
Figura 52.	Frecuencia acumulada del valor de AD	116
Figura 53.	Frecuencia de las direcciones en los dibujos	117
Figura 54.	Conjunto de bocetos empleados en el experimento	118
Figura 55.	Superposición de los puntos de fuga percibidos por los sujetos en el dibujo 3	120
Figura 56.	Cálculo de DRC para el boceto 3 y dirección 4	122
Figura 57.	Ejemplos de agrupamientos de líneas que representan aristas paralelas en el espacio	126
Figura 58.	Soporte de acoplamiento (izq.) y trípode (dcha.)	132
Figura 59.	Cuestionario de elementos característicos	135
Figura 60.	Segundo cuestionario de elementos característicos	137
Figura 61.	Ejemplo 1 en vista axonométrica (a) y sistema multivista (b)	138
Figura 62.	Ejemplo 2.....	139

Figura 63.	Concentrador de una cinta de vídeo (a) y multivista de la pieza 1 (b).....	141
Figura 64.	Ejemplos de escalones	143
Figura 65.	Ejemplos de vaciados	143
Figura 66.	Tipología básica del subgrafo interno que representa un escalón o vaciado... ..	144
Figura 67.	Entrada bocetada (izq.), dibujo delineado (dcha.) con cara del subgrafo interno (10) contenida en la cara externa 1.	145
Figura 68.	Elemento característico no orientado según la cara externa que lo contiene. .	146
Figura 69.	Dos ejemplos y sus correspondientes figures de mérito	146
Figura 70.	Ejemplo de entradas bocetadas y sus dibujos delineados con los elementos característicos detectados	148
Figura 71.	Guía y ranura (izquierda), y algunos de sus indicios 2D (derecha)	148
Figura 72.	Alturas de los vértices de la sección transversal del elemento característico..	149
Figura 73.	Diagrama del proceso para obtener un modelo 3D a partir de un boceto.....	152
Figura 74.	Proceso iterativo hasta obtener la pieza en bruto.....	154
Figura 75.	La selección de elementos característicos puede ser crítica	155
Figura 76.	Ejemplo de cómo se almacena y se guarda la información del árbol de elementos característicos	156
Figura 77.	Elemento característico constituido por un subgrafo (escalón) y simplificación del dibujo	157
Figura 78.	Ejemplo de aristas colineales de la pieza en bruto que son alargadas al eliminar una ranura (arriba) y un nervio (abajo).....	157
Figura 79.	Bloque con un nervio que a su vez contiene una ranura	159
Figura 80.	Bloque con dos ramas independientes	159
Figura 81.	Interferencias entre elementos característicos	159
Figura 82.	Cuestionario experimento 1 apartado 3.2.1.1	177
Figura 83.	Ejemplo del cuestionario y el formulario de respuestas del experimento 2 del apartado 3.2.1.2	179
Figura 84.	Trazos que abarcan ángulos largos empleados en el análisis general del método de reconocimiento de arcos (apartado 3.3.5.1).....	185
Figura 85.	Trazos que abarcan ángulos cortos empleados en el análisis general del método de reconocimiento de arcos (apartado 3.3.5.1).....	186
Figura 86.	Cuestionario experimento 1 apartado 4.3.1	187
Figura 87.	Vértices definidos por puntos de intersección.....	191
Figura 88.	Cuestionario del experimento de puntos fuga.....	193
Figura 89.	Puntos de fuga erróneos	193
Figura 90.	Líneas ocultas para ubicar los puntos de fuga del dibujo 12.	194
Figura 91.	Estrategias para seleccionar la ubicación más probable de los VPs	195
Figura 92.	Nube de puntos para la definición de puntos de fuga	195
Figura 93.	Dibujos 11 y 12	197
Figura 94.	Dibujos y direcciones.....	197
Figura 95.	Dibujos y direcciones.....	198
Figura 96.	Dibujos y direcciones.....	198
Figura 97.	Nube de puntos para el dibujo 11 dirección 1.	199
Figura 98.	Dibujos 11 y 15 con un valor de LoD bajo	199

Glosario

2D: acrónimo de “dos dimensiones”, hace referencia al espacio bidimensional, que es el modelo geométrico de la proyección plana del universo físico en el que vivimos. Esta representación carece de información de profundidad.

http://en.wikipedia.org/wiki/Two-dimensional_space

3D: acrónimo de “tres dimensiones”, hace referencia al espacio tridimensional, que es el modelo geométrico basado en 3 parámetros del universo físico (sin considerar el tiempo) en el que existe toda la materia conocida. Cualquiera tres direcciones pueden ser elegidas, a condición de que no todas ellas se encuentren en el mismo plano.

http://en.wikipedia.org/wiki/Three-dimensional_space

Análisis Post hoc (Post hoc analysis): consiste en analizar los datos observados del experimento—una vez éste ha concluido—para identificar patrones que no se especificaron a priori.

Agrupamiento (Grouping): en la presente tesis es la tarea llevada a cabo durante la vectorización—que consiste en juntar segmentos pequeños en líneas de mayor nivel semántico. Incluye juntar trazos sobretrazados en líneas simples, juntar los trazos de las líneas discontinuas en una única línea, etc.

Árbol de modelo (Model Tree): en CSG los modelos se representan mediante un árbol binario cuyos nodos o vértices representan diferentes sólidos y cuyos enlaces o ramas representan las parejas de sólidos (“padres”) que se combinan recursivamente mediante operaciones booleanas para obtener un sólido más complejo (“hijo”).

Arista (Edge): segmento de recta que limita una cara. En cuerpos poliédricos, son las rectas en las que confluyen dos caras adyacentes.

Arte gráfico (Line art): es una imagen dibujada con líneas simples sobre un fondo liso. Un dibujo lineal es un arte gráfico que sigue las reglas de la proyección y representan sólo los bordes y contornos de las formas dibujadas.

Bocetado asistido por ordenador (CAS, Computer-Aided Sketching): Son las herramientas informáticas que asisten a los diseñadores en las primeras etapas del proceso de diseño conceptual para capturar los diseños preliminares.

B-Rep: Véase Modelado de frontera.

CAD paramétrico (Parametric CAD): ver CAD y diseño paramétrico 3D.

CAD: acrónimo en inglés de “Computer-Aided Design”, o “Diseño Asistido por Computador”. Por simplificación, en la tesis se usa como sinónimo de MCAD.

Cara (Face): área delimitada de una superficie plana. En cuerpos poliédricos, son cada uno de los polígonos que lo delimitan.

CAS: acrónimo en inglés de “Computer-Aided Sketching”, o “bocetado asistido por ordenador”.

Clave de profundidad pictórica (Pictorial depth cue): es cualquier clave o indicio perceptual que el cerebro humano puede interpretar como fuente de información sobre la profundidad, y que es posible plasmar en una imagen (como puede ser una ilustración o la imagen que se forma en la retina) [Gol99].

CSG: acrónimo en inglés de “Constructive Solid Geometry”, o “Geometría Constructiva de Sólidos”. Es una técnica constructiva utilizada en modelado sólido, que consiste en combinar sólidos primitivos mediante operaciones booleanas (unión, intersección y resta ordenada), para obtener sólidos más complejos. Los sólidos resultantes se pueden combinar recursivamente hasta obtener el sólido deseado.

Corte (Cutting view): vista proyectada que muestra la sección transversal de un objeto generada por un plano de corte. Estas vistas se emplean para mostrar el interior de piezas u objetos con mayor claridad que se mostrarían en vistas con líneas ocultas.

Cuasi normalón (Quasi-normalon): un modelo poliédrico se considera cuasi normalón si cumple la condición de que la eliminación de todas las aristas no paralelas a tres direcciones principales no supone la pérdida de vértices. Es decir, que todos los vértices originales siguen conectados al menos a una de las aristas restantes.

Diseñador de producto (Product designer): es el profesional que crea diseños tridimensionales de objetos o realiza mejoras sobre los ya existentes. Debido a la formación técnica recibida, a la hora de realizar el esbozo tiene en consideración no solo el aspecto que debe tener el producto, sino también su funcionalidad, los materiales, los costes, los requisitos técnicos y los métodos de producción. Una vez aprobado el diseño preliminar, los diseñadores utilizan diseño asistido por ordenador (CAD) para realizar su trabajo.

Diseñador gráfico (Graphic designer): es el profesional que crea diseños con un fin comunicativo o para crear un efecto visual. El diseñador gráfico es un especialista en comunicaciones visuales y su trabajo se relaciona con todos los pasos del proceso comunicacional. El diseño gráfico es interdisciplinario, el diseñador necesita tener entre otros, conocimientos de fotografía, geometría descriptiva, psicología de la percepción, comunicación, etc. En la presente tesis empleamos el término para designar al profesional que ha recibido formación en técnicas empleadas en la representación 2D de objetos 3D como parte de una educación no técnica (a menudo artística).

Diseño paramétrico (Parametric design): es la generación de geometría a partir de la definición de una familia de parámetros iniciales y la programación de las relaciones formales que guardan entre ellos. Consiste en la utilización de variables y algoritmos para generar un árbol de relaciones matemáticas y geométricas que permitan no sólo llegar a un diseño, sino generar todo el rango de posibles soluciones que la variabilidad de los parámetros iniciales nos permitan. <http://www.parametriccamp.com/%C2%BFque-es-el-diseno-parametrico/>

Diseño asistido por ordenador (Computer Aided Design) (CAD): conjunto de métodos y aplicaciones informáticas que sirven para asistir a ingenieros, arquitectos y diseñadores en la creación, análisis, modificación y documentación de un diseño o producto.

Dibujo lineal o delineado (Line-Drawing): es cualquier imagen que representa objetos bidimensionales o tridimensionales, siguiendo las reglas de la proyección y representando sólo los bordes y contornos de las formas dibujadas. Los dibujos lineales representan la forma de un objeto combinando diferentes criterios: sistema multivista o de vista única, en proyección paralela o cónica, con o sin líneas ocultas, etc.

Dibujo natural (Natural drawing): aquél que muestra un objeto como si fuera opaco, es decir sin dibujar las líneas ocultas. También se denomina dibujo frontal.

Dibujo técnico (Technical drawing): es un dibujo lineal que incluye además convenciones (como los cortes), anotaciones y/o símbolos normalizados para transmitir información sobre dimensiones, criterios de diseño e indicaciones de fabricación.

DIY: acrónimo inglés para “do it yourself” o “hágalo usted mismo”.

Elemento característico (Feature): es cualquier parte de un modelo 3D o pieza de ingeniería que posea una funcionalidad conocida y reconocible para los diseñadores. En la presente tesis se utiliza el término atendiendo a esta definición, aunque hay que destacar que hoy en día la mayoría de las aplicaciones CAD denominan elementos característicos a todas y cada una de las operaciones de modelado, con independencia de que produzcan auténticos elementos característicos (de forma, de diseño o de fabricación) o no.

Elemento característico 2D (2D Feature): patrón gráfico que aparece al representar un elemento característico (3D) en un dibujo lineal o en un boceto.

Elemento característico de diseño (Design feature): región o parte de un objeto que tienen un propósito particular relacionado con el diseño y la función del objeto.

Elemento característico de fabricación o mecanizado (Manufacturing feature): es aquella configuración producida en un proceso de mecanizado específico.

Elemento característico de forma (Form feature): es la descripción geométrica de una región o parte de un objeto sin relación con su función o el método de fabricación.

Elemento geométrico (Geometrical element): concepto primario que no podemos definir, porque no lo podemos referir a otros más sencillos. Empezamos por reconocer la existencia de infinitos entes llamados *puntos*, cuyo conjunto llamamos espacio. En general, los puntos del espacio se pueden agrupar en diferentes conjuntos, formando figuras. En particular, hay dos grupos de puntos que dan lugar a conceptos primarios que tampoco se definen: las *rectas* y los *planos* [CV08].

Envolvente convexa (Convex hull): En matemáticas, se denomina envolvente convexa de un conjunto X de puntos del plano euclidiano o espacio euclidiano al conjunto convexo más pequeño que contiene a X . Así, si X es un subconjunto acotado del plano, la envolvente convexa puede visualizarse como la forma obtenida al estirar una goma elástica alrededor de X . En geometría computacional existen numerosos algoritmos para calcular la envolvente convexa de un conjunto finito de puntos, con diversos grados de complejidad computacional. En la presente tesis se empleará una variante de la envolvente convexa para líneas poligonales

abiertas (que no definen un perímetro cerrado) a fin de obtener trazos suavizados (sin ondulaciones cóncavas).

Error sistemático (Systematic error): es aquel tipo de error en la medición de una magnitud que parece seguir un patrón. Generalmente se produce por un defecto en el instrumento de medida, por un gesto o movimiento particular del operador o del proceso de medición, etc. Se caracteriza por ser generalmente pequeño y constante (no depende del tamaño de la muestra).

Escena (Scene): es el conjunto formado por uno o más objetos, junto con el entorno en el que se encuentran. Se representa mediante los correspondientes modelos (que describen la forma) y sistemas de referencia (que describen las posiciones).

Esqueleto o andamio (Skeleton or scaffolding): es cualquier línea o grupo de líneas auxiliares del boceto que se emplean para facilitar el trazado del dibujo, pero que no representan aristas o contornos del objeto.

Etapas (Stage): en tecnología es parte de un proceso técnico. En una etapa hay una información de entrada, que procesada produce un resultado final. Una etapa puede constar de una o varias tareas. Una etapa compleja puede subdividirse en sub-etapas más sencillas.

Experimento (Experiment): es un procedimiento mediante el cual se trata de comprobar (confirmar o verificar) una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno. En esta tesis es un procedimiento en el cual se realizan pruebas sobre una muestra o conjunto de sujetos, con el fin de verificar una o varias hipótesis relacionadas con su forma de percibir imágenes, mediante el estudio de la variación de determinadas variables.

Figura geométrica voluminosa (Voluminous geometric shape): figura geométrica que ocupa un lugar en el espacio, que se denomina abierta cuando define una superficie, y cerrada cuando define un volumen.

Geometría constructiva de sólidos o CSG (Constructive Solid Geometry): representación de modelos sólidos basada en operaciones booleanas de unión, diferencia e intersección de sólidos elementales, que se puede generalizar volviendo a combinar objetos resultantes de operaciones booleanas previas. En tal caso, se utiliza un árbol del modelo para representar las relaciones jerárquicas entre los diferentes sólidos.

Geometría subyacente o embebida (Underlying or embedded geometry): es aquella forma geométrica que se pretende transmitir a través de un boceto pero que queda parcialmente enmascarada en el dibujo lineal de dicho objeto, debido a los errores, las imprecisiones y las simplificaciones inherentes al proceso de bocetado.

Geon (Geon): es un término que en la teoría psicológica de Biederman se emplea para designar a un volumen primitivo simple. Los geones son los elementos principales de la teoría de Biederman sobre la percepción de los objetos tridimensionales conocida como teoría del reconocimiento por componentes. Cada objeto puede generalmente descomponerse en un número pequeño de estos elementos que son reconocibles desde diferentes puntos de vista. <http://geon.usc.edu/~biederman/>

Gesto (Gesture): conjunto de trazos dibujados en una herramienta CAS, que la aplicación reconoce como un determinado comando.

Grafo (Graph): es un conjunto de objetos denominados vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos, que permiten representar relaciones entre los objetos del conjunto.

Imagen de mapa de bits (Bitmap): es un formato de imagen orientado a almacenar la información mediante mapas de píxeles que representan imágenes discretizadas, obtenidas por ejemplo, a partir de imágenes escaneadas. El término imagen ráster es sinónimo.

Imagen ráster (Raster image): ver Imagen de mapa de bits.

Imagen vectorial (Vector image): representa una imagen a través del uso de elementos geométricos de mayor nivel semántico que los puntos, tales como segmentos, polígonos y arcos.

Indicio o señal (Cue, clue): es cualquier propiedad que los seres humanos pueden captar de una imagen pictórica (imagen 2D) para construir mentalmente la escena 3D, ya que dichas señales transmiten información de profundidad. En la presente tesis los términos “indicio perceptual”, “indicio pictórico”, “indicio” y “señal” se emplearán como términos sinónimos.

Información de Entrada (Input): es la información, dato o conjunto de datos que se introduce en un proceso para obtener un resultado.

Información de Salida (Output): es el resultado obtenido al procesar la información de entrada.

Inteligencia artificial (AI, del inglés *artificial intelligence*): es un área multidisciplinaria centrada en el estudio y aprendizaje sobre cómo funciona la inteligencia humana. A diferencia de ciencias como la psicología y la filosofía, que también estudian la inteligencia, la IA trata de crear y diseñar entidades capaces de razonar por sí mismas utilizando como paradigma la inteligencia humana.

Intención de diseño (Design intent): término para describir la conducta esperada de un modelo de diseño al ser alterado. Sin embargo, no existe una definición oficial de la intención de diseño [OCCC14].

Interacción persona-ordenador (HCI, del inglés *Human-computer interaction*): Aunque no hay una definición formal, en términos generales se acepta que es la disciplina que estudia el intercambio de información mediante software entre personas y ordenadores. El enfoque científico de la HCI incluye una variedad de herramientas y técnicas que ayudan a desarrollar mejores interfaces de usuario, de manera que la interacción se haga más eficiente, es decir, que se minimicen los errores, que aumente la satisfacción...

Interfaz de usuario (User interface): es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, un equipo o un ordenador. Las interfaces básicas de usuario son todos aquellos canales por los cuales se permite la comunicación entre el ser humano y el ordenador: menús, ventanas, teclado, ratón, y algunos otros sonidos que el ordenador hace.

Interfaz de programación de aplicaciones (API, del inglés *application programming interface*): conjunto de funciones residentes en bibliotecas (generalmente dinámicas, también llamadas DLL por su acrónimo en inglés) que permite que una aplicación sea ejecutada bajo un determinado sistema operativo.

(<http://chsos20121909010.wordpress.com/category/bitacora/>)

Interfaz gráfica de usuario (GUI, del inglés *graphical user interface*): es un programa informático que proporciona un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina u ordenador.

Línea oculta (Hidden line): se emplea para mostrar cualquier superficie, borde o esquina de objeto que está oculta a la vista, y generalmente se representa con una línea punteada o de trazos.

Línea visible (Visible line): se emplea para trazar cualquier arista visible de un objeto. Se representan mediante una línea continua.

Linealidad (Linearity): es un parámetro geométrico empleado en la medición de la rectitud de un trazo. Se define como la relación entre la distancia entre los puntos extremos del trazo (cuerda del trazo) y la suma de las distancias entre los puntos muestreados que representan dicho trazo.

MCAD: acrónimo en inglés para sistemas de modelado asistido por ordenador para aplicaciones mecánicas. Esta tesis se centra en los sistemas MCAD, pero por simplicidad se emplea muchas veces el término general CAD como sinónimo de éste.

Método (Method): es el conjunto de actividades, técnicas y acciones secuenciales diseñadas y desarrolladas para conseguir un objetivo. Los métodos aplicados en ésta tesis deben tener una estructura algorítmica y deben dar lugar a una salida a partir de una entrada.

Método de descenso (o ascenso) símplex (Nelder-Mead simplex method): es un método numérico que busca un mínimo (o máximo) local de una función cualquiera examinando en cada paso los vértices de un simplex. http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_s%C3%ADmplex

Metodología (Methodology): es la teoría acerca del método o del conjunto de métodos. Esta es normativa (valora), pero también es descriptiva (expone) o comparativa (analiza). Es el estudio del método.

<https://sites.google.com/site/metodololgdelainvestig/modulo-0-2/deferencias-entre>

Modelado de frontera o B-Rep (Boundary Representation): es un método de representación de modelos basado en la representación de los límites de sus formas, que pueden ser elementos geométricos como superficies, líneas y puntos; los cuales se representan mediante parches o caras, curvas o aristas y vértices. Coloquialmente, se dice que representa la "cáscara" del objeto sólido.

Modelado de sólidos (Solid modelling): es el conjunto de teorías, técnicas y sistemas orientados a la creación y manipulación de modelos no ambiguos de objetos sólidos.

Modelado basado en bocetos (SBM, Sketch-Based Modelling): es el conjunto de métodos encaminados a la obtención automática de modelos 3D a partir de bocetos 2D. <http://www.regeo.uji.es/sbm.htm>.

Modelado 3D evocativo (Evocative-based 3D modelling): estrategia de algunas herramientas CAS en la que se reconoce un modelo a partir de ciertos conocimientos previos, obtenidos por ejemplo mediante gestos o un reconocimiento de patrones o plantillas.

Modelado 3D basado en reconstrucción (Reconstruction-based 3D modelling): estrategia seguida por algunas herramientas CAS en la que el proceso de modelado de sólidos es automático y se obtiene a partir de reglas visuales aplicadas a la extracción de información de bocetos.

Modelo de alambre (wire-frame model): es la representación de un modelo mediante una aproximación poliédrica pero sin incluir caras, considerando sólo aristas y vértices; de manera que se describe el “esqueleto” del objeto 3D que representa.

Motivación de diseño (Design Rationale): es un término empleado para describir el propósito de las decisiones tomadas durante el diseño; las razones de por qué se tomaron ciertas decisiones en la creación de artefactos [OCCC14].

Normalón (Normalon): es una forma poliédrica cuyas aristas están orientadas según tres y sólo tres direcciones mutuamente ortogonales.

Operación Booleana (Boolean operation): es cualquiera de las operaciones propias del álgebra de Boole (tales como la unión, la intersección y la resta ordenada), se aplican en CSG para combinar sólidos elementales y obtener así sólidos más complejos.

Organización perceptual (Perceptual organization): en visión por ordenador es la capacidad de un sistema para organizar imágenes y primitivas y elementos característicos detectados, basándose en criterios propios de la percepción humana; por ejemplo, en criterios gestálticos [Boy99].

Paradigma (Paradigm): tiene diferentes acepciones, según el campo en el que se enmarque el concepto. El concepto general se puede definir como el resultado de usos, costumbres, y creencias establecidas de verdades a medias que se convierten en ley, hasta que empiezan a acumular crisis que hacen insostenible el paradigma en turno. Su significado contemporáneo en la comunidad científica se refiere al conjunto de prácticas o teorías que definen una disciplina científica, luego de haber sido, y seguir siendo expuestas a numerosas pruebas y análisis a través del tiempo, manteniéndose por ello aún vigentes.

Parche (Patch): representación gráfica o algebraica que se emplea para describir regiones delimitadas de superficies no planas.

Pieza en bruto (Blank): es la pieza base, o tocho, sobre la que se realiza un conjunto de operaciones de mecanizado para la obtención de un producto final o semi-elaborado. En SBM es el modelo 3D de partida, sobre el que se puede trabajar añadiendo o substrayendo elementos característicos para obtener la pieza terminada.

Plano de cuadro o de proyección (Projection plane): es el plano en el que se intersectan los haces de proyección de un objeto en el método de proyección gráfica.

Poliedro (Polyhedron): cuerpo sólido limitado por superficies planas que a su vez están limitadas por lados rectos. Es decir, que los poliedros son porciones del espacio limitadas por cuatro o más polígonos planos conectados por sus aristas. [CV08]

Poliedro normalon (Normalon polyhedron): ver normalon.

Primitiva (Primitive): en las ciencias de la computación y sistemas CAD, el término de primitiva geométrica hace referencia a aquellos modelos o prototipos empleados por los ordenadores para replicar formas geométricas. En la presente tesis diferenciamos entre *primitivas 2D* que representan formas básicas como puntos, rectas, círculos, elipses y arcos, polígonos..., y *primitivas 3D* entre las que existen el cilindro, el prisma, la esfera...

Proceso (Process): es un método que se desarrolla mediante un conjunto de actividades. En la presente tesis, las actividades se engloban en etapas secuenciales.

Proyección central (Central projection): ver proyección perspectiva.

Proyección cónica (Conic projection): ver proyección perspectiva.

Proyección gráfica (Graphical projection): es una técnica de dibujo empleada para representar un objeto o escena tridimensional sobre un plano (plano de proyección), mediante haces de proyección que atraviesan cada punto del objeto y convergen en un punto fijo (centro de proyección). La intersección entre el haz y el plano de proyección genera los puntos que definen la imagen. Las principales propiedades que se conservan invariantes en toda proyección gráfica son las de pertenencia, intersección y tangencia. Existen proyecciones gráficas sobre superficies no planas, pero no se consideran en la presente tesis

Proyección oblicua (Oblique projection): es un tipo de proyección paralela que se caracteriza porque los rayos de los haces proyectivos (que son paralelos entre sí), no son ortogonales al plano de proyección.

Proyección ortogonal (Orthogonal projection): es un tipo de proyección paralela que se caracteriza porque los rayos de los haces proyectivos (que son paralelos entre sí), son ortogonales al plano de proyección.

Proyección paralela (Parallel projection): es un tipo de proyección gráfica en la que los rayos de los haces de proyección son paralelos entre sí, es decir, el centro de proyección es un punto impropio. Además de las propiedades invariantes generales, la proyección paralela incluye como invariantes el paralelismo y la proporcionalidad. Existen dos variantes: ortogonal y oblicua.

Proyección perspectiva (Perspective projection): es un tipo de proyección gráfica en la que los rayos de los haces de proyección son convergentes, es decir, el centro de proyección es un punto propio. También se denomina proyección central o cónica.

Punto de fuga (Vanishing point): en un sistema de proyección cónica, es el lugar geométrico en el plano de proyección al cual convergen las proyecciones de las rectas paralelas a una dirección dada en el espacio. Lo cual ocurre siempre que dicha dirección no sea paralela al plano de proyección.

RANSAC: acrónimo, en inglés, del método conocido como “*consenso de la muestra escogida al azar*”. Es un algoritmo basado en un método iterativo para calcular los parámetros de un modelo matemático a partir de un conjunto de datos observados que contiene valores atípicos. Un ejemplo sencillo de aplicación es ajustar una nube de puntos a una recta, cuando la nube contiene valores atípicos. Se trata de un algoritmo no determinista ya que produce un resultado razonable sólo con una cierta probabilidad, esta probabilidad aumenta cuantas más iteraciones se realizan.

Reconocimiento en línea (On-line recognition): en SBM es un método de reconocimiento basado en reconocer cada trazo inmediatamente después de ser dibujado por el usuario.

Reconocimiento fuera de línea (Off-line recognition): en SBM consiste en realizar la tarea de reconocimiento de los trazos en diferido, a demanda del usuario.

Reconocimiento del boceto (Sketch recognition): es una de las etapas del proceso SBM que consiste en convertir un boceto a mano alzada en un dibujo lineal. En general abarca diferentes tareas como la vectorización, el refinado 2D, etc.

Reconstrucción 3D (3D reconstruction): es el proceso de creación de modelos tridimensionales a partir de la información embebida en una imagen 2D. Intuitivamente puede verse como el proceso inverso a la obtención de imágenes 2D a partir de objetos 3D, aunque los métodos a aplicar en ambos casos son radicalmente diferentes.

http://en.wikipedia.org/wiki/3D_reconstruction_from_multiple_images

Rectángulo delimitador (Bounding box): es un término empleado en geometría que hace referencia al rectángulo con menor perímetro que contiene enteramente a los elementos de un conjunto. Se aplica habitualmente a elementos geométricos en el plano, aunque existen extensiones a 3D.

REFER: aplicación académica (no comercial) de reconstrucción tridimensional—basada en métodos de inflado mediante optimización—en la que se han probado los resultados de esta tesis. La aplicación además gestiona bases de datos de bocetos, dibujos y modelos 3D; permite la visualización de los resultados obtenidos, y facilita la interacción con el usuario. Ver www.regeo.uji.es.

Refinado 2D (2D refinement): también denominado embellecimiento 2D o limpieza del dibujo lineal. En la presente tesis se considera que es una sub-etapa del reconocimiento de bocetos que incluye tareas como ajustar líneas a secciones, completar segmentos perdidos y eliminar segmentos sobrantes.

REGEO: grupo de investigación de modelado basado en bocetos. Ver www.regeo.uji.es.

Regularidad (Regularity): en geometría, una regularidad es cualquier tipo de patrón, pauta o similitud. Las regularidades de las imágenes 2D se usan en SBM como indicios de la existencia de ciertas propiedades del modelo 3D que representan. Marill [Mar91] fue el primero en utilizarlas para reconstruir modelos 3D a partir de dibujos. Como explican Leclerc y Fishler [LF92] pueden ser buscadas mediante procedimientos algorítmicos sobre elementos invariantes de la imagen proyectada y el objeto representado. Aunque en muchos trabajos de SBM el concepto de regularidad e indicio se ha considerado sinónimo, en la presente tesis empleamos el concepto de regularidades en su sentido más estricto, considerándolo un subconjunto de los indicios que se utilizan en reconstrucción.

Relación de aspecto (Aspect ratio): es la relación entre las dimensiones principales de una forma geométrica. Por ejemplo, la relación de aspecto de un rectángulo sería la relación entre su lado más corto y su lado más largo (ancho/largo).

Relación señal/entrada (STIR, del inglés signal-to-input ratio): es una medida utilizada para comparar el nivel de una señal deseada con el nivel en los datos de entrada. En la presente tesis se empleará en los algoritmos de la Transformada de Hough como la relación entre el mayor valor acumulado en cualquier celda de la matriz $\rho-\theta$ y el número de puntos muestreados del trazo.

Segmentación (Segmentation): en vectorización, es el proceso de dividir un trazo complejo en otros simples e independientes.

Sistema basado en gestos (Gestural-based system): estrategia seguida por algunas herramientas CAS en las que el proceso de modelado de sólidos está guiado o dirigido por el usuario. En estas herramientas CAS los menús e iconos son reemplazados por gestos para la activación o ejecución de comandos. Es una estrategia alternativa a la estrategia WIMP dominante.

Sistema o perspectiva axonométrica (Axonometric projection): es un sistema de representación gráfica resultado de aplicar una proyección paralela sobre un plano de proyección oblicuo respecto de la *escena*. En el sistema completo, que consta de cuatro vistas, el objeto queda representado en el plano de cuadro por su proyección directa y sus proyecciones laterales, referidas éstas a las proyecciones previas—proyecciones ortogonales del objeto sobre un triedro de referencia. El término perspectiva axonométrica suele hacer referencia únicamente a la proyección directa. En función de que la proyección paralela empleada sea oblicua u ortogonal al plano de proyección, dispondremos de un sistema axonométrico oblicuo u ortogonal.

Sistema axonométrico oblicuo (Axonometric Oblique projection): es un tipo particular de perspectiva axonométrica, determinada cuando la proyección paralela es oblicua al plano de proyección y el objeto a representar está orientado de modo que dos de sus direcciones principales son paralelas al plano de proyección (como en la caballera).

Sistema axonométrico ortogonal (Axonometric projection): es un tipo particular de perspectiva axonométrica, determinada cuando la proyección paralela es ortogonal y el plano de proyección es oblicuo a las direcciones principales del objeto a representar.

Sistema cónico, perspectiva central o cónica (Linear Perspective): es un sistema de representación basado en la proyección perspectiva. Como expone Puig [Pui86] es un tipo de representación que persigue una descripción puramente estética del objeto representado, tratando de reproducir su efecto visual. Este sistema no conserva las razones simples de distancias, por lo tanto no es un sistema apropiado para realizar mediciones, sino para dar mayor realidad a la representación de objetos.

Sistema de reconstrucción de múltiples vistas (Multiview reconstruction system): es un método de reconstrucción de modelos sólidos en el que la entrada a los algoritmos de reconstrucción son dos o más imágenes (que generalmente representan algunas de las vistas ortográficas principales: alzado, planta y perfil).

Sistema de reconstrucción de vista única (Single view reconstruction system): es un método de reconstrucción de modelos sólidos en el que la entrada a los algoritmos de reconstrucción está compuesta por una sola imagen (que generalmente representan una proyección directa axonométrica).

Sistema de representación (Projection method): conjunto de vistas proyectadas interrelacionadas para dar información completa sobre el objeto representado. Existen diferentes sistemas que se diferencian por el tipo de información a la que dan prioridad. Los sistemas “métricos” (como el diédrico) dan prioridad a la facilidad de medir. Los sistemas “visuales” (como el cónico) dan prioridad a la emulación de la visión humana. El sistema axonométrico es un compromiso entre ambas opciones: da una cierta facilidad de medir, al tiempo que una de sus proyecciones (la directa) emula razonablemente bien la visión humana. Los fundamentos de los sistemas de representación son objeto de estudio en geometría descriptiva. Su aplicación da lugar a los dibujos técnicos.

Sistema diédrico, o de vistas ortográficas (Orthographic projection): es un sistema de representación gráfica basado en la proyección paralela y ortogonal que utiliza dos planos de proyección mutuamente ortogonales y en el que el objeto queda orientado paralelo a los planos de proyección. Se puede extender añadiendo nuevas vistas principales y también vistas auxiliares. Se caracteriza por la posibilidad de realizar mediciones directamente sobre el dibujo, para obtener de forma sencilla y rápida, las dimensiones y posición de los objetos del dibujo.

Sistema multivista ortográfico (Multiview orthographic projection): es una extensión del sistema diédrico, que utiliza hasta seis planos de proyección mutuamente ortogonales y tantos planos auxiliares como se consideren necesarios. Se define como “principios generales de representación” en ISO 128-1:2003.

Sobretrazado (Overtracing): es el uso de múltiples trazos parcialmente superpuestos para representar una única línea, coloquialmente, esta técnica se denomina “barrer”. Algunos diseñadores la emplean para incorporar información adicional, corregir pequeños errores de trazado, o clarificar el boceto.

Sólido (Solid): cuerpo definido mediante una figura geométrica voluminosa cerrada (que ocupa un lugar en el espacio y define un volumen cerrado).

STEP (Standar for the Exchange of Product model data): es un formato estándar internacional para la representación e intercambio de información de productos industriales. La naturaleza de este formato lo convierte en adecuado no solo para un intercambio neutral de archivos, sino también para implementar y compartir bases de datos de productos y archivos. Definido por la norma ISO 10303: Automatización de sistemas industriales e integración—representación e intercambio de datos entre productos.

http://es.wikipedia.org/wiki/ISO_10303

Subgrafo (Subgraph): un subgrafo de un grafo G es un grafo cuyo conjunto de vértices es un subconjunto del conjunto de vértices de G , y cuyo conjunto de aristas es un subconjunto del conjunto de las aristas de G . En la presente tesis al hablar de subgrafos nos referimos a grafos inconexos, es decir que ninguna arista de G conecta vértices del subgrafo con vértices no pertenecientes al subgrafo.

Sujeto (Subject): persona a los que se entrevista durante un experimento con grupos de seres humanos. En la presente tesis se entrevista a los sujetos para saber cómo perciben.

Tarea (Task): es la operación o conjunto de operaciones que aplicadas sobre una entrada de datos produce un resultado o la transformación de éstos.

Trazo (Stroke): es una línea dibujada a mano alzada moviendo un puntero mediante un lápiz digital en una interfaz caligráfica, se almacena como una secuencia de puntos adquiridos como posiciones sucesivas del puntero. Puede contener información adicional, tal como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos puntos sucesivos, la presión ejercida con el lápiz en cada punto, la inclinación del lápiz, etc.

Valor atípico (Outlier): en estadística, un valor atípico es una observación muy diferente a las otras observaciones del mismo grupo de datos. Proviene de errores de procedimiento, acontecimientos extraordinarios o valores extremos. Los datos atípicos distorsionan los resultados de los análisis, y por esta razón hay que identificarlos y tratarlos de manera adecuada, generalmente excluyéndolos del análisis. Hay autores que defiende que no existen datos atípicos, y que en ningún caso está justificado excluir datos del análisis.

Vectorización (Vectorization): es un término con múltiples definiciones. En el reconocimiento gráfico, se refiere al proceso de convertir gráficos ráster en gráficos vectoriales. Sin embargo, en CAD y SBM, vectorización es normalmente sinónimo de ajustar líneas a trazos. En la presente tesis denominamos vectorización al proceso que abarca las tareas de segmentación, ajuste de líneas (o clasificación de trazos) y agrupación.

Vértice (Vertex): punto donde se encuentran dos o más semirrectas que conforman un ángulo. En cuerpos poliédricos, son los puntos de intersección entre las aristas.

Vista axonométrica (Axonometric view): es la proyección principal o directa obtenida sobre el plano de proyección en el sistema axonométrico (Ver sistema o perspectiva axonométrica). Es un tipo de representación o vista pictórica, puesto que muestra simultáneamente las tres direcciones principales del objeto representado, dando sensación de profundidad o volumen.

Vista ortográfica (Orthographic view): vista obtenida mediante proyección ortogonal que muestra únicamente una cara principal del objeto representado. En objetos poliédricos se obtiene cuando el objeto se orienta paralelo al plano de cuadro, de manera que la proyección obtenida aparece en verdadera magnitud.

Vista pictórica (Pictorial view): cualquier tipo de vista obtenida mediante proyección que transmita sensación de volumen del objeto representado, por ejemplo, mostrando simultáneamente tres caras principales del objeto representado. Depende de la orientación relativa entre el objeto y el plano de proyección. Puede darse tanto en proyección paralela como en proyección perspectiva.

Vista proyectada o proyección (Projected view): representación en 2D de un objeto 3D obtenida aplicando el método proyección-sección. Es decir, trazar un haz de rectas proyectantes que pasen por todos los puntos del objeto y por un punto fijo llamado vértice, y cortar dicho haz por un plano proyectante.

WIMP: acrónimo en inglés para “Windows-Icon-Menu-Pointer”, que describe el tipo de interacción entre usuario-ordenador basado en ventanas, iconos, menús y punteros actualmente dominante en las aplicaciones interactivas.

Windows API: es la denominación en inglés de la interfaz de programación de aplicaciones de Windows (Windows application programming interface).

WYPIWYG: acrónimo en inglés de “What you perceive is what you get”, en español “lo que percibes es lo que obtienes”.

Resumen

En la presente tesis se han diseñado, implementado y probado nuevos métodos para obtener automáticamente un dibujo lineal e información de elementos característicos 2D organizada en forma de árbol de elementos característicos, a partir de un boceto de ingeniería.

Muchos diseñadores emplean los bocetos de ingeniería en las etapas iniciales y más creativas del proceso de diseño. En ellos, los diseñadores plasman ideas, comparan posibles alternativas y/o comunican a otros la intención del diseño de manera fluida.

Pero los bocetos hechos con lápiz y papel han quedado desacoplados del proceso de diseño asistido por ordenador. Para integrarlos en el flujo digital primero hay que digitalizar la información que contienen y luego hay que interpretarla.

Hay diferentes estrategias para obtener bocetos digitales. En esta tesis éstos se obtienen mediante trazos formados por una secuencia de puntos adquiridos como posiciones sucesivas de un puntero movido a mano alzada mediante un lápiz digital en una interfaz caligráfica.

Los métodos propuestos en esta tesis para interpretar bocetos se enmarcan en el modelado basado en bocetos (SBM, por su acrónimo en inglés). Obtener modelos 3D a partir de bocetos requiere completar diversas etapas: La *etapa de reconocimiento del boceto*, dirigida a obtener dibujos lineales a partir de bocetos; la *etapa de reconocimiento de indicios* en la que se extrae información del dibujo lineal 2D (tal como vértices, líneas paralelas, caras, etc.), y la *etapa de reconstrucción*, dirigida a producir las formas 3D representadas en el boceto a partir de la información extraída en la etapa anterior.

Al convertir bocetos en dibujos se distingue entre dibujos lineales y dibujos técnicos. Un dibujo lineal representa sólo los bordes y contornos de las formas dibujadas, mediante líneas simples sobre un fondo liso, siguiendo las reglas de la proyección. Los dibujos lineales representan la forma de un objeto combinando diferentes criterios: sistema multivista o de vista única, en proyección paralela o cónica, con o sin líneas ocultas, con o sin cortes, etc. Los dibujos técnicos incluyen además anotaciones y/o símbolos normalizados para transmitir información sobre dimensiones, criterios de diseño e indicaciones de fabricación.

En la presente tesis se trabaja con dibujos lineales, sin anotaciones, que representan objetos poliédricos, mediante vista única y representación alámbrica (dibujos que incluyen tanto las aristas vistas como las ocultas, pero sin distinguir las líneas ocultas mediante líneas de trazos).

En todo este proceso de modelado basado en bocetos hay diferentes problemas abiertos, alguno de los cuales se han abordado en esta tesis.

Primero, en la sub-etapa del reconocimiento de bocetos que denominamos vectorización, que consiste en reconocer líneas (primitivas geométricas 2D) a partir de los trazos del boceto. La información de salida de esta sub-etapa es un dibujo lineal representado internamente como un grafo, donde los nodos representan los vértices del boceto y las líneas que unen dichos nodos, representan las aristas del boceto. La contribución de esta tesis en la sub-etapa de

vectorización ha consistido en desarrollar e implementar un método para ajustar líneas rectas y arcos de elipse mediante criterios perceptuales.

El segundo problema abordado está en la etapa de reconocimiento de indicios. Se ha comprobado que los métodos existentes para determinar los grupos de líneas del dibujo que representan grupos de aristas paralelas en el modelo 3D no resuelven parte de los casos más comunes. Se ha desarrollado e implementado un método, también mediante criterios perceptuales, para agrupar líneas que representan aristas paralelas que es tolerante a errores de bocetado y que detecta el paralelismo de las aristas incluso cuando las líneas que los representan convergen a puntos de fuga.

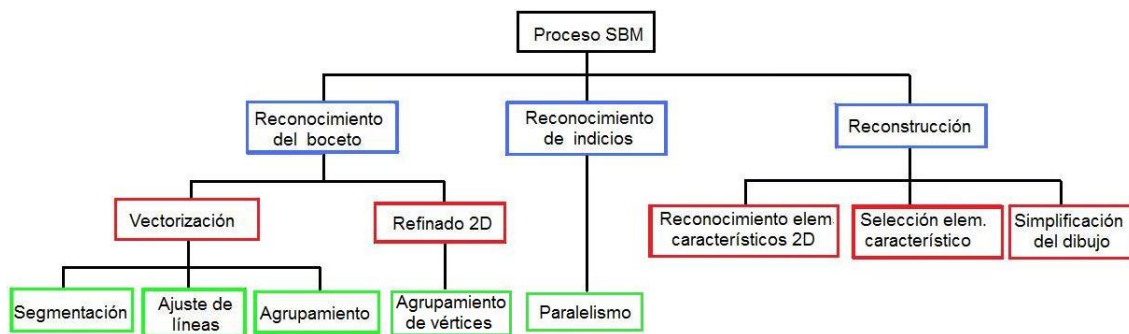


Figura 1. Diagrama jerárquico que representa las diversas etapas (recuadro azul), sub-etapas (recuadro rojo) y tareas (recuadro verde) del proceso SBM propuesto

Tercero, en el proceso de reconstrucción—asumiendo las limitaciones conocidas del método dominante de inflado (que es poco tolerante a las imperfecciones de los bocetos, y que sólo permite obtener modelos B-Rep)—se ha propuesto un método de reconstrucción alternativo basado en obtener el árbol CSG (Geometría constructiva de sólidos, en sus siglas en inglés), para ello una de las sub-etapas críticas es el reconocimiento de elementos característicos 2D. En la tesis se han desarrollado algoritmos de reconocimiento para diferentes elementos característicos, y se ha propuesto un método para ordenar los elementos característicos reconocidos en un árbol del modelo.

Por último, pero no menos importante, hay que destacar que todos los métodos propuestos están basados en criterios perceptuales. Hasta ahora, los métodos empleados en SBM están basados generalmente en consideraciones puramente geométricas, aunque algunas de ellas emplean criterios perceptuales de manera aislada y como estrategia secundaria para desambiguar información geométrica contradictoria. Esta tesis plantea que, puesto que los humanos son capaces de interpretar bocetos a pesar de sus imperfecciones geométricas, la mejor estrategia a seguir es tratar de replicar la percepción humana desde el principio y de forma sistemática. Esta estrategia no es evidente, ya que los mecanismos de la percepción humana no se conocen en su totalidad. Por ello, un objetivo general de la presente tesis es explorar y desarrollar métodos basados en criterios perceptuales.

Cuando los diseñadores observan un boceto de ingeniería, son capaces de crear una imagen mental de un modelo 3D del objeto representado. Para ello, parece que aplican la estrategia de detección de indicios indirectos en el dibujo, es decir, buscan aquellas propiedades de los bocetos que revelan propiedades de los objetos tridimensionales que representan. De esta manera los seres humanos son capaces de filtrar las imprecisiones del dibujo y extraer la

geometría subyacente. Sin embargo, aplicar esta estrategia no es trivial ya que la información perceptual obtenida a partir de indicios suele ser incompleta, redundante y/o contradictoria.

La única estrategia científica que ha demostrado ser útil para determinar cómo perciben los humanos consiste en llevar a cabo experimentos con grupos de sujetos a los que se entrevista para saber cómo perciben. A partir de esta información podemos desarrollar métodos algorítmicos nuevos, o adaptar métodos existentes, para que repliquen la percepción humana.

En consecuencia, se ha seguido el método de plantear hipótesis y validarlas o rechazarlas, tanto para delimitar los indicios que se deben buscar, como para descubrir cuál es la mejor forma de combinarlos evitando sus redundancias y contradicciones. Primero seleccionando un conjunto de bocetos. Segundo, preguntando a un grupo de sujetos cómo interpretan ellos los bocetos en relación a la hipótesis planteada. Por último, analizando las respuestas para validar, rechazar o modificar la hipótesis, dependiendo principalmente del grado de acuerdo en las respuestas.

El método no es simple, porque se sabe que la percepción humana está influenciada por diferentes tipos de estímulos, tales como la habilidad del autor del boceto y la experiencia previa del observador. Además hay muchos indicios, y los estímulos que producen se superponen y complementan.

Algunos indicios aportan información geométrica muy elemental (indicios de bajo nivel). Sobre ellos hay mucho trabajo previo, aunque aún quedan muchos problemas abiertos. Otros indicios aportan información más compleja y sofisticada (indicios de alto nivel), y han sido poco estudiados hasta la fecha. La tesis plantea un nuevo método para detectar elementos característicos 2D a partir de dibujos lineales o vectorizados. Los elementos característicos son partes de un modelo 3D o pieza de ingeniería que poseen una funcionalidad conocida y reconocible para los diseñadores. Al representar dicho modelo en un dibujo 2D, los elementos característicos se muestran mediante configuraciones de líneas que siguen ciertos patrones. En la tesis se describen métodos para detectar dichos patrones, a los que se ha denominado como elementos característicos 2D. La principal novedad de esta propuesta es que la información de entrada habitual para detectar elementos característicos es un modelo 3D, mientras que en la tesis se propone una detección temprana, antes de disponer de información tridimensional. La información de salida de esta etapa permite finalmente obtener un árbol de elementos característicos que describe un modelo CSG, éste define una clasificación jerárquica de los elementos característicos que componen el modelo.

La capacidad para reconocer los elementos característicos en 2D es un gran avance para el proceso de modelado a partir de bocetos, porque permite obtener modelos 3D de mayor nivel semántico sin necesidad de aplicar métodos de reconstrucción basados en inflado (ya que los elementos característicos pueden ser detectados directamente en dos dimensiones).

La mayoría de los modelos obtenidos mediante técnicas SBM son del tipo B-Rep debido a que sólo disponen de información geométrica. Nuestro método permite disponer de información perceptual, lo que nos permite organizar la información de manera distinta y trabajar con modelos CSG. Nos hemos interesado en la representación CSG por varios motivos: (a) porque entendemos que este tipo de representación refleja más fielmente la percepción humana que

es capaz de descomponer una pieza en sub-partes con significado propio, (b) porque es una estrategia en línea con los nuevos avances que se están produciendo en el campo de la fabricación aditiva como son las impresoras 3D, o los sistemas de fabricación de personalización en masa, ya que simplifica el proceso CAD/CAM y permite que usuarios no expertos puedan producir sus propios diseños.

Para probar todos los métodos propuestos se han desarrollado algoritmos apropiados dentro del marco de una aplicación informática académica orientada al SBM, ya existente previamente.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

Los diseñadores carecen de aplicaciones adecuadas que les ayuden en las primeras etapas del proceso de diseño. Esto ocurre principalmente por dos razones:

- Los diseñadores e ingenieros prefieren la libertad del lápiz y papel como instrumentos de diseño para plasmar los primeros diseños y/o transmitir ideas, dadas las nulas restricciones que estos instrumentos inducen en los usuarios.
- Las herramientas de bocetado asistido por ordenador (CAS por sus siglas en inglés, Computer-Aided Sketching) no están suficientemente maduras para integrar directamente la información extraída de un dibujo bocetado en el proceso CAD/CAM del producto.

Hoy en día las herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD por sus siglas en inglés, Computer-Aided Design) que existen en el mercado están más orientadas a la adquisición de documentación automática para el proceso de diseño que al proceso de diseño en sí. Hemos de especificar que si bien el acrónimo CAD se refiere de manera genérica a los diferentes sistemas de modelado, en esta tesis nos centramos en los sistemas de modelado para aplicaciones mecánicas, generalmente conocido como MCAD, pero por simplicidad en adelante emplearemos el término general CAD como sinónimo de éste.

Las herramientas CAD requieren que el usuario introduzca la información del diseño con un detalle propio de etapas avanzadas del proceso de diseño. Para representar un modelo y su intención de diseño, el usuario debe, por ejemplo, conocer las formas, restricciones y dimensiones exactas del objeto a representar. Además estas aplicaciones están generalmente basadas en el paradigma WIMP—sinónimo del tipo de interacción entre usuario-ordenador basado en ventanas, iconos, menús y punteros—que claramente se contrapone a las necesidades del diseñador en la etapa de concepción del diseño, ya que el flujo natural de ideas y la creatividad se ven obstaculizados por la atención que el diseñador debe prestar a los comandos que tiene que ejecutar para obtener el resultado deseado. Por esta razón, estas aplicaciones no son aconsejables, y efectivamente no han tenido un papel relevante en esta etapa.

Las herramientas CAS tratan de salvar esta distancia entre las herramientas CAD por una parte, y el lápiz y papel por otra, alentando a los usuarios a introducirse en este nuevo paradigma tecnológico. Para ello uno de los obstáculos de las herramientas CAS es que aún deben lograr que la interacción con el usuario sea lo más parecida a la versatilidad y multi-modalidad de operaciones que proporcionan el lápiz y papel. Cuando un diseñador emplea el lápiz y papel, es capaz de cambiar de operación automáticamente sin que esto implique un cambio de

herramienta, tiempo, ni interrupción del proceso creativo. Así los diseñadores pueden dibujar líneas auxiliares, ejes de revolución o simetría, aristas vistas, sombreados, hacer retoques y modificaciones en detalles, o incluir anotaciones de manera indistinta, siguiendo el orden de su proceso mental de diseño. Por lo tanto a pesar de su simplicidad, el lápiz y el papel resultan ser herramientas muy sofisticadas y difíciles de imitar o reemplazar. Las herramientas CAS han desarrollado dos estrategias diferentes para intentar replicar esta multi-modalidad del lápiz y el papel: los sistemas basados en gestos y los sistemas basados en reconstrucción.

Los sistemas basados en gestos (*gestural-based systems*), están concebidos para que el usuario dirija o guíe el proceso de diseño mediante gestos (conjuntos de trazos que la aplicación reconoce como comandos), sin necesidad de menús o iconos. Algunas de las aplicaciones basadas en esta estrategia son: GIDes desarrollado por Pereira y otros [PJBF00] o ParSketch de Naya y otros [NCAC07]. Esta estrategia minimiza los problemas de ambigüedad en la interpretación del dibujo ya que la implicación del usuario permite correcciones inmediatas durante el proceso de diseño, pero por el contrario, requiere que el usuario tenga conocimientos previos sobre el conjunto de gestos definidos, algo que se puede complicar conforme aumente la cantidad de éstos.

En los sistemas basados en reconstrucción (*reconstruction-based systems*) en cambio, el proceso de diseño se basa únicamente en la aplicación de normas o reglas sobre la información extraída del dibujo bocetado. Si bien dicha información puede ser incompleta o inconsistente, esta estrategia se considera más cercana al diseñador ya que el usuario no necesita ningún conocimiento previo de la herramienta, y no es una estrategia intrusiva para el proceso creativo, ya que el usuario sólo debe centrarse en el dibujo. Los métodos presentados en la tesis se enmarcan en este tipo de sistemas.

Las herramientas CAS presentan una ventaja innata sobre el lápiz y papel, por su naturaleza informática poseen una serie de características muy ventajosas que agilizan el trabajo del diseñador: facilitan el almacenamiento del trabajo realizado, la edición y reedición del mismo, así como compartir información con otros usuarios o con otras aplicaciones. En torno a ellas se han desarrollado diferentes métodos cuyo objetivo es la obtención automática de modelos 3D a partir de bocetos, pasando a través de dibujos 2D.

Para desarrollar herramientas CAS se utilizan métodos y aplicaciones de modelado basado en bocetos (SBM). El origen de las aplicaciones SBM es el reconocimiento e interpretación de dibujos 2D. Esta idea surgió para recuperar los archivos históricos de las empresas en los años 70 y 80 del pasado siglo, cuando muchos de los diseños y planos se mantenían en papel, y la tarea de digitalización de archivos era ardua para los diseñadores. Hoy en día el mundo industrial se encuentra informatizado y la digitalización de diseños antiguos ha dejado de ser una tarea crítica. En los años 90, el reconocimiento de dibujos dio lugar a un objetivo más ambicioso: lograr obtener una herramienta de diseño válida para todo el proceso de diseño [CPCCN05].

Una herramienta de diseño de estas características permitiría optimizar recursos y tiempo en el proceso de diseño, lo que se traduciría en beneficios para el proceso CAD/CAM industrial. Pero no sólo eso, el desarrollo en los últimos tiempos de nuevas tecnologías de la comunicación junto con nuevas fuentes de energía, están dando lugar a la llamada tercera

revolución industrial (concepto avalado por el Parlamento Europeo en marzo del 2007 [Con07]), en la que se está abriendo camino un nuevo modelo productivo. Este nuevo modelo productivo está basado en la filosofía del DIY (del inglés “do it yourself” o “hágalo usted mismo”) en el que el consumidor es a su vez productor del bien de consumo. Un ejemplo de esta filosofía es la impresión 3D, grupo de tecnologías de fabricación por adición que hoy en día está en auge en varios campos científicos y técnicos como el médico, el espacial, de ingeniería, etc., y cuya aplicación tiende a extenderse al uso doméstico. Este entorno le da un nuevo sentido al SBM ya que además de ser práctico para los diseñadores, puede convertirse en una herramienta muy útil para cualquier usuario no experto ni en herramientas ni en técnicas de modelado.

Otra interesante aplicación de estas herramientas de diseño es el ámbito educativo de los estudios científicos y técnicos. Tal y como McGrath y Brown describen en su Libro Blanco [MB05], el aprendizaje visual es necesario para el desarrollo de habilidades propias en los campos de las ciencias y las ingenierías, ya que por ejemplo, enseñan a los alumnos a plantear nuevos modos de resolución de problemas, facilitan el aprendizaje colaborativo y desarrollan su creatividad. Los autores concluyen que es necesaria la inclusión en el currículum de las enseñanzas de ingeniería del pensamiento visual, y que éste se puede adquirir a través de las técnicas de bocetado y dibujo. En el caso concreto del aprendizaje del proceso de diseño, estas herramientas podrían permitir al alumnado adquirir destrezas y competencias para generar modelos sólidos de calidad. Se podrían elaborar estrategias docentes que permitan a los alumnos determinar la mejor secuencia en el modelado de un sólido, crear árboles de modelo consistentes...

En la presente tesis, sin embargo, centramos nuestra investigación en el interés que el proceso SBM puede tener para ingenieros y diseñadores.

La situación actual es que los métodos empleados en las herramientas de SBM fallan a la hora de producir modelos geométricos 3D que coincidan con la intención de diseño que diseñadores e ingenieros tienen en mente al bocetar. La tasa de éxito actual no es suficientemente buena para persuadirlos a abandonar el lápiz y el papel. Por ello, la presente tesis se centra en esta temática y propone una serie de nuevos métodos orientados a asistir a los diseñadores e ingenieros a interactuar de una manera amigable con los ordenadores durante las primeras etapas de diseño a partir de herramientas CAS.

El término WYPIWYG que son las siglas en inglés de “What you perceive is what you get”, (en español “lo que percibes es lo que obtienes”) fue introducido por Saund y Moran ya en 1994 [SM94]. Sin embargo, muchos de los métodos actuales siguen estando basados casi exclusivamente en consideraciones geométricas. Estos criterios geométricos tienen sentido cuando la entrada de información es una imagen obtenida de una escena real, pero son claramente incorrectos para el procesamiento de bocetos hechos a mano alzada. De hecho, muchos de los métodos actuales afirman emular la percepción humana, pero por lo general, no suele ser cierto. Además, aun cuando fuera cierto, sería difícilmente comprobable, porque previamente no se ha analizado cómo se comportan los humanos mientras perciben. Es decir, no se sabe si los algoritmos replican la percepción humana, porque se desconoce el modo en que actúa dicha percepción.

Tal y como Jansen y otros [JNR83] ya afirmaban en el siglo pasado, para que los diseñadores dispongan de herramientas de diseño con las que interactuar más amigablemente, es fundamental conocer primero la manera en que piensan los diseñadores, y hacer que las herramientas se ajusten a su modo de trabajo. Pero aún a día de hoy, no existe ninguna teoría psicológica del diseño, y el proceso mental que desarrolla un diseñador durante la fase de diseño es poco conocido. Este problema es crítico, porque, a nuestro entender, el principal escollo en la aceptación de las herramientas CAS es que la interacción no debe conllevar un resultado inesperado para el usuario. Los usuarios sólo confiarán en herramientas informáticas, si consideran que éstas hacen interpretaciones similares a las que ellos harían. Por lo tanto los métodos propuestos en esta tesis se han enfocado para descubrir y replicar los mecanismos de percepción visual.

1.2 Propósito y objetivos de esta Tesis

El objetivo general de la tesis es diseñar, implementar y probar nuevos métodos para obtener automáticamente un dibujo lineal e información de elementos característicos 2D organizada en forma de árbol de elementos característicos, a partir de un boceto de ingeniería. Con esta propuesta se pretende mejorar la capacidad actual de las herramientas de bocetado (CAS) para percibir indicios de diseño en los bocetos de diseño de productos industriales, aplicando la estrategia de emular la capacidad de los seres humanos para interpretar dichos bocetos.

Identificar la intención de diseño a partir de un boceto puede parecer un problema trivial, ya que el sistema visual humano nos permite hacerlo de manera rápida y con apenas esfuerzo. En realidad, obtener la interpretación automática de unos trazos creados a mano alzada es considerablemente complejo.

Para alcanzar el objetivo general, se proponen cuatro objetivos concretos:

1. Establecer un nuevo método para el reconocimiento de ciertas primitivas 2D en la etapa de vectorización, empleando criterios perceptuales.
2. Reconocer elementos característicos 2D en dibujos lineales, empleando criterios perceptuales y preservando las intenciones de diseño percibidas mediante indicios indirectos.
3. Determinar un nuevo método para organizar y construir un árbol de elementos característicos que describan un modelo CSG.
4. Diseñar, implementar y probar algoritmos para validar los métodos propuestos.

1.3 Ámbito y Definiciones

Se denomina arte gráfico (Line art) a aquellas imágenes dibujadas con líneas simples sobre un fondo liso. Los dibujos lineales son un tipo de arte gráfico que sigue las reglas de la proyección. En los dibujos lineales se representan sólo los bordes y contornos de las formas dibujadas. Por lo tanto, en esta tesis distinguiremos entre dibujos lineales, que sólo contienen vistas (que son proyecciones del objeto sobre diferentes planos de proyección), y dibujos técnicos, que son aquéllos que también incluyen anotaciones. El modelado basado en bocetos (SBM) es ya un problema difícil de resolver en los casos más simples. Por lo tanto, en la presente tesis no

consideraremos el reconocimiento de bocetos generales, es decir aquellos bocetos que contienen el dibujo y anotaciones o símbolos normalizados. Las personas interesadas en las etapas de reconocimiento y el embellecimiento de símbolos bocetados pueden consultar [HN05], [LKS07] y [PSD10]. Además, ya que nuestro objetivo es la obtención de modelos de piezas de ingeniería, en particular en esta tesis vamos a considerar el reconocimiento de formas geométricas en 2D a partir de bocetos de ingeniería, ya que según el estudio realizado por Pei y otros [PCES11] son los bocetos más empleados en las representaciones realizadas por los diseñadores industriales y diseñadores de ingeniería.

Las imágenes de entrada a una aplicación CAS se podrían obtener a través de las herramientas CAD, pero este tipo de herramientas obliga a los usuarios a trabajar con geometrías completamente definidas. Por lo tanto, no son apropiadas durante el proceso de diseño conceptual, ya que este proceso se caracteriza por la definición de geometrías incompletas y aproximadas [CCVAN09].

Existen dos vías habituales para introducir los bocetos en un sistema CAS, bien a partir del escaneado de bocetos dibujados en papel o mediante la extracción de trazos a partir de interfaces caligráficas de lápices digitales. En esta tesis utilizamos la segunda vía.

La primera vía tiene una dificultad añadida. Las imágenes ráster, de mapa de bits, o nubes de puntos son formatos de imagen orientados a almacenar la información mediante mapas de píxeles que representan imágenes discretizadas, obtenidas por ejemplo, a partir de imágenes escaneadas. Las imágenes ráster pueden contener un alto nivel de detalle, pero no codifican un tipo de información que facilite su posterior edición. Sin embargo, las imágenes vectoriales sintetizan el contenido de la imagen mediante primitivas matemáticas tales como líneas y arcos, esto facilita la edición del dibujo, aunque limita el grado de información de detalle. Las imágenes ráster o de mapa de bits, se emplean como entrada cuando se captura una instantánea de un boceto 2D a través de una cámara digital [Sau99], [FBC09]. Sin embargo, este tipo de entrada es poco frecuente en el proceso de diseño conceptual, ya que exige que el diseñador dibuje el boceto, lo escanee y después espere a que se reconozca el dibujo a partir de una nube de puntos.

Por lo tanto, en esta tesis sólo tenemos en cuenta el reconocimiento de trazos extraídos a partir de interfaces caligráficas, entendiendo por tales aquellas interfaces amigables para diseñar basadas en periféricos como un Tablet PC y un lápiz digital, que permite al diseñador bocetar sobre la misma pantalla. En los últimos tiempos también se han desarrollado nuevos métodos de utilización de pantallas de Smartphone para dibujar pequeños diagramas, como se comenta en [BS12], pero dibujar en pequeñas pantallas genera nuevos problemas específicos que no se considerarán aquí.

La *vectorización* es un término con múltiples y diferentes definiciones. En el proceso de reconocimiento de gráficos es la conversión de gráficos ráster en gráficos vectoriales. Es decir, la conversión de las nubes de puntos que representan bordes o fronteras de la imagen ráster en cadenas de pequeños segmentos. Sin embargo, en CAD y SBM, vectorización es generalmente sinónimo de ajustar líneas a los trazos del dibujo. En nuestro caso denominaremos vectorización al proceso que comprende la segmentación, el ajuste de líneas (o "clasificación de trazos") y el agrupamiento.

Los trazos son secuencias de puntos obtenidos en el movimiento del lápiz durante la interacción del usuario y el ordenador a través de dispositivos de entrada basados en lápices digitales. Los trazos se obtienen “en línea”, y durante su captura, pueden almacenarse datos complementarios a la secuencia de posiciones del lápiz, como por ejemplo el intervalo de tiempo entre puntos consecutivos y, a veces incluso, la presión y la inclinación del lápiz. En nuestro caso, partimos de la información mínima en la captura del trazo: sólo las coordenadas de los puntos capturados, más (opcionalmente) el tiempo transcurrido desde el punto anterior.

Hay dos métodos contrapuestos de reconocimiento. El primero se denomina en línea—“on-line” en inglés—y está basado en reconocer cada trazo inmediatamente después de ser dibujado por el usuario. El segundo se denomina fuera de línea—“off-line” en inglés—y consiste en realizar la tarea de reconocimiento de los trazos en diferido, a demanda del usuario.

En la presente tesis no estamos interesados en el reconocimiento en línea, ya que entendemos que este enfoque crea interferencias al diseñador durante la delicada fase de diseño conceptual, donde las ideas deben fluir ininterrumpidamente. En lugar de ello, optamos por el enfoque de reconocimiento de bocetos fuera de línea de bocetos [CCVAN09].

Por último, también se considera importante distinguir entre las formas libres y las formas analíticas. Los métodos para reconstruir formas libres se derivan del trabajo seminal de Igarashi y otros [IMT99], cuya etapa de reconocimiento se basa principalmente en el ajuste de trazos a curvas de forma libre. Las estrategias necesarias para tratar con formas libres son muy diferentes de las estrategias para reconstruir formas tipo CAD, donde las formas cuadráticas de revolución y poliédricas son las de uso más común. Por lo tanto, en este trabajo se asume que los trazos de los dibujos representan o bien líneas rectas o bien curvas cuadráticas, y se asume que dichos trazos son aristas o contornos de aquellas formas geométricas 3D que se obtienen habitualmente en la fase de diseño mecánico mediante herramientas MCAD.

1.4 Implementación

El objeto de esta tesis es proponer métodos para el reconocimiento de bocetos basados en la percepción, para posteriormente implementar algoritmos que automáticamente repliquen la percepción humana. Durante el periodo de investigación de la presente tesis dichos algoritmos han sido implementados y probados a partir de una aplicación académica (no comercial) ya existente—denominada REFER—que ha servido como laboratorio de ideas para practicar y evaluar los métodos propuestos.

REFER consiste en un motor de reconstrucción basado en la optimización para transformar dibujos lineales 2D en modelos 3D, además REFER gestiona las bases de datos del boceto, el dibujo lineal y el modelo tridimensional, permite la visualización de los resultados intermedios y facilita la interacción con el usuario, que puede reconfigurar fácilmente los parámetros de los diferentes algoritmos implementados.

Los algoritmos se han implementado en lenguaje C++ y se ha empleado la interfaz de programación de aplicaciones de Windows (Plataforma Win32), particularmente nos hemos centrado en API's GDI (interfaz para dispositivos gráficos) de Windows, que nos permiten modificar el entorno de Windows según nuestras necesidades para visualizar los resultados de los algoritmos implementados. Se ha empleado el entorno de programación Microsoft Visual Studio 2008, que además permite utilizar la librería de Microsoft Foundation Classes (MFC) que contiene un conjunto de clases interconectadas entre sí y que proporcionan un acceso sencillo a las API's de Windows. De esta manera se ha podido adaptar el entorno de Windows hasta conseguir que nuestra aplicación interactúe con el usuario de una manera flexible y optimizando los resultados. Mediante el empleo de MFCs podemos controlar, adaptar y modificar el flujo de información del proceso para interactuar con la aplicación, e incluso podemos chequear y visualizar los resultados de algunas funciones del proceso.

Es importante destacar que existe una aparente paradoja al usar herramientas típicas de aplicaciones WIMP cuando el objetivo es obtener aplicaciones WYPIWYG, que, además, sean mínimamente invasivas para no interrumpir el flujo de ideas durante el diseño conceptual. Pero la paradoja no es tal, porque lo que se ha hecho no es desarrollar una aplicación final, sino un "laboratorio de ideas" que sirve para probar algoritmos que deben mejorarse y ajustarse hasta que estén en disposición de integrarse en auténticos entornos CAS.

En la implementación se ha empleado el lenguaje C++ por varias razones. En primer lugar porque para el desarrollo y los ensayos de las propuestas realizadas en esta tesis se ha utilizado la aplicación REFER que ya había sido desarrollada en este lenguaje. Además C++ es un lenguaje orientado a objetos, muy robusto y potente que permite la creación de programas tanto sencillos como complejos. Como es un lenguaje muy extendido existen múltiples librerías e información (en libros, fóruns y tutoriales en línea) que dan un soporte de gran ayuda. En contrapartida podemos señalar que el empleo de DLLs (librerías dinámicas) ralentiza el proceso de ejecución de los programas. Así mientras otros lenguajes como Java o .Net han evolucionado y gestionan las DLLs mediante frameworks, en C++ el desarrollador debe encargarse de cargar y liberar la memoria de estas librerías, corriendo el riesgo que implica el manejo de esta memoria. Sin embargo, en nuestro caso y dado que el fin de nuestra aplicación es formativa/educativa y no comercial, no estamos preocupados por su eficiencia o su rendimiento. Por todas estas razones hemos elegido el lenguaje C++ para implementar nuestros algoritmos e incluirlos en una nueva versión de REFER.

1.5 Estructura de la Tesis

Como ya se comentó previamente, el proceso de modelado basado en bocetos (SBM) requiere completar diversas etapas que se han definido como reconocimiento del boceto, reconocimiento de indicios y reconstrucción. Los métodos propuestos en la presente tesis se enmarcan en ellas, abarcando alguna de sus tareas específicas o una etapa completa. Tal es el caso de la reconstrucción, para la que se presenta un nuevo método para la obtención de un modelo 3D a partir de la información obtenida en las etapas anteriores.

La estructura de la tesis se ajusta pues a la secuencia de dichas etapas de la siguiente manera:

Capítulo 1: Introducción. Se corresponde con el capítulo actual, en los apartados anteriores se ha tratado de introducir al lector en la temática y las motivaciones que han dado lugar a esta investigación. Se ha definido y determinado el ámbito de nuestra investigación. Se han planteado los objetivos que se pretenden alcanzar con las aportaciones de la presente tesis. Y se explica la estructura de la tesis.

Capítulo 2: Antecedentes. Para conocer la evolución del tema abordado en la tesis y cuál es la situación actual en cada una de las etapas del proceso SBM, se han consultado artículos y documentos de los principales investigadores que han trabajado en él. Se hace un repaso del proceso de SBM, para comprobar qué métodos actuales dan respuesta al enfoque perceptual que planteamos, cuáles necesitan ser mejorados y en cuáles se necesita desarrollar nuevos métodos de investigación.

Capítulo 3: Reconocimiento de primitivas 2D basado en la percepción. En la etapa de reconocimiento del boceto el objetivo es obtener un dibujo lineal a partir del boceto. En este capítulo se describe el método desarrollado para la tarea de clasificación de trazos como líneas rectas o curvas, que se lleva a cabo durante la sub-etapa de vectorización. Dicho método está basado en indicios perceptuales que han sido estudiados a partir de experimentos realizados con seres humanos. El planteamiento, análisis y resultados de dichos experimentos se describen también en el capítulo.

Capítulo 4: Reconocimiento de indicios indirectos en dibujos lineales. Este capítulo hace referencia a la segunda etapa de SBM según el proceso propuesto en esta tesis. Nuestra idea consiste en extraer información de un dibujo lineal aplicando estrategias perceptuales, para ello proponemos buscar indicios indirectos sobre el dibujo lineal. En el capítulo se hace una breve descripción del reconocimiento de varios indicios indirectos, que si bien no corresponden a aportaciones originales de esta tesis, ponen al lector en contexto, porque aportan información que emplearemos en la última etapa de SBM. Además se describe la aportación en la presente tesis respecto al indicio de detección en el dibujo de aristas paralelas en el espacio. Dicha aportación consiste en un estudio de campo llevado a cabo para conocer cómo los humanos perciben puntos de fuga en un dibujo con perspectiva. En el capítulo se describe el planteamiento, análisis y resultados de dicho estudio de campo.

Capítulo 5: Reconocimiento de elementos característicos 2D basado en la percepción. La última etapa del proceso SBM es la etapa de reconstrucción, nuestra propuesta consta de dos métodos complementarios. El primero de ellos es el de detectar elementos característicos 2D directamente desde el dibujo lineal. En este capítulo se presenta una clasificación previa de elementos característicos empleados en el diseño de piezas de ingeniería y susceptibles de ser detectados en un dibujo de ingeniería. Además se describen las reglas o condiciones evaluadas para la detección de algunos de ellos. Esta detección se apoya en información anteriormente extraída por indicios indirectos.

Capítulo 6: Construcción del árbol de elementos característicos 2D. El segundo método, de los dos orientados a alcanzar la reconstrucción mediante modelos CSG basados en características, consiste en organizar los elementos característicos 2D detectados siguiendo una estrategia iterativa para obtener el árbol de elementos característicos 2D. En este capítulo se describe en

qué consiste dicha estrategia, las diferentes sub-etapas de las que consta y cómo conduce hasta la pieza en bruto.

Capítulo 7: Conclusiones. En este capítulo se presentan las conclusiones y se recopilan las principales aportaciones del trabajo expuesto en la Tesis. También se exponen algunas futuras líneas de trabajo que, tras haber llegado a este punto en la investigación, la autora considera viables.

El documento concluye con los Anexos dónde se detallan tablas de resultados y detalles del tratamiento de los datos y cálculos realizados a partir de los experimentos llevados a cabo.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Introducción

Este capítulo tiene por objeto encontrar y discutir los antecedentes que establecen el estado del arte que ayuda a argumentar qué etapas o tareas de los métodos SBM propuestos en esta tesis pueden resolverse con métodos actuales, en cuáles se necesita introducir mejoras o adaptaciones y en cuáles se necesita desarrollar nuevos métodos de investigación.

Para el estudio de antecedentes dividimos los métodos SBM en las tres etapas definidas en la Figura 1: La etapa de *reconocimiento del boceto*, dirigida a obtener dibujos lineales a partir de bocetos; la etapa de *reconocimiento de indicios* en la que se extrae información del dibujo lineal 2D (tal como vértices, líneas paralelas, caras, etc.), y la etapa de *reconstrucción*, dirigida a producir las formas 3D representadas en el boceto a partir de la información extraída en la etapa anterior.

Hay que mencionar que existen dos estrategias principales en los métodos que se aplican al SBM: los métodos basados en percepción, que emplean indicios perceptuales (perceptual cues) para guiar el proceso de interpretación del dibujo, y los métodos geométricos, que tratan de generar modelos 3D únicamente a partir de la información geométrica contenida en la información 2D de entrada. Los métodos que nos interesan en esta tesis son aquéllos que están basados en la percepción, ya que—como ya expusimos anteriormente—a nuestro entender el problema de extraer la intención de diseño embebida en un dibujo 2D no es puramente geométrico sino inherentemente cognitivo, y requiere replicar los procesos mentales y perceptuales del ser humano.

2.2 Reconocimiento del boceto

En la tesis seminal de Roberts [Rob63], se consideró que las etapas principales en la percepción automática de sólidos tridimensionales eran dos: la *entrada* que producía un dibujo lineal (a partir de una fotografía), y la posterior *construcción 3D* que producía un objeto tridimensional. Ya en la tesis de Roberts, la etapa de *entrada* se dividía en varias tareas: filtrado de la imagen de entrada, ajuste y agrupamiento de líneas, y el refinado del dibujo lineal obtenido.

La denominación de las tareas puede haber cambiado con el tiempo, pero las tareas siguen siendo las mismas. Olsen y otros [OSCJ09] distinguieron dos etapas: *Filtrado del boceto e interpretación*. Y dentro la etapa de *filtrado*, se consideraron tres tareas diferentes: remuestreo-y-alisado, ajuste y sobretrazado. Johnson y otros [JGHD09] consideraron la *segmentación*, el *agrupamiento* y el *reconocimiento de entidades*. Más recientemente Chansri y Koomsap [CK12], distinguieron entre: *entrada de información*, *creación del dibujo lineal* y

reconstrucción del modelo 3D. En la primera etapa diferencian cuatro tipos de entradas según si el dibujo contiene sobretrazado o no, y si va a ser procesado en línea o fuera de línea. Además incluyeron las tareas de clasificación de trazos, la detección de esquinas, el ajuste de trazos, el agrupamiento de trazos y el agrupamiento de vértices en la segunda etapa.

Por lo tanto, tal y como se refleja en la Figura 1 llegamos a la conclusión de que generalmente se acepta que el proceso de reconocimiento del boceto comprende dos sub-etapas que denominamos vectorización y refinado 2D. La segmentación, el ajuste de líneas y el agrupamiento son las tareas principales de la vectorización, mientras que el agrupamiento de vértices es la tarea principal de la sub-etapa del refinado 2D.

En este apartado vamos a describir y comparar las contribuciones más significativas en dos de las tareas de la sub-etapa de vectorización: la segmentación y el ajuste de líneas, así como la organización del flujo que las ordena. Queda fuera del ámbito de la presente tesis el agrupamiento (Un típico ejemplo de agrupamiento es integrar todas las líneas de una recta discontinua en una sola línea).

2.2.1 Segmentación

La segmentación es una de las tareas principales en el proceso de vectorización. En esta tesis no se aportan contribuciones originales a la misma, sin embargo dado que sí se utiliza, se ha considerado oportuno hacer una breve reseña para explicar cuál es el objetivo del proceso y cuáles son los métodos de segmentación implementados en la herramienta educativa REFER para su consecución.

La segmentación consiste en fragmentar trazos complejos en otros más simples e independientes. Trabajar con trazos está profundamente arraigado en los criterios psicológicos básicos de la percepción, ya que es bien sabido que la información perceptual se concentra en los contornos de las formas representadas en imágenes o dibujos. Además, segmentar los trazos a partir de sus esquinas también está psicológicamente arraigado, ya que la información se concentra aún más en aquellos puntos del contorno en los que existe un cambio brusco de dirección (como en ángulos o en picos de curvatura) [Att54]. De ahí que esta tarea esté claramente basada en la percepción, tal y como establecieron Fischler y Bolles [FB86]. Sin embargo, aún hoy se emplean en esta tarea algoritmos que ignoran criterios perceptuales [ALF10].

Company y otros [CVPVS10] desarrollaron un método para valorar la capacidad de los algoritmos de segmentación para emular la percepción humana en la interpretación de bocetos. Definieron un método, que se puede repetir con cualquier conjunto de bocetos o dibujos lineales, consistente en obtener segmentaciones realizadas por humanos, y compararlas con las segmentaciones obtenidas por los algoritmos de segmentación para evaluar lo bien que emulan la percepción humana.

La aplicación educativa empleada en la tesis, REFER, utiliza tres métodos de segmentación: IStraw (tal y como lo implementaron Xiong y LaViola [XL10]), Shortstraw (de Woling y otros [WEH08]) y "Sliding strips" (propuesto por Sarfraz y otros [MS07], [SZS09]). La aplicación de uno u otro método depende de la configuración inicial elegida por el usuario, sin embargo

ISraw requiere información temporal, y en caso de no disponer de ella, el algoritmo conmuta automáticamente al método de Shortstraw.

Estos tres métodos basan el proceso de segmentación en la detección de esquinas, es decir en detectar aquellos puntos del trazo en los que se produce un cambio significativo de dirección. Existen otros métodos más modernos de segmentación (por ejemplo, [HS11], [TS13]), pero la implementación de los métodos comentados ha demostrado coincidir bastante bien con las comparativas con base psicológica realizadas por Company y otros [CVPVS10].

Hay que considerar que la detección de esquinas no resuelve todos los problemas de segmentación de un dibujo lineal. Habría que tener en cuenta otros nodos dominantes como son los puntos de tangencia y los puntos de inflexión. Dos trabajos que hacen referencia a éstos son [ST94], [AFA13], pero apenas son útiles en el reconocimiento de bocetos, ya que sus entradas son imágenes fotográficas de escenas reales, y el ruido asociado a este tipo de entrada tiene diferente naturaleza a la que encontramos en los bocetos. Por lo tanto, estos algoritmos podrían ser utilizados para los propósitos de SBM, pero para ello sus filtros originales deberían ser reemplazados por filtros adecuados a los errores intrínsecos del bocetado. Así pues, a pesar de que la herramienta REFER funciona adecuadamente para el propósito de esta tesis, y dado que en la presente tesis no se han realizado aportaciones directas en este tema, dejamos esta apreciación como trabajo futuro para el grupo de investigación REGEO, ya que una mejora en la tarea de segmentación repercutirá en la mejora y optimización de las posteriores tareas de vectorización.

2.2.2 Ajuste de Trazos en SBM

La siguiente tarea de la vectorización consiste en clasificar cada trazo como una cierta primitiva 2D. Ésta es una etapa típica tanto en aplicaciones de procesamiento de imágenes como en sistemas de visión por ordenador. Del mismo modo, es también importante en el proceso de modelado basado en bocetos, sin embargo, como ya se comentó en la tarea de segmentación, los mismos métodos no sirven para ambos problemas, ya que existe una diferencia significativa entre el tipo y el tamaño del ruido asociado con las respectivas imágenes de entrada.

El ruido asociado a escenas capturadas por las cámaras u otros dispositivos similares es principalmente debido a errores ópticos y al ruido electrónico. La aberración óptica produce errores repetitivos que pueden filtrarse a través de una calibración y un post-procesamiento adecuados. El ruido electrónico produce valores atípicos, que pueden ser detectados y eliminados a través de filtros basados en la estadística. Estos ruidos pueden ser filtrados en cierta medida. Algunos autores utilizan varias técnicas de procesamiento previo. Por ejemplo, Yang [Yan06] utiliza la normalización, el muestreo, y el suavizado para la eliminación del ruido introducido durante la digitalización, la irregularidad del movimiento de trazado, y las variaciones en el estilo del dibujo. Sin embargo, hay que señalar que su método requiere una comparación con patrones. Además, su éxito en el filtrado de grandes errores de bocetado es limitado.

Las inexactitudes de los bocetos son inherentes al estilo de dibujo y a la capacidad de dibujar particular que tenga cada individuo. Los bocetos no siguen patrones geométricos u ópticos

claros, y producen inexactitudes mucho más grandes y menos aisladas que el ruido electrónico. Clasificar trazos no es una tarea trivial, a pesar que El Meseery y otros [EEMFD09] tuvieron éxito en la adaptación, para el caso de la segmentación de trazos, del algoritmo de “enjambre de partículas” (popular en la aproximación poligonal de curvas digitales y publicado primero por Yin [Yin04]).

Si se considera un boceto como un tipo de mensaje, a través del cual los seres humanos son capaces de interpretar una intención de diseño. Se ha de tener en cuenta, que como mensaje al fin, también es susceptible de ser malinterpretado debido a su naturaleza inexacta. Por lo tanto no podemos exigir a las herramientas CAS que interpreten un mensaje que los humanos no serían capaces de interpretar.

Esta consideración viene determinada por el análisis de los tipos de bocetos realizado por Ferguson [Fer92]. Ferguson identifica hasta tres tipos de bocetos. Los bocetos “*de pensamiento*” son importantes para el propio autor o diseñador, ya que son empleados para clarificar las ideas que el diseñador tiene en mente, podemos decir que son el resultado de un monólogo del diseñador. Los bocetos “*normativos*” o “*de comunicación*”, se emplean generalmente para definir formas o para explicar ideas a otras personas, por lo que en estos casos, es muy importante la percepción de terceras personas, y no la del autor. Así pues entendemos que si las herramientas CAS deben percibir trazos de un boceto, lo importante es que repliquen la percepción del comportamiento de los potenciales usuarios.

En nuestro caso, la información de entrada es un boceto que representa un sólido poliédrico mediante una axonometría, y por tanto su proyección se representa a partir de segmentos rectos y arcos. Por lo tanto, nuestro interés se centra en estudiar la percepción o el reconocimiento de líneas rectas y arcos de elipse de la mayoría de los humanos para tratar de minimizar la discrepancia entre la interpretación humana y la interpretación de la máquina.

Así pues, en los siguientes sub-apartados se presenta una revisión bibliográfica de los trabajos más importantes desarrollados en la clasificación de trazos en líneas rectas y arcos de elipse.

2.2.2.1 Ajuste de líneas rectas

Muchos son los métodos que se han propuesto para la clasificación de trazos. Para el reconocimiento de líneas rectas, por ejemplo, encontramos varios métodos que van desde aquéllos que emplean las estrategias más simples, como es comparar longitudes de cuerda [QWJ01], hasta las que emplean estrategias más populares, como es el uso de la transformada de Hough [DH72]. Una de las aportaciones de la siguiente tesis es la propuesta de la Transformada de Hough Normalizada (NHT), tal y como se explica con más detalle en el apartado 3.2.1.

Otros métodos para el ajuste de líneas rectas han sido desarrollados o adaptados específicamente para el reconocimiento de SBM. Shpitalni y Lipson [SL97] aplicaron ajustes de mínimos cuadrados lineales a una ecuación de sección cónica, de manera que la elipse o la hipérbola resultante era clasificada arbitrariamente como línea recta si la relación de aspecto era superior a 20:1. Qin [Qin05] propuso un método para la clasificación de trazos a mano alzada basados en métodos de umbrales adaptativos y la teoría de la lógica difusa con respecto

a la linealidad y la convexidad de curvas. Zhang y otros [ZSDL06] resumieron los métodos más antiguos, y propusieron un algoritmo incremental de segmentos para la extracción de primitivas gráficas a partir de un trazo. Además trataron de perfeccionar sus parámetros de control mediante el uso de relaciones entre las primitivas. En dicho trabajo el algoritmo demuestra ser fiable para la detección de segmentos rectos.

Los filtros utilizados en estos métodos están dirigidos específicamente a la eliminación del ruido derivado de la acción de dibujar. Sin embargo, la conclusión principal aquí es que, hasta dónde alcanza nuestro saber, los umbrales utilizados en la literatura fueron estimados por los autores sin tener en cuenta si correlacionaban con la percepción humana. El método sugerido por Shpitalni y Lipson en 1997 [SL97] sigue siendo representativo: un valor entre ejes en el rango de 1:20 se usa para distinguir de menor a mayor, aquellos trazos que representan arcos elípticos de los que representan segmentos de línea. Esta relación es heurística y fue elegida de acuerdo a las observaciones de los autores. Este ejemplo ilustra la elección arbitraria de los umbrales que rigen el comportamiento de los algoritmos, en cambio nuestra pretensión es que los umbrales sean re-evaluados de acuerdo a la percepción humana.

Es más, el ejemplo también ilustra que la mayoría de los métodos de clasificación son deterministas: en el método de Shpitalni y Lipson los trazos se clasifican como líneas o arcos elípticos. Pero no se admiten casos dudosos ni la opción de retrasar la clasificación hasta disponer de más información. Una vez más, nuestra propuesta consiste en emular la percepción humana. Esto se puede conseguir permitiendo que los algoritmos puedan devolver una respuesta dudosa inicial, que posteriormente pueda ser corregida a la luz de las respuestas dadas por otros algoritmos colaborativos. El problema fue vagamente expuesto en [SL97] bajo la estrategia "Clasificación y agrupamiento en clústeres en contexto", que fue enunciada, pero no resuelta.

2.2.2.2 *Ajuste de arcos de elipse*

La mayoría de los métodos empleados para ajustar elipses con parámetros desconocidos a un conjunto de puntos muestreados de un trazo, están basados en la minimización del error total. La medida del error difiere para diferentes clases de algoritmos. [CHM14] Proporciona un excelente estado del arte en el ajuste de elipses. Otro trabajo interesante es el de Yu y otros [YKP12] donde claramente se explica la diferencia entre el método de Máxima Probabilidad, y los métodos geométricos y algebraicos. En la presente tesis no se toma en cuenta el método de la Máxima Probabilidad ya que, como concluyen Yu y otros [YKP12], "cuando el ruido es alto y la excentricidad de la elipse es alta, el método falla".

Los algoritmos más populares empleados en el ajuste de nubes de puntos a líneas están basados en RANSAC (abreviación de RANdom SAmple Consensus). Es un algoritmo basado en un método iterativo para calcular los parámetros de un modelo matemático a partir de un conjunto de datos observados que contiene valores atípicos. Pero los métodos estándar RANSAC son ineficientes para ajustar trazos a líneas, ya que ignoran que los datos de entrada no son una nube de puntos aleatoria, sino una lista de nodos ordenada ya secuencialmente. Además, sólo se necesitan cinco puntos para determinar una elipse. Así pues, como señala Rosin [Ros93], se puede aprovechar el hecho de que los nodos del trazo están ordenados secuencialmente para seleccionar una quintupla espaciada regularmente. Aunque Rosin

describe una técnica para el ajuste de elipses basado en la acumulación de varios ajustes de elipse de cinco puntos, podemos destacar que cada uno de esos ajustes individuales de cinco puntos es un ajuste rápido en sí mismo.

El método de Ajuste de Elipse Directo (DIR) de Fitzgibbon y otros es, a todas luces, el algoritmo algebraico más popular para ajustar elipses a una nube de datos dispersa. El método fue publicado en 1996, pero posteriormente fue mejorado [FPF99]. Un trabajo menos conocido de Halir y Flusser describe una implementación robusta de dicho algoritmo en [HF98]. También existe una implementación en C# de Kotagiri [Kot10]. Este método se aplicó por primera vez en el reconocimiento de bocetos por Shpitalni y Lipson [SL97].

Como estamos interesados en medir la bondad del ajuste, en principio deberíamos emplear métodos geométricos ya que éstos trabajan con métricas geométricas evidentes que deberían dar lugar a figuras de mérito válidas para nuestro enfoque. Sin embargo, estos métodos geométricos tienen dos importantes inconvenientes. Primero, tienen un tiempo de computación mayor y hasta cierto punto menos estable que los métodos algebraicos. Segundo, sus métricas geométricas difieren de las métricas perceptuales que buscamos, ya que las primeras no hacen distinción entre oscilaciones y ondulaciones.

Un método geométrico representativo es el algoritmo de Ajuste de Elipse Garantizado (GEF por sus siglas en inglés Guaranteed Ellipse Fitting algorithm), presentado por Szpak y otros [SCH12]. Este método mejora el resultado proporcionado por el método DIR cuando los datos de entrada representan los puntos o nodos muestreados de una porción de la elipse. Además, se considera como una aproximación rápida y exacta del método de ajuste de elipses basado en la distancia ortogonal, cuyo coste computacional es muy elevado.

2.2.3 Flujo de reconocimiento

Las tareas de segmentación y ajuste de trazos son críticas en el proceso de vectorización y están íntimamente relacionadas. El resultado obtenido en una de las tareas influye notoriamente en el resultado de la otra. Esta vinculación ha hecho que nos planteemos qué estrategia de flujo de información deberíamos seguir para que el resultado se aproxime más al comportamiento humano. ¿Es mejor segmentar el boceto para simplificar sus trazos y luego tratar de ajustarlos a líneas rectas o curvas? ¿O es mejor tratar de ajustar los trazos y segmentar posteriormente aquéllos que no hayan sido reconocidos como trazos simples?

El trabajo relacionado con el flujo de reconocimiento es fácil de revisar, ya que, a nuestro entender, hasta el día de hoy sólo se ha propuesto un tipo de flujo. Desde la tesis de Roberts [Rob63] hasta hoy en día, el flujo secuencial es el que se todavía se emplea. Por ejemplo, véanse los flujos descritos por Chansri y Koomsap [CK12], o el método reciente propuesto por Wang y otros [WWGY13], donde el preprocesamiento de trazos precede a la detección de elementos característicos y a una clasificación híbrida. De hecho, los flujos de reconocimiento secuenciales que no tienen en cuenta la dependencia del contexto son aún los más comunes incluso con otras entradas de información de bocetos (como por ejemplo en [KS04], [HLPJPWT10]).

En realidad, se han llegado a proponer algunos métodos que consisten en ejecutar diferentes herramientas de reconocimiento que posteriormente fusionan sus resultados. Pero esto no se diferencia de las propuestas anteriores, ya que el flujo interno de cada una de esas herramientas de reconocimiento sigue siendo principalmente secuencial. Sin embargo, el método propuesto por Arandjelovic y Sezgin es notablemente diferente [AS11]. En él, los autores argumentan que la secuencia de reconocimiento de segmentos debe ser reemplazado por un proceso en el que la segmentación y el reconocimiento se intercalen, ya que la etapa de segmentación está estrechamente relacionada con la etapa de reconocimiento. De esta manera proponen inicialmente generar diferentes hipótesis de reconocimiento para pequeños fragmentos del boceto de entrada para posteriormente, combinar dichas hipótesis hasta detectar cuáles de ellas son compatibles y permiten obtener una fragmentación y una hipótesis de reconocimiento global. Para ello, se evalúan las probabilidades de que diferentes combinaciones de primitivas correspondan a símbolos conocidos.

La idea de Arandjelovic y Sezgin está en línea con los criterios perceptuales que en esta tesis se pretenden emplear. De hecho nosotros postulamos que todos los flujos de reconocimiento deberían ser iterativos, para considerar las interacciones entre las diferentes tareas de reconocimiento. Aquí hay que destacar dos aspectos de los flujos de reconocimiento: la organización perceptual y el contexto. Esta idea se concreta al verificar de manera experimental tal y como se explica con más detalle en el apartado 3.4, la hipótesis de que el contexto es un factor influyente en la percepción humana.

En lugar de tratar de optimizar cada etapa del proceso de reconocimiento, la estrategia propuesta en esta tesis es la de construirlo replicando la percepción humana. La organización perceptual se ha definido como la capacidad de un sistema de visión para organizar imágenes y primitivas y elementos característicos detectados, basándonos por ejemplo, en criterios gestálticos [Boy99]. Se puede encontrar una revisión de las contribuciones preliminares en [SB93], donde los autores citan que "muy pocos de los aspectos de la teoría de la Gestalt se han utilizado hasta ahora en la visión por computador". Y en nuestra opinión, éste sigue siendo el caso en SBM.

Además de que los principios gestálticos no están plenamente aprovechados en SBM, el principal inconveniente que presentan es que, incluso en los casos en que se utilizan *dentro* de cada una de las tareas en particular, siguen sin utilizarse *entre* ellas. Así, las interrelaciones entre tareas siguen siendo difíciles por culpa de flujos secuenciales y jerárquicos. Por ejemplo, Sarkar y Boyer [SB93] clasifican la organización perceptual en una estructura jerárquica que incluye diferentes niveles a partir de: señales, primitivas, estructuras y ensamblajes. En el nivel básico, emplean la organización perceptual para reconocer líneas y contornos. Esos elementos característicos son organizados a nivel estructural como esquinas, polígonos, etc. Estas estructuras básicas se organizan posteriormente a nivel de ensamblaje para identificar determinadas disposiciones como por ejemplo grupos de rectángulos. Y si la situación lo permite este proceso puede continuar indefinidamente. En cada etapa se emplea la organización perceptual, y el número de etapas varía dependiendo de la información que ha de ser procesada. Pero el flujo siempre se dirige secuencialmente desde el nivel más simple hasta el más alto.

2.3 Reconocimiento de indicios

Una vez el boceto se ha convertido en un dibujo lineal, el proceso SBM puede continuar. La siguiente etapa es el reconocimiento de indicios. Esta etapa consiste en la extracción de información a partir del dibujo lineal 2D obtenido en la etapa de reconocimiento del boceto.

Desde hace mucho tiempo, diversos autores han desarrollado estudios sobre la percepción. Por un lado, los psicólogos han analizado los estímulos y los indicios perceptuales que el cerebro humano puede interpretar como fuentes de información para guiar el proceso de percepción visual [Hof00], [Pal99], y se han establecido algunas correspondencias entre la organización perceptual de la visión biológica y la artificial [SB93]. Por otro lado, los informáticos han replicado el proceso de percepción basada en indicios desde varios enfoques [CCCP04], [LS96], [Var03], [YTJ08], [Piq03]. Sin embargo, la situación actual es que no existe un catálogo completo de indicios perceptuales, e incluso aún no se comprende completamente el papel que desempeñan los indicios ya conocidos.

Tal y como apuntan Lipson y Shpitalni [LS96], el proceso de interpretación de un dibujo por parte de los humanos parece experimentar una fase previa en la que la forma general y básica se conceptualiza mientras que los detalles y elementos característicos no son aún interpretados. Se desconoce cómo los humanos logran esta comprensión previa, pero es posible que identifiquen ciertas señales o indicios indirectos que les permitan construir mentalmente la escena 3D, a partir de la información de profundidad que transmiten.

Diversos autores [BWMN95] [CV95] [Gol99] [Pal99] tratan de explicar el fenómeno que nos permite percibir la profundidad a partir de una única vista en 2D, tal y como es la imagen de la retina.

Se sabe que las fuentes de información nos proporcionan información superpuesta, que tomándola como un todo, aumenta la posibilidad de percibir con precisión nuestro entorno como un espacio tridimensional. También se sabe que el cerebro humano recibe esta información sensorial a través de diferentes canales, pero nosotros estamos interesados sólo en aquellas fuentes de información que provienen de una imagen estática, también conocidas como claves pictóricas.

Si tratamos de trasladar este mismo conocimiento al ámbito del modelado basado en boceto, nos encontramos con el concepto de regularidad. Los científicos han estudiado el carácter geométrico de nuestro entorno, y lo han traducido como *regularidades*. Regularidad viene definida por Yuan y otros [YTJ08] como "las relaciones entre o dentro de un conjunto de entidades geométricas de un dibujo que pueden ser llevadas al objeto en 3D", o también lo podemos encontrar definido como "la formulación matemática de los indicios perceptuales" por Company y otros [CCCP04]. En los estudios del SBM se han utilizado las regularidades geométricas de las imágenes 2D como indicios bien de los elementos geométricos 3D, bien de las relaciones entre ellos, o bien como una combinación de ambos. Por ello, con el paso del tiempo, regularidad ha devenido casi en sinónimo de indicio en el ámbito del SBM. Aunque en sentido estricto, las regularidades son un subconjunto de los indicios que se utilizan en reconstrucción.

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha hecho una aportación al trabajo desarrollado por el grupo REGEO en el reconocimiento de uno de estos indicios indirectos: El agrupamiento de líneas que representan aristas paralelas en el espacio. Y es que, la importancia de la perspectiva central o cónica como un indicio indirecto específico en la interpretación de bocetos de ingeniería no ha sido investigada experimentalmente hasta este momento.

Los estudios previos se dividen en los que asumen que las aristas paralelas se dibujan como líneas paralelas y los que asumen que hay convergencia. Por ejemplo, Parodi y otros [PT94] al investigar la complejidad del tiempo computacional en el proceso de etiquetado en escenas poliédricas, asumen la presencia de convergencia y muestran que el cálculo de los puntos de fuga es una de las etapas que determina la velocidad. Kanade [Kan81] propone una técnica para recuperar formas tridimensionales a partir de una imagen basada en aplicar regularidades de la imagen (en particular, el paralelismo de líneas y simetría oblicua) en con restricciones de forma.

La mayoría de los métodos para la detección de puntos de fuga (VP por las siglas en inglés de “vanishing points”) han sido pensados para trabajar con imágenes de cámaras 2D. Los errores con los que trabajan (debido a imperfecciones de las lentes y el ruido en la extracción de segmentos), son más pequeños que los errores típicos de bocetado. De todos éstos, el método más tolerante al ruido de la información es el método de agrupamiento de McLean y Kotturi [MK95].

El trabajo de Tardiff [Tar09] resulta interesante ya que trata uno de los problemas que el grupo REGEO ha considerado en el desarrollo de su algoritmo: la entrada es un conjunto de aristas, y la salida es un conjunto de VPs y una clasificación de cada arista (que es asignada a un VP determinado, o considerada como un valor atípico). También incluye una estrategia de agrupamiento que mejora la propuesta de McLean y Kotturi. Sin embargo, emplea el algoritmo conocido como “J-Linkage” que tiene un alto coste computacional y no es determinista, obteniendo resultados probables pero no definitivos.

Rother [Rot02] es un ejemplo reciente y representativo de un conjunto de métodos que exploran todos los puntos de fuga candidatos, una opción razonable cuando el objetivo es detectar puntos de fuga en un dibujo con un número de trazos reducido. Pero presenta dos inconvenientes, por una parte la etapa de detección de VP a partir de una matriz de acumulación requiere que el dibujo sea bastante exacto para no producir una nube de celdas adyacentes no dominantes, en lugar de una única celda dominante, tal como el algoritmo requiere para predecir la posición del VP. Por otro lado, este método sólo funciona para el denominado “mundo Manhattan” de objetos normales, y no permite encontrar puntos de fuga oblicuos de manera fiable. Sin embargo, hay que decir que este método es representativo de aquéllos que consideran todos los pares posibles de intersecciones de los segmentos detectados. Esta técnica no es práctica para un análisis en línea de imágenes fotográficas, ya que requiere mucho tiempo de ejecución, pero puede ser útil para bocetos que contienen menos líneas.

A partir de la idea utilizada por Rother [Rot02] de la exploración de todos los VPs candidatos, y la idea de la agrupación presentada por McLean y Kotturi [MK95] y Tardif [Tar09]. El grupo de investigación REGEO ha diseñado e implementado un nuevo algoritmo dirigido

específicamente a la búsqueda de puntos de fuga (VPs) en bocetos de objetos de ingeniería [CVP14]. El algoritmo agrupa puntos de fuga candidatos por etapas. En la primera iteración se calculan todos los VPs candidatos como intersecciones entre cada pareja de líneas del dibujo, y se almacenan tanto las intersecciones como las líneas ligadas a ellas. Posteriormente y bajo determinados requerimientos, se van agrupando dichos VPs candidatos (y por tanto, las líneas relacionadas con cada agrupamiento o clúster). Por lo tanto, la entrada del algoritmo es una lista de líneas (donde cada línea queda definida por sus dos puntos finales, cada uno de los cuales es un par (x, y) coordenado), y la salida es un conjunto de grupos de líneas en 2D que corresponden a grupos de aristas paralelas del objeto 3D. Cada grupo de líneas contiene o bien un punto de fuga (proyección cónica) o ninguno (proyección paralela). Los criterios y métricas empleados en la implementación del algoritmo para que replique la percepción humana en la detección de VPs en bocetos, son una aportación original de esta tesis, a la que se ha llegado a partir de un estudio de campo detallado en el apartado 4.4.1.

2.4 Reconstrucción

Tal y cómo se comentó en la introducción, se han desarrollado diferentes estrategias para obtener una herramienta CAS intuitiva que aliente a los diseñadores a reemplazar el lápiz y el papel en la etapa de diseño conceptual. Para ello en los trabajos previos se han seguido dos estrategias.

Como definen Chansri y Koomsap [CK12] el *modelado 3D evocativo* es aquél en el que los usuarios dirigen el modelado a partir de gestos como ocurre con SMARTPAPER [SC04] (que también combina la optimización propuesta por [LS96]), o bien se emplean bases de datos con patrones para el reconocimiento y reconstrucción de objetos, como por ejemplo propusieron Varley y otros [VTMS04] para la reconstrucción de objetos curvos. La introducción adicional de información durante el proceso permite emplear algoritmos no muy sofisticados.

La otra estrategia seguida es la del *modelado 3D basado en reconstrucción*, esta estrategia no requiere del guiado del usuario, ya que el modelo se obtiene de forma sistemática aplicando reglas o normas sobre la información obtenida del boceto. Es una estrategia más intuitiva en la que destacan dos enfoques diferentes: el enfoque de la reconstrucción basada en la optimización y el enfoque perceptual.

La *reconstrucción basada en la optimización* determina la profundidad de los vértices del dibujo mediante la optimización de una función objetivo. Este enfoque caracteriza las relaciones entre un dibujo 2D y el modelo 3D subyacente, mediante un sistema de ecuaciones lineales, que generalmente se formulan como restricciones geométricas sobre el dibujo. La existencia de solución es un criterio suficiente para la reconstrucción y los métodos de optimización por programación lineal pueden aportar dicha solución [Sug86], [GM95]. Lipson y Shpitalni [LS96] plantearon un nuevo método de optimización basado en la existencia de regularidades. Company y otros [CCCP04] mejoraron el proceso de optimización introduciendo un modelo preliminar (el inflado axonométrico [CCPA03]) y categorizando las regularidades. En la misma línea, Yuan y otros [YTJ08] plantearon un método de selección de regularidades que denominaron determinación de relevancia automática (ARD por sus siglas en inglés), según el cual, antes del proceso de reconstrucción se detectan y eliminan las regularidades que no

aportan información útil. De esta manera se reduce la complejidad del proceso de reconstrucción y se produce un resultado satisfactorio. Este enfoque tiene como contrapartida el gran tiempo de ejecución que necesita el proceso de optimización, y el riesgo de alcanzar un mínimo local, generando un resultado que no coincide con la interpretación más plausible del objeto 3D representado.

El enfoque de optimización ha incorporado consideraciones perceptuales hasta desarrollar una investigación centrada en un *enfoque perceptual*, en el que se considera de utilidad toda aquella información extraída del dibujo que represente indicios de la percepción humana. Autores como Lamb y Bandopadhyay [LB90] propusieron un método que emplea reglas heurísticas y perceptuales para ajustar automáticamente el dibujo y reconstruir su modelo 3D. Pero cuando el algoritmo falla, es necesaria la interacción con usuario para que el proceso siga adelante. El *etiquetado de líneas* a menudo se emplea para reducir las posibles interpretaciones en 3D de un dibujo lineal descartando aquéllas no compatibles con la percepción humana. Este método se emplea principalmente en dibujos naturales (sin líneas ocultas). Las líneas se pueden etiquetar como convexas o cóncavas en referencia al observador, o bien como ocluidas. Si bien no constituye un método de reconstrucción en sí, se emplea en etapas previas a la reconstrucción para obtener información del dibujo 2D que se empleará en tareas más complejas, por ejemplo en el reconocimiento de caras, o en análisis topológico previo a la reconstrucción [Sug86], [GM95], [Var03]. Otros autores como Kang y otros [KML04] basan la reconstrucción en la obtención del sistema ortogonal de ejes principales, y entonces emplea el sistema de ejes para calcular la profundidad de cada vértice del dibujo hasta reconstruir el objeto 3D.

La presente tesis se enmarca en este tipo de métodos, igual que en el caso del reconocimiento del boceto, nuestro objetivo es aplicar reglas perceptuales para obtener la representación CSG de un sólido a partir de elementos característicos 2D. En los siguientes sub-apartados, resumimos el estado del arte de estos dos temas: reconocimiento de elementos característicos y el modelado CSG.

2.4.1 Reconocimiento de elementos característicos 2D

En el campo del reconocimiento automático de elementos característicos, hay que decir que no hay mucha bibliografía referida al reconocimiento de elementos característicos 2D. Ya que en la mayoría de métodos reconocimiento de elementos característicos parten de modelos 3D.

Generalmente los modelos CAD 3D se emplean en etapas posteriores de producción para la obtención de modelos CAM, que automáticamente se empleen en la planificación de producción. Actualmente, los modelos CAD 3D no siempre transmiten explícitamente los elementos característicos de diseño o fabricación requeridos en un modelo CAM, y por ello es necesaria una etapa intermedia para la extracción de elementos característicos a partir de un modelo CAD. Tal y como expone Shah [Sha91], las estrategias que hoy en día se emplean para trabajar con elementos característicos son: La *definición interactiva de elementos característicos* (Interactive Feature Definition) en el que se crea en primera instancia el modelo CAD y sobre él, el usuario selecciona y añade los elementos característicos; *el diseño por elementos característicos* (Design-by-features) en el que el modelo 3D se define directamente e interactivamente a partir de elementos característicos, y *el reconocimiento automático de*

elementos característicos (Automated Feature Recognition, o AFR por sus siglas en inglés), que puede considerarse un post-procesado de un modelo CAD en el que algorítmicamente se extrae información de los elementos característicos para la construcción del modelo 3D. Estas estrategias requieren que el usuario tenga conocimientos en la creación de modelos 3D, así como la colaboración entre diseñadores y especialistas mecánicos para resolver los problemas típicos que se dan en la conversión de los modelos CAD-CAM.

Hwang en su tesis doctoral [Hwa91] ya propuso reglas para la detección de elementos característicos 2D, sin embargo dichas reglas no dejaron de ser más que simples propuestas, ya que en ningún momento fueron testeadas ni verificadas. Quizás porque nunca se llegaron a materializar estas propuestas es por lo que el trabajo de Hwang, que es el mejor antecedente de las contribuciones de la presente tesis al reconocimiento de elementos característicos 2D, no ha generado nuevos resultados ni parece que haya tenido continuación.

Meeran y Pratt [MP93] diseñaron un sistema experimental para satisfacer los requisitos del *proceso de planificación automático* en vistas ortográficas 2D. A su vez, desarrollaron reglas generales para el reconocimiento de elementos característicos 2D comunes en el mecanizado de piezas prismáticas. Incluso llegaron a manejar algunos elementos característicos 2D que interactuaban entre sí. Meeran y Taib [MT99] presentaron un sistema de reconocimiento de elementos característicos 2D basado en indicios, de vistas ortogonales en dos etapas. El método consiste en buscar perfiles en dibujos 2D y entonces establecer la dimensión adicional para obtener el volumen del elemento característico. Su limitación viene determinada por los pocos elementos característicos con los que pueden trabajar, además de poder trabajar sólo con elementos característicos que se encuentren orientados paralelos a los ejes x o y.

Tyan y Devarajan [TD98] propusieron el sistema FlexiCAD, cuyo input era un dibujo ortográfico 2D obtenido a partir de modelos 3D. Los elementos característicos se identificaban a partir de patrones geométricos y se clasificaban siguiendo una estructura jerárquica basada en atributos característicos. Las limitaciones eran que el algoritmo sólo reconoce elementos característicos que: 1) no interactúan mutuamente, 2) se enumeran en una biblioteca de patrones y 3) tienen un grosor uniforme.

Vanderbrande y Requicha [VR93] propusieron un método basado en normas para obtener una descomposición volumétrica de elementos característicos a partir de un modelo sólido. Abordaron las complejas interacciones entre los elementos característicos a través del procedimiento de “completitud de elementos característicos”. La principal diferencia con el método propuesto aquí es que su entrada de información para detectar elementos característicos es un modelo 3D, mientras que en nuestra propuesta la entrada es una vista única de un dibujo 2D alámbrico, que necesariamente contiene información incompleta.

Los métodos destinados originalmente a la creación de modelos CAM 3D a partir de viejos planos 2D trabajan con vistas ortográficas múltiples. Por lo tanto, sus estrategias se basan en la extracción y organización de la información fragmentada entre varias de sus vistas. En nuestro caso, la entrada es de una única vista, la cual, necesariamente, contiene información incompleta.

La novedosa propuesta que aportamos, y que se explica con más detalle en el capítulo 5 consiste en realizar una detección temprana de elementos característicos 2D antes de generar cualquier modelo 3D.

Pero antes de llegar a ello, debemos preguntarnos qué tipos de elementos característicos son los que queremos detectar, o dicho de otro modo, cuando tratamos de percibir la intención de diseño de un boceto ¿qué elementos característicos son los que podemos reconocer?

Aunque las definiciones no están unificadas, existe suficiente acuerdo en distinguir entre aquellos elementos característicos que simplemente corresponden con formas geométricas interesantes porque facilitan el modelado a la conceptualización de la geometría de un objeto (elementos “de forma”), de aquellos que además permiten o propician una cierta función (elementos “de diseño”), o de aquellos que se pueden obtener mediante un cierto procedimiento de fabricación.

Vandenbrande y Requicha [VR93], argumentando contra el entonces (1993) paradigma de diseñar en términos de elementos característicos de fabricación, distinguieron entre los *elementos característicos de mecanizado*, producidos en un proceso de mecanizado específico y por lo tanto necesariamente sustractivos, y los *elementos característicos de diseño*, configuraciones de dibujo que, en la mente del diseñador, tienen un propósito particular relacionado con la función del objeto. En su argumento señalaron en particular, que las tecnologías de fabricación pueden cambiar varias veces durante la vida útil de un objeto, pero éste conserva su misma función en todo momento. Sobre esta base, los objetos deben estar diseñados en términos de su función, no en términos de la tecnología de fabricación.

Por otro lado, Han ([Han96], [Han97]) incluye los *elementos característicos de forma*, como descripciones geométricas de forma sin relación implícita de la función o del método de fabricación, y recomienda el uso de elementos característicos de forma durante el proceso de diseño para posteriormente convertir el diseño final en elementos característicos de fabricación. Han también documenta métodos para convertir los elementos característicos de forma presentes en los modelos CAD en elementos característicos de mecanizado para aplicar tecnologías de fabricación específicas. Otros autores han identificado otras muchas categorías de elementos característicos: de análisis, de material, de tolerancia... Sin embargo, este tipo de elementos característicos no están relacionados con el problema de la interpretación de representaciones pictóricas, y por lo tanto han sido ignorados durante la investigación de la presente tesis.

Hay que destacar que hoy en día la mayoría de las aplicaciones CAD no hacen ningún tipo de diferenciación en la tipología y denominan elementos característicos a todas y cada una de las operaciones de modelado, con independencia de que produzcan elementos característicos (de forma, de diseño o de fabricación) o no.

2.4.2 Modelado CSG

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo final del proceso SBM es obtener un modelo tridimensional a partir de la información de entrada. Hasta ahora se ha hecho un recorrido por todas las etapas anteriores hasta llegar a la etapa de reconstrucción. En este apartado se hace un estudio del estado del arte de esta última etapa.

Tal y como se expone en el trabajo de Company y otros [CPCCN05], los modelos B-Rep en 3D son la salida típica de los métodos de SBM. Sin embargo, la reconstrucción mediante geometría constructiva de sólidos (CSG) está cobrando interés debido a los recientes avances que se están produciendo en el campo de la fabricación aditiva personalizada como son las impresoras 3D, o los sistemas de fabricación de personalización en masa, ya que los modelos CSG simplifican el proceso CAD/CAM y permiten que usuarios no expertos puedan producir sus propios diseños.

Hasta ahora han sido pocos los intentos de obtener una reconstrucción de modelos CSG. Algunos de estos métodos trabajan con representaciones de vista única (como las axonometrías): Wang y Grinstein [WG89] produjeron una representación CSG donde cada elemento característico era un paralelepípedo. Y posteriormente ampliaron la representación a poliedros no normales con la adición de una segunda primitiva CSG: el tetraedro. Branco y otros [BCF94] presentaron el sistema IDES. Éste empleaba la interacción WIMP combinada con la entrada de información de un boceto en perspectiva o representado en axonométrico, dibujado sin líneas ocultas. Los usuarios disponían de algunas operaciones de modelado como la extrusión para crear el sólido a partir de formas elementales. Suh [Suh06] observó que muchos componentes mecánicos se pueden representar por combinación de volúmenes de barrido lineal (LSV por sus siglas en inglés), su método consiste en identificar perfiles cerrados en un dibujo natural (sin líneas ocultas), para crear volúmenes por extrusión y posteriormente combinarlos con operaciones booleanas para construir el modelo 3D. Sin embargo, estos enfoques pioneros, que requerían la interacción del usuario y estaban limitados a elementos característicos sencillos, no han tenido continuidad.

Otros métodos se centran en vistas ortográficas múltiples: Shum y otros [SLYY01] propusieron un método con dos etapas para reconstruir sólidos extruidos. La primera etapa consiste en obtener un *sólido básico* mediante el barrido de cada vista a lo largo de su dirección normal. La segunda etapa busca *sólido en exceso*, que después será sustraído del *sólido básico*. Soni y otros [SG03] propusieron un procedimiento para identificar entidades que representan volúmenes de revolución, que no interactúan, y que se representan mediante vistas ortográficas, y Lee y otros [LH05] aplicaron un método basado en indicios para el reconocimiento de sólidos de revolución que se intersectan en vistas ortográficas.

Otros métodos aplicaron la reconstrucción interactiva y operaciones CSG al interpretar bocetos, por ejemplo, Pereira y otros [PJBF00] presentaron GIDeS, un sistema basado en gestos, y Shesh y otros [SC04] introdujeron operaciones CSG en su sistema de bocetado (SMARTPAPER), donde los usuarios aplicaban un sistema de retroalimentación para modificar el boceto de entrada.

Sin embargo, aparte de emplear información de entrada diferente a la que nosotros empleamos aquí (es decir, vistas múltiples en vez de única vista) o requerir interacción del usuario, todos los métodos de reconstrucción basados en la representación CSG únicamente detectan elementos característicos de forma; en ningún caso se consideran elementos característicos de diseño o de fabricación.

Varley [Var03] detectó algunos elementos característicos de diseño y/o fabricación. Pero empleó la detección de elementos característicos como una estrategia complementaria al

proceso de detección de indicios dirigida al etiquetado, al inflado y la obtención de la parte trasera de un dibujo natural. Varley no empleó la detección de elementos característicos de un modo sistemático para obtener el modelo CSG desde el boceto.

2.5 Experimentación

Como ya se ha comentado anteriormente, los nuevos métodos del proceso del modelado basado en bocetos que se presentan en esta tesis, se quieren diseñar e implementar mediante una metodología basada en criterios perceptuales.

La única estrategia científica que ha demostrado ser útil para determinar cómo perciben los humanos consiste en llevar a cabo experimentos con grupos de sujetos a los que se entrevista para hacer explícitas sus percepciones. La metodología experimental tuvo su inicio teórico a partir de la década de 1930 por Ronald A. Fisher, quién sentó la base de la teoría del Diseño Experimental. Fisher incorporó de manera sistemática el pensamiento y los principios estadísticos en el diseño de las investigaciones experimentales [Mon04]. Así pues emplearemos esta técnica para determinar los límites de aceptación humana, es decir, necesitamos experimentos para preguntar a sujetos de muestras representativas y extraer de sus respuestas la información para aplicarla a nuestros métodos algorítmicos y que repliquen la percepción humana. Elsen y otros [EDYL12] también aplicaron una metodología perceptual para conocer las necesidades y prácticas habituales de los usuarios para modelar empleando interfaces de diseño basado en bocetos.

El método no es simple, porque se sabe que la percepción humana está influenciada por diferentes tipos de estímulos, tales como la habilidad del autor del boceto y la experiencia previa del observador. Además hay muchos indicios, y los estímulos que producen se superponen y complementan. El aspecto más complicado es que los experimentos deben dirigirse a revelar el comportamiento psicológico, sin malinterpretar accidentalmente el comportamiento aprendido de algún sujeto como un comportamiento perceptual general.

Para llevar a cabo un experimento y obtener resultados válidos, hay que saber de antemano cómo diseñar el experimento. El arte de diseñar un experimento y el arte de analizar un experimento están estrechamente relacionados. Para diseñar un experimento se ha de tener en cuenta el tipo de análisis al que serán sometidas las respuestas, a su vez, la eficiencia de un análisis experimental dependerá del diseño del experimento que se emplee en la recopilación de datos. Un principio básico en el diseño de un experimento es “hazlo lo más simple posible” [DV99]. La interpretación y la presentación de los resultados son generalmente más claras en experimentos sencillos. A la hora de diseñar un experimento hay tres principios básicos que deben darse [DV99], [Mon04]:

- La repetición u observaciones independientes sobre el fenómeno observado, que permite obtener una estimación del error experimental. Tal estimación ayuda a determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.
- El bloqueo, que consiste en dividir las observaciones en grupos o bloques según se recojan bajo condiciones experimentales similares. Es una técnica que se emplea para

umentar la precisión del experimento, ya que anula o toma en cuenta los factores que afectan la respuesta observada.

- Y la aleatorización para evitar sesgos sistemáticos y personales en el experimento que introducirían fuentes de variación desconocidas en las respuestas.

En el método experimental no sólo es crítico el diseño del experimento. Tal y como exponen Simmons y otros [SNS11], los investigadores científicos podemos inconscientemente “falsear” los resultados de nuestros estudios experimentales debido a lo que denominan psicología del falso-negativo (rechazar una hipótesis nula cuando ésta es cierta). Estos autores culpan al constructo que denominan “grados de libertad del investigador” que está relacionado con las decisiones que el investigador va tomando durante el proceso de recopilación y análisis de los datos. Pero este comportamiento no se considera como malicioso, más bien se atribuye al resultado de dos factores: la ambigüedad en cómo tomar las mejores decisiones y el deseo del investigador de encontrar un resultado significativo. Para minimizar el efecto de dicho constructo, Simmons y otros proponen seis requerimientos que los investigadores deben cumplir en la presentación de sus resultados experimentales:

- Definir la regla que determina la finalización de la recogida de datos, antes de la recolección de datos, y exponerla explícitamente en el artículo.
- Recolectar al menos 20 observaciones en cada celda o bloque de estudio, en caso contrario, se tiene que dar una justificación.
- Listar todas las variables que se han recopilado en el estudio, aunque no resulten significativas.
- Especificar las condiciones experimentales, incluyendo aquéllas que se consideraron fallidas.
- Informar de la eliminación de valores atípicos, y presentar los valores estadísticos antes de eliminar dichas observaciones.
- Si un análisis incluye una covariable, se incluirán los resultados estadísticos del análisis sin la covariable.

En las experimentaciones desarrolladas en la presente tesis, se ha intentado seguir los seis requerimientos descritos arriba.

2.6 Conclusiones

En este capítulo se ha resumido el estado del arte en cada una de las etapas del proceso SBM para las que la presente tesis aporta alguna propuesta de mejora.

Concluimos que en la etapa de reconocimiento del boceto no existen antecedentes que aborden el proceso de vectorización desde el punto de vista perceptual. El reconocimiento de primitivas 2D en un boceto se resuelve generalmente mediante métodos geométricos en los que los resultados no son totalmente satisfactorios debido a que los métodos son sensibles a la falta de exactitud de los bocetos. Sin embargo, los seres humanos a pesar de las imperfecciones inherentes a los bocetos, son capaces de reconocer en la representación de trazos determinadas formas geométricas, ya que son capaces de filtrar dichas imperfecciones y detectar la geometría subyacente. Por esta razón, concluimos que la mejor estrategia para los

métodos de reconocimiento es replicar la percepción humana. Sin embargo, ésta no ha sido una estrategia muy trabajada, y en los trabajos en los que se ha pretendido dar un enfoque perceptual, ha primado la percepción basada únicamente en las observaciones del desarrollador informático u orientada a encontrar el mensaje que pretendía enviar el autor del dibujo.

El reconocimiento de indicios, según la literatura, se ha trabajado en paralelo al reconocimiento geométrico de regularidades. Sin embargo los indicios tienen un carácter más perceptual, ya que no están basados puramente en la geometría del boceto. Desde nuestro punto de vista, y debido a la inexactitud del boceto, nos interesa trabajar con estos elementos perceptuales, que según los psicólogos son las señales que buscan los humanos en los dibujos para detectar información de profundidad. Uno de esos indicios es el agrupamiento de líneas que representan aristas paralelas en el espacio. El reconocimiento de esta señal no es trivial debido a que el paralelismo no es una propiedad que siempre se mantenga invariante al proyectar el objeto 3D: en una proyección cónica las aristas paralelas en el espacio se representan en 2D convergiendo a un punto de fuga. El problema es pues determinar si es posible agrupar líneas paralelas de acuerdo a un criterio global. Para ello, el grupo REGEO ha implementado un método que resuelve este aspecto atendiendo a criterios perceptuales. La contribución de esta tesis a dicho método se explica en el capítulo 4.

En la integración de la etapa de diseño conceptual con el resto del proceso de diseño y fabricación, la etapa de reconstrucción se convierte en la etapa enlace entre las herramientas CAS y el resto del proceso de diseño. Después del repaso bibliográfico concluimos que hasta ahora, aunque se han seguido diferentes estrategias de reconstrucción (gesturales, basadas en optimización...) ninguna produce resultados satisfactorios, o lo hace bajo condiciones muy limitadas. Hasta la fecha, la estrategia de detección de elementos característicos se ha considerado sólo como una estrategia complementaria, utilizada cuando las estrategias principales han fracasado. Además, se ha aplicado generalmente sobre modelos 3D. La idea de buscar elementos característicos 2D como un método independiente no se ha planteado hasta ahora, así como tampoco la estrategia de adaptar estos métodos de reconocimiento 3D para la detección sobre dibujos 2D.

La salida de la etapa de reconstrucción es un modelo 3D. Las representaciones más comunes de dichos modelos son B-Rep y CSG. Por sus características concluimos que el modelo CSG está más en línea con las necesidades técnicas de las siguientes etapas del proceso de diseño. Sin embargo, según el estado del arte, no hay hasta la fecha un método dirigido a la obtención de un modelo CSG capaz de almacenar la información necesaria para la creación de un modelo CAM a partir de elementos característicos detectados en un dibujo 2D. Por lo tanto este problema se planteará y se tratará de solucionar en el capítulo 6 de la presente tesis.

Para conseguir que las máquinas sean capaces de replicar la percepción humana a la hora de interpretar un boceto, debemos conocer primero cómo interpretan la mayoría de humanos. La única manera de conseguir esta información con una base científica es mediante experimentación con humanos. El diseño de los experimentos no es una tarea trivial, porque para justificar la buena práctica en la metodología experimental es necesario cumplir los requerimientos planteados por Simmons y otros [SNS11].

Concluimos finalmente que el desarrollo de una herramienta CAS puramente intuitiva para el proceso de diseño conceptual continúa siendo un reto que todavía no se ha abordado completamente. En la presente tesis se desarrollan métodos que suponen un paso adelante para alcanzar ese ambicioso reto.

Capítulo 3. Reconocimiento del boceto: Métodos para el ajuste de líneas rectas y arcos elípticos

3.1 Introducción

Para alentar a los diseñadores e ingenieros a sustituir el lápiz y el papel en la etapas preliminares de diseño en favor de las herramientas de bocetado (CAS), es necesario mejorar la capacidad actual de dichas herramientas. Van Dijk [Dij95] recopiló los requisitos más importantes que estas herramientas deben cumplir: la entrada de datos debe ser fácil y natural para crear y modificar las formas producidas; los movimientos de las manos han de estar relacionados a la creación de formas, ya sea bocetando en 2D o modelando en 3D; el sistema debe ser suficientemente flexible para permitir al usuario dibujar con cierta imprecisión, añadiendo posteriormente tanta información numérica como sea requerida; por último, el sistema debe permitir al usuario visualizar diferentes diseños, incluyendo interpretaciones alternativas del mismo dibujo. Además, el cambio entre estos diversos “modos” o funciones, debe ser transparente, implementado de tal manera que no se interrumpa el proceso de pensamiento creativo [CV09].

En el presente capítulo se proponen métodos para el ajuste de trazos bocetados que representen líneas rectas o arcos de elipse—ya que estas dos primitivas se consideran las más comunes a la hora de representar objetos de ingeniería en 2D (ver ejemplos de la Figura 2). El objetivo es proponer métodos que cumplan los criterios expuestos por van Dijk. La información de entrada son trazos, representados como una secuencia de puntos o nodos ordenados temporalmente, generados siguiendo los movimientos de la mano del usuario durante el bocetado. Algunos sistemas incluyen también la información temporal de cada nodo, pero éste no es el caso de la herramienta REFER empleada en la captura de trazos en los estudios realizados en la presente tesis. La información de salida más que un ajuste preciso, es un ajuste aproximado a una primitiva 2D (segmento de línea o arco de elipse), y una figura de mérito que devuelve la probabilidad con que un trazo representa estas primitivas. En los métodos propuestos buscamos una respuesta rápida tanto para permitir una retroalimentación inmediata, como para poder emplearla iterativamente en procesos de interpretación de alto nivel.

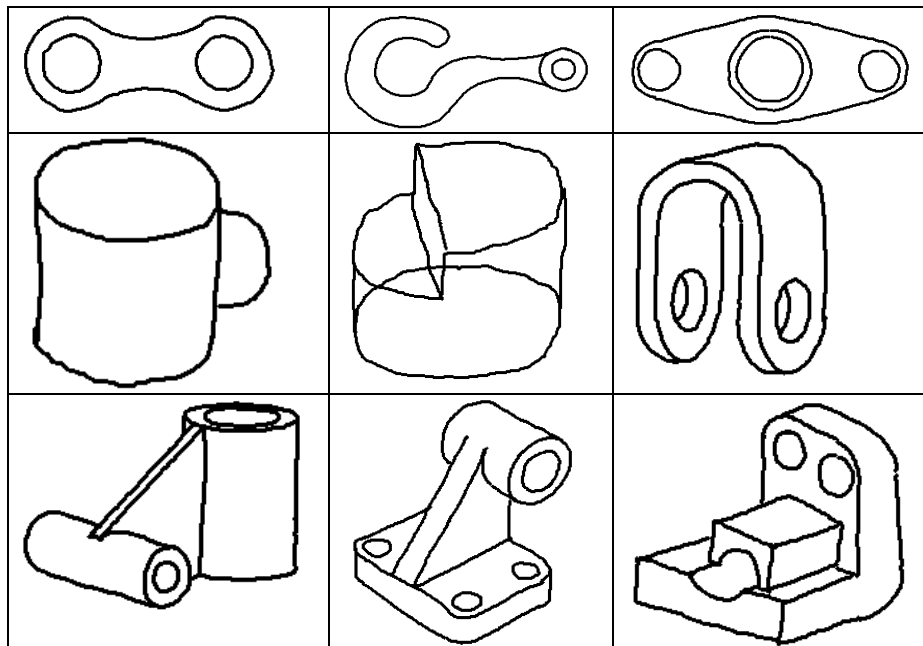


Figura 2. Ejemplos típicos de bocetos de ingeniería que incluyen líneas rectas y arcos elípticos.

En el apartado 2.2.2 del capítulo anterior, se ha presentado una revisión bibliográfica de los trabajos más importantes desarrollados en el reconocimiento de trazos de líneas rectas y arcos de elipse. Sin embargo, aún encontramos dos grandes razones para visitar el problema del “ajuste” a primitivas 2D.

En primer lugar, el problema de la *segmentación* permanece sin resolverse: ¿cómo debemos dividir la secuencia de nodos en trazos de manera que cada trazo represente una única línea recta o un único arco elíptico? De hecho, ni siquiera está claro cuando deberíamos realizar el proceso de segmentación. Realizar el ajuste de líneas antes del proceso de segmentación, produce *macrolíneas*, en las que varias líneas o curvas se agrupan en el mismo trazo (Figura 3 izquierda). Sin embargo, segmentar los trazos cada vez que se detecta un nodo candidato a esquina, se traduce en *microlíneas*, ya que el segmentador interpreta incorrectamente las ondulaciones y oscilaciones como verdaderas esquinas (Figura 3 derecha). A nuestro entender, el proceso de segmentación y de ajuste deberían ejecutarse en paralelo, transmitiéndose información de uno a otro hasta converger a una solución. En este enfoque, el proceso de ajuste se ejecutará cada vez que el proceso de segmentación identifique una primitiva 2D candidata, por lo tanto, es necesario contar con unos procesos de ajuste suficientemente rápidos.



Figura 3. Ajustar un trazo a una única macrolínea (izq.), en dos líneas segmentadas (centro) y muchas microlíneas (dcha.)

En segundo lugar, los humanos tienden a interpretar la totalidad de una escena para formarse una idea general antes de hacer una interpretación final. Por ejemplo, en la Figura 4 izquierda,

no está claro lo que cualquiera de los trazos resaltados en rojos representa, pero es evidente que representan la misma cosa ya que el objeto dibujado es una extrusión. Sólo cuando se toman los dos trazos rojos conjuntamente se hace evidente que la mejor interpretación es la de un arco elíptico.

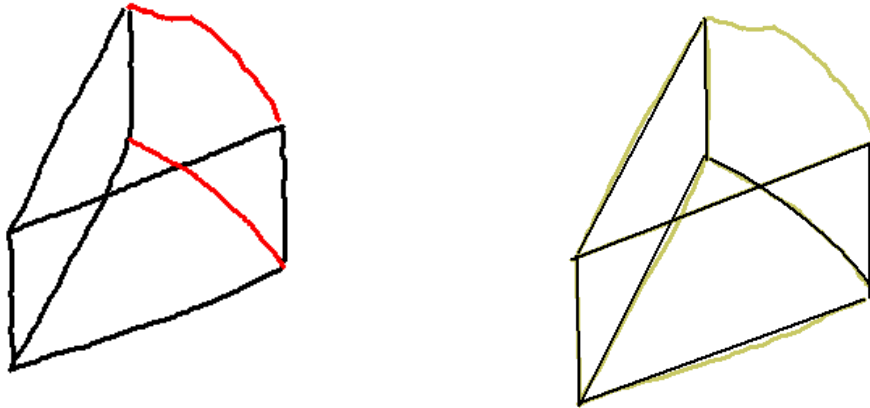


Figura 4. *La influencia del contexto, no la geometría, hace que el arco rojo superior (izq.) se perciba como un arco*

Atendiendo al primer propósito, a largo plazo el objetivo es ejecutar los procesos de segmentación y ajuste en paralelo, de manera que se proporcionen una mutua retroalimentación. El método general consistirá en: (1) ejecutar las tareas de segmentación, ajuste y agrupamiento, de la sub-etapa de vectorización para obtener unos resultados “provisionales”; (2) comparar sus figuras de mérito; (3) compartir información, y (4) repetir el proceso (variando sus ajustes y secuencias) hasta encontrar una solución “perceptualmente válida”. Para tal fin, es más interesante emplear estrategias de ajuste rápidas complementadas con sus correspondientes figuras de mérito, que métodos lentos de ajustes precisos (que sólo son útiles para obtener una solución refinada, una vez se conoce cuál es el correcto ajuste que se está buscando). En este sentido, el nuevo método se diferencia de los métodos actuales en el ámbito de reconocimiento de imagen, ya que da prioridad a la velocidad sobre la precisión geométrica.

Para el segundo propósito, el método empleará bandas de tolerancia tanto en el reconocimiento de líneas rectas como arcos de elipse. Aunque el procedimiento para calcular la banda de tolerancia será diferente en cada caso, ya que las comparaciones que funcionan para las líneas rectas no sirven en el caso de las elipses. Este segundo propósito hace que el nuevo método sea diferente de los métodos actuales de ajuste de línea dicotómicos empleados en SBM.

Luego, a largo plazo la idea es ajustar líneas rectas o arcos elípticos en bocetos típicos de ingeniería, mediante flujos basados en decisiones colaborativas, en lugar de emplear como hasta ahora flujos secuenciales.

Estos métodos se aplican en la primera etapa del proceso SBM—el reconocimiento del boceto—y más concretamente en la tarea de ajuste de líneas de la sub-etapa de vectorización. En los siguientes apartados se detallan los métodos propuestos en el ajuste de trazos como líneas rectas (apartado 3.2) o como arcos de elipse (apartado 3.3). En cada caso se detallan tanto los experimentos llevados a cabo para analizar el comportamiento perceptual humano

como la obtención de las métricas empleadas posteriormente en los algoritmos. También se hace una introducción a los flujos de información basados en decisiones colaborativas en el apartado 3.4. Y en el apartado 3.5 se sintetizan las conclusiones del capítulo.

3.2 Ajuste de segmentos de línea basados en percepción

Como ya se ha comentado, el principal objetivo de este apartado es describir un método para ajustar los trazos creados a mano alzada como líneas rectas, clasificando los trazos tal y como lo harían la mayoría de los seres humanos.

Una de las dificultades inmediatas que encontramos es que la percepción humana está influida por diferentes estímulos como son la habilidad para dibujar del dibujante, y el conocimiento previo y la capacidad de interpretar dibujos del observador. De hecho, hemos observado que los seres humanos pueden interpretar un mismo trazo de manera diferente.

Otro problema que hemos constatado en los algoritmos de reconocimiento de enfoque perceptual que existen hoy en día es que, en general, se ha confundido la percepción general del ser humano, con la percepción particular del desarrollador informático, o se ha confundido lo posible (captar el mensaje que se recibe—percepción) con lo deseable (captar el que se emite—intención).

Nuestra propuesta es pues describir un método para reconocer lo que la mayoría de los humanos percibe. El primer paso es estudiar y analizar el comportamiento de los humanos en el reconocimiento de trazos. Para ello, la única estrategia científica que ha demostrado ser útil es realizar experimentos para hacer explícita la percepción de los seres humanos. En los siguientes apartados se describirá cada experimento de una manera más detallada, pero en general hemos aplicado un proceso basado en las siguientes cuatro etapas:

1. Entrevistar a una muestra de personas para definir un patrón de percepción.
2. Hacer que dichas personas clasifiquen un conjunto de trazos.
3. Adaptar o mejorar algoritmos ya existentes para replicar la percepción humana.
4. Ajustar nuestros algoritmos hasta que repliquen el patrón de percepción.

La primera estrategia que se intentó durante el desarrollo de la tesis fue adaptar métodos geométricos ya conocidos para que replicaran la percepción humana. Como resultado planteamos una metodología basada en un nuevo algoritmo geométrico (Transformada de Hough Normalizada, NHT) que presentaba una tasa de éxito aceptable [PCV13a].

Posteriormente, realizando nuevos estudios experimentales, se decidió cambiar la estrategia de reconocimiento de líneas y proponer un método basado exclusivamente en criterios perceptuales.

Con el método perceptual que proponemos no pretendemos determinar el mejor ajuste geométrico del trazo a una línea recta. Entendemos que el mejor ajuste desde el punto de vista perceptual es el segmento obtenido al unir los dos puntos finales del trazo, ya que éstos son los que aportan al observador información relevante para determinar el modo en el que el

trazo interactúa con otros trazos adyacentes (principio de cierre de la Gestalt). Por lo tanto, lo que tratamos de determinar es si el trazo representa una línea recta o no, y no qué línea recta representa.

En los siguientes apartados se describe la evolución del trabajo, en el 3.2.1 se describen dos experimentos piloto llevados a cabo para conocer qué parámetros geométricos influyen en la percepción de los humanos, y compararlos con los resultados de algoritmos existentes, además conocidos los puntos débiles de éstos, se propone un nuevo algoritmo que devuelve resultados que coinciden bastante bien con los resultados experimentales. En el apartado 3.2.2 se reconsidera el problema perceptual y se describen nuevos experimentos piloto llevados a cabo para descubrir patrones perceptuales. En el apartado 3.2.3, se describe un algoritmo basado en criterios perceptuales dirigido a evaluar la probabilidad en la percepción automática de líneas rectas. Por último en el apartado 3.2.4, se evalúa el método midiendo su habilidad para producir la misma interpretación que los humanos.

3.2.1 Geometría del ajuste de líneas rectas

En un primer estudio realizado durante el periodo de investigación, y que da lugar al trabajo [PCV13a], se plantearon dos objetivos, por un lado estudiar el modo en que los humanos perciben e interpretan trazos como segmentos de líneas rectas, y por otro tratar de descubrir que métricas geométricas se pueden emplear y adaptar para replicar el comportamiento observado en el estudio previo.

Para conocer la percepción humana, se plantearon las siguientes hipótesis que se trataron de validar o rechazar mediante el método experimental. En todos los casos, el criterio para finalizar la recolección de datos fue recoger el máximo de cuestionarios en un periodo de tiempo determinado (un día lectivo escolar), siempre que se alcanzaran al menos 20 respuestas de cada ejemplo. Las hipótesis son:

1. La percepción humana correlaciona bien con varios parámetros que pueden medirse: linealidad, tolerancia, oblicuidad y relación señal/entrada de NHT.
2. Las direcciones no oblicuas (vertical y horizontal) se perciben de un modo similar.
3. Las direcciones vertical y horizontal se consideran direcciones especiales capaces de facilitar en los seres humanos la percepción de rectitud más que lo hacen otras direcciones o inclinaciones.

3.2.1.1 Experimento #1 para líneas rectas

Para validar la primera hipótesis se planteó el siguiente experimento. En primer lugar, se seleccionaron 30 trazos entre los que se incluían trazos de diferente naturaleza y longitud (Figura 6). Cabe destacar que cada trazo consiste en una lista de puntos o nodos muestreados, y almacenados por sus coordenadas cartesianas x e y (Figura 5). Algunas características de dichos trazos se detallan en el caso 1 del Anexo I.

Algunos de los trazos representaban líneas horizontales o verticales (con grados de exactitud diferentes), otros eran claramente inclinados. Unos poseían curvaturas apreciables, mientras que en otros las curvaturas eran ligeras e incluso imperceptibles.

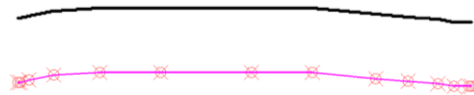


Figura 5. Ejemplo de un trazo y su representación a partir de los puntos o nodos muestreados

Algunos de los trazos representaban líneas horizontales o verticales (con grados de exactitud diferentes), otros eran claramente inclinados. Unos poseían curvaturas apreciables, mientras que en otros las curvaturas eran ligeras e incluso imperceptibles.

Como punto de partida supusimos que algunos de los factores geométricos que podrían influir en la percepción de los trazos como líneas rectas serían: la longitud del trazo, la oblicuidad y las irregularidades del trazado como las ondulaciones, oscilaciones y grandes radios de curvatura.

Las descripciones del cuestionario y de la muestra de sujetos encuestados se detallan en el caso 1 del Anexo 1.

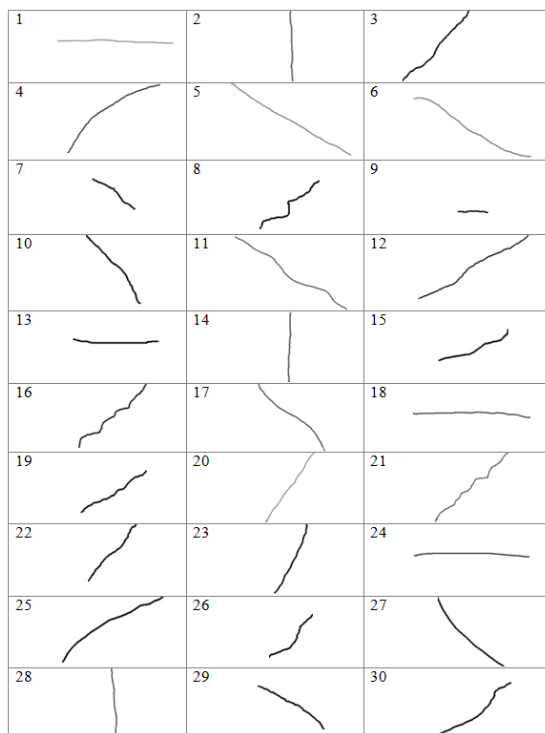


Figura 6. Colección de ejemplos para el experimento #1 de líneas rectas

Ej	Sí (%)	No (%)	? (%)	Long trazo	Lin (%)	Obliq	Tol (%)
1	97		3	782	99.66	0.024	1.93
2	97	3		311	98.39	0.033	1.96
5	97	3		904	93.06	0.685	2.62
24	94	6		366	99.65	0.019	3.30
14	91	9		260	97.23	0.038	1.59
20	91	9		619	94.89	0.793	2.56
28	91	9		262	94.97	0.100	3.63
13	78	19	3	167	96.79	0.012	3.70
9	76	21	3	597	93.93	0.015	5.36
18	75	25		410	96.92	0.043	3.79
22	47	44	9	170	91.83	0.925	5.77
23	41	47	1	171	97.58	0.566	6.59
3	39	52	9	214	94.58	0.948	6.44
21	28	72		540	87.60	0.926	6.57
12	25	59	1	375	94.92	0.677	5.07
19	25	69	6	175	86.61	0.701	5.96
29	22	69	9	176	89.15	0.732	8.28
10	18	73	9	183	93.58	0.864	8.88
27	16	75	9	203	97.76	0.994	9.64
25	9	81	9	244	96.79	0.706	10.13
7	9	82	9	120	83.80	0.829	11.00
17	6	84	9	394	95.79	0.933	8.49
15	6	91	3	163	91.07	0.496	10.14
11	3	94	3	1801	94.58	0.726	6.46
30		94	6	197	94.49	0.846	10.81
4		97	3	413	92.24	0.805	13.16
6		97	3	767	93.49	0.691	7.42
8		97	3	187	79.45	0.846	14.09
16		100		286	82.06	0.897	8.55
26		100		137	85.23	0.927	16.52

Tabla 1 Resultados del experimento #1

Tras la distribución de los cuestionarios se recopilaron más de 30 respuestas de cada ejemplo. Los resultados de la Tabla1 reflejan el porcentaje de sujetos que percibieron cada ejemplo como una línea recta (Sí%), como no recta (No%), y el porcentaje de sujetos que dudaron de su respuesta (?%). Para cada ejemplo también se ha incluido la longitud del trazo, la *linealidad* (obtenida a partir del algoritmo de Longitud de cuerda explicado posteriormente en el apartado 3.2.1.3), la *oblicuidad* y la *tolerancia*.

La *oblicuidad* es un parámetro que mide el grado de inclinación de un trazo. Está relacionado con la verificación de la tercera hipótesis según la cual, la inclinación del trazo influye en la percepción de la rectitud. Como la inclinación de una recta no se puede correlacionar directamente porque el ángulo que la mide no tiene un comportamiento lineal, se definió el parámetro de oblicuidad como el valor normalizado (limitado al primer cuadrante) entre el rango de valor 0 (líneas horizontales o verticales), y valor 1 (inclinación de 45°). La oblicuidad se calcula a partir de la inclinación o pendiente de la recta de regresión ortogonal a la que se ajusta cada trazo (tomando para ello valores que oscilan entre -180° y 180°) según el siguiente pseudocódigo:

- Si $pendiente \in \{-180^\circ \dots 0^\circ\}$, entonces $pendiente \leftarrow 180 + pendiente$;
- Si $pendiente \in \{90^\circ \dots 180^\circ\}$, entonces $pendiente \leftarrow 180 - pendiente$;
- Si $pendiente \in \{45^\circ \dots 90^\circ\}$, entonces $pendiente \leftarrow 90 - pendiente$;
- $Oblicuidad \leftarrow pendiente/45$;

La *tolerancia* no requiere más explicación, porque es un concepto bien conocido en Dimensionamiento Geométrico y Tolerancia (GD&T, por sus siglas en inglés), donde se usa para medir la "rectitud" de una línea (ISO 1101-1983).

La forma de medir la tolerancia que se ha empleado se basa en que, conocido el rectángulo delimitador (Figura 7) de menor área del trazo, se define:

- *Rango-X* como la longitud del lado casi paralelo a la línea.
- *Rango-Y* como la longitud del lado casi perpendicular a la línea.
- *Tolerancia absoluta* de rectitud es el valor de rango-Y absoluto.
- *Tolerancia relativa* de rectitud es la relación entre rango-Y/rango-X.

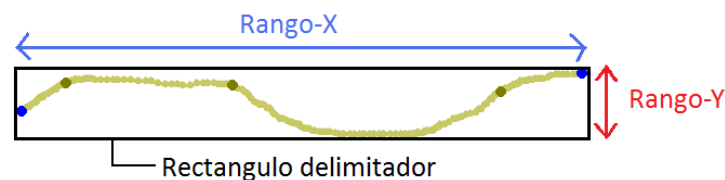


Figura 7. Ejemplo de trazo, su rectángulo delimitador y los valores del rango-x y rango-y

Cuanto más pequeño es el valor de estos parámetros, más recto se considera el trazo. Sin embargo, también hay que destacar que estos parámetros no distinguen si la falta de rectitud es debida a oscilaciones u ondulaciones (irregularidades de alta o baja frecuencia respectivamente).

Mientras que la *tolerancia* es un parámetro bien conocido por los ingenieros mecánicos, en el campo de la visión artificial el parámetro más común es la denominada *Distancia de Hausdorff* (*HD*, por sus siglas en inglés), definida como la máxima mínima distancia entre dos conjuntos de puntos. Huttenlocher y otros [HKR93] aplicaron este concepto para comparar dos imágenes representadas por nubes de puntos.

Para ilustrar el concepto, la Figura 8 (a) muestra para cada punto del triángulo A la distancia al punto más cercano del triángulo B. El máximo de estas distancias mínimas (entre los puntos A2 y B1) se destacan y se consideran como la *distancia de Hausdorff* directa de A a B. La Figura 8 (b) muestra la *distancia de Hausdorff* inversa, o la *distancia de Hausdorff* directa de B a A

(entre los puntos B2 y A3), que no necesariamente ha de ser la misma (y de hecho en este caso no lo es). La Figura 8 (c) muestra únicamente las dos *distancias de Hausdorff* directas, la *distancia de Hausdorff* que buscamos entonces es la mayor de las dos (en este caso la distancia entre A2 y B1).

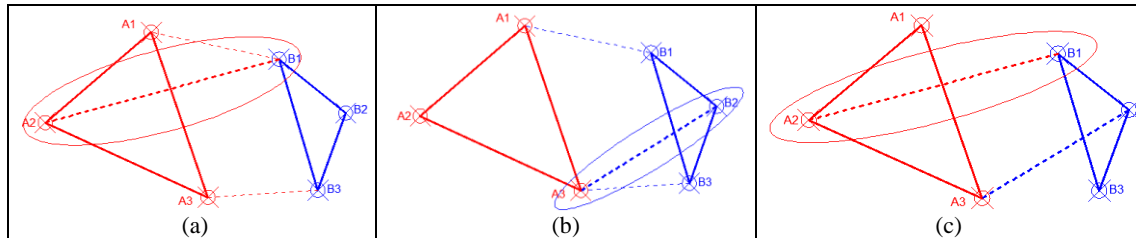


Figura 8. Representación de la distancia de Hausdorff

Más formalmente, la *distancia de Hausdorff* entre dos conjuntos $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ y $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ es una función máximo, definida como:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

donde $h(A, B)$ es la distancia de Hausdorff directa de A a B, y se define como:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \{ \min_{b \in B} d(a, b) \} \quad (2)$$

donde $d(a, b)$ es la distancia Euclídea entre dos puntos.

La *distancia de Hausdorff* es sensible a la presencia de valores atípicos, tales como ruidos y oclusiones. Por ello, en la bibliografía consultada se han encontrado diferentes propuestas de *distancias de Hausdorff* modificadas. Dubuisson and Jain [DJ94] investigaron 24 formas diferentes de la *distancia de Hausdorff* y recomendaron la medida de la *distancia de Hausdorff* modificada (MHD) que ofrecía el mejor rendimiento, y se define como:

$$h(A, B) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{a_i \in A} \min_{b_j \in B} \|a_i - b_j\| \quad (3)$$

donde “p” es la cantidad de puntos en el conjunto A. La definición de función máximo para MHD es la misma que la ecuación (1).

Por lo tanto aplicamos las funciones *HD* y *MHD* para comparar un trazo con la recta de regresión obtenida para dicho trazo. Las ventajas de trabajar con la recta de regresión es que podemos aplicar cualquier rotación al trazo, y la recta de regresión sufrirá la misma rotación, así que podemos decir que esta medida es independiente de la orientación del trazo.

Se observa que el parámetro que definimos anteriormente como *tolerancia*, calculado como (rango-Y/rango-X), está relacionado con la *distancia de Hausdorff*. *HD* mide la distancia más larga desde un punto del trazo a la línea de regresión, y el parámetro de la *tolerancia* mide el mínimo rectángulo delimitador que contiene a todos los puntos del trazo.

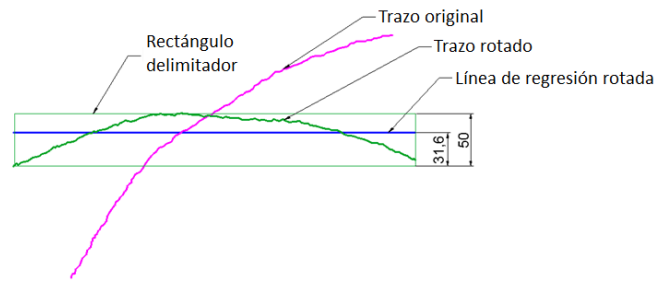


Figura 9. Rectángulo delimitador y recta de regresión

La Figura 9 muestra un trazo original (en color magenta), el mismo trazo girado (en verde) y la recta de regresión rotada hasta la horizontal. Como se puede ver, la recta de regresión no necesariamente coincide con el eje de simetría del rectángulo delimitador; la *HD* general es la distancia del lado más distante del rectángulo delimitador.

Para comparar los diferentes parámetros que miden la diferencia entre los trazos y una línea recta entre ellos y también con los resultados del experimento, se calcularon los parámetros de *tolerancia*, *HD* y *MHD* para cada ejemplo y se aplicó un análisis de correlación de Pearson (Tabla 2).

		Long trazo	Lineal (%)	Obli	Tol (rel)	Tol (abs)	HD	HD (rel)	MHD	MHD (rel)	Sí (%)
Longitud	Pear	1	.198	.018	-.274	.824**	.824**	-.235	.689**	-.361	.053
Trazo	Sig.		.295	.926	.143	.000	.000	.212	.000	.050	.782
Linealidad (%)	Pear	.198	1	-.527**	-.609**	-.029	-.029	-.527**	.023	-.326	.552**
	Sig.	.295		.003	.000	.879	.881	.003	.903	.078	.002
Oblicuidad	Pear	.018	-.527**	1	.647**	.316	.288	.607**	.358	.559**	-.760**
	Sig.	.926	.003		.000	.088	.123	.000	.052	.001	.000
Tol (rel)	Pear	-.274	-.609**	.647**	1	.217	.201	.976**	.326	.929**	-.856**
	Sig.	.143	.000	.000		.25	.286	.000	.079	.000	.000
Tol (abs)	Pear	.824**	-.029	.316	.217	1	.995**	.307	.938**	.155	-.446*
	Sig.	.000	.879	.088	.25		.000	.099	.000	.415	.013
HD	Pear	.824**	-.029	.288	.201	.995**	1	.276	.941**	.119	-.426*
	Sig.	.000	.881	.123	.286	.000		.140	.000	.530	.019
HD rel	Pear	-.235	-.527**	.607**	.976**	.307	.276	1	.407*	.932**	-.847**
	Sig.	.212	.003	.000	.000	.099	.140		.026	.000	.000
MHD	Pear	.689**	.023	.358	.326	.938**	.941**	.407*	1	.330	-.513**
	Sig.	.000	.903	.052	.079	.000	.000	.026		.075	.004
MHD rel	Pear	-.361	-.326	.559**	.929**	.155	.119	.932**	.330	1	-.773**
	Sig.	.050	.078	.001	.000	.415	.530	.000	.075		.000
Sí (%)	Pear	.052	.552**	-.760**	-.856**	-.446*	-.426*	-.847**	-.513**	-.773**	1
	Sig.	.785	.002	.000	.000	.013	.019	.000	.004	.000	

Tabla 2 Correlación de Pearson entre parámetros de tolerancia y distancia de Hausdorff

Comparando la correlación entre la *tolerancia relativa* y la *absoluta* con los resultados (Sí%) obtenidos en la Tabla 1, observamos que la *tolerancia relativa* correlaciona ligeramente mejor con la percepción humana (-0.856) que la *tolerancia absoluta* (-0.446), por esta razón, a partir de ahora emplearemos únicamente la *tolerancia relativa* que recibirá el nombre abreviado de *Tolerancia (Tol)*, de hecho éste es el parámetro de tolerancia representado en la Tabla 1.

La correlación entre los valores relativos de *Tolerancia*, *HD*, *MHD* y la percepción (Sí%) humana resulta ser alta. Como la mejor correlación se da entre (Sí%) y *Tol* (-0.856), y debido a que éste tiene un significado geométrico evidente para los ingenieros y diseñadores, que trabajan con

tolerancias, a partir de ahora emplearemos este parámetro para medir la distorsión de la rectitud de los trazos.

Aunque la Tabla 1 demuestra que ningún ejemplo fue percibido al 100% como una línea recta, los ejemplos (1, 2, 5, 24, 14, 20 y 28) fueron percibidos como tales por más del 90% de los encuestados. De ahí, podemos concluir que cuando la *tolerancia* posee un valor bajo, el grado de percepción de rectitud es alto.

Los resultados de la Tabla 2 también muestran que la longitud de los trazos no afecta a la percepción de rectitud, ya que la correlación entre “Sí (%)” y la longitud del trazo no es significativa (0.053). Sin embargo, la oblicuidad parece presentar cierta influencia sobre la percepción, resultado que puede constatar las hipótesis 2 y 3. Probar estas hipótesis requiere realizar un experimento específico que se describe en el siguiente apartado.

3.2.1.2 Experimento #2 para líneas rectas

Para estudiar la influencia que la oblicuidad de los trazos tiene sobre la percepción humana, y validar o rechazar las hipótesis de trabajo 2 y 3, se realizó el siguiente experimento. Se crearon 72 ejemplos que incluían 6 familias diferentes de trazos. Cada familia se generó al rotar el trazo original horizontal. El trazo horizontal de cada familia se muestra en la Figura 10, y los trazos derivados de cada familia se muestran en el caso 2 del Anexo I.

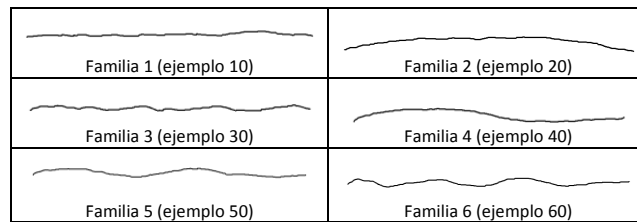


Figura 10. Trazos que definen cada familia de líneas

Cada trazo original se rotó de manera que la recta de regresión que mejor se ajusta al trazo se orientó según los ángulos listados en la Tabla 3 (cada familia, por lo tanto, contiene 12 trazos). Las descripciones del cuestionario y de la muestra de sujetos encuestados se detallan en el caso 2 del Anexo 1.

IdAng	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Angles	0°	9°	27°	45°	54°	72°	90°	99°	117°	135°	144°	162°
Oblicuidad	0	0.2	0.6	1	0.8	0.4	0	0.2	0.6	1	0.8	0.4

Tabla 3 Valores de los ángulos utilizados en el experimento

Tras la distribución de los cuestionarios, se obtuvieron 48 respuestas de cada ejemplo, hecho que estadísticamente maximiza la potencia del método. Además el diseño del cuestionario aseguró que las observaciones fueran independientes (diferentes cuestionarios con diferentes conjuntos de trazos seleccionados aleatoriamente)

Para verificar la segunda hipótesis—según la cual en las direcciones vertical y horizontal se percibe la rectitud de manera similar—se analizaron mediante un análisis ANOVA los ejemplos correspondientes a los ángulos con IdAng= 1 (dirección horizontal) e IdAng= 7 (dirección vertical), y se determinó que dicha hipótesis es cierta, y por lo tanto no existen diferencias significativas en la percepción de rectitud de líneas horizontales y verticales.

Para verificar la tercera hipótesis—según la cual las direcciones vertical y horizontal evocan en los humanos más fácilmente la percepción de rectitud que en otras direcciones—se aplicó otra ANOVA, tomando como factores principales la familia a la que pertenece el trazo y la oblicuidad. El resultado confirma que ambos factores son influyentes en la percepción de la rectitud, pero el factor oblicuidad resulta tener un peso menos importante que el factor familia, esto significa que hay factores que caracterizan a las familias (algunos de ellos serán los que posteriormente se calcularán a partir de algoritmos geométricos) que influirán con mayor peso en la percepción de los humanos que el factor oblicuidad. Para conocer más detalles sobre los resultados de los análisis ANOVA se remite al lector al caso 2 del Anexo I.

Después del análisis ANOVA, decidimos realizar un análisis Post hoc, para tratar de comprobar si existe en los datos observados algún patrón que a priori no especificamos en el experimento. Para ello realizamos un análisis Post hoc Tukey [DV99], en él se agrupan los diferentes grados de oblicuidad en función de la similitud de las puntuaciones medias obtenidas en las observaciones (Tabla 4), y concluimos que efectivamente la inclinación parece influir sobre la percepción de la rectitud, pero contrariamente a nuestras expectativas, los sujetos parecen ser más estrictos con la “rectitud” en líneas cercanas a la vertical o la horizontal. Y son menos exigentes cuando las líneas representan una inclinación cercana a 45° o 135°.

Puntuación de rectitud
Tukey B^{a,b}

Oblicuidad	N	Subconjunto		
		1	2	3
0,2	288	2.54		
0,4	288	2.56		
0,0	288		2.76	
0,6	288		2.80	
0,8	288		2.88	2.88
1,0	288			3.01

La tabla muestra las medias de los subconjuntos de grupos homogéneos.
a. Emplea el tamaño simple de la media armónica = 288.000
b. Alfa = 0.05

Tabla 4 Análisis Post-hoc, grupos homogéneos

3.2.1.3 Métodos geométricos

A continuación y para validar las hipótesis, revisamos dos algoritmos ya existentes de ajuste de líneas rectas: por un lado el algoritmo más sencillo y rápido que compara las longitudes de cuerda, y por otro lado el más popular que emplea la transformada de Hough. Puesto que nuestra idea es utilizar un algoritmo que replique la percepción de los humanos, se comparan ambos métodos con los resultados obtenidos en el experimento #1. De esta manera podemos verificar qué algoritmo es el que muestra un comportamiento más similar al observado en los humanos, o si son susceptibles de ser adaptados para replicar lo más fielmente posible la percepción humana.

Algoritmo de longitud de cuerda

El modo más sencillo para determinar si un trazo representa un línea recta es evaluando la *linealidad* del trazo. Ésta se define como la relación entre la distancia entre los puntos extremos del trazo (cuerda del trazo) y la suma de las distancias entre los puntos muestreados que representan dicho trazo.

Para calcular este parámetro empleamos el *algoritmo de Longitud de Cuerda* empleado por Qin y otros [QWJ01], para identificar líneas rectas a partir de la entrada de datos de un polígono. Este algoritmo se seleccionó por su fácil implementación y su bajo coste computacional.

El valor de la *linealidad* varía entre 0 y 1. De manera que una línea estrictamente recta tiene un valor de 1, es decir cuando la longitud del trazo coincide con la longitud de la cuerda que une los puntos extremos del trazo. En los bocetos hechos a manoalzada raramente aparece un trazo perfectamente recto, por esta razón el algoritmo identifica un trazo como recto cuando la linealidad es superior a cierto valor umbral.

Recta de regresión Ortogonal

Este método geométrico es el que comúnmente se emplea para ajustar un conjunto de datos a una línea recta, de manera que se minimice la suma cuadrática del error. En nuestro caso, hemos considerado este método sólo para caracterizar geoméricamente los trazos de los experimentos en casos particulares, por ejemplo en la obtención de la pendiente del trazo o la rotación del mismo; y no como un método de ajuste en sí. Por el tipo de datos con los que trabajamos, entendemos que es más adecuado emplear la regresión ortogonal a la regresión lineal simple.

En la regresión lineal simple, generalmente se asume que en un conjunto de pares de datos coordinados (x, y) , la variable independiente siempre toma un valor correcto, y por tanto, que todo el error del valor muestreado estará contenido en la variable dependiente. El problema se reduce entonces en encontrar aquella recta que minimice la suma de los cuadrados de las distancias verticales de cada par coordinado a la línea de ajuste (Figura 11 izquierda).

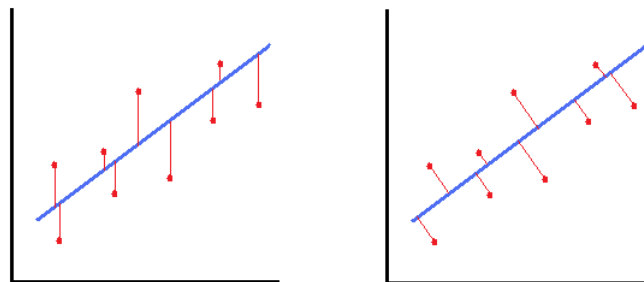


Figura 11. *Regresión lineal simple (izquierda), regresión lineal ortogonal (derecha)*

Pero ¿qué ocurre cuando no existe la certeza de que la variable independiente tenga unos valores correctos? La regresión ortogonal, que minimiza la suma cuadrática de las distancias ortogonales de cada punto del trazo a la línea de ajuste, se utiliza, como ya se ha comentado, para obtener el trazo rotado (de manera que la línea de regresión quede horizontal, tal y como se muestra en la Figura 9). El problema de regresión ortogonal se simplificó transformándolo en una regresión lineal simple tras adaptarlo a la idea de Brown de la búsqueda de las principales direcciones de los puntos de datos [Bro12] de la siguiente manera:

- Dada una nube de puntos, podemos encontrar las direcciones principales de la nube, de manera que una de ellas corresponderá a la dirección de la recta de regresión ortogonal.

- Si esa nube de puntos y su recta de regresión ortogonal se rotaran de tal manera que las distancias perpendiculares coincidieran con las verticales, nuestro problema se reduciría a encontrar el ángulo que minimice la suma cuadrática de las distancias.

En este caso, cada punto de la nube de puntos (x, y) se rotará hasta (x', y') un ángulo q :

$$x' = x \cdot \cos q + y \cdot \operatorname{sen} q \quad (4)$$

$$y' = -x \cdot \operatorname{sen} q + y \cdot \cos q \quad (5)$$

Para un determinado ángulo fijo, la suma cuadrática de las alturas verticales de los “n” puntos transformados es:

$$S = \operatorname{sum}(y'^2) = \sum_n y'^2 \quad (6)$$

Luego el problema de minimización consistirá en encontrar la derivada de la expresión de y' respecto del ángulo q (será el ángulo de la recta de regresión) y hallar las raíces de esta derivada.

Desarrollando la derivada, se llega a la expresión siguiente:

$$\tan^2 q + \lambda \cdot \tan q - 1 = 0 \quad (7)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{\sum[(x - \operatorname{media}(x))^2 - (y - \operatorname{media}(y))^2]}{\sum[(x - \operatorname{media}(x)) \cdot (y - \operatorname{media}(y))]} \quad (8)$$

La expresión de λ sólo tiene indeterminaciones cuando se anula el divisor, esto es, cuando nos encontramos con trazos delineados perfectamente en las direcciones vertical u horizontal.

Luego despejando de (8) el valor de q , obtenemos:

$$q = \tan^{-1} \left(-\lambda \pm \frac{\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2} \right) \quad (9)$$

Las raíces de esta ecuación corresponden a los ángulos de las direcciones principales, en las que la dispersión es máxima y mínima. El último paso consiste en seleccionar el ángulo que produce la mínima suma cuadrática de distancias.

Para ello basta calcular la suma de las distancias perpendiculares de cada punto a cada una de las rectas que pasan por el centroide del conjunto de puntos y tienen las pendientes de las direcciones principales.

Si tomamos como origen de coordenadas el centroide. La suma de distancias “d” se calcula como:

$$d = \frac{\sum |\tan q \cdot [(x_i - \operatorname{media}(x)) - (y_i - \operatorname{media}(y))]|}{\sqrt{\tan^2 q + 1}} \quad (10)$$

Tal como ya se había dicho, una de las dos direcciones principales de la nube corresponderá a la dirección de la recta de regresión ortogonal. Por tanto la recta de regresión es aquella que de cómo resultado un valor de “d” más pequeño.

Transformada Estándar de Hough

La Transformada Estándar de Hough (SHT, por sus siglas en inglés) es un algoritmo ampliamente utilizado como solución de los problemas de detección de líneas en el procesamiento de imágenes y visión artificial. Cuando SHT se emplea en imágenes digitalizadas, la entrada de información es el valor de escala de grises de cada píxel de la imagen. En nuestro caso, la entrada de información es una lista de puntos o nodos muestreado, por lo tanto antes de cualquier análisis debemos adaptar el algoritmo a nuestra información de entrada. Para encontrar más información sobre variantes de la Transformada de Hough y sus aplicaciones para detectar planos en 3D, se puede consultar el estudio y la evaluación realizada por Borrmann y otros [BELN11].

El algoritmo representa una línea como una ecuación lineal en forma normal, donde la normal para una línea dada es el segmento más corto entre dicha línea y el origen (Figura 12 izquierda):

$$\rho = x \cdot \cos \vartheta + y \cdot \sin \vartheta \quad (11)$$

En esta expresión, theta (ϑ) representa el ángulo de inclinación de la normal y rho (ρ) es la longitud de la normal. Con estos parámetros fijados, x e y representan las coordenadas cartesianas de cada punto que pertenece a esta línea recta.

Nuestra intención es determinar si un conjunto de puntos representan una línea recta. Usando la forma normal, podemos representar cada punto del espacio (x, y) como una curva senoidal en el espacio (ρ, ϑ). Aplicando este procedimiento a cada punto, obtenemos un conjunto de curvas senoidales.

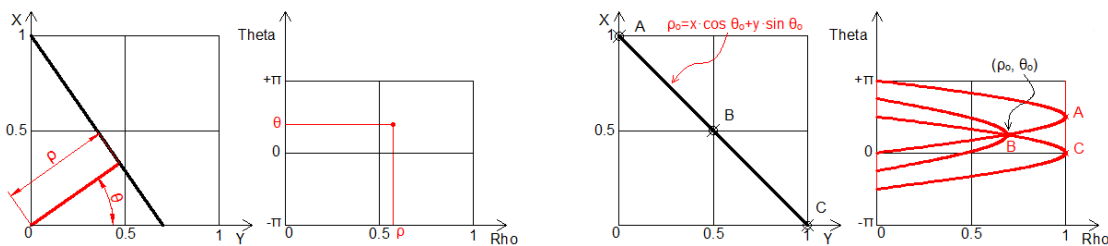


Figura 12. (Izquierda) línea paramétrica y representación de Hough de un punto. (Derecha) conjunto de puntos colineales y su representación de Hough (curvas senoidales)

Todas las curvas senoidales que intersectan en un punto en particular del espacio (ρ, ϑ) representan puntos que pertenecen a la misma línea recta. El algoritmo propuesto por Lee [Lee06] discretiza el espacio (ρ, ϑ) en un número finito de celdas, empleando una matriz de acumulación ρ - ϑ donde cada celda es un contador que se incrementa siempre que una curva senoidal pasa por ella.

En la matriz, ϑ toma valores entre 0° y 180° con una fila de celdas por grado. El rango de ρ se determina duplicando la longitud de la diagonal que enmarca al trazo input, y se le suma una unidad para obtener un valor impar.

$$\rho = 2 \cdot \sqrt{xrange^2 + yrange^2} + 1 \quad (12)$$

El principal parámetro que podemos emplear para clasificar el trazo es la relación señal/entrada (STIR, del inglés signal-to-input ratio), que definimos como la relación entre el mayor valor acumulado en cualquier celda de la matriz ρ - ϑ y el número de puntos muestreados del trazo. Para determinar qué trazos representan una línea recta, debemos determinar un valor umbral.

La ventaja conocida del algoritmo SHT es su robustez. Sin embargo, el algoritmo también tiene puntos débiles. Primero, como trabajamos con trazos hechos a mano alzada, que no son líneas rectas ideales, necesitamos algo de flexibilidad para tolerar inexactitudes. Además, la exactitud de los resultados depende de la longitud del trazo: cuanto más largo sea el trazo, mayor será el valor de ρ , y mayor será la exactitud. En segundo lugar, la inclinación del trazo afecta al valor de ρ , ya que las variaciones de los parámetros $xrange$ e $yrange$ (ecuación 12) cambian con la variación de la inclinación, por lo tanto el mismo trazo se evalúa de manera diferente cuando cambia su inclinación. Por último, el algoritmo requiere un coste computacional mayor que el *algoritmo de Longitud de cuerda*, e incrementar la precisión requiere un mayor número de columnas en la matriz ρ - ϑ , incrementando aún más el coste computacional.

3.2.1.4 Comparación de parámetros geométricos con la percepción humana

Para comparar los resultados de los parámetros geométricos estudiados con los resultados obtenidos de la percepción humana a partir del experimento #1, presentamos la Tabla 5, donde las cuatro primeras columnas reflejan los porcentajes de percepción del experimento #1 (presentados en la Tabla 1 del apartado 3.2.1.1), el resto de columnas muestran la siguiente información:

- Longitud del trazo, medido como la distancia entre sus puntos finales.
- La linealidad (lin%).
- El valor STIR del algoritmo SHT

La tabla se subdivide en tres grupos: (a) ejemplos considerados como líneas rectas por los sujetos encuestados en más del 90% de los casos, (b) ejemplos considerados como líneas rectas del 50% al 90% de los casos, y (c) ejemplos considerados como líneas rectas en menos del 50% de los casos.

Si para el parámetro de *linealidad* tomamos el valor umbral definido por Qin y otros [QWJ01] del 95% para considerar los trazos como líneas rectas, vemos que éste resulta ser un valor en concuerda con el grupo medio de ejemplos de la Tabla 5. Sin embargo, vemos que también se producen varios casos de falsos positivos y negativos. Lo más preocupante es comprobar que los falsos positivos ocurren sistemáticamente en aquellos ejemplos en los que el trazo representa curvas suavizadas con una gran curvatura (trazos con ondulaciones y sin oscilaciones). Éste es un claro ejemplo de cómo un método puede ser válido desde el punto de vista de la geometría pero sistemáticamente erróneo desde el punto de vista de la psicología.

Tales métodos son los que debemos evitar si queremos aplicar métodos con criterios perceptuales.

Ejemplo	%Sí	%No	%?	Long trazo	Lin (%)	SHT STIR%
1	97		3	782	99.66	28.30
2	97	3		311	98.39	30.00
5	97	3		904	93.06	10.69
24	94	6		366	99.65	46.67
14	91	9		260	97.23	33.75
20	91	9		619	94.89	12.89
28	91	9		262	94.97	28.79
13	78	19	3	167	96.79	54.46
9	76	21	3	597	93.93	52.08
18	75	25		410	96.92	19.19
22	47	44	9	170	91.83	27.63
23	41	47	1	171	97.58	26.09
3	39	52	9	214	94.58	22.39
21	28	72		540	87.60	11.67
12	25	59	1	375	94.92	17.27
19	25	69	6	175	86.61	22.31
29	22	69	9	176	89.15	24.24
10	18	73	9	183	93.58	27.40
27	16	75	9	203	97.76	33.33
25	9	81	9	244	96.79	26.09
7	9	82	9	120	83.80	24.73
17	6	84	9	394	95.79	18.67
15	6	91	3	163	91.07	19.30
11	3	94	3	1801	94.58	6.20
30		94	6	197	94.49	23.68
4		97	3	413	92.24	18.33
6		97	3	767	93.49	17.65
8		97	3	187	79.45	12.84
16		100		286	82.06	22.45
26		100		137	85.23	14.76

Tabla 5 Comparación de los algoritmos con los resultados del experimento #1

Si nos fijamos en los resultados devueltos por el algoritmo SHT, vemos que no es obvio encontrar un valor umbral apropiado que concuerde con la percepción humana. Por ejemplo, si tomamos como valor umbral el 25% se producen dos falsos positivos (ejemplos 5 y 20), y seis falsos negativos (ejemplos 22, 23, 10, 27, 25 y 7), y aumentando el valor umbral al 30%, no se experimenta ninguna mejora significativa, al contrario, el número de falsos negativos aumenta ya que resulta más difícil clasificar un trazo largo como una línea recta. Parece que los falsos resultados dependen de la longitud del trazo—relacionado con la cantidad de puntos o nodos muestreados—que influye en el número de columnas empleadas en el algoritmo, haciendo que el algoritmo varíe su precisión y se vuelva más estricto conforme aumente la longitud del trazo. Por lo tanto podemos concluir que este algoritmo no nos permite obtener una buena estimación de la rectitud del trazo.

Luego podemos concluir que aunque ambos algoritmos coinciden medianamente bien con los resultados obtenidos experimentalmente, la cantidad de falsos positivos y negativos que devuelven nos hace descartar ambos como apropiados para replicar la percepción humana.

3.2.1.5 Definición de métricas

Para evitar las debilidades encontradas en el algoritmo SHT, a continuación proponemos una adaptación al algoritmo: el algoritmo de *Transformada de Hough Normalizada* (NHT), donde la

diferencia respecto a SHT está en cómo se definen los parámetros de la matriz, y en la pre-rotación que se aplica al trazo antes de ser evaluado.

Transformada de Hough Normalizada

En NHT, la discretización de ρ y ϑ están fijados antes de ejecutar el algoritmo, de esta manera el algoritmo no depende del número de puntos del trazo. Además, como paso previo a la aplicación del algoritmo, se rota el trazo de manera que la recta de regresión ortogonal quede horizontal. Esto permite determinar un valor de *tolerancia* fijo, independiente de la longitud, la inclinación y el número de puntos muestreados del trazo. Además de reducir también el tiempo de ejecución.

Para obtener una discretización óptima de la matriz ρ - ϑ se analizaron los valores del parámetro STIR de cada ejemplo del experimento 1 con diferentes versiones del algoritmo:

- Se analizó la influencia del número de filas (es decir, la discretización de ϑ que se corresponde con la fidelidad en la rotación/inclinación), variando este parámetro desde 91° hasta 361° , en intervalos de 30 grados.
- Se analizó la influencia del número de columnas (es decir, la discretización de ρ que corresponde a la fidelidad de la longitud del trazo), variando dicho parámetro desde 31 hasta 1199, en intervalos de 4 unidades.

Observamos que los seres humanos son más determinantes que los algoritmos al evaluar trazos con buena o mala calidad. El algoritmo NHT suele encontrar algún residuo de rectitud cuando los humanos rechazan completamente un trazo por mala calidad, y cuando el tamaño de las celdas de la matriz de acumulación son suficientemente pequeñas, el algoritmo encuentra imperfecciones (rechazando algunos puntos como no alineados) incluso cuando la mayoría de los seres humanos los ignoran y los perciben como líneas de buena calidad.

Como consecuencia, asumimos que la discrepancia entre los humanos y el algoritmo es mayor para los trazos de muy buena y muy mala calidad, que en los casos de trazos de calidad media. Esto significa que los parámetros de ajuste deberían ser diferentes para estos tres rangos. Pero como el umbral para distinguir entre trazos que representan líneas rectas o no rectas pertenece claramente al rango intermedio, se decidió eliminar los trazos de buena y mala calidad y concentrar el análisis en los trazos medianos.

Pero ¿cuáles son los límites entre los rangos de trazos buenos, medianos y malos? Comparando los valores entre NHT STIR y la percepción humana, se comprobó que la mejor coincidencia se daba entre las frecuencias 5% y 95%. De ahí, que los ejemplos 1, 2, 4, 5, 6, 8, 11, 16, 26 y 30 se descartaran para la comparación.

Considerando el resto de ejemplos, se calcularon para cada combinación de filas y columnas, el valor del algoritmo NHT STIR. Los resultados se resumieron con un único parámetro: la diferencia absoluta entre los resultados obtenidos del algoritmo NHT y la percepción de los humanos (%Sí). La Figura 13 y la Figura 14 muestran como este parámetro varía con respecto al número de filas y columnas respectivamente. A menor diferencia, mejor es la correlación entre el valor de STIR y la percepción humana. Por lo tanto, la función mínima nos devuelve la mejor opción para el número de filas y columnas.

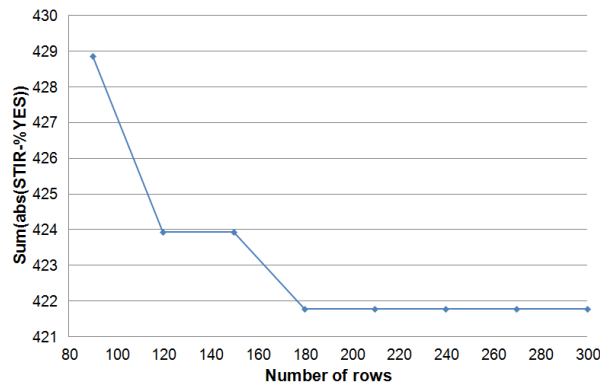


Figura 13. Influencia del número de filas (correspondiente a la discretización de theta) sobre la diferencia entre la percepción humana (%Sí) y el algoritmo NHT (STIR).

Analizando la Figura 13 y la Figura 14, y teniendo en cuenta que un número pequeño de filas y columnas reduce el coste de cálculo, se comprueba que la opción más óptima es la de tomar un valor de 180 filas. El mejor rango para las columnas se encuentra en el rango entre 119 y 146 columnas, recordando además que el número de columnas debe ser impar, seleccionamos un tamaño de matriz de 180x143. Luego en posteriores cálculos de la Transformada de Hough Normalizada, tomamos una matriz $\rho\text{-}\vartheta$ de 180x143.

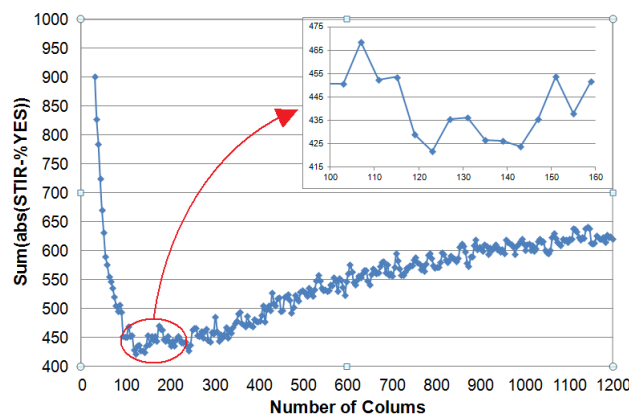


Figura 14. Influencia del número de columnas (correspondiente a la discretización de rho) sobre la diferencia entre la percepción humana (%Sí) y el algoritmo NHT (STIR)

En el apartado 3.2.1.5 se describen los valores umbrales de este parámetro para ajustar el algoritmo NHT a la percepción de los seres humanos.

Coeficiente de oblicuidad y Tolcob

Debido a la influencia que la inclinación de las rectas demostró tener en la percepción de rectitud de las líneas según el experimento 2 del apartado 3.2.1.2, se consideró necesario incluir un parámetro algorítmico que tuviera en cuenta el valor de la oblicuidad. Esta afirmación viene cotejada además por la correlación significativa (-0.760) de la Tabla 2. Como queremos que nuestro algoritmo replique el comportamiento humano, se decidió definir un umbral de tolerancia variable de manera que sea más estricto para orientaciones fáciles de percibir por los humanos, y más flexible para orientaciones de difícil percepción para los humanos.

A la luz de los resultados del análisis ANOVA efectuado en el experimento 2 (Tabla 4) el factor de Oblicuidad podría ser considerado un factor secundario, ya que como indica el factor (F), su

peso es aproximadamente 20 veces menos importante que el peso del factor que define el tipo de trazo (en nuestro caso definido por el valor STIR del algoritmo NHT). Por esta razón, definimos un *Coficiente de Oblicuidad (COB)* que afecta el valor umbral dependiendo de la oblicuidad del trazo.

Según los grupos homogéneos determinados por el análisis post-hoc análisis de la Tabla 4, la gente parece ser más estricta cuando la oblicuidad posee un valor aproximado a 0.2 (es decir, cuando la dirección del trazo es prácticamente horizontal o vertical), y cuando menos estricta es la oblicuidad alcanza el valor de 1 (es decir, cuando el trazo tiene una pendiente de 45°). Según la Tabla 4, la variación perceptual entre el valor máximo (3.01 para una oblicuidad de 0.8) y el mínimo (2.54 cuando la *oblicuidad* es 0.2) es del 9.4%, por lo tanto nuestra propuesta es emplear un coeficiente que afecte el valor umbral hasta un 10% de su valor.

Para obtener un modelo del Coeficiente de Oblicuidad de manera que se comporte como los humanos, se ha empleado una función senoidal donde la variable de entrada (x) es el valor de la oblicuidad del trazo (Figura 15), el valor máximo (para una oblicuidad de 0.2) es de 1.0, y el valor mínimo (para una oblicuidad con valor de 1.0) es igual a 0.9:

$$COB = \frac{\sin\left((x + 0.125) \cdot \frac{4\pi}{3}\right)}{20} + 0.95 \quad (13)$$

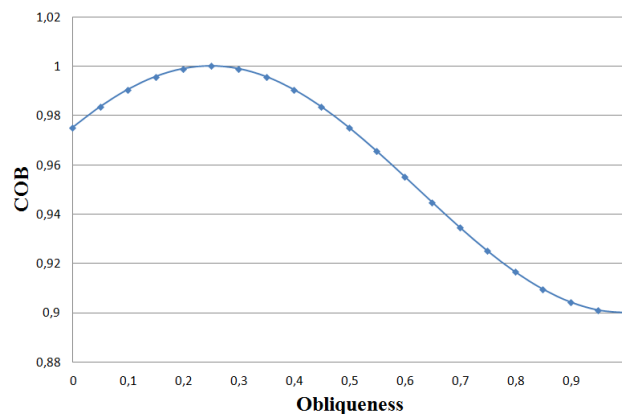


Figura 15. *Coficiente de Oblicuidad*

Debido a que la influencia de este parámetro no era decisiva, al final, COB se combinó con la *tolerancia (Tol)* en un solo parámetro $Tolcob = Tol \cdot COB$. No se aplicó al valor umbral para el resultado STIR del algoritmo NHT, ya que NHT es en sí un algoritmo robusto y la influencia de la dirección del trazo ha sido eliminada por la rotación previa del trazo hasta su horizontal. Tampoco se aplica sobre el algoritmo de Longitud de cuerda porque éste sólo depende de la cuerda y de la longitud del trazo, y por lo tanto es independiente de la orientación del trazo. Y no lo aplicamos sobre SHT porque su resultado ya depende de la orientación del trazo.

Ajuste de las métricas:

A continuación se presenta la 0 en la que se muestra la correlación específica entre los diferentes algoritmos y los resultados de la percepción humana (Sí%). En el caso de la linealidad, tal y como ya habíamos concluido anteriormente, se corrobora que la correlación con la percepción humana es positiva pero insuficientemente fuerte.

Respecto a SHT, éste tiene una correlación débil con la percepción humana de líneas rectas, y si tenemos en cuenta que la evaluación del algoritmo depende de la dirección del trazo, entonces corroboramos la conclusión a la que anteriormente habíamos llegado sobre que este algoritmo no nos proporciona una buena estimación sobre la rectitud de trazos.

El algoritmo NHT es el que mejor valor de correlación tiene (0.827) con un nivel de significación del 1%, por tanto, podemos decir que la adaptación propuesta de la transformada de Hough es el algoritmo que más se alinea a nuestra estrategia perceptual.

		Linealidad	SHT	NHT	Sí%
Linealidad	Pear	1	.370*	.547**	.552**
	Sig.		.044	.002	.002
SHT	Pear	.370*	1	.335	.444*
	Sig.	.044		.070	.014
NHT	Pear	.547**	.335	1	.827**
	Sig.	.002	.070		.000
Sí%	Pear	.552**	.444*	.827**	1
	Sig.	.002	.014	.000	

*. Correlación significativa a nivel 0.05 (bilateral).

** . Correlación significativa a nivel 0.01 (bilateral).

Sample size is N=30

Tabla 6 Correlación de Pearson entre los resultados de los algoritmos y el experimento #1

Ejemplo	%Sí	NHT	Tol (%)	COB	Tolcob
1	97	88.68	1.93	0.024	1.89
2	97	58.33	1.96	0.033	1.92
5	97	61.83	2.62	0.685	2.46
24	94	60.00	3.30	0.019	3.23
14	91	67.50	1.59	0.038	1.56
20	91	71.13	2.56	0.793	2.35
28	91	66.16	3.63	0.100	3.60
13	78	67.33	3.70	0.012	3.62
9	76	52.08	5.36	0.015	5.24
18	75	53.49	3.79	0.043	3.72
22	47	38.16	5.77	0.925	5.21
23	41	47.83	6.59	0.566	6.34
3	39	38.81	6.44	0.948	5.80
21	28	49.42	6.57	0.926	5.93
12	25	43.63	5.07	0.677	4.76
19	25	39.67	5.96	0.701	5.57
29	22	46.46	8.28	0.732	7.69
10	18	46.58	8.88	0.864	8.06
27	16	50.00	9.64	0.994	8.68
25	9	47.83	10.13	0.706	9.45
7	9	35.48	11.00	0.828	10.04
17	6	26.32	8.49	0.933	9.15
15	6	40.00	10.14	0.496	8.28
11	3	51.68	6.46	0.726	6.00
30		37.50	10.81	0.846	11.98
4		43.19	13.16	0.805	6.80
6		29.17	7.42	0.691	13.19
8		32.86	14.09	0.846	7.78
16		39.80	8.55	0.897	14.94
26		36.84	16.52	0.927	9.75

Tabla 7 Comparación de resultados entre NHT, Tol, COB y Tolcob, y el experimento #1

En la Tabla 7 se comparan los resultados del experimento #1 con los resultados del algoritmo NHT y los parámetros Tol, COB y Tolcob.

En el caso del algoritmo NHT, tomando un valor umbral del 52%, comprobamos que no se dan casos de falsos negativos ni falsos positivos. Sin embargo, existen varios casos límite: los ejemplos 9 y 18 están cerca de considerarse falsos negativos, y los ejemplos 27 y 11, como falsos positivos.

Tal y como muestra la Tabla 2, los parámetros de tolerancia y oblicuidad mantienen una alta correlación negativa con la percepción humana (%Sí). Concretamente la tabla refleja unos valores de correlación de (-0.856) y (-0.760) respectivamente con un nivel de significación al 1%. Por lo tanto, la influencia de estos parámetros se puede emplear para introducir una nueva condición que resuelva los casos dudosos que se presentan en NHT. En particular, emplearemos el parámetro *Tolcob*.

A partir de la Tabla 7 fijamos los valores umbrales para los parámetros que mejor replican la percepción humana observada en el experimento 1: STIR-NHT y Tolcob.

Nuestro objetivo es transformar la evaluación determinista obtenida por los encuestados (sí/no) en una cifra de mérito. Por ejemplo, la combinación de las condiciones $STIR > 60$ y $Tolcob < 3,5$ predicen qué trazos serían aceptados por más de un 90% de los seres humanos como líneas rectas. Para trazos de calidad pobre, los rangos no son tan claros, aun así sugerimos los valores de $STIR < 50$ junto con $Tolcob > 7.0$ para predecir los trazos que serían aceptados por aproximadamente el 10% o menos de los humanos como líneas rectas. Usando estos valores umbrales podemos fácilmente clasificar los trazos que representan claramente una línea recta, una línea que no es recta y los que son dudosos.

3.2.2 Percepción del ajuste de líneas rectas

Nuestra intención al clasificar trazos es que los trazos de buena calidad se identifiquen como líneas rectas, los de mala calidad se identifiquen como líneas no rectas, y en los casos intermedios se asigne una figura de mérito. Para ello consideramos que los métodos basados en criterios perceptuales pueden ser más sencillos y con un coste computacional menor que los métodos basados en criterios geométricos. La hipótesis que planteamos es que el reconocimiento por métodos geométricos puede ser reemplazado sin problemas por criterios perceptuales.

En el presente apartado se expone el modo en que se ha llevado a cabo la validación de dicho enfoque. Para ello, se han realizado tres experimentos para validar o rechazar las siguientes hipótesis:

1. Los parámetros *STIR* y *Tolcob* predicen la rectitud de un trazo de manera similar.
2. Los parámetros *STIR* y *Tolcob* generalmente coinciden con la percepción humana.
3. Los seres humanos distinguen entre oscilaciones y ondulaciones.
4. Los seres humanos tienden a percibir mejor la rectitud en trazos ondulados que en trazos oscilantes (zigzagueantes).
5. Una parte significativa de la población parece “filtrar” mentalmente las oscilaciones y perciben la rectitud del trazo “subyacente”.

Los detalles de los tres experimentos se tabulan en el caso 3 del Anexo I, allí se pueden consultar las tablas con todas las respuestas detalladas, sin añadir parámetros estadísticos. Los datos son cuantitativos (incluyen en detalle la ordenación de cada sujeto), pero también pueden leerse de forma cualitativa gracias al diseño visual de la tabla: las variables de imagen [Ber67] se han empleado para destacar las diferencias y excepciones de las respuestas.

3.2.2.1 Experimento #3 para líneas rectas

Al comparar los parámetros *STIR* y *Tolcob* en la Tabla 7 podemos ver que éstos predicen la rectitud de una manera muy similar (hipótesis 1), y que ambos coinciden bastante bien con la percepción humana (hipótesis 2). A continuación, llevamos a cabo un nuevo experimento en el que se compara la rectitud relativa de un nuevo conjunto de doce trazos (Figura 16), con longitudes y orientaciones similares, pero incrementando los valores de *Tolcob* y *STIR*. Los parámetros de estos doce trazos se reflejan en la Tabla 8. También se incluye el parámetro de

tolerancia *Tol* para demostrar que el *coeficiente de oblicuidad (COB)* no afecta de manera significativa en la comparación, ya que en este caso todos los trazos son prácticamente horizontales.


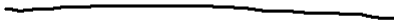
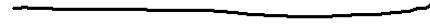






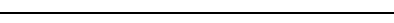


Nº de Trazo	Trazos ordenados de menor a mayor <i>Tol</i>
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Figura 16. Ejemplos de trazos para la evaluación de rectitud relativa

La Tabla 8 confirma que ambos parámetros (*Tolcob* y *STIR*) predicen la rectitud de manera muy similar. Las únicas ligeras diferencias aparecen en el orden de los trazos 5, 6 y 7.

Trazo	<i>Tolcob</i>	<i>Tol</i>	<i>STIR</i>
1	0,54	0,56	82
2	2,12	2,16	71
3	2,56	2,63	64
4	2,64	2,69	64
5	4,20	4,30	56
6	4,28	4,38	66
7	6,07	6,19	65
8	6,39	6,48	47
9	7,44	7,62	43
10	7,82	7,99	32
11	10,92	11,07	32
12	11,55	11,80	28

Tabla 8 Parámetros de los trazos de la evaluación de rectitud relativa

Para obtener estos resultados, se entrevistó a una muestra de 22 sujetos (principalmente profesores y estudiantes de ingeniería, junto con otras personas no relacionadas con materias de ingeniería). Se les proporcionó un conjunto de doce trazos en hojas separadas de tamaño A6 que habían sido convenientemente mezcladas al azar, y se les pidió devolver dichas hojas ordenadas de manera descendente en función de su rectitud. Las secuencias devueltas por los 22 sujetos se muestran en la Tabla 25. Como se puede comprobar, no se detectaron diferencias debidas a los orígenes de los sujetos.

La Tabla 25 muestra todas las respuestas (ver caso 3 del Anexo I). Los datos cuantitativos muestran que el trazo 1 fue percibido por todos los sujetos entrevistados como el trazo más

recto. A partir de la información cualitativa de la tabla, concluimos que hay tres grupos de trazos claramente percibidos (las líneas gruesas de la tabla separan los trazos según se han percibido como buenos, medianos y trazos pobres) y también existen algunas excepciones (números marcados en negrita y color rojo). Esta lectura cualitativa nos confirma que los umbrales sugeridos en el sub-apartado anterior (buenos $<3.5 <$ medianos $< 7.0 <$ pobres), también son válidos para este nuevo conjunto de trazos.

Comparando la Tabla 8 y la Tabla 25, concluimos que el parámetro *Tol* en general coincide con la percepción humana (y también el parámetro *STIR*). Sin embargo existen discrepancias, como en el caso del ejemplo 6, que siempre se percibe más recto que el trazo 5, y el trazo 8 casi siempre se percibe más recto que el trazo 7. La discrepancia más notable entre los seres humanos y el algoritmo se produce en los trazos 5 y 9, ya que con frecuencia son permutados desde el grupo medio al grupo de trazos pobres y viceversa.

En general este experimento valida la idea de que el ajuste de líneas a partir de métricas perceptuales (como la tolerancia, *Tol*) es equivalente al ajuste de líneas a partir de métricas geométricas (por ejemplo, *STIR*). Además, en este caso, la primera requiere muchos menos cálculos que la última.

3.2.2.2 Experimento #4 para líneas rectas



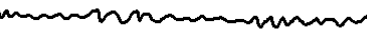


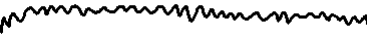



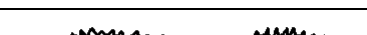
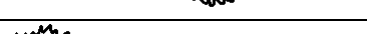

Nº Trazo	Trazos ordenados de menor a mayor <i>Tol</i>
-1	
-2	
-3	
-4	
-5	
-6	
-7	
-8	
-9	
-10	
-11	
-12	

Figura 17. Ejemplos de trazos con oscilaciones para la evaluación de su rectitud relativa

Nuestra hipótesis para las discrepancias descritas al final del experimento anterior es que la gente entiende que los puntos esquinas (puntos del trazo en los que hay un cambio brusco de dirección) quebrantan la rectitud más de lo que lo hacen las ondulaciones (esto implicaría que los humanos distinguen entre ondulaciones y oscilaciones, hipótesis 3). Por eso son más propensos a percibir la rectitud en trazos ondulados de lo que lo perciben en trazos zigzagueantes (hipótesis 4). Además, también planteamos la hipótesis de que las oscilaciones

(de menor amplitud de onda, aunque pueden presentar mayores frecuencias que las ondulaciones) son menos molestas (ya que suelen ser percibidas como no intencionales) que las ondulaciones. Para validar estas hipótesis definimos un nuevo conjunto de trazos, similar al grupo anterior, pero incluyendo oscilaciones. Tal y como se muestran en la Figura 17.

Se encuestaron entonces otros 22 sujetos (de nuevo, principalmente profesores y estudiantes de ingeniería, junto con otras personas que no están relacionadas con materias de ingeniería) para ordenar las hojas de tamaño A6 que contienen los doce trazos con oscilaciones en orden decreciente en función de su rectitud. Las secuencias devueltas por los 22 sujetos se muestran en la Tabla 26 (caso 3 del Anexo I), en donde se ve claramente que los trazos con oscilaciones fueron clasificados por los encuestados de la misma manera que cuando no presentaban oscilaciones. Por lo tanto, confirmamos la hipótesis de que las oscilaciones se perciben independientemente de las ondulaciones. Debido a que, cuando todos los trazos comparados contienen el mismo tipo de oscilaciones, la gente los filtra y los clasifica atendiendo a los puntos esquinas y a las ondulaciones.

3.2.2.3 Experimento #5 para líneas rectas

Para validar o rechazar la hipótesis 5, mezclamos aleatoriamente dos trazos con oscilaciones con diez trazos sin oscilaciones, sin repetir ningún tipo del mismo conjunto. Entrevistamos a 32 nuevos sujetos, divididos en dos grupos. En el primer grupo lanzamos dieciséis cuestionarios diferentes empleando cuatro trazos de los tipos 1, 6, 7 y 11 (ya que habían demostrado ser más estables en su percepción), y dos trazos elegidos aleatoriamente del conjunto de los 12 trazos con oscilaciones. En el segundo grupo, pedimos a otros 16 sujetos (principalmente profesores de ingeniería y estudiantes, junto con personas no relacionadas con materias de ingeniería) que ordenaran la colección de ejemplos mezclados. En este caso, dicha colección estaba compuesta por diez trazos sin oscilaciones y dos trazos con oscilaciones, donde los trazos oscilantes fueron seleccionados de los grupos buenos y regulares (es decir, se excluyeron los trazos del -9 al -12). Los primeros resultados mostraron que entre el 30 y 50% de los sujetos apartaron los dos trazos con oscilaciones y los colocaron al final de la colección ordenada (como por ejemplo, el sujeto 1 de la Tabla 27 en el caso 3 del Anexo I).

En las respuestas observamos que todos los sujetos distinguieron entre oscilaciones y ondulaciones, pero de dos maneras diferentes. Algunos de los sujetos encuestados "separaron" los trazos con oscilaciones debido a su mala calidad geométrica como líneas rectas, mientras que otro grupo de sujetos parecía mentalmente "filtrar" las oscilaciones y evaluar el trazo "subyacente". Esta interpretación se vio reforzada por las consultas que algunos sujetos hicieron (aunque no se les contestó) sobre si debían prestar atención o ignorar la falta de "suavidad", de "lisura" u "horizontalidad" de algunas líneas.

Analizando en más detalle el grupo de sujetos que parecían "suavizar" espontáneamente los trazos con oscilaciones, descubrimos que a pesar del filtrado, no consideraban los trazos oscilantes con tanta rectitud como sus equivalentes suavizados, es decir, que los trazos oscilantes son devaluados en cierto sentido. Existen casos en donde todos los trazos oscilantes, buenos y malos, son situados juntos en la categoría intermedia, peor que los trazos buenos no-oscilantes, pero mejor que los trazos malos no-oscilantes (en vez de reducir el valor asignado a la calidad del trazo, las oscilaciones reducen la habilidad para enjuiciar el trazo).

Para investigar este comportamiento en mayor profundidad, modificamos el experimento, incluyendo únicamente trazos oscilantes de los primeros dos grupos (1 a 8), ya que consideramos que los trazos con oscilaciones del último grupo (9 a 12) no serían evaluados por delante de su equivalente no oscilante (y obviamente no podrían ser situados por detrás de sus equivalentes). Los resultados de este experimento modificado se corresponden con las respuestas de los sujetos enumerados del 17 al 32 en la Tabla 27. Además, como habíamos intuido que los sujetos con más conocimientos en ingeniería (conocimientos como, el ruido de una señal o las imperfecciones de la superficie) parecen ser más propensos a filtrar las oscilaciones, nos inclinamos a seleccionar sujetos con este perfil para la muestra de este experimento. Esto no implica una pérdida de generalidad, ya que en realidad estamos interesados en percibir bocetos tal y como hacen los ingenieros. Aun así, algunos de los sujetos encuestados con conocimientos en ingeniería devolvieron los conjuntos de los trazos divididos. Unos cuantos sujetos más fueron entrevistados hasta que obtuvimos 16 clasificaciones no divididas (del 17 al 32 en la Tabla 27).

Como no se ha podido apreciar una penalización sencilla y sistemática (quizás la muestra es demasiado pequeña para poder cuantificarla), no podemos validar la hipótesis 5. Aun así, podemos concluir que la devaluación existe, y muchos de los encuestados (al menos el 50%, y más en el caso de sujetos con formación en ingenierías) tienden a evaluar la rectitud en los trazos suavizados y después reducen la clasificación de trazos buenos a regulares, o de regulares a malos.

3.2.3 Algoritmo de ajuste de segmentos de recta basado en la percepción

Tal y como se describe en el apartado 2.2.2.1, la mayoría de los métodos de ajuste de una línea recta con parámetros desconocidos a un conjunto de puntos de un trazo, son geométricos, es decir, que están basados en la minimización del error total entre el trazo y la línea ajustada. Estos métodos se caracterizan por tener un coste computacional, y añaden una precisión geométrica innecesaria en la interpretación de bocetos. El nuevo método que describimos en la presente tesis, emula el modo en que la gente percibe trazos como líneas rectas. El método comprende dos etapas: primero calcula un ajuste razonablemente bueno y rápido, y entonces calcula lo bien que el trazo se ajusta a una estrecha banda de tolerancia creada alrededor de la recta ajustada.

El método propuesto comienza por encontrar la línea recta que une los dos puntos extremos del trazo. Éste es el mejor ajuste perceptual, ya que (tal y como expone el principio de cierre de la Gestalt [Boy99]), los puntos finales son los indicios más destacados para determinar la manera en que el trazo interactúa con otros trazos vecinos. El trazo no está aislado, sino que pertenece al boceto, la relación perceptual con sus trazos vecinos es más importante que su propia rectitud geométrica, posición u orientación. Por ejemplo en la Figura 18, la gente percibe el trazo 0 como conectado a los trazos 1 y 3, (principio de clausura) y paralelo al trazo 2, a pesar de la posición y orientación de cualquier ajuste geométrico, o incluso de la calidad del boceto (bueno en la Figura 18 izquierda, y pobre en la Figura 18 derecha).

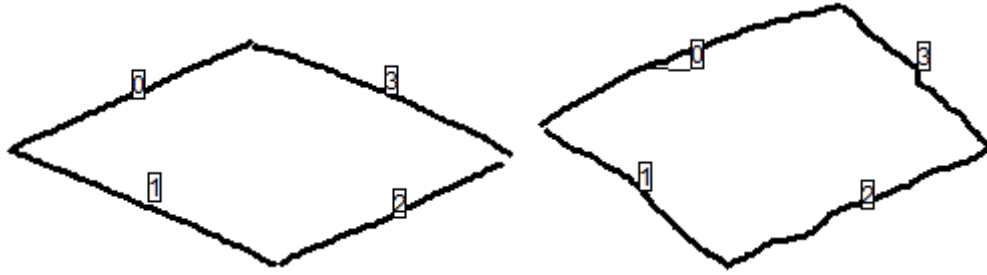


Figura 18. Ejemplos de relaciones mútuas entre trazos

Una vez tenemos la línea candidata, hay que determinar si el trazo representa una línea recta, y no, qué línea recta es la que representa. Para ello, y empleando las conclusiones de los experimentos llevados a cabo en la sección 3.2.2, seleccionamos el parámetro *Tolcob*, ya que es rápida de calcular (no requiere ningún ajuste geométrico de líneas), y tiene un claro significado para los ingenieros y diseñadores, quienes están acostumbrados a trabajar con tolerancias.

Por último, como no necesitamos una clasificación determinista basada en sí/no, comparamos la tolerancia del trazo con dos valores umbrales: la mínima y máxima tolerancia (*TolMin* y *TolMax* respectivamente). Los valores de tolerancia entre los valores umbrales, se calcula una figura de mérito entre 0.0 (no) y 1.0 (sí).

Las etapas principales del algoritmo son las siguientes:

1. Se define el segmento como la línea recta que une los puntos extremos del trazo.
2. Se calcula la pendiente de la línea, y se rota hasta situarla horizontalmente.
3. Se calcula el parámetro *Tolcob* del trazo original.
4. Si *Tolcob* es menor que la tolerancia mínima, el trazo se acepta como línea recta con la cifra de figura de mérito más alta (1.0), y el algoritmo termina.
5. Si el algoritmo no termina, el trazo se suaviza (para evitar que las oscilaciones afecten la probabilidad de ser evaluado como una línea recta), y se guarda el número de etapas (iteraciones) empleadas en el suavizado (*NSS*).
6. *Tolcob* se calcula para el trazo suavizado.
7. El mérito asignado es 1 cuando *Tolcob* es menor que *Tolmin*, nulo cuando *Tolcob* es mayor que *TolMax* y disminuye linealmente de 1 a 0 dentro de este rango (para así distinguir los trazos buenos, medios y pobres).
8. La figura de mérito se reduce en los trazos con oscilaciones, en función de una penalización (*Penalty*) y del número de etapas de suavizado (*NSS*):
Mérito= Mérito-*Penalty***NSS*. No se permiten valores de méritos negativos.

Las bandas de tolerancia se representan en la Figura 19.













Id Trazo	Mínima y máxima banda de tolerancia
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

Figura 19. Bandas de tolerancia mínima y máxima para los doce trazos de la figura 16

El rectángulo ortogonal delimitador del trazo rotado devuelve una buena estimación de la longitud y el ancho del trazo. Estas métricas geométricas aunque sean ligeramente imprecisas no son un problema desde el punto de vista perceptual ya que: a) el resultado no es determinista, y b) se trata de un pequeño paso dentro de un flujo más complejo en el que los casos dudosos son revisados posteriormente en función de indicios redundantes o relacionados.

3.2.3.1 Suavizado

A continuación se describe el proceso de suavizado empleado en REFER.

Hay técnicas muy conocidas para filtrar las oscilaciones de alta frecuencia (véase por ejemplo [Vas08]). El método de la Media móvil (o media acumulada) es quizás el más popular. Sin embargo la estimación de los parámetros correctos para distinguir el ruido de la señal de entrada es crítico [Dur59]. Dado que estamos interesados en dar prioridad a lo que la gente percibe, optamos por un método muy simple que puede ser fácilmente controlado por los mismos parámetros que parecen ser los más importantes en la percepción del ser humano: los puntos esquina y la anchura. Por lo tanto, nuestro método consiste en eliminar "micro-esquinas" aprovechando el hecho de que los trazos son secuencias de puntos (no nubes de puntos) en los que se eliminan secuencialmente puntos alternos del trazo mientras el trazo suavizado siga conteniendo esquinas, y mientras la anchura del trazo resultante sea similar a la anchura del trazo original.

La métrica para *similitud* es la máxima variación permitida en la anchura del trazo al suavizarlo y queda definida por el valor umbral de *TolSmooth*, de manera que sólo se eliminan puntos

alternos si su distancia mutua es inferior a $2 * TolSmooth$. El número de iteraciones de suavizado (*NSS*, por sus siglas en inglés, *number of smoothing steps*) requerido en cada trazo queda almacenado.

Para la tarea de suavizado en REFER, hay implementados tres métodos diferentes para la búsqueda de esquinas: *IStraw* (tal y como lo implementaron Xiong y LaViola [XL10]), *Shortstraw* [WEH08], y "Sliding strips" (propuesto por Masood y Sarfraz [MS07]). La elección inicial viene determinada por el usuario, siendo *IStraw* el método definido por defecto. *IStraw* requiere información temporal, si al seleccionar este método no se dispone de dicha información, entonces se emplea *Shortstraw*.

Obsérvese que aunque se lleve a cabo la búsqueda de esquinas, en realidad los trazos aún no han sido segmentados. La idea es ajustar la línea antes de la tarea de segmentación, pero empleando información sobre la segmentación.

El efecto del proceso de suavizado puede verse en la Figura 20 y en la Tabla 9.



Figura 20. Trazo con oscilaciones (izq.), trazo con oscilaciones tras cuatro iteraciones de suavizado (centro), y trazo similar sin oscilaciones (dcha.)

Trazo	Tolcob	Tol	STIR
-1	2.44	2.49	68
-2	3.25	3.31	53
-3	3.66	3.74	62
-4	3.24	3.31	50
-5	4.31	4.42	46
-6	4.92	5.03	50
-7	7.03	7.18	39
-8	8.06	8.17	44
-9	8.45	8.65	30
-10	8.56	8.76	31
-11	11.26	11.39	27
-12	11.13	11.39	25

Tabla 9 Parámetros para los trazos de oscilación después de cuatro pasos de suavizado

3.2.3.2 Ajuste del algoritmo

Nuestro algoritmo replica el comportamiento humano para los siguientes valores de parámetros: cuando *TolMin* es el 3,5% de la longitud del trazo (medida como la longitud de su rectángulo delimitador ortogonal), *TolMax* es el 7,0% de la longitud del trazo, y *TolSmooth* es el 1,0% de la longitud del trazo. Por último, la *Penalización* de suavizado es del 10%, por cada iteración de suavizado.

En la Tabla 10 se muestran las figuras de mérito devueltas por el algoritmo para cada trazo, además del número de iteraciones del proceso de suavizado requeridos en trazo.

A partir de los datos de la Tabla 10, se comprueba que los trazos que poseen una figura de mérito igual o mayor que 0,5 corresponden con los trazos que se percibieron como "buenos"

por los sujetos encuestados, y por tanto éste es el criterio que sugerimos para convertir el valor de la figura de mérito en una decisión dicotómica (*sí/no*).

Trazo	Merit	NSS	Trazo	Merit	NSS
1	1.0	0	-1	0.50	5
2	1.0	0	-2	0.50	5
3	1.0	0	-3	0.37	5
4	1.0	0	-4	0.50	5
5	0.47	3	-5	0.21	6
6	0.94	0	-6	0.10	5
7	0.0	4	-7	0.0	6
8	0.18	0	-8	0.0	5
9	0.0	3	-9	0.0	6
10	0.0	4	-10	0.0	6
11	0.0	4	-11	0.0	5
12	0.0	3	-12	0.0	6

Tabla 10 Figuras de mérito devueltas por el algoritmo

3.2.4 Análisis

En el presente apartado primero se evaluaremos en qué medida el algoritmo replica la interpretación de los humanos. A continuación, se evaluará el tiempo de ejecución para mostrar cómo el algoritmo reduce el coste de computación respecto de NHT para todas las entradas no patológicas, y que es suficientemente rápido y fiable para una aplicación de SBM en línea. En un análisis más detallado del algoritmo, se comprueba que generalmente éste se comporta tal y como harían los humanos, pero es sensible a las variaciones de dos de sus cuatro parámetros y aún es incapaz de resolver algunos casos patológicos.

3.2.4.1 Comportamiento general

Para comparar los resultados del algoritmo de Tolerancia con la percepción humana, primero calculamos la frecuencia con que los sujetos clasificaron los trazos como *buenos*, *medianos* y *pobres*, empleando para ello los resultados de los experimentos #1 y #2, donde los trazos con y sin oscilaciones fueron clasificados independientemente, los del experimento #3, donde ambos tipos de trazos se combinan aleatoriamente. Como muestra la Tabla 11, las figuras de mérito del algoritmo de Tolerancia se ajustan bien a las respuestas del experimento #3 si se aplican los siguientes criterios: el trazo se clasifica como *bueno* cuando su figura de mérito sea ≥ 0.5 ; como *pobre* cuando la figura de mérito sea igual a 0, y *medio* en otros casos. Aunque el experimento #3 no nos da ninguna idea sobre cómo cuantificar exactamente la “pérdida de calidad” que los humanos aplican a los trazos oscilantes, el algoritmo de Tolerancia ha sido implementado de acuerdo al comportamiento cualitativo observado sobre cómo los sujetos penalizaron a los trazos oscilantes.

Comparando los resultados de los experimentos con los méritos calculados por el algoritmo, se comprueba que en general, el algoritmo replica el juicio humano, pero en los trazos 7, -3 y -4 del experimento #3, el algoritmo no se ajusta correctamente a los resultados perceptuales. Estos casos se analizan con más profundidad en el apartado 3.2.4.5.

Trazo	Experimentos #1 y #2			Experimento #3			Figura de mérito
	Buena	Mediano	Pobre	Buena	Mediano	Pobre	
1	100%			100%			1
2	100%			100%			1
3	100%			100%			1
4	100%			96,2%	3,8%		1
5		77,3%	22,7%	14,3%	81,0%	4,8%	0,47
6		100%	0%	71,4%	28,6%		0,94
7		90,9%	9,1%		81,3%	18,8%	0
8		90,9%	9,1%	10%	80%	10%	0,18
9		18,2%	81,8%		45%	55%	0
10		9,1%	90,9%		35%	65%	0
11			100%			100%	0
12		13,6%	86,4%		15%	85%	0
-1	100%			57,1%	28,6%	14,3%	0,5
-2	100%			40%	40%	20%	0,5
-3	90,9%	9,1%		25%		75%	0,37
-4	100%			25%	75%		0,5
-5		100%			100%		0,21
-6	9,1%	90,9%			100%		0,1
-7		72,7%	27,3%		16,7%	83,3%	0
-8		54,5%	45,5%			100%	0
-9		72,7%	27,3%			100%	0
-10			100%			100%	0
-11			100%			100%	0
-12			100%			100%	0

Tabla 11 Frecuencias de percepción de los experimentos y figuras de méritos devueltas por el algoritmo

3.2.4.2 Tiempos de ejecución

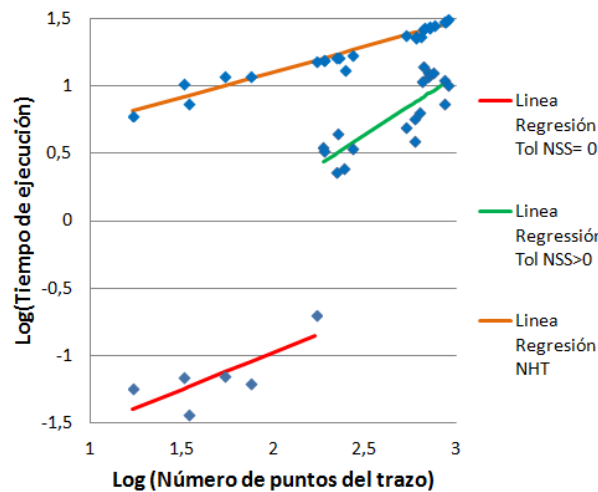


Figura 21. Comparación del tiempo de ejecución entre los algoritmos de Tolerancia y NHT

La Figura 21 ilustra la complejidad computacional práctica de los algoritmos de Tolerancia y NHT (el tiempo de ejecución viene expresado en milisegundos y el tamaño es el número de puntos muestreados del trazo). La etapa más crítica en el algoritmo de Tolerancia es el proceso de suavizado de las oscilaciones. Esta etapa se ejecuta únicamente cuando el trazo no ha alcanzado el máximo valor de la figura de mérito (1.0), lo que implica que nuestro algoritmo posee un coste computacional diferente dependiendo de si se cumple el criterio de parada definido en la etapa 4 del algoritmo, o no. El algoritmo presenta una respuesta rápida, $O(n^{0.54})$, cuando $NSS = 0$ (línea de regresión roja), y una respuesta más lenta, $O(n^{0.88})$, cuando $NSS > 0$ (línea de regresión). Sin embargo el algoritmo NHT (línea naranja), a pesar de tener una complejidad computacional menor ($O(n^{0.38})$), posee un tiempo constante mucho mayor y es más lento en general, tal y como se esperaba.

Por lo tanto, podemos concluir que nuestro algoritmo es suficientemente rápido para emplearlo en una aplicación SBM en línea.

3.2.4.3 Análisis de sensibilidad

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad para determinar la robustez del algoritmo de Tolerancia a las variaciones de los parámetros de ajuste. Tal y como se describe en el apartado 3.2.3 el algoritmo emplea cuatro parámetros (*TolMin*, *TolMax*, *TolSmooth*, *Penalty*) que se ajustan según se describe en el apartado 3.2.3.2. Para realizar el análisis de sensibilidad, variamos todos los parámetros por pasos alrededor de los valores recomendados para encontrar los rangos en los que los parámetros dejan de dar resultados razonables (Tabla 12), y determinar cuántos más errores comete el algoritmo.

Con los resultados de la tabla, concluimos que el algoritmo es sensible a *Tolmin* y *Tolmax*, y los errores se incrementan tan pronto los parámetros varían ligeramente sus valores recomendados. El algoritmo es robusto respecto a *TolSmooth* y *Penalty*, ya que estos parámetros no influyen aquellos casos en los que $NSS = 0$ (Tabla 10), o cuando el mérito se asigna directamente (1 cuando $Tolcob < TolMin$ o 0 cuando $Tolcob > TolMax$). Sin embargo, su influencia se verá con más detalle en el siguiente apartado.

	Evaluado		Recomendado						Evaluado	
	Min	Errores	Min	Errores	Prefijado	Errores	Max	Errores	Max	Errores
<i>TolMin</i>	0.01	6/24	2.5	5/24	3.5	3/24	5	4/24	15	17/24
<i>TolMax</i>	3	9/24	6	5/24	7	3/24	11	4/24	60	15/24
<i>TolSm</i>	0.1	7/24	0.5	4/24	1	3/24	2	2/24	20	4/24
<i>Penalty</i>	0	5/24	7	3/24	10	3/24	12	6/24	30	7/24

Tabla 12 Parámetros del algoritmo y su rango recomendado de valores

Cuando *TolMin* iguala a *TolMax*, los trazos no pueden clasificarse como medios, y las figuras de méritos únicamente pueden tomar dos valores posibles: 0 o 1.

3.2.4.4 Casos patológicos

Como ya se comentó en el apartado 3.2.4.1, el algoritmo no coincide con la percepción humana en el caso de los trazos 7, -3 y -4, del experimento #3. A continuación, estudiaremos estos ejemplos con más detalle ya que son representativos de los casos patológicos más comunes que se han encontrado en los experimentos.

El trazo 7 posee una ondulación destacada cerca del extremo derecho del trazo (Figura 22). Esta ondulación aislada afecta a la posición de las bandas de tolerancia, y como resultado, la figura de mérito resultante es reducida. Adicionalmente, el valor del parámetro de suavizado *Penalty* (el trazo 7 requiere de 4 iteraciones de suavizado) reduce el valor del mérito hasta cero. Sin embargo los seres humanos parecen filtrar estas ondulaciones aisladas, ya que como muestra la Tabla 11, tanto en el experimento #1 como en el #3, el trazo 7 se clasificó como un trazo de calidad media. Si se redujera el valor del parámetro *Penalty* (concretamente del 10% al 7%), el resultado de la figura de mérito clasificaría el trazo del mismo modo que lo hicieron los sujetos encuestados, pero al mismo tiempo, otros trazos (como el 5 y el -3) se clasificarían ahora incorrectamente. Por lo tanto, reducir el valor de *Penalty* no es una buena estrategia.

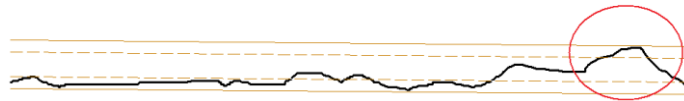


Figura 22. Trazo 7 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax)

El trazo 3 (Figura 23) es un caso particular donde la percepción humana parece actuar de manera anómala. En este caso, los sujetos tienden a clasificar los trazos oscilantes de los experimentos #2 y #3 como (1) pertenecientes al mismo grupo que sus trazos equivalentes no oscilantes, o (2) bien desplazados al grupo inmediato inferior. Sin embargo en este caso, la mayoría de los sujetos clasificaron el trazo -3 como bueno en el experimento #4 y como pobre en el experimento #5. A pesar de este comportamiento anómalo de la percepción humana, el algoritmo se sigue comportando como lo hacen los humanos.



Figura 23. Trazo 3 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax)

En el experimento #4, todos los sujetos clasificaron el trazo -4 (Figura 24) como bueno; en el experimento #5, en cambio, el 75% de los sujetos lo clasificaron como mediano, mientras el 25% aún lo clasificaba como bueno. Dado que el trazo subyacente (después de suavizar las oscilaciones) no posee ondulaciones notables, parece que aquellos sujetos que percibieron la forma subyacente tendieron a clasificar este trazo como bueno, mientras que aquellos que percibieron las oscilaciones como imperfecciones lo clasificaron como mediano, o pobre.

El algoritmo se comporta de una manera similar: el trazo suavizado es *bueno* (se ajusta dentro de la banda de mínima tolerancia), pero la devaluación del valor de mérito puede hacerlo aparecer como un trazo *mediano*, ya que este ejemplo es muy sensible al valor de *Penalty*—incrementar el valor de *Penalty* del 10% al 11% cambiaría la clasificación del trazo de *bueno* a *mediano*.



Figura 24. Trazo -4 y sus bandas de tolerancia (TolMin y TolMax)

Por último, el algoritmo ha resultado ser incapaz de procesar correctamente trazos que se pliegan sobre sí mismos y se auto intersectan (Figura 25): el algoritmo devuelve una línea más corta de lo que psicológicamente se esperaría. Queda como trabajo futuro tratar de resolver este tipo de inconvenientes añadiendo una comprobación para detectar los casos donde el rectángulo delimitador del trazo es más largo que la longitud del segmento ajustado.

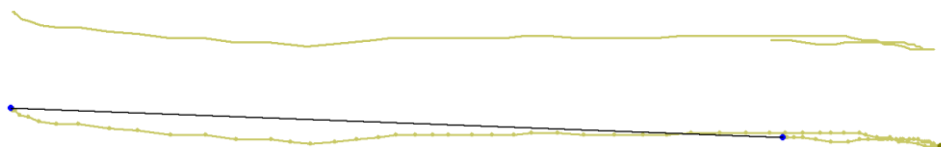


Figura 25. Trazo con retroceso, y su segmento de ajuste

3.3 Ajuste de arcos elípticos basado en percepción

En este apartado se describirá el método para el ajuste de arcos de elipse dirigido a ser empleado en un flujo de reconocimiento basado en decisiones colaborativas. Este nuevo método (1) es más rápido y (2) produce una figura de mérito para medir la probabilidad de que un trazo represente un arco de elipse (en lugar de devolver la típica respuesta dicotómica sí/no).

Para el primer objetivo, el método selecciona uno de los tres algoritmos de ajuste existentes e implementados en REFER. Para realizar dicha selección previamente calcula unas métricas que ayudan a determinar cuál es el algoritmo más rápido que devuelve un ajuste válido. En este sentido, el método propuesto es diferente de los métodos actuales empleados en el ámbito de reconocimiento de imagen, ya que prioriza la velocidad sobre la precisión geométrica.

Para el segundo objetivo, el método emplea una banda de tolerancia similar a la empleada en el apartado 3.2 para el ajuste de líneas rectas, aunque el procedimiento para calcular dicha banda es diferente, ya que el método que funciona para líneas rectas no sirve para los arcos de elipse. Este segundo objetivo hace que este nuevo método sea diferente de los métodos dicotómicos actuales para el ajuste de líneas empleados en SBM. Por ejemplo, CALI emplea la lógica difusa para la toma de decisiones internas, pero actúa como una caja negra que devuelve una clasificación dicotómica a los usuarios finales [JF00], [FJ00].

La precisión de este método viene determinada por nuevas y rápidas métricas desarrolladas de acuerdo a criterios perceptuales, que se determinarán mediante experimentos apropiados.

En el apartado 3.3.1 se revisita la geometría de elipses, para descubrir métricas rápidas que ayuden a medir la calidad del ajuste. En el apartado 3.3.2 se ilustran los métodos experimentales dirigidos a determinar cómo los humanos perciben formas embebidas en los trazos bocetados. El conjunto de trazos clasificados por seres humanos en estos experimentos se empleará posteriormente como punto de referencia para evaluar el nuevo método de ajuste. En el apartado 3.3.3 se analiza los puntos débiles y fuertes de los algoritmos de ajuste que existen en la literatura. En el apartado 3.3.4 se detalla el nuevo método propuesto para ajustar trazos a arcos elípticos (buscando el mejor balance entre velocidad y precisión) y medir su probabilidad (a partir de la banda de tolerancia). Por último, en el apartado 3.3.5, se analiza el nuevo método para determinar su “bondad”, medida como la capacidad para reproducir el mismo comportamiento que los humanos (es decir, de replicar las respuestas obtenidas con el conjunto de referencia en los experimentos).

3.3.1 Geometría del ajuste de elipses

Las elipses se definen como el conjunto de puntos de un plano cuya suma de distancias a dos puntos predefinidos (denominados focos) es constante (Figura 26). Las elipses son simétricas respecto de dos ejes perpendiculares entre sí. El mayor de los ejes es el que contiene a los focos. A la mitad del eje mayor se le denomina a veces radio mayor R_a (mientras que R_b es la mitad del eje menor). Todas las cónicas (elipses, parábolas e hipérbolas) pueden ser definidas por la ecuación de segundo grado:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad / \Phi = (a, b, c, d, e, f) \quad (14)$$

Donde uno de los parámetros puede ser fijado sin pérdida de generalidad. Esta ecuación general describe una elipse real no-degenerada si Delta (δ) no es 0 (en caso contrario, nos encontramos con una cónica degenerada), si J es mayor que 0 (si no, no es una elipse) y si Delta*(a+c) es inferior a 0 (en caso contrario, se trata de una elipse imaginaria). Siendo Delta (δ) el determinante de la matriz de coeficientes:

$$\delta = acf - \frac{b^2f}{4} + \frac{bde}{4} - \frac{cd^2}{4} - \frac{ae^2}{4} \quad (15)$$

y J el Jacobiano:

$$J = ac - \frac{b^2}{4} \quad (16)$$

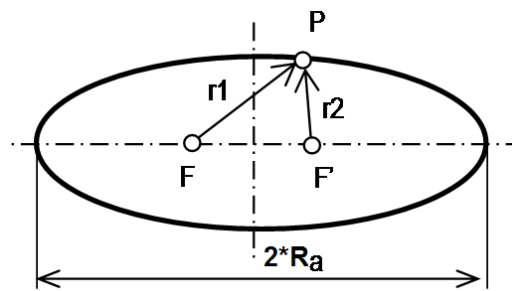


Figura 26. Elipse

3.3.1.1 Parámetros canónicos

Una vez que obtenemos la forma general de la cónica (ecuación 14), se pueden calcular los siguientes parámetros canónicos: los ejes principales (definidos por la longitud de los dos semi-ejes R_a y R_b , más la orientación α del eje principal), el centro (c_x, c_y) y los focos (F1, F2).

$$(c_x, c_y) = \left(\frac{be - 2cd}{4J}, \frac{bd - 2ae}{4J} \right) \quad (17)$$

$$aa1 = \frac{ae^2 + cd^2 + fb^2 - bde}{2} - 2acf \quad (18)$$

$$aa3 = \sqrt{(a - c)^2 + b^2} \quad (19)$$

$$R_a = \sqrt{\frac{aa1}{J(a + c - aa3)}} \quad (20)$$

$$R_b = \sqrt{\frac{aa1}{J(a + c + aa3)}} \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = 0, & \text{si } b = 0 \text{ y } a < c \\ \alpha = \frac{\pi}{2}, & \text{si } b = 0 \text{ y } a \geq c \\ \alpha = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{b}{a-c}\right)}{2}, & \text{si } b \neq 0 \text{ y } a < c \\ \alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\tan^{-1}\left(\frac{b}{a-c}\right)}{2}, & \text{si } b \neq 0 \text{ y } a \geq c \end{array} \right. \quad (22)$$

$$F1 = c_x + \sqrt{R_a^2 - R_b^2} \cos(\alpha) \quad (23)$$

$$F2 = c_y + \sqrt{R_a^2 - R_b^2} \sin(\alpha) \quad (24)$$

3.3.1.2 Detección de puntos finales

Dado que lo que buscamos en realidad es un arco elíptico y lo que obtenemos con el método de ajuste es una elipse completa, debemos “recortar” dicha elipse para que se ajuste a nuestro trazo, para ello calculamos los puntos de la elipse que están más cerca de los extremos del trazo. Este cálculo requiere una función específica que calcule el punto de una elipse que es más cercano a un punto genérico $P(x_p, y_p)$. Ese punto se calcula como la intersección entre la elipse y la recta normal a ésta que pasa por el punto P . Es decir, es el punto de tangencia $T(x_T, y_T)$ correspondiente a la línea tangente cuya normales pasa por P . A primera vista, el problema parece simple. Como el punto de tangencia pertenece a la elipse, la ecuación de la elipse se puede reformular como:

$$\left(\frac{x_T}{R_a}\right)^2 + \left(\frac{y_T}{R_b}\right)^2 = 1 \quad (25)$$

Al mismo tiempo, como el punto de tangencia pertenece a la recta normal, su ecuación se puede reformular como:

$$(y_T - y_p) = m_n(x_T - x_p) \quad (26)$$

Como ambas líneas son perpendiculares entre sí (donde m_t es la pendiente de la recta tangente) es perpendicular a la recta normal, se cumple que:

$$m_n = -\frac{1}{m_t} \quad (27)$$

Finalmente m_t puede ser obtenida por diferenciación implícita de la ecuación de la elipse:

$$\frac{2x_T}{R_a} + 2y_T y' = 0 \rightarrow m_t = -\frac{R_b x_T}{R_a y_T} \quad (28)$$

Desafortunadamente, la solución del sistema da como resultado una ecuación trascendental. Por lo tanto, la mejor opción es usar técnicas de cálculo de raíces. El problema ha sido descrito muchas veces. Una explicación e implementación clara es la proporcionada por Eberly [Ebe04]. La función calcula el punto T de la elipse (x_T, y_T) que es más cercano a $P(x_p, y_p)$ y también devuelve la distancia entre ambos puntos. Esta función refleja las coordenadas de $P(x_p, y_p)$ de manera que el punto quede ubicado en el primer cuadrante, determina los valores (R_a, R_b) para

que queden ordenados correctamente y, a continuación, resuelve el problema simplificado únicamente para el primer cuadrante. El punto T devuelto (x_T, y_T) debe ser postprocesado para que coincida con el cuadrante real del punto P.

Con esta función obtenemos los puntos finales del arco elíptico. Éstos son los puntos de la elipse más cercanos a los respectivos extremos del trazo. A su vez, también calculamos el punto de la elipse más cerca del punto medio del trazo. Este tercer punto se emplea para desambiguar cuál de los dos arcos definidos por los puntos finales es el que mejor se ajusta al trazo.

3.3.2 Percepción del ajuste de elipses

Las elipses son comunes en los bocetos de ingeniería: los círculos y los arcos de círculo son elementos característicos de ingeniería muy comunes, y los círculos son un caso especial de elipses; proyectar un círculo en un plano oblicuo al plano de proyección produce una elipse en el plano de proyección; además un círculo realizado a mano alzada, debido a las imperfecciones del bocetado, puede fallar en un test de circularidad pero todavía ser identificado como una elipse.

Por lo tanto, los ingenieros de diseño están acostumbrados a ver elipses en los bocetos de ingeniería. Pero ¿qué criterios tienen en cuenta cuando evalúan cuándo y cómo ajustar una elipse a una curva? Por ejemplo, ¿dónde acaba la percepción y dónde empieza el razonamiento inductivo? Nuestra intención es investigar el comportamiento psicológico, sin malinterpretar accidentalmente el comportamiento aprendido de sujetos particulares como un comportamiento perceptual general.

Para determinar los límites de la percepción humana, debemos preguntar a los seres humanos qué perciben, y la única estrategia que ha resultado útil para determinar qué perciben los seres humanos es llevar a cabo experimentos con grupos de sujetos que son entrevistados para hacer sus percepciones explícitas (por ejemplo [EDYL12]).

Por lo tanto, se han llevado a cabo cuatro experimentos para identificar qué patrones de percepción muestran los seres humanos a la hora de reconocer arcos elípticos, y el grado de confianza que tienen en su juicio. Los experimentos se diseñaron para validar o rechazar las siguientes hipótesis:

1. Los seres humanos distinguen claramente entre arcos elípticos bocetados con buena, regular y mala calidad, y estas categorías no se subdividen en subcategorías.
2. Los humanos son más estrictos al percibir arcos que abarcan ángulos grandes. Por lo tanto, la longitud del arco representa un parámetro influyente en la percepción humana.

La regla común para finalizar la recopilación de datos fue la de recoger respuestas válidas de al menos 20 sujetos, o el máximo dentro de un periodo de tiempo (generalmente un día lectivo escolar). Los detalles de los cuatro experimentos se tabulan en el caso 4 del Anexo I, allí se pueden consultar las tablas con todas las respuestas detalladas, que también pueden considerarse cualitativas al emplear variables en imágenes [Ber67] para destacar las diferencias y excepciones.

Para determinar si los resultados son debidos al azar o no, y el nivel de significación de las pruebas, se ha empleado una distribución binomial, definida como una distribución de probabilidad discreta del número de éxitos en una secuencia de “n” experimentos independientes del tipo éxito/fallo. En nuestros experimentos el éxito ocurre cuando el trazo es clasificado por el sujeto en el grupo que habíamos predicho (bueno, mediano o pobre), y consideramos fallo cuando se clasifican en un grupo diferente.

En el experimento #1, los sujetos compararon trazos contra sus arcos ajustados. En el experimento #2 compararon cada trazo contra el arco que cada sujeto imaginó en su mente. La conclusión de ambos experimentos es que los humanos perciben si un trazo representa un buen, mediano o arco pobre, con indiferencia de si se les da un patrón con el que comparar el trazo.

Los experimentos #3 y #4 demuestran que los humanos son más estrictos con arcos largos y muestran menos seguridad con arcos pequeños, ya que los trazos cortos transmiten menos información; para replicar la percepción humana, deberíamos ser más tolerantes al evaluar trazos cortos.

En los experimentos #1 y #2, la mayoría de los sujetos encuestados tenían conocimientos tecnológicos, y se incluyó un grupo reducido de sujetos sin conocimientos tecnológicos. Para minimizar la posibilidad de encontrar un comportamiento común aprendido entre los sujetos, el grupo de encuestados con una base tecnológica incluía profesores de diferentes cursos (que a su vez estudiaron en diferentes universidades) y estudiantes de diferentes grados de ingenierías (formados por varios profesores). En los experimentos #3 y #4, todos los sujetos eran estudiantes de asignaturas de ingeniería.

Por último pero no menos importante, los experimentos nos proporcionan un conjunto de trazos de referencia que luego emplearemos para validar el nuevo método propuesto para replicar el comportamiento humano (apartado 3.3.5).

3.3.2.1 Experimento #1 para arcos

Para este experimento se seleccionaron trazos que representaban arcos elípticos de similar longitud pero con grados de imperfección cada vez mayores (Figura 27). Cada trazo junto con su respectivo arco ajustado, se presentó en una “ficha” tamaño A6. Y a continuación, se pidió a una muestra de 32 sujetos (principalmente profesores y estudiantes de ingeniería, junto con personas no vinculadas con materias de ingeniería) que ordenaran las 12 fichas en orden decreciente según la similitud con sus “respectivos” arcos elípticos. En cada ficha se incluyó el arco que mejor se ajustaba a cada trazo, ya que consideramos que un mismo trazo podría ser comparado con diferentes elipses que los diferentes sujetos pudieran tener en mente.

Los resultados (ver Tabla 28 del caso 4 Anexo I) confirman que los sujetos distinguen los trazos en tres grandes grupos: buena, media y pobre calidad del arco elíptico dibujado. En particular, 25 de los 32 sujetos (que representan casi el 78% de los encuestados) clasificaron los trazos a.1, a.2 y a.3 como buenos, los trazos a.6, a.7 y a.8 como calidad media, y los trazos a.9, a.10, a.11 y a.12 como calidad pobre. La única excepción destacada fue el trazo a.5, que fue percibido como bueno en el 90.6% de los casos, en detrimento del trazo a.4, considerado un trazo mediano con una frecuencia del 84.4%. ¿Hicieron los sujetos esta clasificación al azar?

Aplicando una distribución binomial $B(32, \frac{1}{2})$, obtenemos una probabilidad $p(X \geq 25) = 0.0011$. Por lo que asumiendo un nivel de $\alpha = 0.01$, podemos concluir que los sujetos no contestaron aleatoriamente.

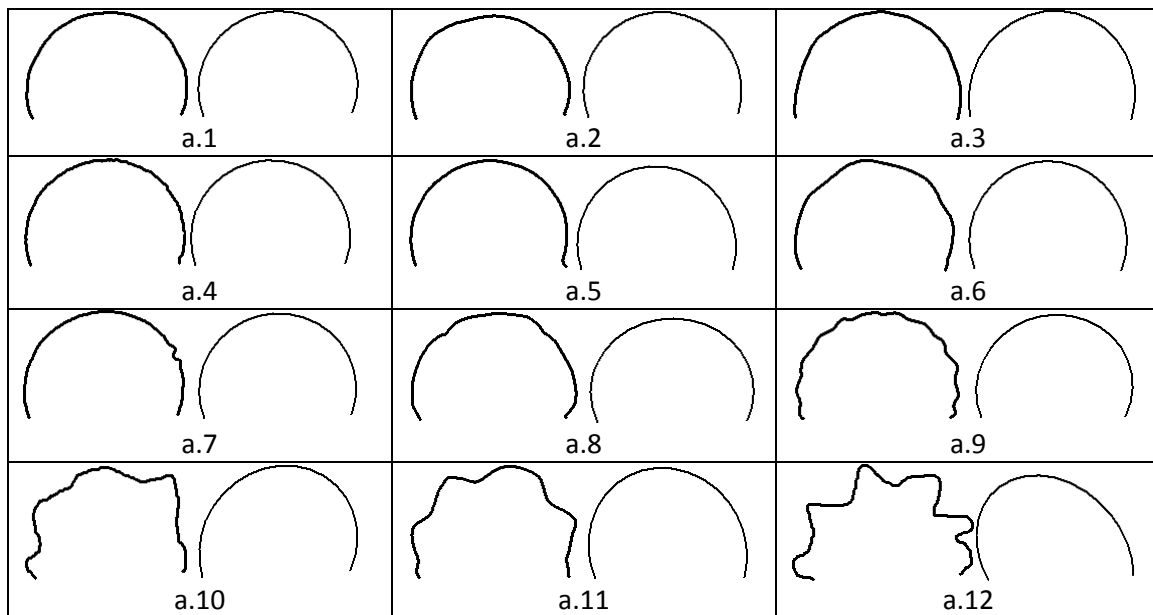


Figura 27. Conjunto de trazos empleados en la percepción de arcos elípticos.

Hay otros hechos que pueden ser observados en la Tabla 28, del caso 4 Anexo I. En primer lugar, parece que los sujetos penalizan menos las irregularidades aisladas cercanas a los puntos extremos (trazo a.5) que las irregularidades localizadas en posiciones intermedias del trazo (trazo a.7). De hecho, algunos de los sujetos penalizaron más el trazo a.7 que el trazo a.9, aunque éste último parece tener más ondulaciones. En segundo lugar, los humanos parecen distinguir hasta tres tipos de errores: oscilaciones de alta frecuencia, ondulaciones de baja frecuencia y cambios de curvatura. Por ejemplo, algunos sujetos parecen filtrar las oscilaciones y evaluar el trazo subyacente en el trazo a.4, mientras que otros sujetos penalizan esas oscilaciones ubicando el trazo en posiciones posteriores.

3.3.2.2 Experimento #2 para arcos

Posteriormente decidimos volver a repetir el mismo experimento pero sin incluir en las fichas de tamaño A6 los arcos ajustados de cada ejemplo. Ya que dedujimos que el arco vectorizado podría estar dando información de la buena o mala calidad del trazado de un trazo, cuando en realidad nuestra intención es que los encuestados ordenaran los trazos según la “elipticidad” percibida y no que valoraran la calidad singular de cada trazo. Además, como todos los trazos del experimento representaban arcos que abarcaban ángulos de elipse similares, interpretamos que era difícil que los encuestados compararan mentalmente los trazos con distintos arcos elípticos.

Así pues se volvieron a presentar los doce trazos reflejados en la Figura 27, pero esta vez en cada ficha A6 se presentó un ejemplo de trazo sin su correspondiente arco elíptico ajustado. Se recopilaron un total de 30 respuestas (esta vez la muestra provenía de alumnos de grado de diferentes ingenierías). Los resultados (ver Tabla 29 del caso 4 del Anexo I) confirman que los sujetos distinguen entre arcos elípticos dibujados con calidad buena, media y pobre, incluso

aunque no posean un patrón de comparación. En este caso, la clasificación descrita en el experimento anterior se repitió en 20 de los 30 sujetos (que representan un 66.6% de los encuestados). Podemos decir que los resultados continúan reflejando una tendencia significativa, con un nivel de significación del 5%, ya que $p(X \geq 20) = 0.049$ en la distribución binomial $B(30, \frac{1}{2})$.

Cabe destacar el aumento de la presencia del ejemplo a.4 entre los trazos considerados como arcos “buenos”. Probablemente el hecho de no contar con el arco de ajuste correspondiente hace que más sujetos tiendan a filtrar las oscilaciones del trazado. La presencia de a.4 se incrementó en un 24% en el grupo de buena calidad, a cambio de una reducción del 17% en la presencia del trazo a.5.

3.3.2.3 Experimento #3 para arcos

Una cuestión que nos surge es si la longitud del arco afecta a la percepción de los humanos, nuestra hipótesis es que los humanos no serán tan estrictos a la hora de clasificar trazos cortos (que abarcaban ángulos pequeños de una elipse) ya que contienen menos información perceptual que en los casos en los que los trazos representan arcos mayores como ocurría en los experimentos anteriores.

Para comprobar esta hipótesis, se seleccionaron trazos que representan arcos elípticos cortos y con diferentes grados de imperfección, tal y como se muestra en la Figura 28.

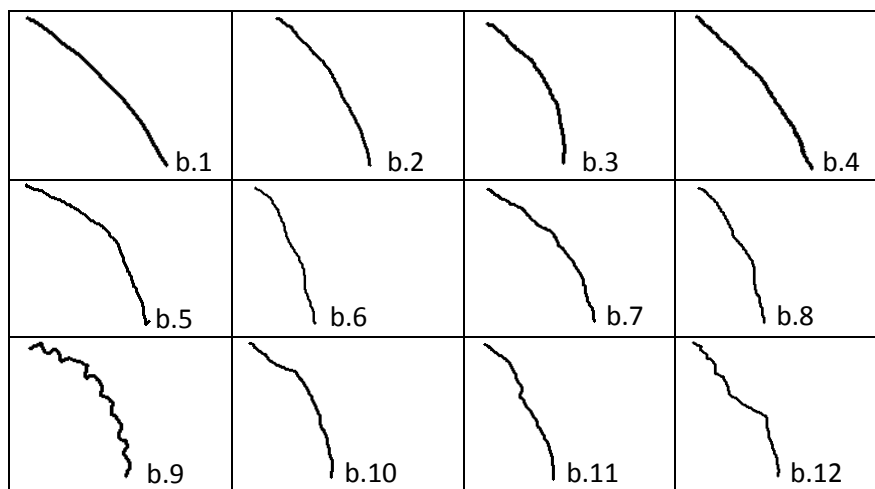


Figura 28. Conjunto de trazos cortos empleados en la percepción de arcos elípticos

Los trazos se presentaron en un cuestionario que constaba de un único folio normalizado de formato A4. Para que el orden de los ejemplos en la hoja no afectase al criterio de ordenación de los encuestados, se presentaron 4 cuestionarios diferentes con los mismos ejemplos ordenados aleatoriamente.

Los encuestados numeraron cada uno de los ejemplos en la hoja de mejor a peor representación de arco elíptico, según su percepción. La muestra estuvo compuesta por 28 sujetos, alumnos de grado de distintas titulaciones de ingenierías. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 30 del caso 4 en el Anexo I.

Los resultados desvelan que los encuestados muestran cierta tendencia a ordenar dichos trazos pero, tal y como hipotetizábamos, no es un patrón tan definido como en los

experimentos anteriores. Los sujetos todavía perciben los trazos de muy buena y muy baja calidad, pero el grupo de calidad media es mucho más difuso. Cerca del 64% de los encuestados percibieron los trazos b.1, b.2 y b.3 como buenos (marginamente significativo con un $p < 0.1$, lo que demuestra una ligera evidencia contra la hipótesis de aleatoriedad) y cerca del 86% consideraron b.9 y b.12 como trazos pobres (con un nivel de significación del 1%). Cabe destacar que el trazo b.3 a pesar de tener pequeñas oscilaciones es considerado como un arco bueno (93%) con más frecuencia que el trazo b.1 (71%), que no tiene oscilaciones. Probablemente el mayor ángulo abarcado ha primado sobre sus pequeñas imperfecciones. El ejemplo b.5 se consideró como arco bueno sólo la mitad de las veces, esto implica que aunque el ángulo abarcado pudo alentar a los sujetos a considerarlo un buen arco, algunos de ellos quizá penalizaron sus irregularidades—tales como las oscilaciones que presenta su trazado o el punto de esquina que presenta en uno de sus extremos.

El trazo 12 siempre se consideró un arco malo, probablemente por la destacada irregularidad que presenta y el punto de esquina que aparece en su trazado. Es interesante resaltar el ejemplo 9 que a pesar de ser considerado un arco malo en la mayoría de ocasiones, todavía fue considerado un arco bueno por más del 10% de los encuestados, la peculiaridad de este trazo estriba en que, a pesar de sus notables ondulaciones, parece que algunos sujetos filtraron la línea subyacente dando prioridad al radio de curvatura sobre dichas ondulaciones.

Por lo tanto podemos concluir que en casos de trazos que representan arcos cortos, las personas no muestran un criterio de percepción tan evidente como con arcos largos. Las personas parecen ser menos estrictas con las pequeñas irregularidades u oscilaciones, y las filtran para extraer la línea subyacente y comprobar si ésta posee un radio de curvatura suficiente como para percibir un arco elíptico. Sin embargo siguen penalizando ondulaciones evidentes y sobre todo la existencia de puntos de esquina donde existen cambios bruscos de dirección en el trazado como en el trazo b.9.

3.3.2.4 Experimento #4 para arcos

Dado que la gente es menos estricta con trazos cortos, cabe pensar que este comportamiento pueda influir en la percepción de trazos con diferentes longitudes (cubriendo diferentes ángulos de una elipse). Lanzamos la hipótesis de que la longitud del arco representa un parámetro muy influyente en la percepción humana.

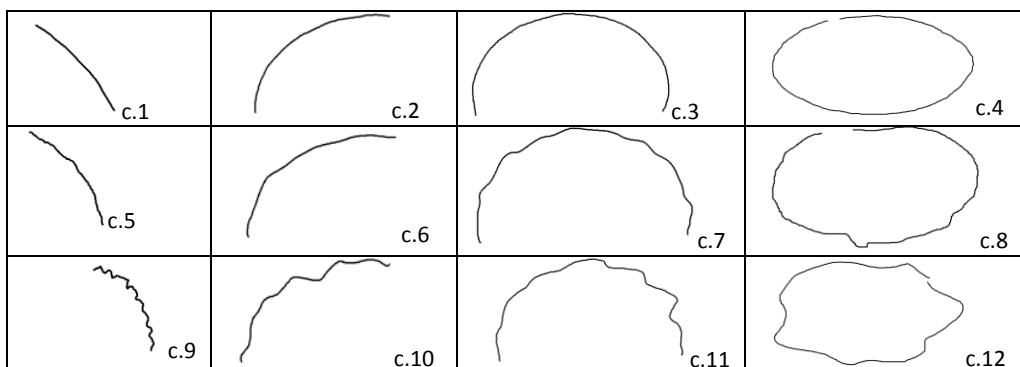


Figura 29. Conjunto de trazos empleados en la percepción de arcos elípticos

Para tal fin, se propuso un último experimento en el que se seleccionaron trazos que representaban arcos con diferente longitud, algunos de ellos representan arcos que abarcaban

ángulos de prácticamente 360° , otros 180° , otros cerca de 90° y otros menos de un cuarto de elipse. Además se seleccionaron arcos con tres diferentes calidades de trazado tal y como se muestra en la Figura 29.

Siguiendo el criterio del experimento 4, los trazos se presentaron en cuatro cuestionarios (formato A4) con los ejemplos ordenados aleatoriamente. Los cuestionarios se presentaron a una muestra de 32 sujetos, todos ellos alumnos de grado de diferentes titulaciones de ingeniería que numeraron cada uno de los ejemplos en la hoja de mejor a peor percepción de un arco elíptico. Los resultados se reflejan en la Tabla 31 del caso 4 en el Anexo I.

A la luz de los resultados se observa que los encuestados muestran un patrón de clasificación: los trazos c.1, c.2 y c.3 se clasificaron como arcos buenos por cerca el 69% de los sujetos (con un nivel de significación del 5%); los trazos c.5, c.6 y c.7 fueron clasificados como arcos medianos por el 65% de los encuestados, y los trazos c.9, c.11 y c.12 como arcos pobres también por el 65% de los encuestados (lo que implica una significación marginal del 10% en cada caso). Sin embargo, los arcos c.4 y c.8, que representan arcos casi completos son los ejemplos que presentan la menor frecuencia de percepción en los grupos buenos y medianos respectivamente, con una notable presencia en el grupo inmediatamente inferior. Por el contrario el trazo c.10 es el ejemplo del grupo pobre con más presencia en el grupo mediano; quizás en este caso las ondulaciones irregulares y la corta longitud del trazo hicieron que los sujetos se comportaran de un modo menos estricto. El trazo c.12, que también representa un arco casi completo con grandes irregularidades en su trazado, es el ejemplo que con mayor frecuencia se percibió como arco malo.

Por tanto, podemos decir que tal y como intuíamos, los humanos parecen más estrictos a la hora de percibir trazos como arcos que abarcan un gran ángulo de una elipse, sin embargo este comportamiento no implica que la longitud del arco tenga una influencia de peso en la percepción, puesto que en ningún caso se han ordenado los trazos por la longitud de su arco, sino que, como ha sucedido en todos los experimentos, la ordenación parece determinada por el tipo de irregularidades que el trazo posea en su trazado.

3.3.2.5 Oscilaciones y ondulaciones

Durante los experimentos, observamos que algunos sujetos entrevistados evaluaban los trazos con oscilaciones como trazos pobres, mientras que otro grupo de sujetos parecía filtrar mentalmente las oscilaciones y evaluar el trazo subyacente. En otras palabras, los sujetos generalmente distinguen entre oscilaciones y ondulaciones (definidas respectivamente como ondas de alta y baja frecuencia en torno a una línea teórica). Esta interpretación se vio reforzada por las preguntas que algunos sujetos realizaban a los encuestadores—preguntas que no fueron contestadas para no influir en la respuesta del encuestado—sobre si debían prestar atención o ignorar la falta de “suavizado”, “planitud” u “horizontalidad” de algunas líneas.

Por lo tanto suponemos que los sujetos parecen distinguir cambios de curvatura de oscilaciones de alta frecuencia y ondulaciones de baja frecuencia, y que las oscilaciones distraen menos (ya que generalmente son percibidas como no intencionadas) que las ondulaciones. La hipótesis es verdadera para los sujetos que en los experimentos del apartado 3.2.2 percibieron líneas rectas a partir de trazos. Aunque, hasta el momento, todavía no se han

llevado a cabo experimentos para validar o rechazar la hipótesis de que los sujetos con conocimientos técnicos son más propensos a filtrar oscilaciones y/u ondulaciones cuando perciben arcos elípticos. Y tampoco hemos determinamos hasta qué nivel debe llegar el proceso de filtrado.

3.3.3 Evaluación del trabajo previo

El siguiente objetivo es comparar los tres algoritmos descritos en la literatura y determinar sus fortalezas y debilidades. Por tanto a continuación evaluaremos el algoritmo de cinco-puntos (5P) basado en la implementación de Davis [Dav96], la implementación de Kotagiri [Kot10] del *ajuste de elipse directo* (DIR), y el *ajuste de elipse garantizado* con la distancia de Sampson (GEF) implementado por Szpak y otros Hay que comentar que en REFER se ha implementado nuestra propia versión en C++ del algoritmo GEF, siguiendo la implementación disponible de MATLAB en [Szp14].

Puede observarse que los algoritmos DIR y GEF requieren cálculos con vectores y matrices, para trabajar con este tipo de funciones el grupo REGEO ha implementado sus propias librerías en C++, dichas librerías se han implementado de un modo similar al trabajo de Richardson [Ric14], en nuestro caso se empleó la clase estándar de vector para simplificar la implementación y la depuración del programa, aunque eso conlleve sacrificar la eficiencia.

En el apartado 3.3.3.1, se demuestra que el algoritmo 5P falla en varias circunstancias:

- Para arcos cercanos a los 360° , a menos que uno de sus puntos finales se sustituya por un punto medio adicional.
- Para arcos cortos y con poco radio de curvatura (planos) y para trazos con un cambio en su curvatura, en este caso, el algoritmo devuelve lo que podemos denominar un ajuste “dolicocéfalo” (arco con forma larga y delgada).
- Para trazos con poco radio de curvatura y ondulados, ya que entonces el algoritmo no devuelve una elipse válida.

En el apartado 3.3.3.2 se explica que DIR falla para arcos cortos y planos, ya que tiene tendencia a devolver elipses más pequeñas. También falla ocasionalmente debido a mínimos locales que pueden aparecer durante el proceso iterativo. En el apartado 3.3.3.3 se explica que el algoritmo GEF es robusto y no falla (siempre que 5P o DIR le proporcionen una semilla válida), pero es tremendamente lento.

3.3.3.1 Algoritmo de cinco puntos (5P)

Basándonos en que los nodos del trazo están ordenados secuencialmente, implementamos un algoritmo de ajuste de una elipse que pase únicamente por 5 puntos: los dos puntos extremos del trazo más tres puntos intermedios equidistantes entre sí. Este método es mucho más rápido (se comprobará que aproximadamente mil veces más rápido que nuestra implementación del método DIR). Y además también se garantiza que los extremos del trazo pertenezcan a la elipse de ajuste (que coincide con el principio de cierre de los criterios gestálticos [Boy99]). El código se implementó para trabajar con la ecuación de una cónica según Davis [Dav96].

Al ejecutar el algoritmo, se ha observado que tiene tendencia a devolver lo que denominamos ajustes “dolicocefálicos” (es decir arcos con forma alargada y delgada) en tres casos. En primer lugar, cuando los extremos del trazo se encuentran demasiado próximos entre sí (Figura 30 izquierda). En este caso, tomando el primer punto del trazo y seleccionando otros 4 puntos intermedios equidistantes se soluciona el problema. En segundo lugar, al ajustar trazos que son irregulares, cortos (que abarcan un ángulo menor de 180°), y planos. Como ilustra la Figura 30 centro, al forzar al algoritmo 5P a pasar por nodos ligeramente cóncavos respecto a sus nodos adyacentes, devuelve un arco muy excéntrico o una solución numéricamente inestable que no representa una elipse válida. Por último, en el caso de trazos con cambios de curvatura bruscos (Figura 30 derecha).

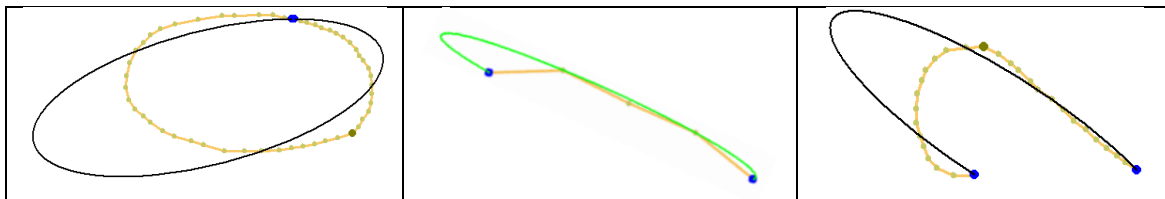


Figura 30. Ajustes dolicocefálicos del algoritmo 5P

Por último, el principal inconveniente del algoritmo 5P es que en realidad sólo selecciona cinco puntos del trazo. Para trazos de buena calidad (es decir, trazos que coincidan casi exactamente con un arco elíptico) la diferencia es irrelevante, mientras que para trazos muy irregulares, el ajuste es más bien aleatorio. Ocasionalmente, el algoritmo devuelve parámetros de una cónica en forma general (ecuación 14), que no puede definirse como una elipse válida. Este comportamiento ha sido detectado con algunos trazos planos y con ondulaciones, como el ejemplo b.9 representado en la Figura 28. La razón es que al tomar tres puntos intermedios del trazo más los dos puntos extremos, existe una alta probabilidad que algunos de los puntos intermedios caigan en uno de los semiplanos definidos por los puntos extremos, mientras que otros puntos intermedios caigan en el otro semiplano. Obviamente, estos casos impiden el ajuste de la elipse. Pero en realidad este hecho no implica un problema en el método que planteamos, ya que nuestro interés es que el algoritmo ajuste el trazo a una elipse si éste realmente describe una; en caso contrario, el algoritmo simplemente tiene que devolver un mérito nulo (valor de 0).

3.3.3.2 Ajuste de elipse directo (DIR)

El popular método de ajuste DIR busca estadísticamente los parámetros de la elipse más cercana a todos los puntos del trazo (supone que todos los puntos dados pertenecen a una elipse), empleando una minimización por mínimos cuadrados. El algoritmo garantiza como solución una elipse específica incluso con datos con ruido o dispersión. La solución óptima se calcula directamente, sin ninguna iteración. Halir y Flusser lo consideran un método simple, estable y robusto [HF98].

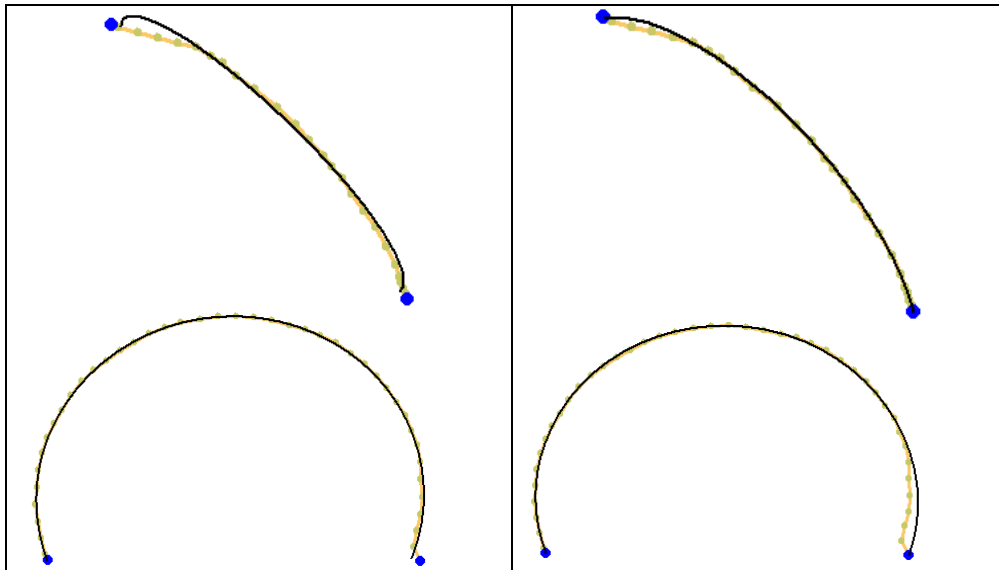


Figura 31. Dos arcos con un ajuste pobre según el método de Fitzgibbon (izquierda) y un mejor ajuste en sus extremos según el método de los cinco puntos (derecha).

Pero el método de Fitzgibbon tiene dos inconvenientes importantes. Primero, requiere un alto tiempo de cálculo. Y segundo, el ajuste está de alguna manera sesgado hacia elipses pequeñas. Cuando los puntos muestreados forman sólo una porción de elipse, la elipse estimada es a menudo más pequeña de lo que debería ser [Szp14]. Eso significa que en casos de elipses muy excéntricas, los puntos extremos del trazo nunca pertenecen a la elipse estimada (que como ya se comentó en el caso de las líneas rectas, rompe el principio de cierre de la Gestalt [Boy99]). Algo similar ocurre cuando el usuario dibuja los extremos del trazo con descuido (Figura 31).

Otro inconveniente de este algoritmo es que de manera ocasional devuelve mínimos locales, lo que implica que el conjunto de parámetros obtenido no representa un arco elíptico válido, o que el resultado es un ajuste perceptualmente erróneo, como el representado en la Figura 32—que es claramente un mínimo local, ya que desaparece al rotar ligeramente el trazo sobre su centroide.

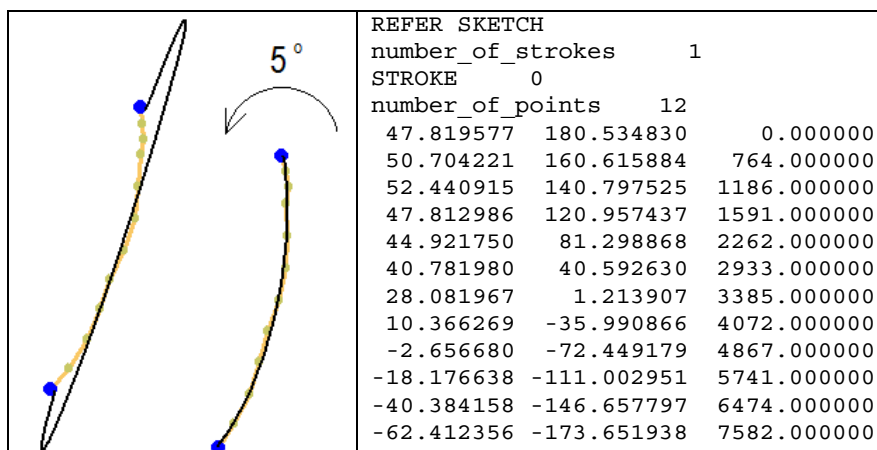


Figura 32. Ajuste pobre de DIR debido a un mínimo local, que desaparece tras una rotación de 5°

3.3.3.3 Ajuste de Elipse Garantizado con la distancia de Sampson (GEF)

La otra alternativa estudiada es el algoritmo denominado “Guaranteed Ellipse Fitting” (GEF). Este algoritmo busca los parámetros de la elipse más cercana a los nodos empleando un método de optimización conocido como *método de descenso simplex*. El método emplea una función de coste de máxima probabilidad aproximada para ajustar una elipse a los datos, y simultáneamente garantiza la obtención de una elipse [Szp14]. El método es iterativo y su comportamiento depende en gran medida de esa estimación inicial.

Suponiendo que el arco semilla tomado como estimación es lo suficientemente bueno, GEF devuelve ajustes muy precisos, que están libres de los sesgos o tendencias observados en el método DIR. Sin embargo, el tiempo computacional de GEF es inaceptable para una aplicación en-línea. Además, el tiempo de ejecución se incrementa en casos patológicos hasta niveles inaceptables para nuestro propósito (ver apartado 3.3.3.4 “Tiempos de ejecución”) ya que GEF requiere unas buenas aproximaciones que son imposibles de obtener en esos casos. La Figura 33 muestra un ejemplo sencillo en el que el trazo remuestreado de 20 puntos es ajustado en un tiempo de 2”, mientras que el trazo original (55 puntos) requiere de 1’40”. Esto es debido al empleo del algoritmo 5P para la obtención de la semilla de GEF es ineficiente en caso de trazos de calidad pobre.

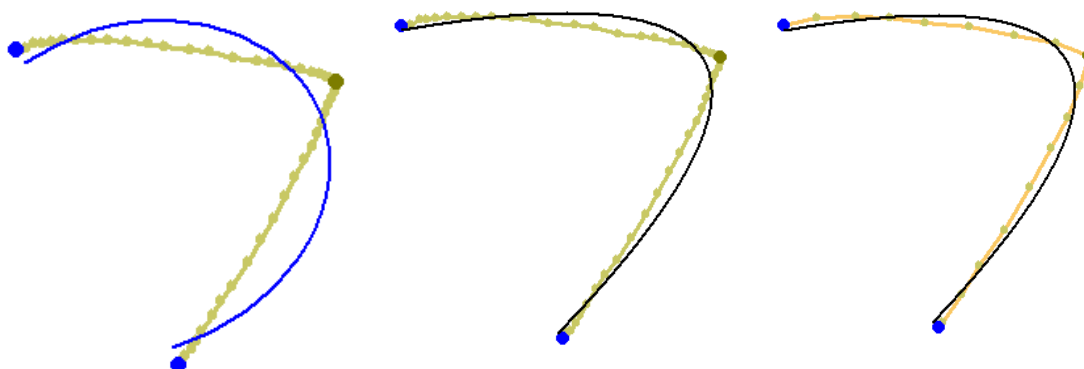


Figura 33. Una semilla inapropiada de DIR (izq.) conlleva grandes costes computacionales para obtener un ajuste de GEF válido (centro), que es reducido drásticamente tras remuestrear el trazo (dcha.)

La solución adoptada para evitar excesivos tiempos de ejecución es remuestrear el trazo de entrada a una veintena de puntos (ver apartado 3.3.4.2)—ya que se necesita una cantidad mínima de 5 puntos para permitir un ajuste preciso en un solo cuadrante. La desventaja del remuestreo es que aumenta las probabilidades de que DIR produzca una semilla inapropiada (como en la Figura 32) a partir del trazo remuestreado, lo que producirá un mal ajuste de GEF.

3.3.3.4 Tiempos de ejecución

Para analizar el coste computacional, se tomaron tiempos de los cuatro algoritmos: 5P, DIR y GEF—evaluado con las semillas procedentes de los algoritmos de 5P (GEF/5P) y de DIR (GEF/DIR).

Los ejemplos evaluados corresponden a los mismos trazos empleados en el apartado 3.3.2 para entrevistar a los seres humanos. Como los algoritmos se comportan de manera diferente frente a arcos que abarcan ángulos pequeños o grandes, los ejemplos se han clasificado siguiendo esta pauta y se han evaluado por separado. Así, la Figura 34 muestra el tiempo de

ejecución frente al número de puntos que definen el trazo cuando el ejemplo representa un arco de ángulo pequeño, y la Figura 35 cuando los ejemplos representan arcos de ángulos grandes. Adicionalmente y para ampliar el espectro de la muestra, los ejemplos se han remuestreado para obtener diferentes valores de la variable: número de puntos del trazo.

Es evidente que el algoritmo 5P es el más rápido—aproximadamente 1000 veces más rápido que DIR y 100000 veces más rápido que GEF—y esta ventaja aumenta ligeramente cuando se incrementa el número de puntos. Por esta razón, 5P debería probarse siempre en primer lugar si se sigue el criterio de la velocidad. El tiempo de ejecución de DIR puede ser aceptable para trazos que contengan hasta unos pocos cientos de puntos o nodos, por lo tanto la alternativa de combinar DIR con un remuestreo del trazo hasta unos 100 puntos se convierte en una alternativa rápida y de ajuste fiable. Los tiempos de ejecución de GEF/5P y GEF/DIR son inaceptables para una aplicación interactiva, incluso cuando se combina la opción de remuestreo a 20 puntos. El algoritmo GEF/5P no vale la pena considerarlo ya que casi siempre es más lento que GEF/DIR.

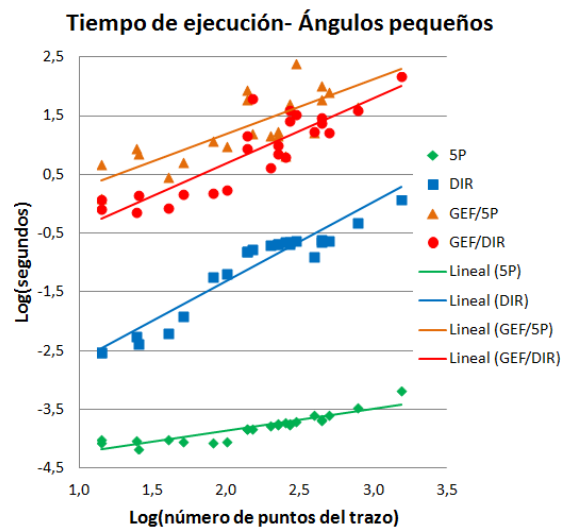


Figura 34. Comparación de los tiempos de ejecución entre todos los algoritmos para arcos cortos.

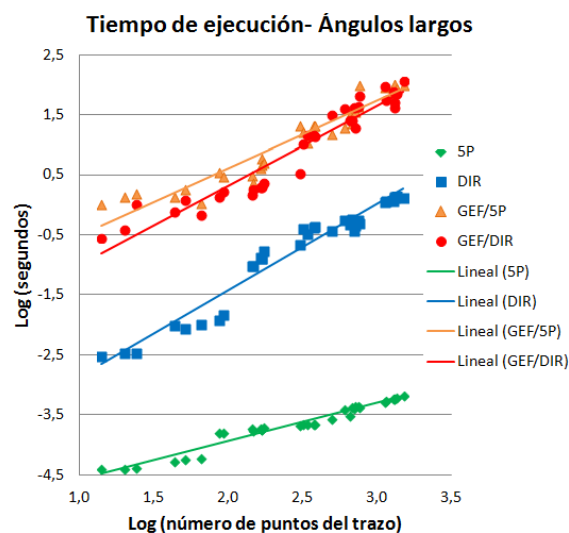


Figura 35. Comparación de los tiempos de ejecución entre todos los algoritmos para arcos largos.

3.3.4 Algoritmo rápido y basado en la percepción humana para el ajuste de arcos elípticos

A continuación se describe el método desarrollado e implementado por el grupo REGEO (con colaboración de la doctoranda) para ajustar trazos bocetados a arcos de elipse buscando un equilibrio entre la velocidad y la precisión. Los estudios de campo y los análisis explicados en el presente capítulo, son contribuciones originales de la presente tesis que se han empleado para descubrir las claves perceptuales que se aplican en el algoritmo propuesto.

El método debe ser lo suficientemente preciso para ser empleado en una aplicación CAS, donde la velocidad es más importante que obtener geometrías exactas. Por otra parte, no estamos interesados en algoritmos que midan lo bien que una forma representa una primitiva geométrica pre-fijada, sino en los métodos que miden la probabilidad de que una determinada forma sea percibida por los seres humanos como una determinada primitiva geométrica. El método que se propone en la siguiente tesis puede emular a los seres humanos cuando perciben trazos que representan arcos elípticos, actuando en dos etapas: primero se calcula un ajuste razonablemente bueno y rápido, y posteriormente se calcula lo bien que el trazo se ajusta en un conjunto de tres bandas de tolerancia en torno al arco elíptico ajustado.

En el apartado 3.3.3 hemos comprobado que 5P es un algoritmo suficientemente preciso y razonablemente robusto. La robustez está garantizada empleando nuestras métricas rápidas tolerante a las imperfecciones de bocetado (apartado 3.3.4.3): el método detecta fallos potenciales de 5P y lanza automáticamente otros algoritmos alternativos (DIR o GEF). De ahí que en primer lugar se ejecute primero 5P, ya que es el algoritmo más rápido. Este algoritmo algebraico devuelve seis parámetros que definen la ecuación de la cónica en forma general (ecuación 14). Si estos parámetros no definieran una elipse válida (por ejemplo, debido a que apareciera un determinante nulo de la matriz de coeficientes, o un determinante nulo o negativo de la submatriz resultante al eliminar la última fila y la última columna), entonces se ejecutaría el algoritmo 5P/CH. En el caso de que ninguno de los dos métodos definiera una elipse válida, el proceso se ejecuta secuencialmente para DIR/R, DIR/R/CH, DIR y GEF hasta que uno de ellos devuelve un ajuste válido.

Los ajustes válidos pueden diferir entre sí (Figura 36), y pueden tener una calidad pobre. Para saber si un algoritmo ha devuelto un ajuste válido tenemos dos opciones: realizar una comparación punto por punto (con un alto coste computacional), o emplear algunas métricas rápidas basadas en criterios perceptuales. El método propuesto emplea esta segunda opción, basada en las métricas definidas en el apartado 3.3.1.2).

De este modo, el método emula la percepción humana, ya que a partir de los resultados obtenidos experimentalmente, sabemos que distinguir entre trazos buenos, medianos y pobres es un comportamiento perceptual. Además el método también replica la percepción humana, cuando se comporta diferente según los trazos representen arcos cortos o largos, y al elegir el algoritmo más rápido en lugar del algoritmo que devuelve un resultado geoméricamente más exacto.



Figura 36. Trazo poligonal ajustado por 5P (izquierda), DIR (centro) y GEF (derecha).

Además, se pueden combinar los algoritmos de ajuste existentes de diferentes maneras, y aquí es donde los experimentos del apartado 3.3.2 son importantes para descubrir qué flujo es el que mejor replica el comportamiento humano.

El método para evaluar el mérito del ajuste—para distinguir entre trazos buenos, medianos y pobres (como en los experimentos #1 y #2)—define tres bandas de tolerancia y evalúa si los puntos del trazo están localizados dentro de éstos. Esta evaluación se describe en el apartado 3.3.5.

El método se puede resumir como sigue:

1. Calcular las métricas rápidas del trazo (*BoxLength*, *Sagitta*, *ShortStroke*, *FlatStroke*, *ShortAndFlat*). (Ver apartado 3.3.1.2).
2. Ajustar el trazo a un arco elíptico.
 1. Calcular $\Phi = (a, b, c, d, e, f)$ aplicando 5P al trazo original.
 - i. Calcular ejes principales, centro, focos y puntos finales a partir de Φ .
 - ii. Φ es válido si $\Delta \neq 0$ y $J > 0$ y $\Delta \cdot (a+c) < 0$ (ver apartado 3.3.1)
 - iii. Calcular las métricas del arco (*ShortArc*, *ArcOverflow*).
 - iv. Establecer Φ como no válido si:
 1. (*ShortAndFlat* es verdadero y *ShortArc* es falso), o
 2. (*ShortStroke* es falso y *ShortArc* es verdadero) o
 3. (*ShortArc* es falso y *ArcOverflow* es verdadero)
 2. Si Φ no es válido, entonces calcular Φ mediante 5P/CH (aplicado a la envolvente convexa del trazo original).
 - i. Los mismos pasos i hasta iv como en 2.1.
3. Si Φ no es válido, entonces calcular Φ mediante DIR/R (después de remuestrear el trazo original a 20 nodos).
 - i. Calcular ejes principales, centro, focus y puntos finales a partir de Φ .
 - ii. Φ es válido si $\Delta \neq 0$ y $J > 0$ y $\Delta \cdot (a+c) < 0$ (ver apartado 3.3.1)
 - iii. Calcular las métricas del arco (*ShortArc*, *ArcOverflow*, *GapEnds*, *ArcOverflow*).
 - iv. Establecer Φ como no válido si:
 1. (*ShortAndFlat* es verdadero y *ShortArc* es falso), o
 2. (*ShortStroke* es falso y *ShortArc* es verdadero) o

3. (*GapEnds* es verdadero) o
4. (*ShortAndFlat* es verdadero y *ArcUnderflow* es verdadero)
5. (*ShortArc* es falso y *ArcOverflow* es verdadero)
4. Si Φ no es válido, entonces calcular Φ mediante DIR/R/CH (aplicado a la envolvente convexa del trazo remuestreado).
 - i. Los mismos pasos i hasta iv como en 2.3.
5. Si Φ no es válido, entonces calcular Φ mediante DIR (aplicado al trazo original).
 - i. Los mismos pasos i hasta iv como en 2.3.
6. Si Φ no es válido, entonces calcular Φ mediante GEF (después de remuestrear el trazo original a 20 nodos).
 - i. Calcular ejes principales, centro, focus y puntos finales a partir de Φ .
 - ii. Φ es válido si $\Delta \neq 0$ y $J > 0$ y $\Delta \cdot (a+c) < 0$ (ver apartado 3.3.1)
7. Si Φ no es válido, entonces devuelve mérito cero.
3. Evaluar el mérito del ajuste
 1. Calcular *Tol* para el trazo original.
 2. Si *Tol* es menor que la tolerancia mínima, entonces
 - i. Devuelve la mayor figura de mérito (1).
 3. Suavizar el trazo original, como en el apartado 3.3.4.2.
 4. Calcular *Tol* para el trazo *remuestreado* (apartado 3.3.4.3).
 5. Asignar mérito 1 para *Tol* menor que *TolMin*, nulo para *Tol* mayor que *TolMax*, y un valor linealmente decreciente de 1 a 0 dentro de este rango.
 6. Reducir el mérito para las oscilaciones de los trazos:

$$Merit = \max (Merit - Penalty \cdot NSS, 0)$$

3.3.4.1 *Envolvente convexa*

Para evitar el problema de trazos localmente cóncavos (Figura 30 centro), se propone un método que está basado en la consideración perceptual de que al obligar a los humanos a dar sentido a una forma muy irregular, éstos actúan ignorando sus detalles y tratando de dar sentido al contorno global (“cuando sea posible, se interpretará una curva en una imagen como el borde de una superficie 3D [Hof98]). Por lo tanto, el método 5P/CH funciona como sigue: primero se calcula la envolvente convexa, que posteriormente se remuestrea (apartado 3.3.4.2) a cinco puntos—o seis puntos si el primero y el último nodo están demasiado próximos—y se emplea esta quintupla resultante para ajustar la elipse. Una estrategia muy similar se emplea también para DIR/CH.

La envolvente convexa puede obtenerse, por ejemplo, mediante Graham Scan [Har14]. Aunque en nuestro caso, hemos implementado un método sencillo que aprovecha el hecho de que los nodos del trazo ya se encuentren secuenciados. Este método elimina recursivamente aquellos nodos que definen una conexión cóncava con sus nodos vecinos. Se emplea la fórmula del área para determinar si el trazo sigue el sentido de las agujas del reloj, o un sentido contrario (el resultado es impredecible para los trazos que se auto-intersectan, pero

esos casos no nos preocupan ya que no representan arcos elípticos). Para trazos que siguen el sentido de las agujas del reloj, si los nodos en cuestión, caen en el semiplano derecho de los dos semiplanos definidos por la línea que conecta el nodo anterior con el posterior, esto significa que el nodo actual es cóncavo y debe ser eliminado. En el caso de los trazos dibujados en sentido contrario a las agujas del reloj, los nodos que tienen que ser eliminados son los que caen en el semiplano izquierdo. En ambos casos, los semiplanos quedan determinados por el signo del producto cruzado de las líneas orientadas (anterior-actual) y (actual-posterior), que es positivo si el nodo actual cae en el semiplano izquierdo definido por la línea entre los nodos anterior-posterior y negativo si el nodo actual cae en el semiplano derecho.

3.3.4.2 *Remuestreo*

Como el tiempo de cálculo de DIR era demasiado alto y el tiempo de ejecución de GEF es inaceptable para aplicaciones en-línea, el grupo REGEO implementó un sencillo algoritmo para remuestrear los trazos. Los trazos se remuestran hasta 20 nodos equidistantes entre sí. El intervalo se define de acuerdo a la longitud total del trazo dividido por el número de nodos remuestreados menos uno (20-1). El primer nodo del trazo original se toma como primer nodo del trazo remuestreado. Los siguientes nodos del trazo original quedan descartados, hasta que la distancia al último nodo añadido previamente al trazo remuestreado es mayor o igual que el intervalo fijado. Si la distancia es exactamente la misma, el nodo que cumple esta condición es añadido al trazo remuestreado. En caso contrario, el punto ubicado a la distancia exacta se obtiene por la interpolación de la cuerda que conecta el nodo actual y el anterior. El proceso se repite hasta que se alcanza el final del trazo. Por último, el último nodo del trazo original es añadido al trazo y los pequeños errores de redondeo quedan acumulados en la longitud de esta última cuerda.

El remuestreo es también empleado en los algoritmos 5P (para obtener los 5 nodos que necesita el algoritmo) y DIR para su versión DIR/R.

3.3.4.3 *Métricas rápidas para medir la calidad del ajuste*

Obviamente, las diferencias entre el ajuste de arcos y los trazos de entrada pueden ser medidas con gran precisión (por ejemplo midiendo las diferencias de sus respectivos perímetros), pero esto requeriría demasiado tiempo para una aplicación interactiva. En su lugar, el método propuesto se basa en métricas rápidas de calcular que miden razonablemente bien las discrepancias entre el trazo y el arco. Además, estas métricas están dirigidas a aquellos casos en los que las pruebas muestran que alguno de los tres algoritmos puede fallar.

De acuerdo al apartado 3.3.3, los fallos de 5P y DIR aparecen principalmente para arcos que cubren ángulos pequeños. El indicador *ShortStroke* toma el valor de “verdadero” cuando el ángulo que abarca el trazo es inferior a 180°. El método puede medir indirectamente el ángulo antes del ajuste del arco porque los valores de *GapF* y *GapL* (Figura 37) son nulos cuando los trazos son cortos. Para permitir al usuario dibujar con cierta imperfección, el método evalúa el indicador como “verdadero” si el valor máximo de *GapF* o *GapL*, es menor que el umbral de tolerancia definido como el 10% del valor máximo entre (*Chord/2*, *Sagitta*).

Obviamente, esta métrica asume que el trazo representa aproximadamente un arco elíptico. Y falla cuando la calidad del trazo es muy pobre (como el trazo a.12 de la Figura 27), pero esto

no nos plantea un problema ya que el objetivo es que para dichos trazos, simplemente se detecte que no representan arcos elípticos.

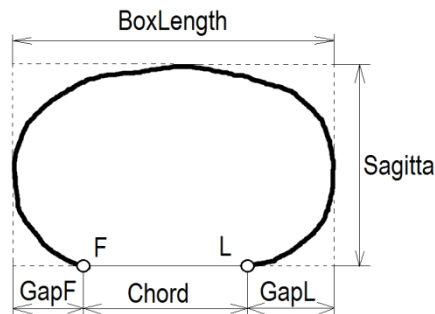


Figura 37. Parámetros para determinar si el trazo representa un arco que cubre un pequeño ángulo de una elipse

Sin embargo, algunos trazos largos pueden ser erróneamente clasificados como cortos por estas métricas rápidas. Aplicar un umbral más restrictivo podría resolver este problema, pero entonces se reduciría la flexibilidad del método para analizar bocetos imprecisos. Afortunadamente, los trazos cortos no suponen un problema para el algoritmo 5P, a menos que además sean también planos. De ahí, que se haya considerado un segundo indicador, denominado *FlatStroke*, que toma el valor de “verdadero” si el trazo representa una línea casi recta. El método primero calcula el rectángulo delimitador del trazo, donde *BoxLength* es paralelo a *Chord* (la cuerda que conecta los dos extremos F y L del trazo) y denominamos *Sagitta* a la distancia perpendicular (Figura 37). Para determinar pequeñas curvaturas, es decir, trazos “planos”, el método compara si el valor de *Sagitta* es mucho menor que el valor de *Chord*. En la propuesta actual, *FlatStroke* es verdadero si *Sagitta* es menor que el 20% de *Chord*.

Si el trazo representa un arco que cubre un ángulo pequeño y es prácticamente plano (es decir, si los indicadores *ShortStroke* y *FlatStroke* son verdaderos), entonces el indicador *ShortAndFlat* toma el valor de verdadero. El ángulo cubierto por el trazo se compara con el ángulo cubierto por el arco. A tal fin *ShortArc* se considera verdadero si el arco abarca menos de 180° .

Para trazos largos, 5P muestra una tendencia a producir arcos excesivamente grandes. Para detectar estos casos emplea el indicador *ArcOverflow*. El método emplea la orientación del trazo medido como el ángulo de *Chord*, y el ángulo del eje principal del arco (α), ambos para el rango $[0, \pi/2)$. Si la diferencia absoluta entre ambos ángulos es menor que $\pi/8$, se considera que el eje principal es prácticamente paralelo a *BoxLength*. En este caso, *ArcOverflow* toma el valor de verdadero si $2 \cdot R_a$ es mayor que *BoxLength*, o $2 \cdot R_b$ es mayor que *Sagitta*. En otro caso, *ArcOverflow* toma el valor de verdadero si R_a es mayor que la raíz cuadrada del cuadrado de *BoxLength* más el cuadrado de *Sagitta*.

En resumen, existen tres casos en los que 5P puede producir malos ajustes: (1) cuando *ShortAndFlat* es verdadero y *ShortArc* es falso, (2) cuando *ShortStroke* es falso y *ShortArc* es verdadero, y (3) cuando *ArcOverflow* es verdadero y *ShortArc* es falso.

El ajuste de DIR se evalúa prestando atención a su fallo típico: la tendencia a ajustar elipses más pequeñas. Este fallo está relacionado con trazos cortos y planos. En esos casos, DIR falla al

cumplir el principio gestáltico de cierre. Por ello, el indicador *GapEnds* toma el valor de verdadero cuando la distancia del arco elíptico a al menos uno de los dos puntos extremos (ver apartado 3.3.1.2) es mayor que el 5% de las distancias reducidas del trazo—calculadas como la suma de las longitudes de las cuerdas de *numIntervals*. Para encontrar la longitud aproximada del arco con ondulaciones resultante al eliminar oscilaciones de alta frecuencia del arco original se emplea un valor pequeño de *numIntervals* (generalmente 10). De esta manera, el método distingue entre oscilaciones y ondulaciones.

Finalmente, DIR tiene una cierta tendencia a producir arcos de tamaño excesivamente pequeño (únicamente en arcos que cubren ángulos grandes). Para detectarlo, el indicador *ArcUnderflow* toma el valor de verdadero si el arco mucho más pequeño que el trazo. Esto ocurre cuando *BoxLength* es mayor (generalmente un 15% mayor) que $2R_a$.

Empleando los indicadores definidos anteriormente, podemos asumir que DIR produce un ajuste pobre: (1) si *ShortAndFlat* es verdadero y *ShortArc* es falso, (2) si *GapEnds* es verdadero, y/o (3) si *ArcOverflow* is verdadero.

3.3.4.4 Suavizado

El proceso de suavizado es el mismo que se planteó en el apartado 3.2.3.1 para el reconocimiento de líneas rectas.

El efecto del suavizado de un caso típico de trazo pobre que representa un arco puede observarse en la Figura 38.

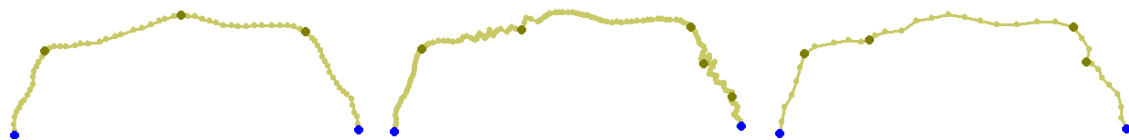


Figura 38. Trazo con ondulaciones y sin oscilaciones (izq.), trazo de oscilaciones regulares (centro), y trazo suavizado con oscilaciones tras dos iteraciones de suavizado (dcha.)

3.3.4.5 Evaluación del mérito del ajuste

El método también evalúa el mérito del ajuste para distinguir entre trazos buenos, medianos y pobres (como en los experimentos #1, #2 y #3). Para determinar el mérito del ajuste del método se define las bandas de tolerancia y se evalúa si los puntos del trazo se encuentran dentro de éstas. Primero, se evalúa el trazo original respecto de la banda de tolerancia mínima (*ToLMin*). Los trazos que pasan este filtro se pueden considerar arcos elípticos prácticamente perfectos, y son reconocidos como tales. Los trazos que no pasan el filtro de mínima tolerancia son suavizados (siguiendo el proceso de suavizado explicado en el apartado 3.3.4.4, que filtra las oscilaciones, es decir la irregularidades de alta frecuencia), y se evalúan respecto de la banda de máxima tolerancia (*ToLMax*). El valor de la figura de mérito se reduce en función del número de etapas de suavizado (*NSS*), sin permitir valores negativos:

$$\text{Mérito} = \text{Mérito} - \text{Penalty} \cdot \text{NSS} \quad (29)$$

Medir las distancias de cada uno de los puntos del trazo a la elipse para determinar si el trazo está dentro de las bandas de tolerancia requiere un alto consumo de tiempo, ya que se

necesita resolver el sistema trascendental usando las técnicas de cálculo de raíces descritas anteriormente—apartado 3.3.1.3 “detección de puntos finales”—para cada uno de los puntos del trazo.

Para simplificar el proceso, el método asume que una elipse es un círculo que ha sido alargado en una dirección. De ahí, el trazo es rotado—para hacer que su eje principal coincida con el eje de coordenadas principal—y se escala empleando un factor que convierta el arco elíptico ajustado en un círculo de radio unidad. A continuación los nodos del trazo transformado que más distante se encuentran del radio unidad (tanto por exceso, como por defecto), son aquéllos que se considerarán como los nodos más distantes del trazo original a la elipse, y esas distancias se calcularán respectivamente como d_{Out} y d_{In} . Por último, el parámetro Tol se calcula como la suma de dichas distancias: $Tol = d_{Out} + d_{In}$.

3.3.5 Análisis

En este apartado se analizan los resultados al evaluar las ideas implementadas en el apartado 3.3.4. El conjunto de parámetros y sus ajustes se describen en apartado 3.3.5.1.

Los resultados de los ajustes obtenidos se muestran en el apartado 3.3.5.2. Y el análisis de tiempos de ejecución se refleja en el apartado 3.3.5.3.

3.3.5.1 *Ajuste de los parámetros*

Al evaluar un gran conjunto de trazos, incluyendo todos los trazos empleados en todos los experimentos, observamos que el método es rápido y devuelve figuras de mérito coherentes con los resultados de la percepción humana cuando $TolMin$ tiene es igual al 1.0% de la longitud del trazo, $TolMax$ es el 10% de la longitud del trazo, $TolSmooth$ es el 1.0% de la longitud del trazo, y la penalización de suavizado (*Penalty*) el 5.0% para cada iteración de suavizado.

Al ajustar el método con estos valores, devuelve los méritos mostrados en la Figura 39, Figura 40 y Figura 41.

Comparando los resultados experimentales con los resultados de método propuesto podemos concluir que éste replica casi siempre la percepción humana. También se puede concluir que los trazos con una figura de mérito igual o mayor a 0.5 corresponden a trazos que han sido percibidos como buenos o medianos por los humanos, y por tanto éste es el criterio que sugerimos para aquéllos que estuvieran interesados en convertir las figuras de mérito en una decisión dicotómica (*sí/no*).

3.3.5.2 *Comportamiento general*

Todos los trazos de los Experimentos #1 y #2 pueden ajustarse con el algoritmo 5P, aunque para los trazos pobres produce ajustes para los que la única bondad es que sus puntos finales pertenecen al arco ajustado (trazos 9, 10 y 11 de la Figura 39).

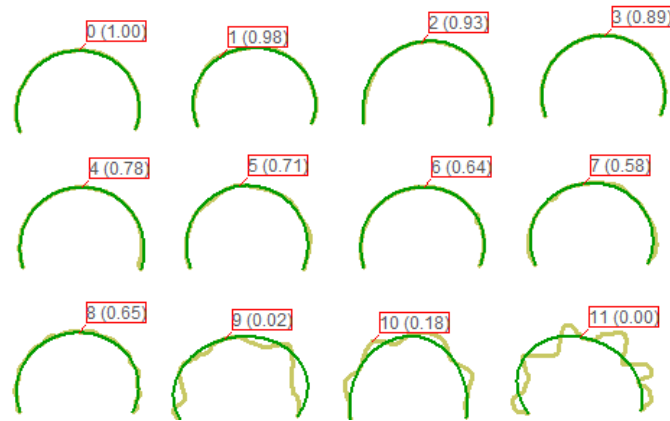


Figura 39. Ajustes de 5P de los trazos del Experimento #1

En el caso del Experimento #3, cuatro de los trazos cortos fueron evaluados por 5P (líneas verde oscuro de la Figura 40); 5P/CH se lanzó en el cálculo de 3 arcos (líneas verde claro); se requirió DIR/R en 4 de los trazos (línea azul oscura), mientras que para el último ejemplo se ejecutó DIR/R/CH (línea azul claro).

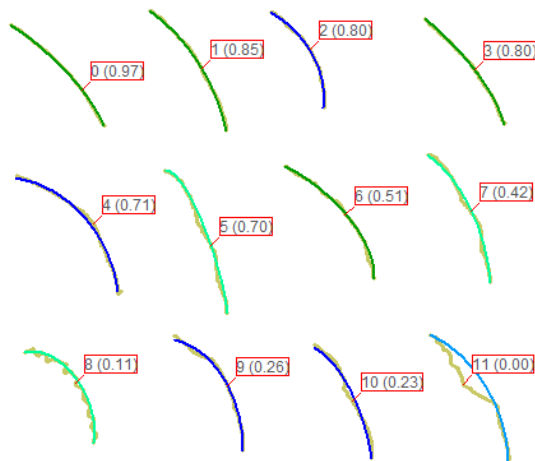


Figura 40. Ajustes de los trazos del Experimento #3

Once de los trazos del experimento #4 se ajustaron con el algoritmo 5P, y el restante por 5P/CH (Figura 41). El método no ejecutó el algoritmo GEF en ningún ejemplo.

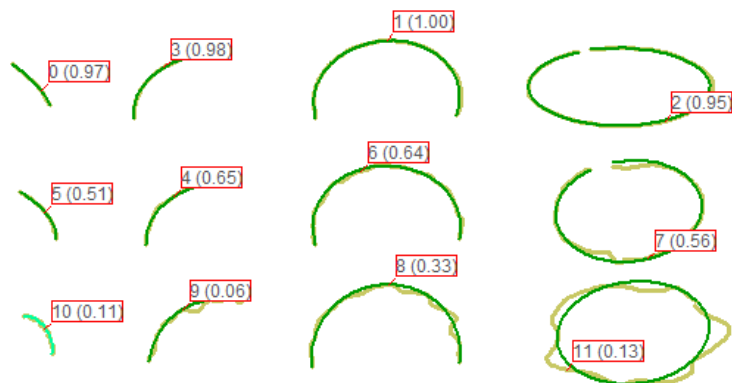


Figura 41. Ajustes de los trazos del Experimento #5

De la estimación de frecuencias para estos experimentos se desprende que 5P logró un ajuste válido 31 de las 36 veces (86%), DIR/R se ejecutó 5 veces (14%), y ni DIR ni GEF fueron lanzados con ningún ejemplo. Pero estas frecuencias son apenas relevantes, ya que cabe destacar que: (1) 5P sólo falla para trazos muy cortos o de muy baja calidad; (2) nuestro método devuelve ajustes válidos para todos los ejemplos evaluados, y (3) nunca requiere tiempos de cálculo costosos (i.e. GEF o DIR), y emplea los ajustes más rápidos la mayoría de las veces: 86%, o el 72% (13/18) si sólo consideramos arcos cortos. Esas estimaciones se refinaron analizando más trazos.

Para el experimento #1, que sólo contiene arcos largos, sólo se ejecutó el algoritmo 5P (es decir que el paso 1.1 de nuestro método fue suficiente para calcular un Φ válido. De un conjunto de otros 69 trazos largos (incluidos en la Figura 84 del caso 5, Anexo I), 64 se ajustaron con 5P (paso 1.1), 4 con 5P/CH (paso 1.2), y sólo uno empleó DIR (paso 1.3). Además, del conjunto de los 26 arcos elípticos cerrados, todos se ajustaron correctamente con 5P (paso 1.1). Esto significa que para arcos largos DIR sólo se requiere de manera marginal (sólo cuando ocurren los ajustes dolicocéfalicos).

5P (paso 1.1) calculó un Φ válido para 4 de los ejemplos de arcos cortos del experimento #3. 5P/CH (paso 1.2) se ejecutó en 3 ejemplos. Mientras que DIR se empleó 4 veces y DIR/CH sólo 1. Además, de un conjunto de otros 139 trazos cortos similares (incluidos en la Figura 85 del caso 5, Anexo I), 88 se ajustaron con 5P (paso 1.1), 22 con 5P/CH (paso 1.2), 23 con DIR/R (paso 1.3), 3 con DIR/R/CH (1.4), y 3 emplearon DIR para el ajuste (sobre el trazo original). Recapitulando, para arcos cortos, DIR/R se empleó 26/139, y DIR aplicado con el trazo original se empleó sólo 3/139. El algoritmo GEF nunca se ejecutó.

3.3.5.3 Validez de los algoritmos rápidos y menos precisos

Aunque la selección de la quintupla para 5P puede parecer arbitraria, se debe destacar que en el contexto del método propuesto no hay pérdida de generalidad al seleccionar puntos intermedios espaciados regularmente. La posible falta de precisión durante la etapa de ajuste en ajustes rápidos, no impide asignar los méritos correctos durante la segunda etapa, ya que posteriormente medimos la banda de tolerancia entre la elipse ajustada a dichos puntos y el resto del trazo. Ciertamente, este método puede devolver un ajuste pobre, ya que en realidad sólo toma cinco puntos del trazo para el cálculo del ajuste. Sin embargo, para trazos de buena calidad (es decir, trazos que coincidan casi exactamente con un arco elíptico) la diferencia es irrelevante, mientras que para trazos pobres el ajuste también puede ser pobre, pero aún así el método detecta cuán pobre es el ajuste al definir la banda de tolerancia para medir las discrepancias entre los puntos "malos" del trazo y el ajuste (Figura 42 izquierda). En caso de que se seleccionaran al azar algún punto intermedio "malo" para el ajuste de la elipse, se medirá la tolerancia de puntos "malos" a puntos "buenos" que es casi la misma tolerancia que la que existe de puntos "buenos" a puntos "malos" (Figura 42 derecha). Por lo tanto, la aproximación tomada no afecta a la correcta asignación de la figura de mérito.

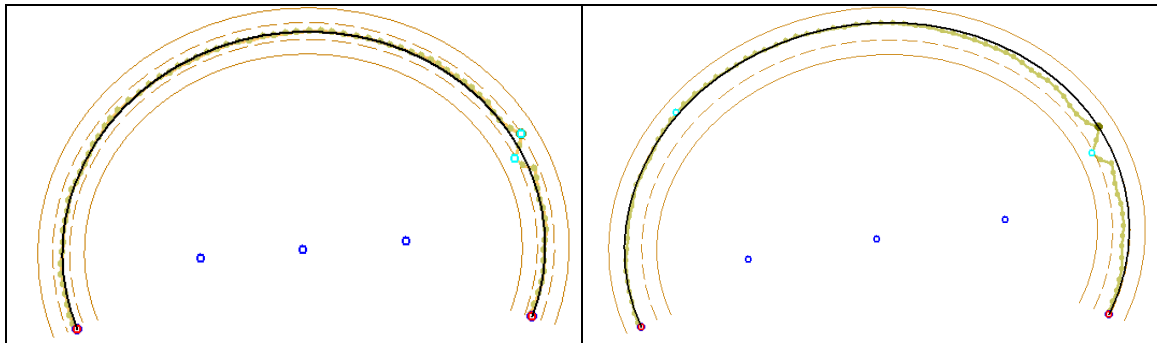


Figura 42. Medida de la banda de tolerancia con una buena estimación (izq.), y una mala estimación (dcha.)

3.3.5.4 Tiempo de ejecución

Para calcular los tiempos de ejecución, distinguimos cinco etapas principales en el nuevo método: (a) Ajuste del trazo a una elipse provisional, (b) Evaluación del criterio de mínima tolerancia, (c) Suavizado de las oscilaciones, (d) Evaluación del criterio de máxima tolerancia y (e) Asignación del mérito. Dentro de la primera etapa, podemos definir las siguientes sub-etapas: (a.1) Cálculo de las métricas rápidas, (a.2) Remuestreo del trazo, (a.3) Obtención de la envolvente convexa, (a.4) Ajuste del trazo, (a.5) Obtención del arco elíptico y (a.6) Evaluación de la calidad.

Para medir los tiempos de ejecución empleamos los ejemplos d1 y d2 (Figura 43), que respectivamente abarcan ángulos grandes y pequeños. Ambos tienen un número similar de nodos (sobre 1500 nodos), y ambos fueron remuestreados hasta un 1/8 de su número de puntos inicial para compara los tiempos de ejecución.

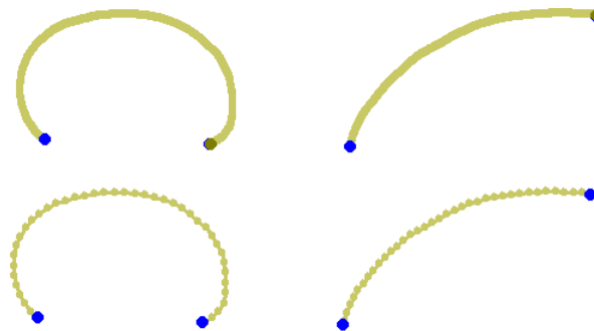


Figura 43. Trazos d1(izq.) y d2 (dcha.) para comparar el comportamiento del algoritmo con arcos largos/cortos variando el número de puntos.

Para filtrar los redondeos de medición de los tiempos de ejecución, los algoritmos rápidos (5P, 5P/CH, DIR/R, DIR/R/CH, DIR/CH y DIR/CH/R) fueron ejecutados 100 veces, calculando su tiempo medio. Debido a su alto coste computacional, DIR, GEF/R/5P y GEF/R/DIR se ejecutaron sólo 20 veces.

Según los resultados, las etapas (e) y las sub-etapas (a.5) y (a.6) son independientes del tamaño del trazo. Las etapas (b) y (d) incrementan su tiempo de ejecución con el tamaño del trazo tan moderadamente que no han sido considerados en la Tabla 13. La etapa (c) depende de la calidad del trazo, cuanto más puntos-esquina se detecten, más iteraciones requerirá el algoritmo de suavizado—en la Tabla 13, todos los casos tienen NSS = 0, por esta razón el tiempo de ejecución de la etapa (c) parece independiente del tamaño del trazo. Como se

puede observar en la Tabla 13, el cuello de botella se encuentra en la sub-etapa (a.4), ya que el coste total del resto de sub-etapas es comparativamente insignificante en general. La comparación entre 5P, DIR y GEF para esta sub-etapa se consideró ya en el apartado 3.3.3, donde concluimos que 5P es mucho más rápido que DIR y GEF. Se puede observar que el remuestreo reduce en gran medida las diferencias entre los algoritmos, pero aún así, 5P sigue siendo la elección más rápida.

Cabe destacar que 5P es tan rápido, que el cálculo de la envolvente convexa tiene un coste relativamente alto en el caso de 5P/CH. Como trabajo futuro, sería conveniente mejorar la eficiencia computacional para esta sub-etapa.

También es interesante observar que la secuencia DIR/R/CH optimiza mejor el tiempo de ejecución que DIR/CH/R y DIR/CH en todos los casos. Entonces, podemos concluir que remuestrear el trazo antes de calcular la envolvente convexa es una estrategia acertada.

Etapas ppales. nuevo método	5P	5P/CH	DIR/R	DIR/R/CH	DIR/CH	DIR/CH/R	DIR	GEF/R/5P	GEF/R/DIR
trazo d1 (ángulo grande, 1544 nodos)									
(a) Ajuste elipse provisional	0.003	0.010	0.008	0.007	0.043	0.016	1.107	0.676	0.387
(a.1) Cálculo métricas rápidas	0.001								
(a.2) Remuestreo trazo			<0.001	<0.001				<0.001	<0.001
(a.3) Envolvente convexa		0.008		<0.001	0.008	0.008			
(a.4) Ajuste del trazo	<0.001	<0.001	0.006	0.005	0.033	0.006	1.105	0.674	0.385
(c) Suavizado del trazo	<0.001								
trazo d2 (ángulo pequeño, 1511 nodos)									
(a) Ajuste elipse provisional	0.003	0.009	0.008	0.008	0.049	0.015	1.052	0.546	0.320
(a.1) Cálculo métricas rápidas	0.001								
(a.2) Remuestreo trazo			0.001	0.001		<0.001		<0.001	<0.001
(a.3) Envolvente convexa		0.007		<0.001	0.007	0.007			
(a.4) Ajuste del trazo	<0.001	<0.001	0.006	0.006	0.040	0.005	1.050	0.544	0.318
(c) Suavizado del trazo	<0.001								
trazo d1 (ángulo grande, 165 nodos)									
(a) Ajuste elipse provisional	<0.001	<0.001	0.057	0.060	0.088	0.049	0.086	0.859	0.614
(a.1) Cálculo métricas rápidas	<0.001								
(a.2) Remuestreo trazo			<0.001	<0.001		<0.001		<0.001	<0.001
(a.3) Envolvente convexa		<0.001		<0.001	<0.001	<0.001			
(a.4) Ajuste del trazo	<0.001	<0.001	0.056	0.059	0.087	0.049	0.085	0.858	0.613
(c) Suavizado del trazo	<0.001								
trazo d2 (ángulo pequeño, 143 nodos)									
(a) Ajuste elipse provisional	<0.001	<0.001	0.061	0.058	0.115	0.041	0.087	1.463	2.436
(a.1) Cálculo métricas rápidas	<0.001								
(a.2) Remuestreo trazo			<0.001	<0.001		<0.001		<0.001	<0.001
(a.3) Envolvente convexa		<0.001		<0.001	<0.001	<0.001			
(a.4) Ajuste del trazo	<0.001	<0.001	0.060	0.057	0.114	0.041	0.086	1.462	2.435
(c) Suavizado del trazo	<0.001								

Tabla 13 Tiempos de ejecución (en segundos) para las etapas principales

Por último, comparando los ángulos pequeños y grandes, comprobamos que GEF/R es más rápido para ajustar ángulos grandes que ángulos pequeños. Esto puede estar relacionado con la forma del trazo, cuanto más grande sea el ángulo abarcado por el trazo, menos iteraciones necesita el algoritmo GEF para conseguir el ajuste. Sin embargo, esta ventaja no tiene una aplicación práctica en nuestro método, ya que 5P no devuelve resultados erróneos con arcos largos y GEF/R se ejecuta muy esporádicamente para arcos cortos.

3.3.5.5 Casos patológicos

Obviamente el método está pensado únicamente para trazos que representan un solo arco elíptico, y por tanto no devuelve estimaciones válidas para trazos compuestos (Figura 44). El método no produce falsos positivos, ya que en esos casos, devuelve un mérito de cero. Para obtener ajustes válidos, este tipo de trazos deben ser segmentados anteriormente.

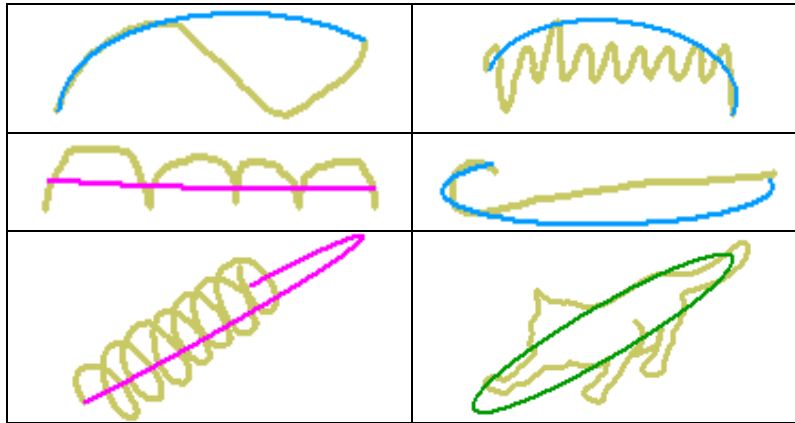


Figura 44. Ajustes elípticos pobres para trazos compuestos

Otro tipo de fallos ocurre cuando el trazo representa un arco elíptico de más de 360°, como muestra la Figura 45.

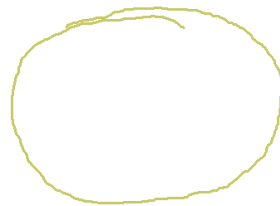


Figura 45. Arco elíptico que abarca más de 360 grados

Para futuras versiones, durante la etapa de detección de puntos finales, el algoritmo deberá detectar y tratar por separado los trazos “en espiral” (trazos que abarcan un ángulo mayor de 360°).

3.4 Reconocimiento dependiente del contexto

Respecto a la influencia del contexto sobre la percepción humana, es bien sabido que éste afecta en diferentes y sutiles maneras [Hof00]. En particular, en el caso del reconocimiento de trazos, coincidimos con Johnson y otros [JGHD09] en que el decidir qué técnicas de segmentación y agrupamiento son apropiadas depende del tipo de información de entrada que la aplicación requiera.

3.4.1 Experimento #1 de contexto

A pesar de las pruebas y opiniones citadas anteriormente, dudábamos si en la etapa de reconocimiento a bajo nivel la influencia del contexto era también evidente, por ello se realizó una sencilla prueba piloto para validar o rechazar la hipótesis de que incluso en la percepción de trazos:

- El nivel de imperfecciones geométricas aceptado por los seres humanos depende del contexto.

El propósito del experimento piloto era evaluar si el entorno influye en la percepción de trazos como líneas. En primer lugar, dibujamos a mano un conjunto de objetos simples, tal y como se muestra en la Figura 46. Luego preguntamos a un grupo de sujetos que marcaran sobre el dibujo aquellos trazos que no representarían segmentos rectos. Paralelamente, se presentaron los trazos marcados en la Figura 46 como trazos aislados a un segundo grupo de sujetos y les pedimos que los evaluaran del mismo modo como se hizo en el experimento descrito en el apartado 3.2.1.1. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 14.

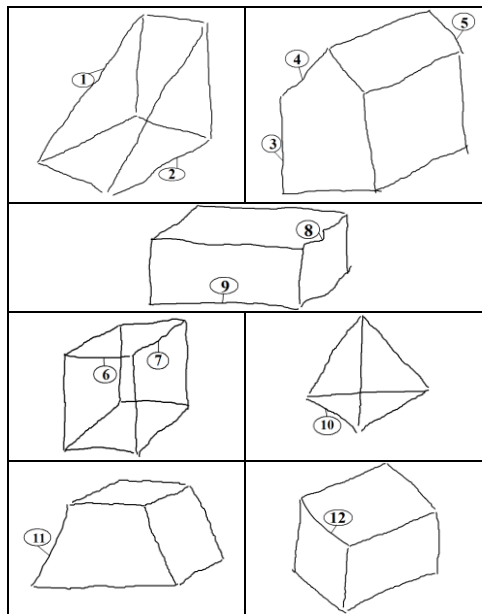


Figura 46. Dibujos para el experimento de percepción del contexto

Trazo	Percepción aislada			Percepción del contexto		
	Yes	No	?	Yes	No	?
1	52	44	4	65	26	9
2	6	92	2	19	77	3
3	96	4		100		
4	23	72	6	23	74	3
5	49	43	8	55	39	6
6	35	59	6	84	16	
7	40	58	2	32	68	
8		96	4	9	88	3
9	40	60		69	28	3
10	13	78	9	31	66	3
11	10	86	4	28	59	13
12	12	82	6	19	81	

Tabla 14 Resultados del experimento de percepción de la escena

Los resultados muestran que en la mayoría de casos los trazos son más propensos a ser percibidos como líneas rectas cuando se encuentran inmersos en una escena (excepto en el caso del trazo 7). En los trazos 6 y 9, que representan líneas horizontales, la diferencia es decisiva, convirtiendo la respuesta negativa (inferior al 50%) cuando se perciben aislados, en respuesta positiva (superior al 50%) cuando el trazo se percibe inmerso en una escena. Los otros dos trazos en los que el cambio en la percepción es grande (aunque no lo suficiente para

convertir a un "No" en un "Sí") son los trazos 10 y 11, los cuales representan aristas de contorno inclinadas con alta curvatura.

Llegamos pues a la conclusión de que el nivel de imperfección geométrica aceptado por los seres humanos depende del contexto, y también que en la percepción de trazos: los seres humanos son más estrictos en la percepción de trazos aislados, y menos estrictos cuando los trazos pertenecen a una escena que evocan en los sujetos una idea mental reconocida. A partir de esta conclusión se plantea el método de reconocimiento iterativo que se describe a continuación.

3.4.2 Flujos basados en considerar el contexto

Una vez que hemos confirmado la influencia del contexto en la percepción de trazos, nuestra propuesta a largo plazo es que los algoritmos encargados de las diferentes tareas de reconocimiento deberían colaborar entre sí. El primer paso para lograr la colaboración ya está dado, ya que los algoritmos no deberían devolver respuestas deterministas, sino figuras de mérito. Además, el flujo no debería ser secuencial, sino que debería incluir reevaluaciones enriquecedoras. Como propuesta de trabajo futuro, buscamos una organización que permita trabajar a los algoritmos de manera colaborativa, es decir, que compartan información que ayude a cada uno de ellos a responder a cuestiones diferentes pero relacionadas entre sí.

Los antecedentes principales a este sistema de organización los encontramos en las "puntuaciones" utilizadas por Saund y Morán [SM94] y Saund y otros [SMFLL02]; en la estrategia de "Clasificación y agrupación en el contexto" de [SL97]; y en las figuras de mérito en la tesis de la Varley [Var03]. Una idea similar fue desarrollada en [WFH11]. En realidad no se trata de la misma idea ya que Wolin y otros tratan de encontrar el mejor método para resolver una tarea particular para cada trazo específico. Mientras que en nuestra propuesta estamos tratando de comunicar información entre tareas para obtener una retroalimentación que permita a cada tarea reconfigurarse a la luz de los resultados obtenidos por las tareas que están tratando de obtener otra información.

Si bien el desarrollo de flujos alternativos queda pendiente como trabajo futuro para el grupo REGEO, durante el desarrollo de los métodos propuestos en el presente capítulo ya se han planteado algunas situaciones que pueden emplearse en la reevaluación de la información obtenida en la sub-etapa de vectorización:

- Si la mayoría de los trazos son dudosos o no reconocibles (tanto como líneas o arcos elípticos), asumimos que el dibujo es de poca calidad y relajamos el valor de las tolerancias mínimas y máximas. Complementariamente, la penalización en el proceso de suavizado (*Penalty*) debería reducirse cuando se estuvieran analizando bocetos realizados por usuarios no expertos, ya que probablemente sus trazos de dibujo mostrarán mayores "temblores". La reducción sugerida es de un 10% a un 5% por cada iteración.
- Si los trazos no reconocidos son mayoritariamente trazos cortos, hay que volver a reevaluarlos aplicando la longitud del segmento más largo para evaluar sus tolerancias. En otras palabras, la idea es aplicar una métrica general de todo el dibujo, en lugar de una métrica particular para cada trazo. De esta manera hacemos que la

mala calidad de los trazos cortos no sea tan importante en el contexto de la percepción global del boceto.

- Detectar posibles aristas rectas indirectamente mediante su pertenencia a caras "provisionales". Se propone buscar caras asumiendo que todos los trazos no reconocidos representan líneas rectas, y utilizar esas caras tentativas o provisionales para buscar aquellos trazos no reconocidos que pertenezcan simultáneamente a dos caras provisionales diferentes para asumir que si es el único trazo de ambas caras aún no percibido, y el resto son todos ellos líneas rectas, el trazo en cuestión debe ser igualmente una línea recta. Éste es claramente un ejemplo de criterio topológico, ya que una arista compartida por dos superficies debe ser recta si ambas superficies sólo pueden ser caras planas.

3.5 Conclusiones

Hemos revisado las estrategias que hoy en día se aplican para extraer información válida de la información de entrada para posteriormente emplearla en el proceso de producción de los modelos geométricos 3D a partir de dibujos 2D. Concluyendo que los procesos de reconocimiento basados en la percepción y la toma de decisiones mediante flujos colaborativos se consideran aún problemas abiertos.

En este capítulo se ha demostrado que las consideraciones perceptivas son aún escasamente tenidas en cuenta en los métodos de reconocimiento. La mayoría de los algoritmos de reconocimiento no prestan suficiente atención a la percepción humana, por esa razón no pueden adaptarse fácilmente para que las interpretaciones de la máquina repliquen las interpretaciones de los humanos. En su lugar, se propone una estrategia basada en estudiar y analizar el comportamiento humano para obtener parámetros y métricas preliminares para implementar algoritmos que repliquen la percepción humana en el reconocimiento de líneas rectas y arcos de elipse a partir de bocetos de ingeniería. La contribución aquí es pues triple:

En primer lugar, la única estrategia científica que ha resultado útil para determinar cómo perciben los seres humanos es llevar a cabo experimentos con grupos de humanos para hacer sus percepciones explícitas. Empleando esta estrategia hemos diseñado e implementado cuestionarios para identificar el patrón de percepción por el que los seres humanos reconocen que ciertos trazos aislados representan líneas rectas o arcos elípticos, y por el que consideran que otros no. Además a partir de estos experimentos se recopilaron los resultados perceptivos de un conjunto de ejemplos que más tarde se emplearon como referencia para comparar si los métodos propuestos replican el comportamiento humano o no.

En el caso de las líneas rectas, se han comparado los algoritmos conocidos como Longitud de cuerda y Transformada de Hough Estándar (SHT) con la percepción de seres humanos. Se ha concluido que el método de la longitud de cuerda no es adecuado para aplicar la estrategia que proponemos ya que ignora importantes supuestos de percepción. También se concluye que la Transformada de Hough Estándar posee puntos débiles: la exactitud de los resultados depende de la longitud del trazo y de su inclinación. Para mejorar estos puntos débiles hemos propuesto el algoritmo de la Transformada de Hough Normalizada (NHT). Se ha comprobado que los resultados de NHT coinciden razonablemente bien con los aportados por un ajuste de

tolerancias. Pero la principal contribución de esta tesis en este ámbito consiste en el nuevo algoritmo basado en los principios de la Gestalt (particularmente en el principio de cierre) que coincide con las interpretaciones humanas aceptablemente bien y es suficiente rápido para ser empleado en aplicaciones en línea.

En el caso de la percepción de arcos elípticos, se ha propuesto una estrategia basada en seleccionar algoritmos que sean más rápidos que geoméricamente precisos, y se ha intentado hacerlos comportarse como lo hacen los humanos devolviendo una figura de mérito en lugar de una clasificación dicotómica. El grupo REGEO, con el que ha colaborado la doctoranda, ha propuesto un nuevo método adaptando tres algoritmos (5P, DIR y GEF), combinándolos para sacar provecho de sus respectivas ventajas y ajustándolos para replicar mejor la percepción humana. Los estudios de campo y los análisis explicados en el presente capítulo, son contribuciones originales de la presente tesis que se han empleado para descubrir las claves perceptuales que posteriormente se han aplicado en el algoritmo propuesto. El método resultante ha demostrado clasificar trazos como arcos elípticos replicando el comportamiento humano. DIR/R funciona bien muchas veces, y GEF/R casi siempre pero ambos son algoritmos con un alto coste computacional. Por lo que el algoritmo de cinco puntos (5P) es el que se emplea por defecto, (ya que es 1000 veces más rápido y razonablemente preciso para nuestro propósito) y DIR/R se ejecuta en caso de que 5P falle. Cuando DIR/R y DIR devuelven un ajuste pobre, entonces se ejecuta GEF/R, que es bastante preciso pero excesivamente lento. Por lo tanto el método contribuye al ahorro de tiempo al emplear 5P un 60-80% de las veces, y emplear DIR y GEF/R sólo cuando son necesarios. Otra contribución de este método es el conjunto de nuevas métricas dirigidas a predecir los casos en los que los algoritmos devuelven ajustes no válidos.

Hemos comprobado, una vez más, que los humanos son más estrictos con los trazos aislados, y menos estrictos con los trazos que pertenecen a escenas que evocan un objeto. A partir de ahí, hemos planteado la hipótesis de que se necesitan métodos iterativos de reconocimiento, ya que generalmente las interacciones complejas y sutiles entre las diferentes tareas de reconocimiento son ignoradas. Incluso cuando se utiliza la organización perceptiva dentro de cada tarea específica, luego no se mantiene esta organización entre tareas. A este respecto, se propone un nuevo flujo de colaboración para superar esta limitación. Sugerimos, como trabajo futuro, una estrategia basada en dos pasos en el que primero se identifican trazos aislados que claramente son percibidos como líneas rectas o arcos circulares o elípticos, y luego se mejora la percepción de trazos dudosos según el contexto.

Capítulo 4. Reconocimiento de indicios: agrupamiento de aristas paralelas en el espacio

4.1 Introducción

Durante tiempo, los psicólogos se han dedicado a estudiar cómo los seres humanos son capaces de percibir el espacio en su entorno visual. Diversos autores [BWMN95] [CV95] [Gol99] [Pal99] tratan de explicar el fenómeno que nos permite percibir la profundidad a partir de la imagen de la retina (que es semejante a una única vista en 2D). Como explica Jacobs [Jac02], los entornos visuales son ricos en fuentes de información. Pero esta riqueza de información puede plantear problemas en la percepción de los seres humanos. Los psicólogos han estudiado hasta una docena de indicios visuales que influyen en la percepción de la profundidad y del espacio [CV95], entre ellos se encuentra el indicio de convergencia.

Los indicios visuales nos proporcionan información ambigua y superpuesta, que convenientemente procesada, aumenta la posibilidad de percibir con precisión nuestro entorno como un espacio tridimensional. El cerebro humano recibe esta información sensorial a través de diferentes canales, pero en la presente tesis abordamos sólo en aquellas fuentes de información que provienen de una imagen estática—conocidas como claves pictóricas o indicios pictóricos.

Por lo tanto, definimos un indicio como cualquier propiedad percibida por los seres humanos en una imagen pictórica (imagen 2D) que permita construir mentalmente la escena 3D, gracias a la información de profundidad que transmiten.

Nuestra propuesta se basa entonces en detectar indicios desde el dibujo delineado obtenido tras vectorizar el boceto inicial. En el capítulo siguiente, se emplearán dichos indicios para el reconocimiento de elementos característicos 2D.

Denominamos “indirectos” a aquellos indicios que relacionan una propiedad del dibujo con otra propiedad distinta del modelo que dicho dibujo representa. Por ejemplo, las líneas convergentes a un punto de fuga, que representan aristas paralelas del modelo. El grupo de investigación REGEO ha trabajado en diferentes indicios indirectos (www.regeo.uji.es).

La contribución de la presente tesis al reconocimiento de indicios consiste en el estudio de campo realizado para un indicio específico como es el agrupamiento de líneas que representan aristas paralelas en el modelo tridimensional.

Cuando los ingenieros y diseñadores persiguen descripciones cuantitativas, tienden a utilizar vistas basadas en proyecciones paralelas. Si la geometría a representar es compleja, se prefiere utilizar múltiples vistas ortográficas; siguiendo, más o menos libremente, los protocolos descritos por Garpard Monge en su sistema diédrico [Mon99] y desarrollados en las diferentes normas de “Principios generales de representación” (ISO 128:1982), “Dibujos Técnicos. Métodos de proyección. Parte 2: Representaciones ortográficas” (UNE-EN ISO 5456-2:2000) y “Documentación técnica de producto” (UNE-EN-ISO 10209). Si la geometría no es demasiado compleja, pero persiste la necesidad de mostrar las proporciones, los ingenieros y diseñadores utilizan las proyecciones axonométricas—codificada por Farish en 1822 y desarrollada en “Dibujos Técnicos. Métodos de proyección. Parte 3: Representaciones axonométricas” (UNE-EN ISO 5456-3:2000) y “Documentación técnica de producto” (UNE-EN-ISO 10209). En ambos casos, el tipo de proyección es paralela, por lo que las aristas del objeto se proyectan como líneas paralelas. En consecuencia, el indicio de paralelismo es directo en el dibujo. Por el contrario, cuando se consideran más importantes las descripciones cualitativas, se utilizan vistas basadas en proyecciones perspectivas (codificada en el libro de Durer “Four Books on Measurement” en 1522, y en normas como “Dibujos Técnicos. Métodos de proyección. Parte 4: proyección central” (UNE-EN ISO 5456-4) y “Documentación técnica de producto” (UNE-EN-ISO 10209)). En ellas, las aristas paralelas del objeto se muestran como líneas convergentes del dibujo. Haciendo que el indicio de paralelismo sea indirecto.

Cabe notar que para algunos autores, tanto las proyecciones perspectivas como las axonométricas dan lugar a lo que denominan “vistas pictóricas”, puesto que en todas ellas se orienta el objeto para que muestre simultáneamente tres caras principales. Aquí no estamos interesados en dicha clasificación, puesto que el objetivo es distinguir entre proyecciones perspectivas (que convierten el paralelismo en un indicio indirecto), y el resto (que lo mantienen como directo).

Claramente cada representación tiene sus ventajas e inconvenientes, y los diseñadores e ingenieros las emplean a su conveniencia. Por lo que un sistema de modelado basado en bocetos debe ser capaz de interpretarlas todas.

Se ha comprobado (ver estado del arte, sección 2.3) que los métodos existentes para determinar los grupos de líneas del dibujo que representan grupos de aristas paralelas en el modelo 3D no resuelven parte de los casos más comunes. El grupo REGEO ha implementado un método, basado en criterios perceptuales, para agrupar líneas que representan aristas paralelas que es tolerante a errores de bocetado y que detecta el paralelismo de las aristas incluso cuando las líneas que los representan convergen a puntos de fuga. En el presente capítulo se describe la aportación realizada en esta tesis, que consiste en los estudios de campo realizado para determinar las métricas y parámetros que posteriormente se emplearon en dicho algoritmo. Para ello se realizaron dos estudios, en primer lugar se realizó un experimento piloto para conocer la importancia de la convergencia en la creación de bocetos de ingeniería. Después de comprobar por un equipo de expertos el modo de bocetar modelos

poliédricos por parte de una muestra de sujetos con formación en ingeniería y otra muestra de sujetos con formación artística, concluimos que en ninguno de los dos casos existe una tendencia evidente a emplear la convergencia en su representación pictórica. Sin embargo el indicio sigue siendo importante, porque aunque no se emplee masivamente, aparece con cierta frecuencia en los bocetos de los diseñadores, por lo que un sistema de modelado basado en bocetos que aspire a ser completo debe contemplarlo.

Esto explica el estudio de campo que se llevó a cabo para conocer el patrón de percepción humana sobre los puntos de fuga. A partir de él hemos obtenido unos parámetros y métricas preliminares con los que poder implementar algoritmos que repliquen la percepción humana para detectar puntos de fuga en diseños de ingeniería.

4.2 Definición de términos

Antes de explicar los experimentos piloto llevados a cabo, se considera interesante definir los términos comunes que en el presente capítulo se van a emplear respecto a la perspectiva cónica y los puntos de fuga.

Los fundamentos de la perspectiva cónica o central fueron codificados por Durer en su libro “*Four Books on Measurements*” en 1522. Se trata de una representación pictórica realista que se obtiene proyectando el objeto desde un punto a una distancia finita (ISO 5456-4:1996). Y los efectos que ejerce en nuestra manera de ver y dibujar son bien conocidos [Pal99]. En particular, la cantidad de puntos de fuga (VP por vanishing points) en una imagen depende de la orientación relativa del objeto representado respecto del plano de proyección. Así, un poliedro *normalón* (aquél con todas sus aristas paralelas a una de las tres direcciones principales de los ejes cartesianos) puede producir tres situaciones diferentes:

- Que posea dos ejes paralelos al plano de cuadro y un único punto de fuga, donde las líneas paralelas a este tercer eje converjan.
- Que posea un solo eje paralelo al plano de cuadro y dos puntos de fuga, donde las líneas paralelas a los otros dos ejes converjan.
- Que ningún eje sea paralelo al plano de cuadro y existan tres puntos de fuga, donde las líneas paralelas a los tres ejes sean convergentes.

Estas tres variedades, conocidas como perspectiva central con uno, dos y tres puntos de fuga respectivamente (ISO 10209-2:1993), se representan en la Figura 47:

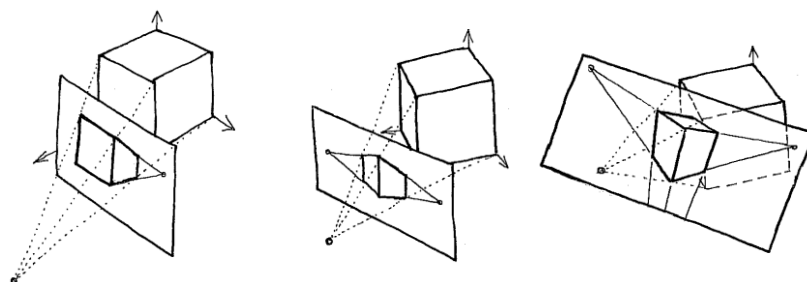


Figura 47. *Perspectiva lineal con uno (izq.), dos (centro) y tres (dcha.) puntos de fuga*

Otra importante distinción es entre puntos de fuga principales y oblicuos. Para un poliedro general con “n” diferentes grupos de aristas paralelas, las variedades de perspectiva central

pueden ser de n , $n-1$, $n-2$..., puntos de fuga, dependiendo del número de grupo de aristas paralelas en el modelo que son paralelas al plano de cuadro. La Figura 48 muestra un ejemplo con sólo dos puntos de fuga principales, ya que el eje vertical es paralelo al plano de cuadro y por lo tanto las líneas verticales no convergen; sin embargo, también existe un punto de fuga oblicuo resultado de la convergencia de las aristas laterales de la cuña.

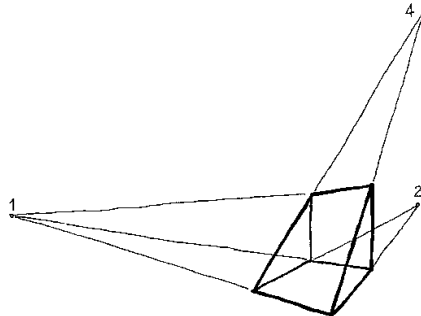


Figura 48. *Cuña con dos puntos de fuga principales y un punto de fuga oblicuos.*

Respecto a la ubicación de los puntos de fuga relativos al objeto, no existe una distinción teórica. Sin embargo hay una distinción práctica muy útil entre los puntos de fuga localizados dentro y fuera del objeto (Figura 49).

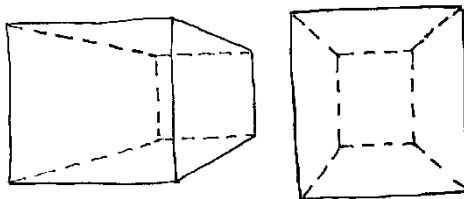


Figura 49. *Perspectiva lineal de un prisma con un punto de fuga externo (izq.) e interno (dcha.) al objeto.*

Los puntos de fuga internos son típicos en escenas arquitectónicas interiores, pero son raramente empleadas para representar productos de ingeniería. De ahí que en los siguientes estudios, no se haya considerado este tipo de puntos de fuga. Aunque sí se emplearán dibujos con diferente cantidad de puntos de fuga, tanto en direcciones principales como oblicuas.

4.3 Sobre el empleo de la convergencia en tareas de bocetado

En el presente apartado se describe el estudio de campo llevado a cabo para determinar la presencia y la importancia de la perspectiva cónica o central cuando los ingenieros bocetan piezas de ingeniería. Con él nos proponemos conocer el comportamiento de los seres humanos en una tarea específica a la hora de bocetar. Esta investigación dio como resultado el trabajo [PCPV10a].

Para el propósito de este experimento definimos un *diseñador de producto*, como aquel profesional que ha recibido una formación específica en geometría 2D y 3D, así como en técnicas empleadas habitualmente en la representación 2D de objetos 3D como parte de una educación técnica.

En contraste, un *diseñador gráfico* es el profesional que ha recibido formación en técnicas habitualmente empleadas en la representación 2D de objetos 3D como parte de una educación no técnica (a menudo artística).

Empleando estas definiciones planteamos la hipótesis de que la formación técnica recibida por los diseñadores de producto, influencia el modo en que representan piezas tridimensionales. Concretamente la hipótesis a validar es:

1. Las personas con una formación en ingeniería, tienden a emplear proyecciones paralelas (axonométricas u oblicuas), que mantienen indicios importantes sobre la funcionalidad del objeto representado.
2. Por el contrario, los diseñadores gráficos, por su formación artística (donde la apariencia es más importante que la funcionalidad), podrían mostrar una tendencia a emplear convergencia al bocetar.

Por lo tanto, el objetivo fue comparar el comportamiento de dos grupos distintos de población: diseñadores de producto, con formación en ingeniería, y los diseñadores gráficos, cuya formación es artística.

Para completar el estudio, se tuvo en cuenta un tercer grupo de estudio, aquéllos que no habían recibido ninguna formación en diseño, ni desde el punto de vista artístico, ni de las ingenierías. En este caso, no hay motivos a priori para sostener ninguna hipótesis, ni en favor de la preferencia hacia las proyecciones paralelas ni hacia las convergentes.

4.3.1 Experimento #1

El experimento piloto consistió en pedir a una muestra de sujetos que dibujaran a mano alzada los tres sólidos poliédricos representados en la Figura 50. Los modelos sólidos se construyeron en poliestireno expandido ya que se consideró que el brillo de su superficie ayudaría en la tarea de reconocimiento de las caras y aristas del objeto, asegurándonos de esta manera que todos los participantes consiguieran un modelo mental válido del objeto que iban a bocetar.

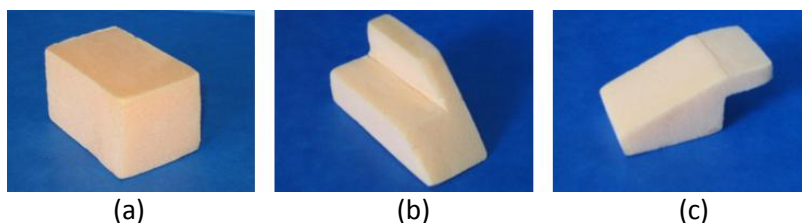


Figura 50. Modelos utilizados en el experimento, en orden creciente de dificultad de (a) a (c).

Se recopilaron un total de 147 cuestionarios. El criterio de finalización fue temporal, es decir que se trató de recopilar el máximo de cuestionarios posibles en el plazo de una semana. Para conocer más información sobre el experimento, y una descripción más detallada de la población encuestada, se remite al lector al caso 1 del Anexo II.

Para determinar el modo en que los humanos clasificaron los bocetos recopilados, cada dibujo fue clasificado subjetivamente por seis expertos (cuatro pertenecían al grupo investigador y dos expertos externos) como: claramente axonométrica, claramente con perspectiva cónica, claramente vista no pictórica, dudoso, y no clasificable debido a la pobre calidad del dibujo. La

clasificación dada por cada experto viene detallada en los anexos del informe técnico publicado por REGEO [PCPV10b].

Tras comparar dichas clasificaciones, se descartaron aquellos cuestionarios que:

- Provocaron un desacuerdo en la clasificación de los expertos (en este caso, consideramos que hay acuerdo cuando 4 o más expertos coinciden en su clasificación).
- Tenían una calidad muy pobre para ser útiles en la etapa de análisis.
- No representaban un objeto pictóricamente, ya que algunos sujetos dibujaron una única vista ortográfica, que no proporcionaba información tridimensional del objeto representado.

Tras este filtrado previo, la colección de cuestionarios para el análisis se redujo a 111 dibujos. De los cuales, 3 (2.54%) se representaron con una perspectiva central o cónica y 108 (91.53%) emplearon proyecciones axonométricas. Es destacable que los tres cuestionarios con perspectiva cónica representaban el modelo cúbico (a) de la Figura 50. Para conocer más detalles sobre la clasificación, se remite al lector al caso 1 del anexo II.

A partir de los resultados de las frecuencias observadas, concluimos que los diseñadores (tanto de producto, como diseñadores gráficos) tienden a emplear más la representación axonométrica que la perspectiva cónica. Aplicando tablas de contingencia y el test de Fisher a los resultados obtenidos (tal y como se detalla en la Tabla 32 en el caso 1 del anexo II) podemos rechazar la hipótesis nula de independencia, o lo que es lo mismo, podemos aceptar la hipótesis alternativa de que la variable ámbito del diseñador (de producto o gráfico) influye o está asociada con el empleo de convergencia al bocetar. Así mismo encontramos evidencias para lanzar la hipótesis de que la complejidad del modelo influye en la elección de la representación, de manera que la perspectiva cónica se emplearía con más probabilidad en la representación de modelos sencillos, antes que en ejemplos complejos. Eso muestra el test de Fisher de la tabla de contingencia correspondiente (ver Tabla 35 en el caso 1 del anexo II) sin embargo la obtención de una probabilidad cercana al límite de aceptación ($p = 0.041 < 0.05$) hace recomendable revalidar el resultado con un experimento más específico.

4.3.2 Discriminación automática de convergencia en bocetos

Para conservar los cuestionarios, las imágenes bocetadas fueron escaneadas y almacenadas en formato bitmap. Esta acción además nos da la posibilidad de realizar análisis numéricos. La información numérica se empleará posteriormente para calibrar un algoritmo que clasifique automáticamente los bocetos como axonométricos/cónicos, como un paso hacia el objetivo de conseguir la automatización de la interpretación de bocetos de ingeniería. Los resultados numéricos pueden consultarse en un informe técnico publicado por el grupo REGEO [PCPV10b].

Para producir esta información numérica, primero se vectorizó manualmente las imágenes escaneadas para obtener dibujos lineales. Para ello se identificaron la posición de los vértices para trazar después nuevas líneas de vértice a vértice, tal y como se describe en el caso 2 del Anexo II.

Una vez todos los vértices fueron definidos, se redibujaron las líneas pictóricas en diferentes colores, dependiendo de las direcciones (Figura 51). Para facilitar el análisis posterior, las líneas de cada modelo que representan la misma dirección se dibujaron con el mismo color.

De cada dibujo vectorizado se extrajo: (a) información geométrica proporcionada por la pendiente de las rectas, la longitud de las líneas y las coordenadas de cada vértice; (b) información general, correspondiente a la información geométrica clasificada por las direcciones; y (c) información del dibujo (presencia o ausencia de líneas ocultas, o de líneas auxiliares).

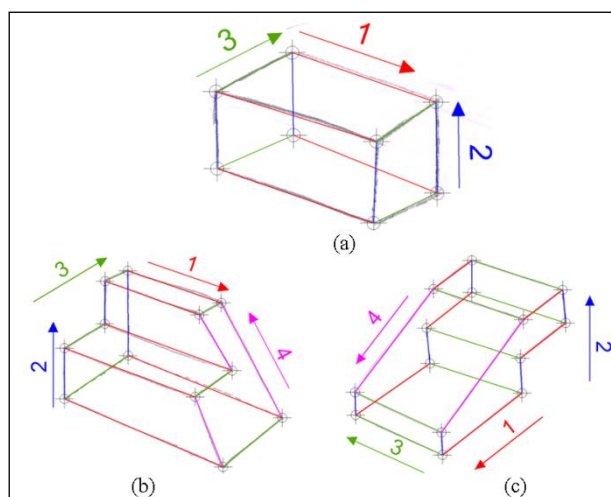


Figura 51. Dibujos lineales, vectorizados manualmente

Todos estos datos se analizaron con el objetivo de encontrar un criterio que permitiera discriminar automáticamente entre bocetos axonométricos y convergentes, y replicando la percepción humana.

Obviamente, no todos los seres humanos tienen la misma habilidad para crear bocetos de alta calidad. Por lo tanto, a la hora de discriminar entre proyecciones axonométricas o perspectiva cónica, no se puede simplemente buscar el paralelismo entre líneas. En cambio, necesitamos encontrar una función con la que podamos diferenciar entre paralelismo entre líneas y/o convergencia a pesar de las inexactitudes de los bocetos.

Nuestra elección fue tomar como función la *dispersión angular* (*AD* por sus siglas en inglés), es decir, el valor máximo angular entre las diferencias de las pendientes de cada pareja de líneas que representan aristas paralelas del modelo original 3D:

$$AD = \max |\alpha_i - \alpha_j| \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (30)$$

Donde “n” define cada uno de los conjuntos de líneas que pertenecen a una dirección específica. Es decir, tratamos de conocer el máximo valor del error cometido al dibujar líneas paralelas a mano alzada.

A partir de los datos de AD calculados, se extrajo el valor medio del parámetro para cada modelo y dirección, tal y como se muestra en la Tabla 15:

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Dirección 1	2.98°	4.28°	7.25°
Dirección 2	3.63°	4.77°	12.54°
Dirección 3	6.19°	12.08°	8.65°
Dirección 4		5.97°	2.96°

Tabla 15 Valores medios de AD para cada modelo

En segundo lugar, se creó el gráfico de la frecuencia acumulada de AD (Figura 52). Se comprobó que en 22 casos, la orientación que habían elegido los sujetos a la hora de representar los modelos, producían que apareciera una única línea en una dirección dada. Estos 22 casos no fueron incluidos en este análisis.

En este análisis general, obtuvimos un valor medio de AD de 6.5°. Fijando un valor umbral de AD = 9°, obtendríamos que en un 80.4% de los casos, las líneas de los dibujos hubieran sido clasificadas como paralelas en vez de convergentes.

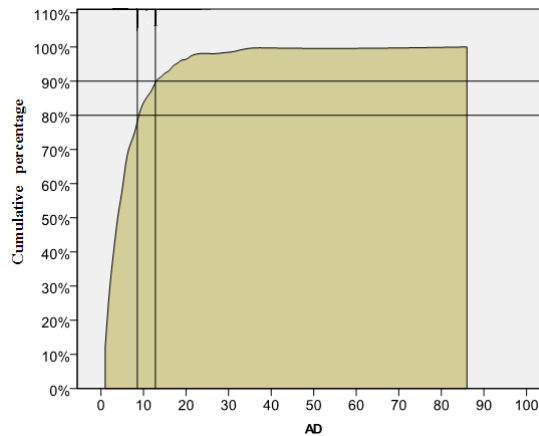


Figura 52. Frecuencia acumulada del valor de AD

Por lo tanto podemos concluir que la convergencia, no es un indicio importante en la percepción artificial de los bocetos de ingeniería, ya que como se ha comprobado la perspectiva central o cónica se emplea raramente en los bocetos de ingeniería. Por el contrario, el paralelismo demuestra ser un indicio importante, ya que las aristas paralelas de los objetos tridimensionales se representan generalmente como líneas paralelas en los bocetos de ingeniería.

Del experimento se pueden extraer otras conclusiones.

Analizando los dibujos que fueron clasificados como convergentes, obtenemos que el valor medio de AD es de 21.84°, y su valor mínimo en una convergencia es de 8.6°. Por lo tanto, se propone finalmente un valor umbral de AD = 8° para determinar si la intención del diseñador era la de dibujar líneas paralelas. Con este valor y según el gráfico de la Figura 52, el 75.4% de los valores AD están por debajo de este umbral.

A partir de los datos de los dibujos vectorizados pudimos investigar la preferencia que muestran los diseñadores por direcciones particulares en 2D. La Figura 53 muestra la frecuencia de ángulos particulares, en la que se aprecian 4 grupos destacados: hay una fuerte preferencia por la dirección de 90° (es decir, la dirección vertical), seguida por una preferencia menos contundente sobre las direcciones de 30°, 0° y -30°.

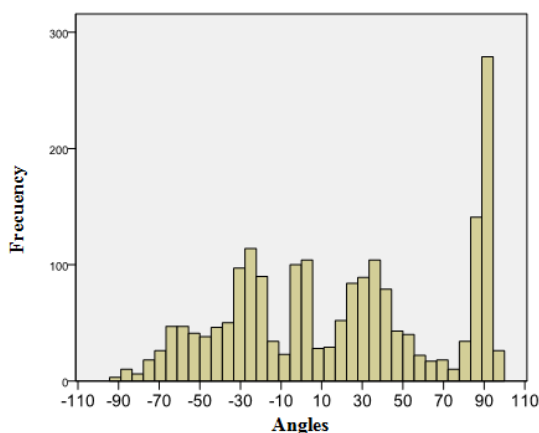


Figura 53. Frecuencia de las direcciones en los dibujos

Estudios previos (por ejemplo [Per68]) ya han teorizado la importancia de la dirección vertical, las aristas verticales de un objeto 3D se dibujan como líneas verticales en 2D. El predominio de los ángulos de 90° , independientemente del modelo dibujado y del tipo de proyección empleado, apoyan firmemente esta teoría. La verticalidad es una dirección dominante en las representaciones pictóricas, y tanto los diseñadores de producto como los diseñadores gráficos son capaces de emplearla con bastante precisión. La destacada frecuencia de los ángulos de $\pm 30^\circ$ se puede atribuir al uso que hacen de ellos los sujetos para representar las dos direcciones horizontales principales en proyecciones isométricas.

4.4 Percepción humana de puntos de fuga

A pesar de concluir que la perspectiva central no es comúnmente empleada en los bocetos de ingeniería, nuestro objetivo es desarrollar métodos que ayuden a los diseñadores a interactuar amigablemente con los ordenadores. Entendemos que los diseñadores confiarán en los ordenadores cuando consideren que éstos son capaces de interpretar dibujos tal y como lo harían ellos. Para ello, hemos de tratar de desarrollar métodos algorítmicos que repliquen la percepción humana al reconstruir modelos representados en bocetos de ingeniería con o sin convergencia.

Para desarrollar estos métodos tenemos que conocer el modo en que los humanos interpretan bocetos de diseño. Más concretamente, y tras comprobar en el estado del arte que la perspectiva central o cónica no ha sido investigada experimentalmente como un indicio indirecto específico en la interpretación de bocetos de ingeniería, en el presente apartado nos planteamos la necesidad de realizar un experimento para encontrar los criterios y las métricas que nos permitan replicar algorítmicamente el modo en que los seres humanos perciben puntos de fuga, y bajo qué circunstancias son percibidos.

4.4.1 Experimento #2

Como ya hemos comentado anteriormente, el propósito de este experimento es obtener criterios y métricas para implementar un algoritmo que imite la percepción humana para detectar puntos de fuga en un boceto. Para ello, se propusieron las siguientes hipótesis para validarlas:

1. Los seres humanos son capaces de percibir la existencia de puntos de fuga en bocetos de formas poliédricas tridimensionales, a pesar de sus imperfecciones inherentes.
2. Los seres humanos son capaces de localizar con bastante precisión aquellos puntos de fuga que no están demasiado cerca, ni demasiado lejos, del dibujo.
3. La longitud de las líneas influye en la detección de convergencia. Cuanto más larga es una línea, más fácil es detectar un punto de fuga.

Para validar estas hipótesis se diseñó el siguiente experimento piloto. En primer lugar se seleccionó un conjunto de dibujos (representados en la Figura 54). A continuación se pidió a un grupo de sujetos que determinaran el número y la localización aproximada de los puntos de fuga implícitos en el boceto, además de etiquetar los diferentes grupos de aristas paralelas.

Por último, se analizaron los resultados para determinar hasta qué punto los sujetos coinciden en la percepción de los mismos puntos de fuga, y cuáles son los factores más influyentes en esta proceso de percepción. Para más información sobre el cuestionario y más detalles del experimento, se remite al lector al caso 3 del Anexo II.

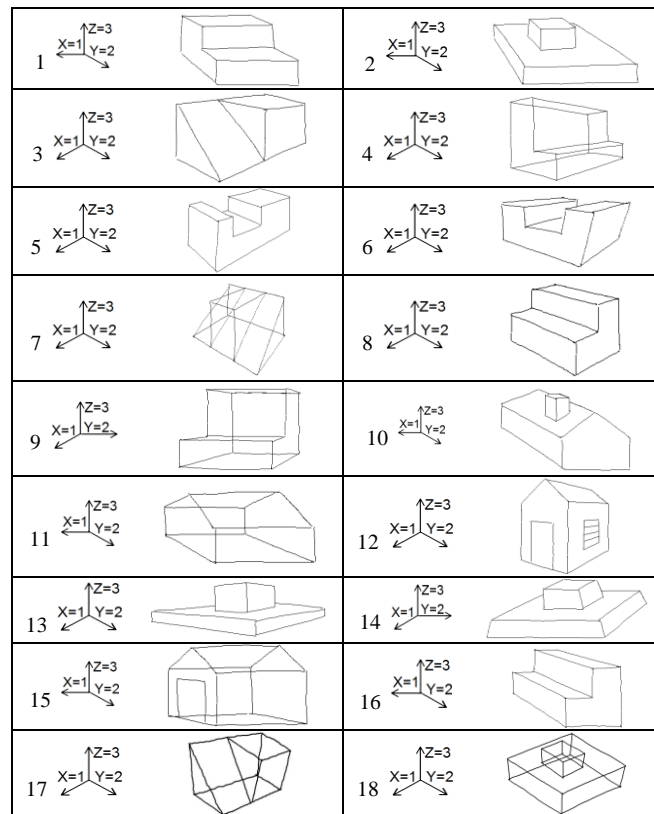


Figura 54. Conjunto de bocetos empleados en el experimento

4.4.1.1 Validación cualitativa de la primera hipótesis

Para validar cualitativamente la primera hipótesis, se analizó la percepción de puntos de fuga para cada boceto y cada eje candidato. Los ejes candidatos principales vienen definidos en la Figura 54, hay que destacar que además, los ejemplos 3, 7, 10, 11, 12 y 15 incluían uno o dos direcciones o ejes oblicuos, etiquetados como ejes 4 y 5.

Sketch	Axis 1 (X)	Axis 2 (Y)	Axis 3 (Z)	Axis 4	Axis 5
1	46.67	93.33	33.33		
2	17.65	94.12	23.53		
3	100.00	72.22	5.56	66.67	
4	100.00	76.92	0.00		
5	100.00	84.21	5.26		
6	100.00	85.71	78.57		
7	68.75	93.75	6.25	75.00	
8	72.22	94.44	0.00		
9	100.00	7.14	0.00		
10	7.14	92.86	0.00	71.43	
11	22.22	77.78	0.00	44.44	33.33
12	100.00	76.47	5.88	35.29	5.88
13	100.00	92.31	0.00		
14	83.33	8.33	75.00		
15	28.57	57.14	28.57	28.57	42.86
16	6.67	100.00	0.00		
17	94.74	31.58	84.21	68.42	
18	6.25	12.5	68.75		

Tabla 16 Puntos de fuga percibidos

La Tabla 16 lista el porcentaje de sujetos encuestados que percibieron convergencia en cada ejemplo y dirección. En rojo se han marcado aquellos ejemplos y direcciones percibidos como convergentes por el 75% o más de los sujetos y en azul los percibidos entre el 50-75%.

Al observar los datos, se comprueba que de los tres ejes principales, el eje 3 (Z, o vertical) es en el que menos se ha percibido convergencia. Parece que los diseñadores de ingeniería no suelen emplear la convergencia en la dirección vertical, y que los sujetos están menos dispuestos a percibir la convergencia de esta dirección.

Respecto a las direcciones oblicuas, parece que los humanos no perciben fácilmente la convergencia oblicua, sin embargo parece que grupos numerosos de líneas en una dirección oblicua (como en el caso del ejemplo 7) ayudan a los seres humanos a identificar la convergencia a puntos de fuga oblicuos.

En resumen, podemos concluir que la convergencia de los ejes principales es fácil de percibir, a pesar de las imperfecciones de los bocetos. Algo más difícil resulta percibir los puntos de fuga en direcciones oblicuas. En el apartado 4.4.3 se definirá el mínimo valor para el ángulo de convergencia, y el número de líneas que garantizan una percepción general de puntos de fuga.

4.4.1.2 Validación cualitativa de la segunda hipótesis

Para cada dibujo, se superpusieron todos los puntos de fuga señalados por los sujetos encuestados. Cada conjunto de puntos se colorearon según la dirección a la que están ligados (Figura 55).

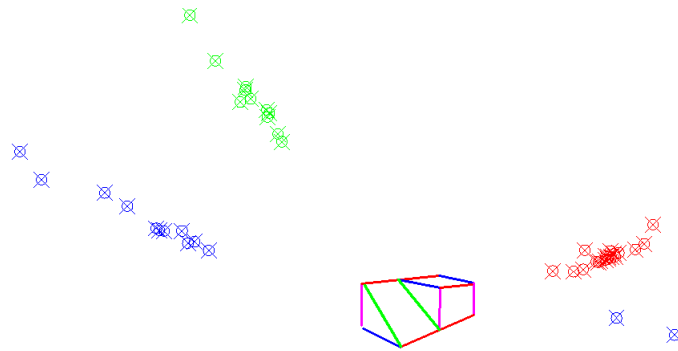


Figura 55. Superposición de los puntos de fuga percibidos por los sujetos en el dibujo 3

Los resultados claramente muestran que los sujetos coincidieron en el ángulo de orientación sobre el que se sitúa el punto de fuga, pero hay menos consenso a la hora de posicionar el alejamiento punto de fuga sobre la línea.

Parece que la nube de puntos de aquellos puntos de fuga claramente percibidos, está más concentrada (y en general puede ser delimitada por una elipse), mientras que la nube de puntos de fuga no tan evidentes es bastante más alargada y hasta puede semejarse a una línea recta.

También parece que la dispersión en la localización aumenta cuando el punto de fuga es distante respecto del dibujo, o cuando el grupo de líneas no es numeroso o son líneas cortas.

Para conocer más detalles sobre los resultados de este análisis se remite al lector al caso 4 del Anexo II.

A la luz de los resultados podemos concluir que la segunda hipótesis debe ser rechazada: los seres humanos parecen no ser capaces de localizar los puntos de fuga con precisión. No obstante, es importante notar que sí coinciden en la orientación del ángulo, aunque difieren sobre la posición concreta.

4.4.1.3 Validación cualitativa de la tercera hipótesis

A partir de la Tabla 16, observamos que los casos dudosos (aquellos que se encuentran en el rango 50-75%) son aquellos típicamente formados por grupos de líneas que contienen las líneas más cortas del dibujo, o aquellos que tienen una baja densidad de líneas. Esta percepción apoya nuestra tercera hipótesis: que la longitud de las líneas influye la detección de la convergencia. Sin embargo, también se debe tener en cuenta la densidad del grupo de líneas.

4.4.2 Parámetros y métricas de ajuste

A continuación se investigarán diferentes métricas, y se estudiarán cómo pueden aplicarse para ajustar algoritmos que automáticamente detecten puntos de fuga en bocetos de ingeniería.

Puesto que nuestro objetivo es replicar la percepción humana, compararemos los parámetros geométricos que vamos a estudiar con los resultados de percepción obtenidos en la Tabla 16.

Los dos primeros parámetros son genéricos. Los dos siguientes se proponen para evaluar las métricas relacionadas con la segunda hipótesis. Por último, se definen los parámetros cinco a siete para evaluar las métricas relacionadas con la tercera hipótesis.

4.4.2.1 Grado de percepción (Det)

Es el porcentaje de sujetos que identificaron un punto de fuga en cada dibujo y dirección.

$$Det = \frac{n^{\circ} \text{detecciones}}{n^{\circ} \text{cuestionarios}} \cdot 100 \quad (31)$$

Algunos parámetros geométricos deben ser normalizados para evitar la influencia del tamaño del dibujo. Para ello se empleará el radio del círculo delimitador, calculado como la máxima distancia entre el centro de masas del dibujo y cualquiera de sus vértices. El centro de masas del dibujo (x_{com}, y_{com}) se calcula como:

$$x_{com} = \frac{\sum x_i}{n_v}, \quad y_{com} = \frac{\sum y_i}{n_v}, \quad \forall i \in V_s \quad (32)$$

donde n_v representa el número de vértices del dibujo S , y V_s es el conjunto de vértices del dibujo S .

$$size = \max \left[\sqrt{(x_i - x_{com})^2 + (y_i - y_{com})^2} \right] \quad \forall i \in V_s \quad (33)$$

Para evaluar las métricas relacionadas con la primera hipótesis, se analizó la convergencia por medio de los siguientes parámetros:

4.4.2.2 Dispersión angular (AD)

Es el ángulo de máxima apertura entre parejas de líneas de un grupo de líneas que representan aristas paralelas en el espacio, es el mismo parámetro que ya habíamos definido previamente en el apartado 4.3.2 para la discriminación automática de convergencia en bocetos:

$$AD = \max(|\alpha_i - \alpha_j|) \quad \forall i, j \in L_{SA} \quad (34)$$

Donde α_i y α_j representan, respectivamente, los ángulos de las aristas i y j relativas al mismo origen; y L_{SA} es el grupo de líneas del boceto S y la dirección A .

4.4.2.3 Dispersión (Disp)

Este parámetro mide la densidad de la nube de puntos de puntos de fuga localizados por los sujetos (como en la Figura 55). Para ello se calcula en primer lugar el centroide de la nube de puntos:

$$x_{centroid} = \frac{\sum x_i}{n_{vp}}, \quad y_{centroid} = \frac{\sum y_i}{n_{vp}} \quad \forall i \in VP_{SA} \quad (35)$$

Donde VP_{SA} es la nube de puntos de fuga del boceto S y la dirección A , y n_{vp} es el tamaño de esta nube. A continuación se calculan las distancia euclídeas d_i entre cada punto (x_i, y_i) de la nube y su centroide ($x_{centroid}, y_{centroid}$).

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{centroid})^2 + (y_i - y_{centroid})^2} \quad \forall i \in VP_{SA} \quad (36)$$

Entonces se calcula la desviación estándar (dev) de estas distancias.

$$Av = \frac{\sum d_i}{n} \quad \forall i \in VP_{SA} \quad (37)$$

$$dev = \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum (d_i - Av)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \forall i \in VP_{SA} \quad (38)$$

Por último, para evitar la influencia del tamaño, se normaliza el parámetro:

$$Disp = \left(\frac{dev}{size} \right) \cdot 100 \quad (39)$$

4.4.2.4 Relación de distancias entre centroides (DRC)

Este parámetro mide la distancia a la que la nube de puntos se encuentra del boceto. Se calcula como la distancia euclídea entre el centro de masas del dibujo y el centroide de la nube de puntos:

$$Dist = [(x_{centroid} - x_{com})^2 + (y_{centroid} - y_{com})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Y para evitar la influencia del tamaño del dibujo, se normaliza el parámetro:

$$DRC = \frac{Dist}{size} \quad (41)$$

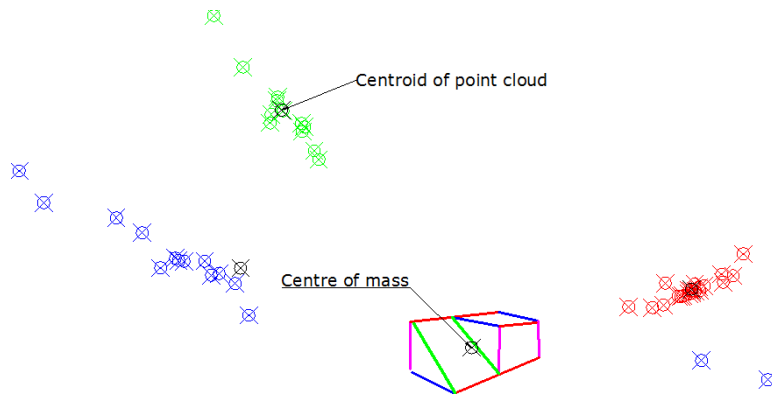


Figura 56. Cálculo de DRC para el boceto 3 y dirección 4

4.4.2.5 Dispersión de longitudes (LeD)

Es la desviación estándar que mide la dispersión de las longitudes de las líneas (l_i) que pertenecen al mismo boceto y misma dirección: cuanto más difieren las longitudes de las líneas, más alto es el valor. Primero se calcula la longitud media L_{aver} . Tomando l_i como la longitud de cada línea y n_l como el número de líneas:

$$L_{aver} = \frac{\sum l_i}{n_l} \quad \forall i \in L_{SA} \quad (42)$$

$$LeD = \left[\frac{1}{n_{SA} - 1} \cdot \sum (l_i - L_{aver})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \forall i \in L_{SA} \quad (43)$$

Donde n_{SA} es el número de líneas en el grupo de aristas paralelas del dibujo S y dirección A.

4.4.2.6 Número de líneas (NL)

Número de líneas que pertenecen al mismo dibujo y dirección:

$$NL = n_{SD} \quad (44)$$

4.4.2.7 Dispersión de localización (LoD)

Es la desviación estándar que mide la influencia de la dispersión entre la localización de los puntos medios de las líneas que pertenecen al mismo dibujo y dirección, y la longitud normalizada de cada línea. Cuanto más difieran las localizaciones, y cuanto más cortas sean las líneas, más alto es el valor de este parámetro.

Primero calculamos la localización de cada punto medio, a partir de las coordenadas de los puntos extremos de cada línea, (xh_i, yh_i) para el vértice de cabeza y (xt_i, yt_i) para el vértice origen o de cola:

$$loc_i = \left(\frac{xh_i + xt_i}{2}, \frac{yh_i + yt_i}{2} \right) \quad \forall i \in L_{SA} \quad (45)$$

$$Loc_{aver} = \frac{\sum loc_i}{n_i} \quad \forall i \in L_{SA} \quad (46)$$

A continuación calculamos la desviación estándar normalizada con la longitud relativa:

$$LoD = \sqrt{\left(\frac{1}{n_{SD} - 1} \right) \cdot \left(\frac{size}{l_i} \right) \cdot \sum (loc_i - Loc_{aver})^2} \quad \forall i \in L_{SA} \quad (47)$$

4.4.3 Análisis

	Det	AD	Disp	DRC	LeD	NL	LoD	
Det	Pear	1	.757**	-.378**	-.403**	-.054	-.044	-.222
	Sig.		.000	.009	.002	.672	.733	.080
	N	63	63	47	56	63	63	63
AD	Pear		1	-.295*	-.460**	-.064	.229	.018
	Sig.			.044	.000	.621	.071	.888
	N		63	47	56	63	63	63
Disp	Pear			1	.581**	-.028	.117	.166
	Sig.				.000	.854	.433	.266
	N			47	47	47	47	47
DRC	Pear				1	-.219	-.181	-.064
	Sig.					.104	.181	.642
	N				56	56	56	56
LeD	Pear					1	.379**	.048
	Sig.						.002	.710
	N					63	63	63
NL	Pear						1	.301*
	Sig.							.017
	N						63	63
LoD								1
								63

Tabla 17 Correlación de Pearson entre los parámetros

Una vez definidos los parámetros, en la Tabla 38 del caso 5 del Anexo II, se muestran los cálculos de todos los parámetros para cada dibujo y cada dirección. Los resultados se muestran en orden decreciente de acuerdo al *grado de detección* (Det).

Realizando un análisis estadístico basado en la correlación de Pearson, obtenemos las influencias mutuas de cada pareja de parámetros. Para este estudio, se omitieron los casos donde los grupos tenían una única línea ($NL = 1$), ya que no aportan información útil.

A la luz de estos resultados, seguidamente analizamos las hipótesis propuestas.

4.4.3.1 *Primera hipótesis*

La Tabla 17 demuestra que el *grado de detección* (Det) es el parámetro que mejor correlaciona con AD (tal y como cualitativamente se dedujo en el análisis cualitativo). De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 38, del caso 5 del Anexo II, se concluye que los humanos perciben claramente y consistentemente la convergencia, a pesar de las imperfecciones de los bocetos, cuando las líneas abarcan un ángulo de al menos 12° . Entre 12° y 8° , la percepción es incierta. De ahí que un algoritmo para la detección de puntos de fuga debería dar altas probabilidades para grupos de líneas que abarcaran al menos 12° ; la probabilidad debería reducirse entre los 12° y los 8° , y debería ser cercana a cero por debajo de los 8° .

4.4.3.2 *Segunda hipótesis*

Tal y como se argumentó en el análisis cualitativo de la hipótesis 2, los humanos son capaces de coincidir sobre la orientación del ángulo de un punto de fuga, pero no sobre la posición exacta del punto de fuga sobre esta línea. Este patrón puede ser cuantificado por medio del parámetro DRC y su medida de *dispersión* Disp.

La Tabla 17 muestra que el *grado de detección* (Det) tiene un valor pequeño de correlación negativa con la *relación de distancias entre centroides* (DRC), e igualmente con la *dispersión* de la nube de punto de intersección (Disp). Considerando además el análisis detallado descrito en el caso 5 del Anexo II, podemos concluir que cuando el valor de DRC se encuentra entre 1.6 y 3, es muy probable que un punto de fuga se perciba. Con un DRC entre 3 y 5, el punto de fuga es menos probable que sea detectado. Y cuando DRC es superior a 5, las líneas no son percibidas como convergentes.

De ahí deducimos que el algoritmo para detectar puntos de fuga, debería asignar una alta probabilidad a puntos de fuga candidatos localizados en un anillo cuyo radio mínimo sea 1.6 veces el radio del círculo delimitador, y cuyo radio máximo sea 3 veces el radio del círculo delimitador. La probabilidad entonces debería disminuir fuera de este radio, y debería ser prácticamente nula fuera para una posición exterior al anillo cuyo radio sea 5 veces el radio del círculo delimitador.

En los casos donde las líneas son cortas y visualmente dispersas en el dibujo, el comportamiento de los sujetos parece cambiar. Este hecho se considera bajo el análisis de la tercera hipótesis.

4.4.3.3 Tercera hipótesis

Para evaluar nuestra tercera hipótesis, nos centraremos en la desviación estándar entre las longitudes LeD. La Tabla 17 no muestra relación entre la detección percepción de convergencia (Det) o la dispersión de las respuestas (Disp), y LeD. Sin embargo, al analizar con detalle los cuestionarios recopilados observamos que los sujetos cambiaron su patrón o estrategia de respuesta bajo situaciones específicas. Luego si bien los resultados finales no demuestran una correlación evidente entre los parámetros, las respuestas de los cuestionarios demuestran un cambio de estrategia o método de los sujetos para obtener dichos resultados. Por lo tanto no podemos negar la influencia de las longitudes de línea. Estos cambios de estrategia se han observado en los siguientes casos:

- Cuando el grupo de líneas contiene líneas de muy diferentes longitudes (LeD alto).
- Cuando el grupo de líneas incluye sólo líneas cortas y están dispersas en el dibujo (LoD alto).
- Cuando el número de líneas en el grupo es bajo (NL bajo).

Por lo tanto se debería considerar el parámetro LoD como un parámetro secundario, cuya influencia aparece en ciertas circunstancias. Tras el análisis detallado sobre el parámetro LoD descrito en el caso 5 del Anexo II, podemos deducir que la dispersión es alta para casos dudosos que tienen un valor AD pequeño, o cuando el conjunto de líneas contiene líneas cortas y medianas dispersas por el dibujo. Sin embargo, previamente hemos observado que cuando un grupo de líneas contiene líneas con longitudes muy diferentes, los humanos tienden a aplicar ciertas estrategias como son, emplear únicamente las líneas más externas del grupo, o ignorar las líneas más cortas o las más erráticas—en el caso más común se ignoran las líneas más cortas, y se emplean sólo las líneas largas para posicionar el punto de fuga—y en estos casos la dispersión se reduce.

Esta estrategia es fácil de replicar algorítmicamente y modelaría la percepción humana con fidelidad. Los casos más representativos (los dibujos 2, 3, 5, 7, 10, 13 y 14) poseen valores de LeD superiores a 10. Por lo tanto $LeD > 10$ podría emplearse como un valor umbral para señalarle al algoritmo que sólo debería emplear líneas largas para localizar el punto de fuga.

A partir de este análisis, y de los parámetros y métricas definidas con el estudio de campo, que son contribuciones originales de la presente tesis, el grupo REGEO (con participación de la doctoranda) implementó un algoritmo capaz de detectar puntos de fuga, y por tanto, grupos de líneas convergentes que representan aristas paralelas en el espacio, y a su vez detectar grupos de líneas que no convergen (son paralelas) y representan igualmente grupos de aristas paralelas en el espacio. En el siguiente apartado se describe dicho algoritmo.

4.5 Algoritmo de agrupación de líneas

El grupo REGEO, ha desarrollado un algoritmo de detección de puntos de fuga, adaptado a bocetos de objetos poliédricos. Una vez detectados los puntos de fuga, el algoritmo agrupa como aristas paralelas aquellas rectas que convergen a dicho punto de fuga. En caso de no existir punto de fuga en una dirección dada, el algoritmo agrupa las rectas paralelas en esa dirección como aristas paralelas del modelo que representan. A diferencia de otros métodos

ya existentes, este método se caracteriza por ser tolerante a las imperfecciones de dibujos hechos a mano alzada, y por estar basado en criterios perceptuales para ajustar los valores umbrales basados en los resultados y las métricas estudiadas en el apartado anterior.

Tras evaluar el algoritmo, se demuestra que sus resultados coinciden en gran medida con los resultados de la percepción humana. El resultado de dicha implementación ha dado lugar al trabajo [CVP14] donde el lector puede consultar con mayor detalle el método propuesto, y los resultados obtenidos. Además, en la página web del grupo de investigación es de acceso libre el código del método implementado (<http://www.regeo.uji.es/ParallelEdges.htm>). Por último, y para ilustrar su funcionamiento, en la Figura 57 se presentan dos ejemplos de dichos resultados. Los grupos detectados como paralelos se destacan con líneas verdes, y los grupos convergentes con líneas rojas.

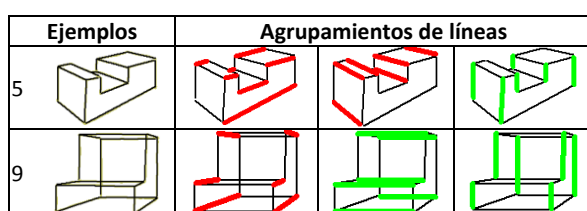


Figura 57. Ejemplos de agrupamientos de líneas que representan aristas paralelas en el espacio

Los estudios de campo presentados en esta tesis han permitido descubrir criterios y métricas que utilizados en el algoritmo, consiguen que éste replique la percepción humana. Los resultados del algoritmo avalan por tanto la importancia de esta contribución.

4.6 Otros indicios indirectos detectables en un dibujo lineal

Aunque en la presente tesis no se han realizado aportaciones a otro tipo de indicios indirectos, éste sí ha sido un tema de interés en el trabajo de investigación del grupo REGEO, que ha hecho un esfuerzo en estudiar métodos ya existentes y en desarrollar e implementar nuevos métodos de reconocimiento de otros indicios indirectos. Esta información resulta muy útil en las siguientes etapas del proceso de SBM tal y como se describirá en los siguientes capítulos.

Algunos de los indicios indirectos—desarrollados por el grupo REGEO, y utilizados en la presente tesis—que aportan información útil en etapas subsiguientes son:

- *Direcciones principales:* En la aplicación empleada en la tesis, REFER, se emplea la detección automática basada en reglas perceptuales, que está en línea con las estrategias perceptuales que proponemos en la presente tesis. En esta opción, el cálculo se basa en la distribución angular (ADG) propuesta por Lipson y Shpitalni [LS96], representada mediante un histograma de los ángulos calculados y sus frecuencias. Cuando un ángulo es añadido al gráfico, se introduce una curva de distribución gaussiana cuya media es el valor del ángulo y con una desviación típica de 7 grados, para tener así en cuenta la imprecisión del boceto. Después que todas las curvas se superponen y se combinan, posteriormente y con sus diferentes pesos el gráfico se normaliza a un valor máximo de 1.0. El gráfico ADG muestra

cuantitativamente los ángulos que prevalecen como campanas, las tres campanas mayores son las que determinan los tres ángulos de las direcciones principales.

- *Subgrafos*: La información de los subgrafos del dibujo delineado se obtiene siguiendo la estrategia seguida por Varley [Var03]. Cabe destacar que un subgrafo es un subconjunto de un dibujo lineal en el que los vértices del subgrafo no están conectados al resto de vértices del dibujo. Los subgrafos son un claro indicio indirecto en la detección de algunos features 2D como agujeros, protrusiones, vaciados, etc. Para la detección de los siguientes indicios, también se necesita información sobre subgrafos.
- *Caras*: El proceso de búsqueda de caras empleado en REFER para una representación B-Rep 2D de un objeto poliédrico es el descrito en el trabajo de Varley y Company [VC10]. También puede consultarse el informe técnico publicado por el grupo REGEO [Var09].
- *Etiquetado de aristas*: El etiquetado de aristas para representaciones alámbricas en 2D no está resuelto. Aun así, para dibujos naturales se emplea el método de Varley [Var03].

4.7 Conclusiones

En el presente capítulo se ha estudiado un indicio indirecto como es el agrupamiento de líneas que representan aristas paralelas en el espacio. Dicho estudio se ha realizado en varias etapas.

En un estudio preliminar sobre la importancia de la perspectiva cónica en los bocetos de ingeniería, se determinó que tanto los ingenieros de producto como los ingenieros gráficos tienden a emplear preferentemente la perspectiva axonométrica al bocetar piezas poliédricas sencillas de ingeniería. Sin embargo, la discriminación automática entre bocetos con convergencias o axonométricos sigue considerándose interesante. Concluimos que se trata de un problema que permanece abierto, porque el hecho de que dos líneas o más del dibujo sean paralelas (dentro de cierto valor umbral), no es un indicador suficientemente fiable de que representen aristas paralelas del objeto. En tal sentido, la propuesta desarrollada en el presente capítulo supone un avance, aunque no resuelve completamente el problema. Por ejemplo, un valor umbral ($AD = 8^\circ$) suficiente bajo permitiría identificar correctamente todas las perspectivas centrales o cónicas, pero al mismo tiempo daría lugar a que el 24,6% de los bocetos que se identificaron manualmente como axonométricos se clasifiquen erróneamente como perspectiva central.

A pesar de concluir que los ingenieros de producto y gráficos no emplean con frecuencia la convergencia al bocetar productos de ingeniería, entendemos que los diseñadores confiarán en los ordenadores cuando consideren que éstos son capaces de interpretar dibujos tal y como lo harían ellos. Por ello, consideramos que lo interesante es desarrollar métodos algorítmicos que repliquen la percepción humana al reconstruir modelos representados en bocetos de ingeniería con o sin perspectiva.

Con este fin, se ha realizado un estudio de campo para conocer el patrón de percepción humana sobre los puntos de fuga, cuyos resultados dieron lugar a la publicación [PCV13b]. Este experimento piloto nos ha permitido obtener unos parámetros y métricas preliminares

para implementar algoritmos que repliquen la percepción humana al detectar puntos de fuga en diseños de ingeniería. A través de este experimento, se ha concluido que los seres humanos son capaces de percibir la existencia de puntos de fuga en bocetos de formas tridimensionales poliédricas. Los humanos generalmente perciben los puntos de fuga en grupos de líneas que abarcan ángulos iguales o superiores a 12° . También hemos concluido que los humanos coinciden a la hora de identificar el ángulo de orientación del punto de fuga relativo al dibujo, pero no así en a qué distancia situar el punto de fuga del dibujo. Los puntos de fuga son fáciles de percibir y localizar si no están demasiado cerca ni demasiado lejos del dibujo: lo ideal sería considerar distancias no mayores que el tamaño del dibujo. Los algoritmos por tanto, deberían seguir los siguientes criterios perceptuales: el criterio de aceptación debería ser más tolerante a imperfecciones dentro de la región (1.6x a 3x), y más estricto para la región (3x a 5x). De hecho, la autora de la presente tesis ha colaborado en el diseño, implementación y prueba de uno de dichos algoritmos [CPV14] (código disponible en <http://www.regeo.uji.es/ParallelEdges.htm>), que ha obtenido resultados que concuerdan con lo predicho como conclusiones de los experimentos descritos en éste capítulo.

Por último, un conjunto de parámetros secundarios se puede combinar para influenciar la percepción y la localización de puntos de fuga incluyendo la longitud de líneas, la localización de las líneas y la densidad del grupo de líneas. La influencia de estas “distracciones” puede ser sutil, y podrían ser objeto de nuevos estudios a tener en cuenta como investigación futura.

Capítulo 5. Reconocimiento de elementos característicos 2D

5.1 Introducción

Como ya se comentó en el capítulo de la introducción, los bocetos ayudan a los diseñadores de productos durante las etapas creativas de diseño, sin embargo, éstos también son útiles cuando se utilizan como parte de un diálogo entre diseñadores donde en un único dibujo se puede representar la idea que se discute. El factor común de estos usos de los bocetos es que los diseñadores buscan la velocidad y la libertad del lápiz y del papel para transmitir la intención de diseño. En esta tesis, entendemos por intención de diseño el concepto que el diseñador tiene en su mente al dibujar un objeto.

Pero, la percepción artificial de la intención de diseño en bocetos no es un problema sencillo. Un ingeniero cuando observa un boceto puede ver:

- a) su geometría (y sus restricciones más importantes),
- b) sus características constructivas (es decir, cómo se puede fabricar la pieza) y
- c) finalidad (o la función del objeto).

La intención de diseño incluye todos estos puntos de vista, que además suelen interactuar entre sí de manera sutil convirtiendo la detección de la intención de diseño en un problema altamente complejo. En el presente capítulo, nos centramos en el punto de vista del propósito o función: ¿para qué sirve el objeto?

Los bocetos de ingeniería son un tipo específico de diagramas que transmiten información de formas 3D a dos niveles distintos: a nivel pictórico, en el que las líneas 2D del dibujo representan aristas y contornos de objetos 3D, y mediante convenciones de ingeniería, como líneas auxiliares y anotaciones. En esta tesis nos centramos en el primer nivel. En general, cualquier humano puede interpretar vistas pictóricas pero nuestro interés se centra en la formación técnica que ayuda a los diseñadores a reconocer las formas y funciones de los objetos 3D cuando miran un dibujo pictórico. Los diseñadores emplean los bocetos para comunicarse entre ellos, y el proceso es fluido y eficiente gracias a que otros diseñadores pueden deducir el significado de dichos bocetos reconociendo información de alto nivel semántico. Esta habilidad es resultado de la formación técnica recibida. Esto significa que los diseñadores tienen un conocimiento básico común que emplean en el reconocimiento de bocetos, ¿se podría automatizar este proceso de reconocimiento?

Nuestra visión es que los diseñadores perciben la intención de diseño embebida en los bocetos mediante el reconocimiento de elementos característicos que les resultan familiares. Los elementos característicos, a su vez, se perciben como una combinación de *indicios, claves o señales*. Entendemos que este paradigma se corresponde con la forma en que los ingenieros interpretan habitualmente los dibujos, y que este procedimiento puede ser replicado algorítmicamente.

Tal y cómo hemos comprobado en la literatura (apartado 2.4.1), el reconocimiento de elementos característicos a partir de información de entrada 2D ha sido escasamente considerado hasta el momento, mientras que el reconocimiento de elementos característicos a partir de información de entrada 3D es un problema bien conocido y trabajado (aunque todavía no resuelto) [BNM08]. Según Han y otros [HPR00] hay tres métodos prometedores en el reconocimiento de elementos característicos: el *método basado en grafos*, el *método basado en la descomposición volumétrica*, y el *método basado en indicios*. El último de éstos es similar al método perceptual propio del modelado basado en bocetos (SBM). Las señales o indicios 3D determinados por Han se diferencian poco de las regularidades 2D o de los indicios (directos o indirectos) empleados en SBM que sugieren la posible existencia de un elemento característico. Obviamente los algoritmos desarrollados para analizar una información de entrada 3D no se pueden aplicar directamente a información de entrada 2D—ya que requieren información de profundidad que no está disponible—pero pueden proporcionar un punto de partida útil.

Así pues, la estrategia que proponemos es buscar elementos característicos 2D directamente a partir de los dibujos delineados, generados tras la etapa de *reconocimiento de boceto*, y empleando la información de diferentes indicios extraída en la etapa de *reconocimiento de indicios*. El *reconocimiento de elementos característicos 2D* es por tanto, la primera sub-etapa de la etapa de *reconstrucción*, cuyo objetivo final es obtener el modelo 3D del objeto representado (Figura 1). Basamos nuestra estrategia en la teoría de *reconocimiento por componentes*, introducida por Biederman [Bie87] en el campo de la psicología de la percepción según la cual la percepción humana incluye la habilidad de “trocear” objetos en componentes más sencillos para tratar de buscar en nuestra memoria una coincidencia. Estos componentes sencillos reciben el nombre de geones y describen cuatro volúmenes primitivos básicos: esferas, cilindros, prismas y cuñas. La teoría plantea que diferentes combinaciones y relaciones estructurales entre dichos geones permite generar múltiples objetos. Y que el sistema visual humano ha desarrollado la capacidad de percibir los geones como características invariantes desde diferentes puntos de vista. Nuestra hipótesis general es que los ingenieros y diseñadores pueden descomponer un dibujo en sus elementos característicos, y analizando la combinación de elementos característicos 2D reconocidos en el dibujo, son capaces de determinar la intención de diseño del objeto representado.

El presente capítulo se desarrolla de la siguiente manera. En el siguiente apartado (apartado 5.2) se definen los tipos de elementos característicos y se clasifican aquéllos que se han considerado como los más comunes y por tanto, interesantes de reconocer en bocetos de ingeniería. A continuación (apartado 5.3) se presentan unos experimentos piloto para verificar el paradigma perceptual sobre cómo los ingenieros (de producto) y diseñadores (industriales) interpretan los bocetos de ingeniería. Después y como aportación de la presente tesis

(apartado 5.4) se describe la implementación de un algoritmo para el reconocimiento de unos elementos característicos específicos como son los escalones y/o vaciados; y se describe brevemente qué otros elementos característicos 2D se reconocen actualmente en REFER.

5.2 Tipos de elementos característicos

Como ya hemos tratado en la revisión de la literatura (apartado 2.4.1) aunque las definiciones no están unificadas, varios autores ([VR93], [Han96], [Han97], [Sha08] entre otros) han definido y distinguido entre aquellos elementos característicos que simplemente corresponden a formas geométricas (*elementos característicos de forma o geométricos*) de los *elementos característicos de diseño* y los *elementos característicos de fabricación o mecanizado*. Los primeros son interesantes porque facilitan el modelado y la conceptualización de la geometría de un objeto. Los segundos permiten además comunicar una intención de diseño o una cierta función. Los terceros hacen referencia a formas que se pueden obtener mediante un cierto proceso de fabricación.

Por lo tanto en la presente tesis, consideramos estos tres importantes tipos de elementos característicos, que relacionamos de la siguiente manera: Los *elementos característicos de diseño* son los que en la mente del diseñador se transforman en *elementos característicos de forma o geométricos* a través de dibujos y de modelos CAD, y posteriormente son interpretados como *elementos característicos de mecanizado o fabricación* para la planificación del proceso de fabricación. La correspondencia entre dos de estos conjuntos cualesquiera no es biunívoca. Desde el trabajo de [VR93] en adelante, se ha desarrollado una gran cantidad de investigación sobre la conversión de elementos característicos de forma en elementos característicos de mecanizado, sin embargo, se ha investigado poco la deducción de elementos característicos de diseño, ya que con frecuencia se asume que la intención de diseño ya no es de interés una vez que el diseñador la plasma en un dibujo mediante formas geométricas. A nuestro entender, ésta es una consideración equivocada. Analizar sólo la geometría implícita en los bocetos nos proporciona una descripción del objeto de muy bajo nivel. Sin embargo, la descripción de alto nivel—a la que llamamos intención de diseño—es una información compleja y útil, que en un momento dado, ayuda a desambiguar la información aportada por los indicios en una imagen pictórica. Por lo tanto, tan importante debería ser analizar la geometría de los bocetos como la intención de diseño que contienen.

5.2.1 Clasificación de Elementos característicos

Como argumenta Sha [Sha91], aunque el número de elementos característicos no es finito, es interesante tratar de clasificarlos o crear familias por varias razones:

- Primero, porque al clasificarlos se pueden identificar propiedades de cada familia de modo que puede dar lugar a nuevos algoritmos de reconocimiento para familias de elementos característicos, en lugar de que existan algoritmos para cada uno de los elementos característicos.
- Segundo, porque se puede llegar a consensuar una terminología común o general.
- Por último, la taxonomía de los elementos característicos puede ayudar a desarrollar estándares de intercambio de datos de producto.

Luego, en primer lugar, se ha considerado interesante realizar un estudio de los elementos característicos más comunes. La razón principal que nos mueve a ello es que necesitamos conocer sus características para implementar algoritmos que nos permitan reconocerlos en los dibujos delineados obtenidos tras la etapa de vectorización, y antes de pasar al modelado del objeto. Hay que destacar que a la hora de desarrollar estos algoritmos, se tendrá en cuenta la información extraída de los indicios indirectos presentados en el capítulo anterior.

Para realizar la clasificación se ha tomado como punto de partida el catálogo en-línea de CustomPartNet [Cus11] ya que está basado únicamente en elementos característicos de forma, mientras que las librerías de elementos característicos de los programas CAD/CAM están estrechamente asociados con procesos de mecanizado. Cabe destacar que de la clasificación que presentamos a continuación se ha excluido un elemento característico muy popular en CAD: la extrusión. La extrusión es tanto una operación muy útil de modelado CAD como un elemento característico de fabricación, pero consideramos que la extrusión tal cómo se aplica en los programas CAD dominantes no está asociada a ninguna intención de diseño. Sin embargo, algunos elementos característicos de forma que pueden ser modelados y mecanizados por extrusión sí han sido incluidos en la clasificación cuando están relacionados con alguna función específica—por ejemplo, las guías que se emplean en el desplazamiento relativo entre dos piezas.

Otra duda que se planteó en esta clasificación es si debíamos incluir los chaflanes y redondeos. La función de estos elementos característicos es la de eliminar las aristas vivas y/o transiciones afiladas (que pueden herir a los usuarios; que son difíciles de mecanizar; actúan como concentradores de tensiones, etc.). Por una parte, su función es secundaria, y ayudan poco a determinar la intención de diseño del dibujo. Pero, por otra parte, son ubicuas, fáciles de generar durante el proceso de modelado CAD, y fáciles de detectar y eliminar de los bocetos para simplificarlos antes de abordar otros elementos característicos más complejos [CV10]. Por lo tanto han sido incluidas en la clasificación.

Por último, en la clasificación no se han considerado elementos característicos *compuestos*, como por ejemplo el soporte de acoplamiento de la Figura 58 izquierda, donde seis elementos característicos de forma (una protuberancia cilíndrica perforada y cuatro nervios circulares) se combinan para realizar una única función (acoplar esa pieza a otra, mediante un tornillo o por presión). Y tampoco se han considerado elementos característicos *distribuidos*, como por ejemplo las tres patas del trípode de la Figura 58 derecha, que pueden considerarse como un único elemento característico—con la función de mantener el asiento del taburete estable, incluso sobre una superficie irregular—aunque estén topológicamente separadas. Estos casos son demasiado complicados de clasificar en un catálogo inicial, pero esperamos que podrán ser reconocidos una vez se hayan identificado los elementos característicos más sencillos.

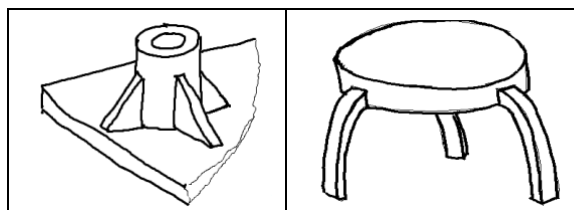


Figura 58. Soporte de acoplamiento (izq.) y trípode (dcha.)

Este análisis sobre los elementos característicos más comunes, dio lugar al trabajo [PVC13] en el que además de presentarse un listado de los elementos característicos de forma más comunes, se intenta relacionar cada uno de ellos con la intención de diseño que representa. La clasificación se realiza atendiendo a dos criterios. En primer lugar si son elementos característicos que implican un emparejamiento, o no (aislados). Ya que en ese caso generalmente existe correspondencia entre los elementos característicos complementarios, puesto que comparten indicios geométricos. Y en segundo lugar, si son aditivos (implican una extrusión aditiva de material) o sustractivos (implican una extrusión sustractiva o eliminación de material debido generalmente a un proceso de mecanizado).

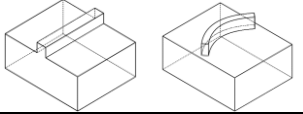
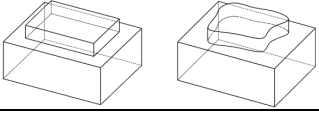
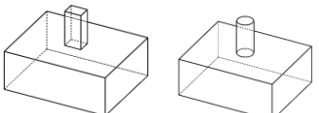
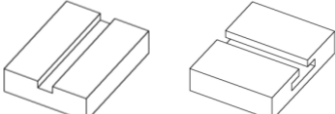
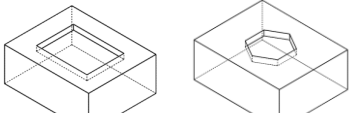
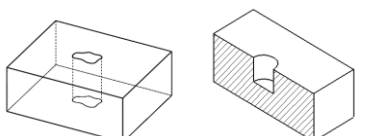
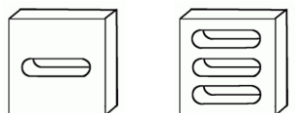
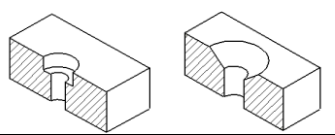
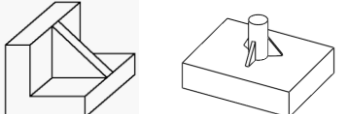
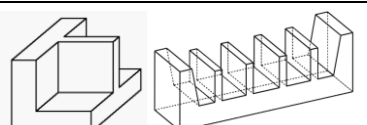
Elementos característicos	Emparejados	Aditivos	Guías		
			Escalones		
			Protuberancias		
		Sustractivos	Ranuras		
			Huecos o vaciados		
			Agujeros		
	Aislados	Aditivos	Agujero coliso		
			Refrentado y avellanado		
			Nervios		
				Divisores	

Tabla 18 Clasificación de los elementos característicos 2D

5.3 Experimentos sobre el reconocimiento de elementos característicos 2D

Como ya comentamos anteriormente, intuimos que la manera en que ingenieros y diseñadores extraen la intención de diseño es descomponiendo mentalmente un objeto en los elementos característicos que lo componen. Esta hipótesis es fácil de comprobar en objetos sencillos, cuando a partir de su forma, cualquier técnico o incluso cualquier sujeto sin formación técnica puede deducir la función que tiene el objeto, sin embargo, ¿podemos aplicar el mismo proceso para objetos más complicados?

Nuestra hipótesis general se basa en que un dibujo puede ser descompuesto en los elementos característicos que lo componen y que a partir de la combinación de los elementos característicos 2D reconocidos en el dibujo, los ingenieros y diseñadores pueden determinar la intención de diseño del objeto representado. Para validar esta hipótesis general hemos llevado a cabo dos sencillos experimentos para determinar las siguientes hipótesis:

1. Los ingenieros y diseñadores son capaces de reconocer diferentes elementos característicos de forma en un dibujo delineado.
2. A partir de los elementos característicos 2D, ingenieros y diseñadores son capaces de deducir la intención de diseño de la pieza representada.

Los resultados de nuestros experimentos demuestran que: a) los diseñadores tienen una base de conocimiento común, es decir, conocen un conjunto de elementos característicos que son capaces de reconocer en un dibujo 2D, b) al menos para la mayoría de las piezas, los encuestados pueden deducir su intención de diseño, incluso si las piezas son dibujadas de manera aislada y no contextualizadas con su ensamblaje, y c) los diseñadores emplean la clase de enfoque reduccionista que proponemos en el presente trabajo como recurso alternativo cuando las piezas no les resultan familiares.

5.3.1 Experimento #1

Primero realizamos un experimento para validar la primera hipótesis. Para ello, proporcionamos a una muestra de sujetos (todos ellos con conocimientos técnicos, mayoritariamente en ingeniería) unos cuestionarios con una serie de piezas de ingeniería dibujadas, y les pedimos que determinaran los elementos característicos que observaban en cada objeto dibujado, a partir de su propia experiencia y el sentido común (Figura 59).

Empleamos los dibujos de diez objetos diferentes (Tabla 19) dando únicamente 5 de ellos a cada uno de los sujetos entrevistados, evitando así la fatiga en sus respuestas. En los cuestionarios incluimos un ejemplo ilustrativo de cómo contestar el cuestionario, que no incluía los mismos elementos característicos de las piezas representadas en los cuestionarios. Cada dibujo aparecía en una hoja independiente (formato estándar A4), con suficiente espacio para que los encuestados añadieran marcas y comentarios que consideraran.

Los encuestados fueron principalmente profesores de universidad, incluyendo ingenieros industriales, ingenieros mecánicos y diseñadores industriales. Debido al tipo de tarea solicitada en la que se necesitaba un conocimiento básico en piezas de ingeniería, buscábamos una

población con conocimientos técnicos. El criterio de finalización fue temporal, es decir que se trató de recopilar el máximo de cuestionarios posibles en el plazo de una semana.

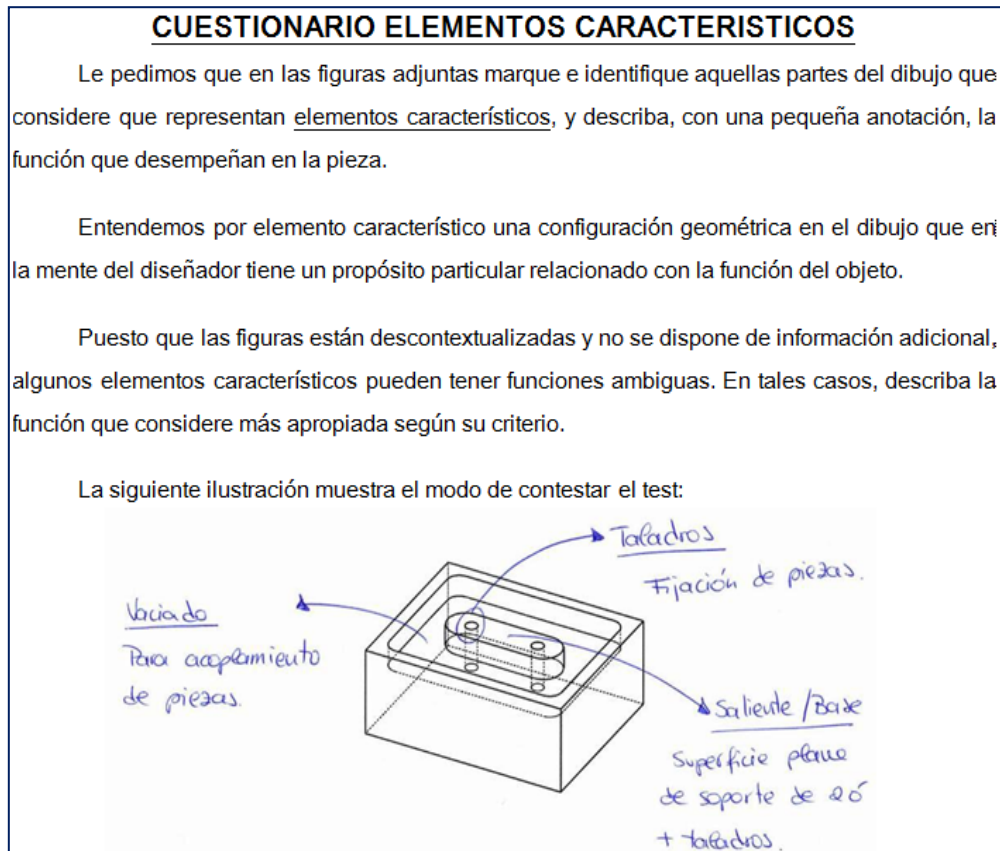


Figura 59. Cuestionario de elementos característicos

Se recogieron un mínimo de 11 y un máximo de 14 opiniones diferentes para cada uno de los diez dibujos. En la columna central de la Tabla 19, se listan para cada dibujo, todos los elementos característicos 2D percibidos por los encuestados, y en la columna derecha, el porcentaje de sujetos que los percibieron.

A la luz de los resultados, podemos concluir que el experimento valida claramente la hipótesis de que los diseñadores tienen en su base de conocimiento un conjunto de elementos característicos que pueden identificar en los dibujos. Diez de los elementos característicos que aparecían en los dibujos fueron percibidos por todos los sujetos. Al menos una tercera parte de los elementos característicos (22 de los 65) pueden considerarse “comunes”, ya que fueron percibidos por al menos el 80% de los sujetos. Sólo un tercio (17 de los 65) se pueden considerar como elementos característicos “inusuales” o “difíciles de percibir”, ya que se percibieron por menos del 20% de los sujetos.

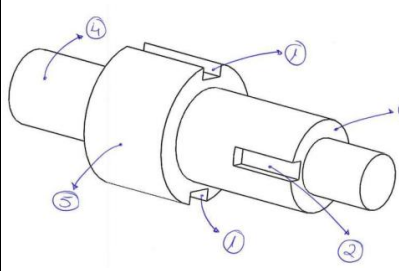
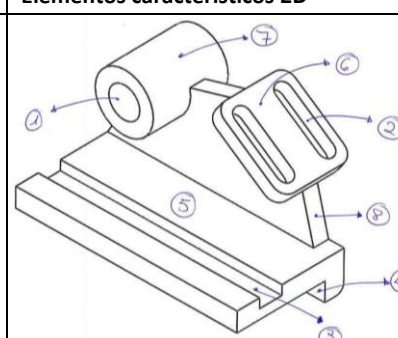
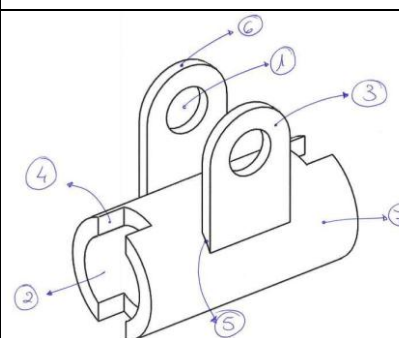
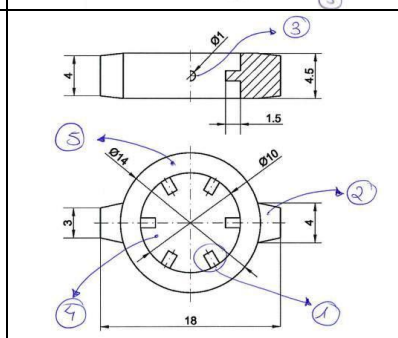
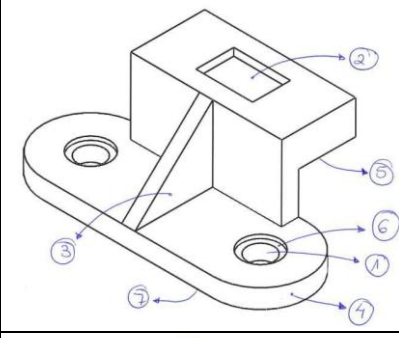
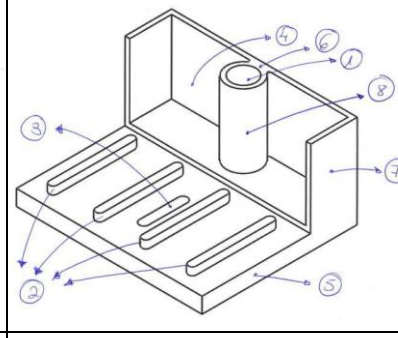
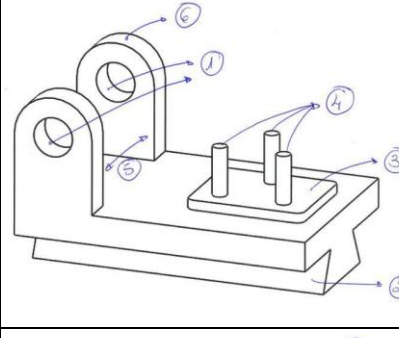
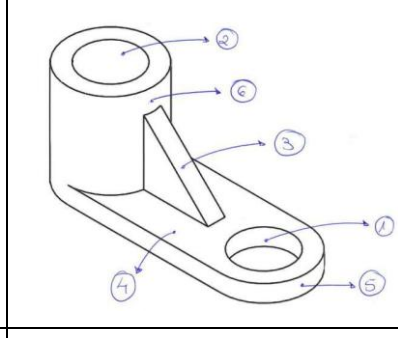
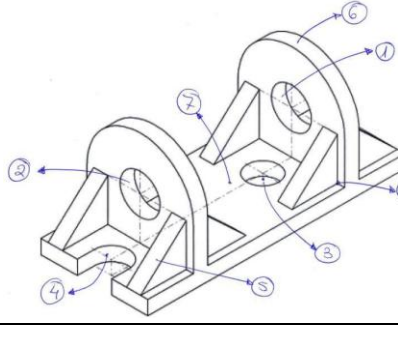
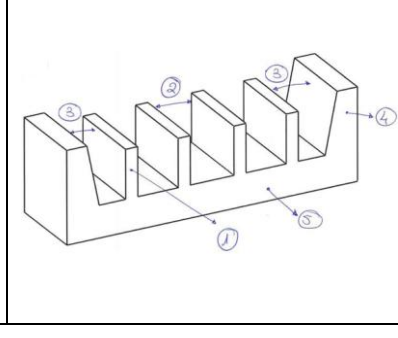
Dib	Elementos característicos 2D	% resp	Dib	Elementos característicos 2D	% resp
1		1 100% 2 100% 3 25% 4 58% 5 17%	2		1 100% 2 92% 3 100% 4 67% 5 17% 6 42% 7 17% 8 17%
3		1 75% 2 17% 3 67% 4 100% 5 8% 6 8% 7 17%	4		1 91% 2 91% 3 9% 4 27% 5 18%
5		1 86% 2 100% 3 64% 4 7% 5 29% 6 64% 7 21%	6		1 100% 2 100% 3 100% 4 29% 5 21% 6 7% 7 29% 8 7%
7		1 93% 2 93% 3 43% 4 93% 5 7% 6 21%	8		1 92% 2 85% 3 85% 4 31% 5 8% 6 23%
9		1 100% 2 93% 3 79% 4 93% 5 71% 6 21% 7 14% 8 7%	10		1 67% 2 50% 3 8% 4 17% 5 8%

Tabla 19 Dibujos y elementos característicos percibidos por los encuestados

Además, el experimento nos ha aportado otras informaciones valiosas.

En primer lugar, aunque los nombres dados por los encuestados a cada elemento característico a veces variaban (entre otras cosas porque los encuestados hablaban diferentes idiomas), hay una evidencia razonable de que su comprensión sobre la función de la pieza es la misma. Por ejemplo, el elemento característico 2 del objeto 1 fue etiquetado por el 75% de los sujetos como “chavetero”, el resto de los sujetos describieron la misma función del elemento característico, aunque le dieron un nombre diferente. Para conocer más detalles sobre estos resultados se remite al lector al caso 1 del anexo III.

Nuestra impresión, resultado de conversaciones informales con algunos de los sujetos después de haber completado el test, es que cuando un elemento característico tiene diferentes interpretaciones, éstas vienen determinadas por diferentes modos de mecanizar el elemento característico (por ejemplo, agujero cilíndrico o taladro), antes que por diferentes intenciones de diseño. Parece que, incluso dos décadas después de Vandenbrande y Requicha [VR93], el conocimiento de los elementos característicos de mecanizado aún influye la percepción de la intención de diseño.

Algunos de los sujetos escribieron espontáneamente su percepción sobre la función/intención de diseño del objeto completo. Por esa razón y para ampliar la información de si el dibujo transmite suficiente información sobre la intención de diseño del objeto completo, realizamos un segundo experimento.

5.3.2 Experimento #2

En el segundo experimento, se solicitó a los encuestados que describieran la función general de tres objetos, argumentando las razones de su percepción (Figura 60). Cada objeto se presentó dibujado en una hoja individual donde los sujetos pudieron responder y añadir sus propios comentarios. Además no se aportó ningún tipo de información adicional sobre el objeto, ni información sobre su contexto. De nuevo, la muestra de personas encuestadas fueron principalmente profesores de varios departamentos de la misma universidad, entre ellos ingenieros industriales, ingenieros mecánicos y diseñadores; además en este experimento también participaron tres estudiantes con estudios de postgrado en ingeniería. De nuevo, se buscaba una población con una formación en ingeniería dado que la tarea requería conocimientos en ingeniería.

CUESTIONARIO ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS

Le pedimos que en las figuras adjuntas describa la función de la pieza ¿cuál piensa que es el propósito general de la pieza?

¿En qué se basa?

Figura 60. Segundo cuestionario de elementos característicos

Se obtuvieron un total de 16 opiniones de cada uno de los tres ejemplos. Los resultados se discuten en los siguientes apartados. Para cada uno de los tres ejemplos, proporcionamos el dibujo, información real de su procedencia, nuestras propias expectativas de cómo los sujetos

lo van a analizar, los resultados del experimento, y un análisis de cómo los resultados coinciden con nuestras expectativas.

Algunos de los entrevistados dieron respuestas múltiples, proponiendo ideas diferentes de forma simultánea. Por lo tanto, el número de sujetos que apoyan diferentes funciones no siempre suman el 100%.

Ejemplo 1

Lo primero que observamos en la Figura 61 es que se trata de un eje central formado por cuatro cilindros concéntricos. El objeto está claramente diseñado para girar alrededor de su eje: se trata por tanto de un árbol, y en particular, se trata de un árbol de transmisión.

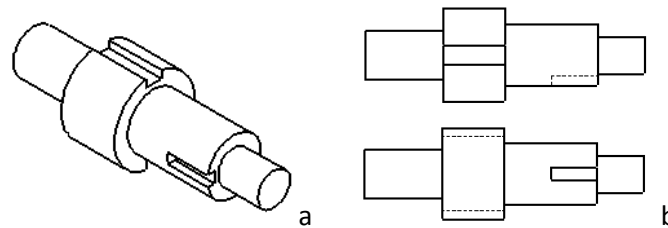


Figura 61. *Ejemplo 1 en vista axonométrica (a) y sistema multivista (b)*

Los ejes generalmente contienen ranuras, como el par de ranuras opuestas de la sección más grande de nuestro eje. Deducimos que una segunda pieza, un engranaje o un cubo, puede ser la pieza que encaje por deslizamiento en esta parte del eje, ya que el desplazamiento longitudinal está permitido por las ranuras, y a su vez obligan al conjunto a rotar solidariamente.

El eje contiene una tercera ranura, que es distinta: un chavetero. Podemos intuir la presencia del chavetero correspondiente en la pieza que encaja con la mostrada—un engranaje o un cubo por ejemplo—pero deberíamos primero ver la pieza de acoplamiento antes de poder deducir la función de la ranura. De hecho, el chavetero, junto con el chavetero similar situado en la pieza acoplada, y la propia chaveta, producen una unión desmontable.

Resultados experimentales: el 88% de los encuestados identificaron el objeto como el elemento de un sistema de transmisión (un árbol); el 36% especificó su función principal como la transmisión de energía; algunas personas identificaron el objeto sólo como una parte de un ensamblaje (12%).

La mayoría de las opiniones destacaron la importancia de la existencia de ranuras para la colocación de chavetas (81%) y la mayoría también destacaron los cilindros coaxiales con diferentes diámetros de la pieza (56%).

Muchos encuestados dedujeron que estas características estaban relacionadas con la rotación de la pieza y otro componente de transmisión (75%). En otras explicaciones, mientras se deducía la presencia de uno o más componentes, algunos encuestados describieron estos componentes como cojinetes o engranajes (17%), otros como otro árbol (8%) o como un motor (8%).

Uno de los sujetos sugirió que la pieza podría ser un componente de un mecanismo de una cerradura o un pomo de puerta.

Discusión: Los resultados muestran que la pieza es bien conocida por los ingenieros independientemente de su especialidad. El reconocimiento funcional del elemento característico así como el reconocimiento de forma resulta ser incuestionablemente esencial para deducir el propósito general de la pieza, y también para deducir qué otras piezas o componentes podrían formar parte del ensamblaje. Los sujetos han alcanzado un acuerdo general sobre todo esto.

Ejemplo 2

El ejemplo de la Figura 62 posee una placa plana en su parte inferior, y tanto el agujero vertical como el agujero semi-coliso que atraviesa la placa (incluyendo posibles agujeros secundarios si suponemos la pieza simétrica) sugieren que este objeto no sólo descansa sobre una superficie, sino que además se podría fijar a ella mediante tornillos o pernos.

Si eliminamos la placa base, nos quedan dos divisores verticales reforzados con cuatro nervios cada uno. Ambos divisores tienen un agujero pasante que parecen estar alineados, lo que sugiere que otro componente puede acoplarse y ajustarse a través de ellos. Los agujeros parecen circulares y no poseen obstrucciones, por lo tanto se puede pensar que la segunda pieza pueda ser un eje que se acople y pueda girar.

La presencia de componentes móviles en el conjunto significaría que la pieza de estudio se encuentre probablemente sometida a una fuerza o carga importante, esto explicaría la presencia de los nervios para reforzar la estructura de la pieza que actuaría como soporte, y la presencia de los divisores como elementos que ayudarían al árbol de transmisión a contrarrestar las cargas de torsión propias de su función. Es decir, que nuestra interpretación sería que la función de la pieza estudio es la de sostener un eje de giro a una distancia determinada sobre una superficie plana.

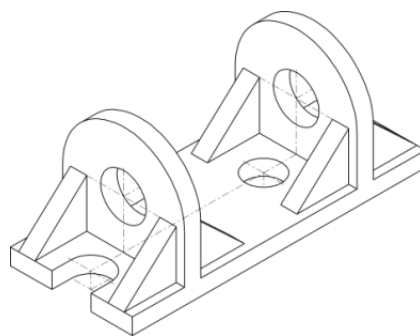


Figura 62. *Ejemplo 2*

De hecho, la pieza es un componente de un eje de transmisión procedente de un kit de transferencia de energía para convertir la energía eléctrica a través de la energía mecánica en energía potencial. Así, uno de los extremos del eje de rotación está impulsado por un motor eléctrico; mientras que el otro extremo sobresale de la base y sujeta un contrapeso. La inercia del movimiento de este peso puede producir una pérdida de equilibrio del conjunto, que es otra razón por la cual la pieza debe estar fijada firmemente a una superficie plana.

Resultados experimentales: todos los sujetos encuestados entendieron que la función principal del objeto representado es un tipo de soporte estructural (100%). Algunos de ellos, denominaron a la pieza como placa de base (38%), como pieza soporte de un eje/árbol (38%), soporte para cableado (6%) o incluso una bisagra (6%).

El 63% de los encuestados observaron que la pieza podría estar fijada a una superficie a través de los agujeros practicados en la base horizontal.

Además, el 56% expuso que los agujeros coaxiales en los divisores verticales sugerían el alojamiento de un eje o algún tipo de piezas cilíndricas a las que se les permitiría el movimiento de rotación. Otro 31% no estuvo de acuerdo, argumentando que los agujeros coaxiales sólo admitían o alojaban piezas no giratorias (como herramientas, objetos, elementos tubulares, alambres). El 13% restante determinó que la posición de los agujeros en la pieza podría permitir una transmisión de movimiento de rotación entre un eje horizontal y un eje vertical a través de, por ejemplo, engranajes cónicos.

El 19% de los sujetos indicó que los nervios implicaban que la pieza podría estar soportando fuerzas externas, y su función principal era la de reforzar la estructura.

Por último 13% sugirió la posibilidad de emplear cojinetes en los agujeros coaxiales con el fin de facilitar el movimiento de rotación del eje.

Una respuesta curiosa fue la que propuso que la pieza podría ser parte de un banco de trabajo de carpintero.

Discusión: Los resultados muestran que la pieza es bien conocida por ingenieros, independientemente de su especialización, pero existen dos interpretaciones razonables. Todos los sujetos coinciden en la función de soporte de la pieza. Como en el primer ejemplo, el reconocimiento funcional del elemento característico proporciona una información esencial a la hora de comprender la intención de diseño de la pieza. Por otro lado, mientras que todos los encuestados reconocieron que los agujeros coaxiales implicaban la presencia de otra pieza de ensamblaje, no hubo un acuerdo general sobre la pieza de qué se podría tratar: la mayoría consideraron que sería un eje de rotación, otros discreparon. Por último, unos pocos sujetos describieron la función de los nervios como refuerzo de la pieza soporte, incluso aunque éste es un importante indicio de intención de diseño. De hecho, los sujetos parecían más preocupados en encontrar diferentes posiciones de las piezas a ensamblar.

Ejemplo 3

La Figura 63 representa un conjunto de tres piezas ensambladas, de las cuales la pieza 2 es la pieza externa. De nuevo, la presencia de un eje central y las formas básicas cilíndricas sugieren que el conjunto es rotatorio.

Es evidente que las ranuras de la pieza 2, se corresponden con las guías de la pieza 1, y determinan el modo en que ambas piezas se ensamblan. Este tipo de ensamblaje permite un fácil montaje por deslizamiento del anillo en el interior del cubo en la dirección del eje central, pero impide la rotación del anillo alrededor del eje. Por lo tanto todo el conjunto tiene que girar solidariamente.

Quedan las seis protuberancias alrededor del agujero central de la pieza 1 (que se muestran claramente en el dibujo multivista de la pieza 1 en la Figura 63b). Sin embargo, poco es lo que podemos deducir a partir de la geometría sobre el propósito de estas protuberancias.

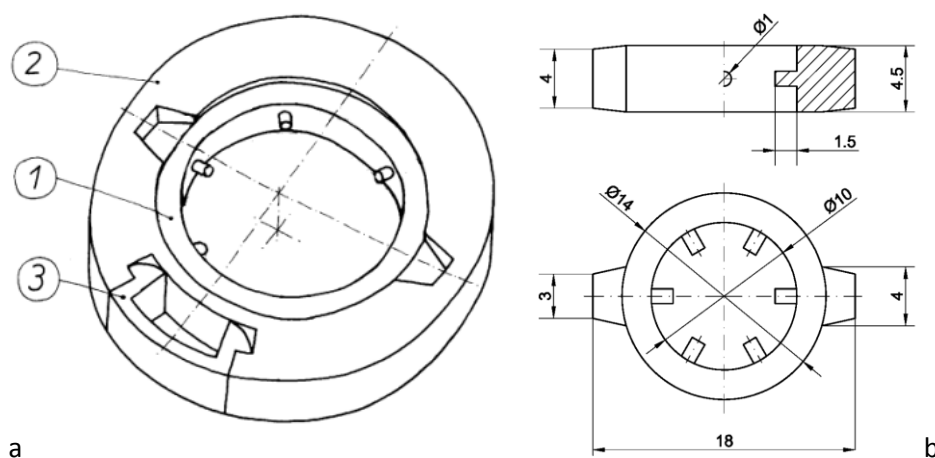


Figura 63. Concentrador de una cinta de vídeo (a) y multivista de la pieza 1 (b)

De hecho, la figura muestra uno de los dos carretes de una grabadora de vídeo. La cinta se enrolla sobre la superficie externa del tambor (2). Una clavija (3) fija el inicio de la cinta a la superficie externa del tambor. El anillo interior (1) encaja en la polea rotatoria de la grabadora de vídeo. La superficie de la polea contendrá muescas para que coincida con las seis protuberancias del anillo interior, que manera que el carrete girará cuando gire la polea.

Resultados experimentales: En este ejemplo se obtuvo una gran variedad de respuestas a partir de los sujetos. La pieza fue denominada de diferentes formas, incluyendo la denominación de tambor (31%), soporte de fijación (25%), arandela (19%), cojinete (13%)... Lo que demuestra que la función de la pieza tiene diferentes interpretaciones.

Alrededor del 70% de los sujetos establecieron que la pieza 1 estaba embebida en la pieza 2 mediante las pestañas laterales. Además, el 56% de los sujetos comentaron que la función de las protuberancias de la pieza 1 era la de ajustar, posicionar y centrar una pieza interna; un 31% pensó que la función principal de la pieza 1 era transmitir un movimiento de rotación entre la pieza interior y piezas 2 y 3; mientras que el 13% restante pensó que al contrario la pieza 1 impedía el movimiento de rotación entre una pieza interior y las piezas 2 y 3, actuando como un cojinete.

Otros comentarios interesantes fueron que: (a) si la pieza 1 estuviera hecha con un material flexible, podría eliminar vibraciones a la pieza interna (6%), y que (b) las protrusiones de la pieza 1 reducían la fricción con la pieza interna (6%).

Discusión: A diferencia de los otros dos ejemplos, en este caso la pieza parece no ser conocida por los sujetos. Aunque la mayoría de los encuestados reconocieron los elementos característicos individuales, hubo diferentes conclusiones acerca la intención del diseño de la pieza.

Conclusiones generales del experimento

En definitiva, los resultados de los tres experimentos validan parcialmente la hipótesis, número 2, dado que sugieren que los diseñadores tienden primero a interpretar la pieza completa mediante una estrategia de comparación de patrones, y emplean elementos característicos para reforzar o rechazar la comparación global. En esos casos en los que la experiencia previa no les proporciona patrones de identificación, los diseñadores tratan de determinar indirectamente la función global empleando sus conocimientos sobre cada elemento característico individual y determinando qué combinación de funciones proporciona la mejor interpretación general del objeto.

5.4 Detección de elementos característicos 2D en dibujos lineales

El *reconocimiento de elementos característicos 2D* es la primera sub-etapa de la etapa de *reconstrucción*. La estrategia que proponemos es buscar elementos característicos 2D directamente a partir de los dibujos delineados, generados tras la etapa de *reconocimiento de boceto*, y empleando la información de diferentes indicios extraída en la etapa de *reconocimiento de indicios*.

Nuestro método para detectar elementos característicos en bocetos 2D se basa en la detección previa de indicios. Como parte del trabajo de la presente tesis se han elaborado algoritmos para el reconocimiento de dos elementos característicos 2D específicos: escalones y vaciados. El problema es complejo porque partimos de una información de entrada 2D y por lo tanto carecemos de información de profundidad.

Existen diferentes sutilezas o matices que deben ser tomados en cuenta al desarrollar algoritmos para identificar y distinguir entre elementos característicos de forma. Por ejemplo, la topología proporciona importantes indicios a la hora de identificar elementos característicos de forma ayuda a diferenciar entre nervios y divisores (los ingenieros saben que la forma rectangular no es apropiada para los nervios, ya que no aporta ninguna ventaja desde el punto de vista estructural).

Los indicios geométricos parecen menos importantes pero no pueden ser totalmente ignorados. Por ejemplo, la relación de aspecto (“aspect ratio” en inglés) es un indicio necesario para distinguir un nervio; el cual, por definición, es una “pared delgada”.

A continuación se describe el algoritmo desarrollado para el reconocimiento desde una imagen 2D de dos elementos característicos clasificados en la sección 5.2.1 como escalones y vaciados.

5.4.1 Escalones y Vaciados

Estos elementos característicos son tratados al mismo tiempo ya que están emparejados, y comparten en gran medida una intención de diseño. A continuación se describen las características geométricas de cada uno de ellos:

- *Intención de diseño*: Los escalones y los vaciados son ambos un fuerte indicio de que el objeto es parte de un ensamblaje. Son piezas complementarias y proporcionan

información topológica y geométrica acerca de cómo se ensambla el conjunto. También se pueden emplear para el centrado o el posicionamiento de ensamblajes. Alternativamente, los vaciados situados en la cara superior de un objeto, pueden actuar como recipientes de líquido, cubetas para la recogida de objetos, o definir un molde de fabricación; por su parte, los escalones pueden proporcionar una superficie plana para reforzar el servicio de agujeros.

- *Geometría de un escalón:* Un escalón es un volumen de extrusión aditiva con una relación de aspecto reducida (el elemento característico ha de ser más ancho que alto), y un contorno regular (Figura 64 a) o irregular (Figura 64 b), que puede ser uniforme o no-uniforme a lo largo de cualquier dirección (Figura 64 d). Además puede tener una sección transversal irregular (Figura 64 c). Cuando un escalón combina muchos de los elementos descritos anteriormente, tales como un contorno irregular y no uniforme y una parte superior no plana, puede dar como resultado una forma muy compleja que es mejor clasificarla como un bajorrelieve. Tales caso complejos no son considerados por el algoritmo que proponemos.

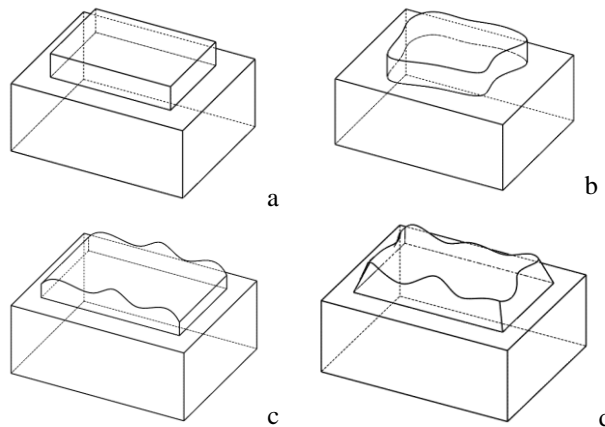


Figura 64. Ejemplos de escalones

- *Geometría de un vaciado:* Un vaciado es un volumen de extrusión sustractiva que no cumple los criterios para ser considerado un agujero o una ranura: no es tan profundo como un agujero (Figura 65a y b) y no es tan largo como una ranura (Figura 65c y d). Puede tener una sección transversal uniforme (Figura 65c) o no (Figura 65d).

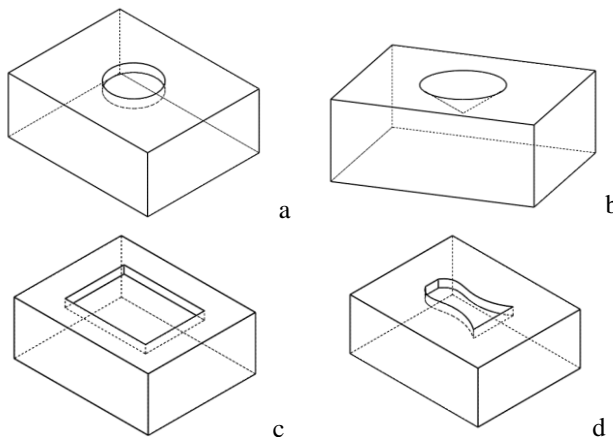


Figura 65. Ejemplos de vaciados

Antes de comenzar el proceso de detección de vaciados y escalones en dibujos de vista única y estructura alámbrica, recordemos que como entrada de información contamos con los indicios analizados en la etapa de *reconocimiento de indicios*. El principal indicio para encontrar los vaciados y los escalones es que pertenecen a subgrafos desconectados en los dibujos vectorizados.

Para el desarrollo del algoritmo se empleará la información de los siguientes indicios indirectos:

- Grupos de líneas que representan aristas paralelas.
- Direcciones principales.
- Información o lista de subgrafos.
- Listado de caras.
- Etiquetado de líneas.

El resultado o salida prevista del algoritmo es una lista de elementos característicos candidatos a representar un vaciado o un escalón y una figura de mérito que indique la probabilidad de calidad para cada uno de ellos.

El algoritmo tiene cinco etapas que a continuación se describen: 1) Búsqueda de elementos característicos candidatos, 2) Filtrado de forma, 3) Candidatos a cara externa 4) Selección de la cara externa, y 5) Clasificación del elemento característico.

5.4.1.1 Búsqueda de elementos característicos candidatos

Tal y como hemos comentado, una condición que tanto los vaciados como los escalones cumplen, es que ambos pertenecen a subgrafos desconectados. El subgrafos que contiene la mayoría de las aristas de contorno se etiqueta como *subgrafo externo*. El algoritmo toma como candidatos aquellos subgrafos detectados y ubicados dentro del subgrafo externo, a partir de ahora, *subgrafos internos*.

5.4.1.2 Filtrado de forma del subgrafo interno

El algoritmo comienza analizando la forma de cada subgrafo interno. Esta etapa actúa como filtro (los subgrafos que no pasan el filtro son descartados como candidatos).

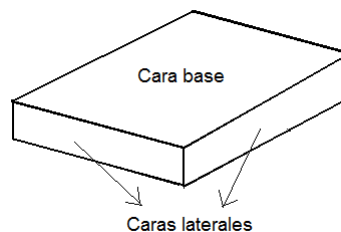


Figura 66. Tipología básica del subgrafo interno que representa un escalón o vaciado.

El algoritmo busca subgrafos con forma prismática con una relación de aspecto baja. Por ello, primero busca caras laterales rectangulares, representadas en el dibujo como circuitos

cerrados de cuatro aristas. Considerando que un rectángulo en 3D por lo general se presenta como un paralelogramo en una imagen 2D axonométrica, admitimos que un paralelogramo en 2D es un indicio indirecto de un rectángulo en 3D. Como además poseen una relación de aspecto baja, los paralelogramos que buscamos deben ser estrechos—con dos lados cortos opuestos, y los otros dos lados paralelos y largos. Si una cara satisface estas condiciones, se marcará como cara lateral, y las caras adyacentes con las que comparte las aristas más largas, se etiquetarán como caras base.

A continuación el algoritmo comprueba si todas las caras etiquetadas como caras laterales suman el total de caras del subgrafo menos dos (que son las caras marcadas como bases). Si el subgrafo interno cumple esta condición, entonces la figura de mérito es incrementada en +0.50. En caso contrario, directamente se rechaza como candidato.

5.4.1.3 Localización de la cara externa

Denominamos como *caras externas* a todas aquellas caras que pertenecen al subgrafo externo. El siguiente paso consiste en buscar las *caras externas* que son candidatas a ser coplanarias con una de las caras base del *subgrafo interno*. Hay que tener en cuenta que la coplanaridad es fácil de detectar en 3D, sin embargo no es una tarea obvia en 2D y para ello necesitamos indicios indirectos que nos ayuden a detectarla.

Una de las señales importantes es que si alguna de las caras base (o ambas) del elemento característico candidato están contenidas enteramente en una o más de esas caras externas. Esta condición incrementa la figura de mérito en +0.15. Si por el contrario no se cumple esta condición, el subgrafo es directamente rechazado como vaciado o escalón.

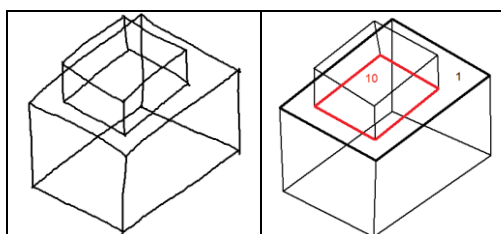


Figura 67. Entrada bocetada (izq.), dibujo delineado (dcha.) con cara del subgrafo interno (10) contenida en la cara externa 1.

5.4.1.4 Selección de la cara externa

Cuando más de una cara cumple las condiciones para ser candidata a cara externa, se buscan condiciones para seleccionar aquella con más probabilidades de serlo. El objetivo es encontrar la cara externa coplanaria con el elemento característico. Se seleccionará la candidata que mejor cumpla las siguientes condiciones:

- Si las aristas de las caras base del subgrafo interno son paralelas a las aristas de la cara externa, se asume que el elemento característico es coplanario a esa cara ya que ambas están igualmente orientadas.
- Cuando la cara externa candidata tiene algunas de sus aristas paralelas a dos de las direcciones principales, si el subgrafo interno está contenido en ella, entonces la dirección del desplazamiento entre las bases del subgrafo interno deben ser paralela a la tercera dirección principal (Figura 68).

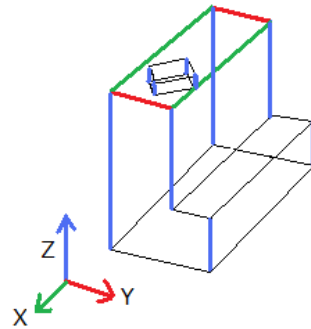


Figura 68. Elemento característico no orientado según la cara externa que lo contiene

En la Figura 68 la dirección de desplazamiento entre las bases del subgrafo interno es paralela al eje Z. Por lo tanto, es muy probable que el subgrafo interno sea colineal a aquella cara externa que no contenga ninguna arista paralela al eje Z.

Si el algoritmo encuentra y selecciona una cara externa, ésta es etiquetada como cara externa coplanaria y la figura de mérito se incrementa +0.15.

5.4.1.5 Clasificación del elemento característico

Una vez se conoce la “ubicación” del subgrafo interno, falta discriminar si el elemento característico es un escalón o un vaciado. Para ello, el algoritmo busca si existen intersecciones entre las aristas de la cara externa coplanaria (del subgrafo externo) y cualquier arista corta de las caras laterales del subgrafo interno.

- Si existen intersecciones y las aristas de la cara externa coplanaria están etiquetadas como “contorno” (B) o “cóncava” (-). Entonces el elemento característico se clasifica directamente como un escalón y la figura de mérito se incrementa +0.20.
- Si existen intersecciones y las aristas de la cara externa coplanaria están etiquetadas como “convexas” (+) entonces el elemento característico se clasifica como un vaciado y la figura de mérito se incrementa +0.20.

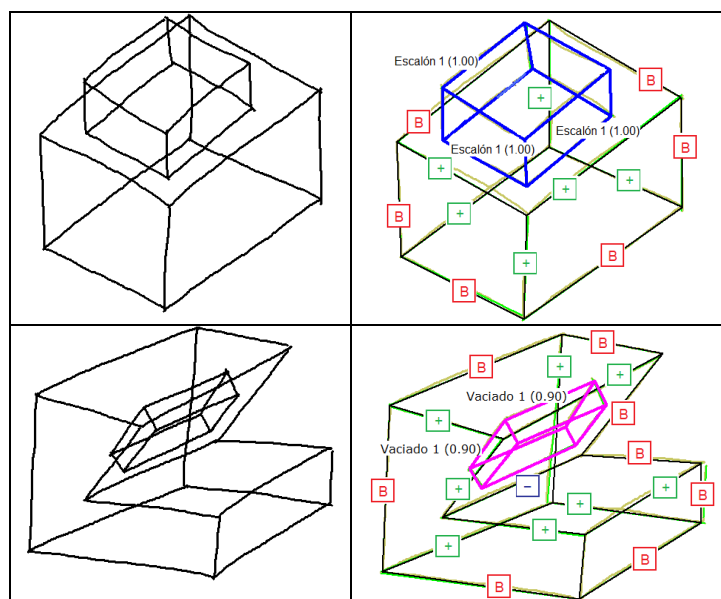


Figura 69. Dos ejemplos y sus correspondientes figures de mérito

Al final, el resultado es una lista de elementos característicos candidatos de escalones y vaciados, con sus correspondientes figuras de mérito en el rango 0-1 (Figura 69). El proceso de búsqueda se lanza de manera iterativa para analizar todos los subgrafos detectados.

5.4.2 Otros elementos característicos

En la aplicación REFER se han desarrollado otros algoritmos de reconocimiento para elementos característicos. Si bien en la presente tesis no se ha realizado una aportación directa a dichos métodos, la información extraída de los mismos se empleará en las siguientes sub-etapas de la etapa de reconstrucción como se verá en el capítulo siguiente.

Nervios y divisores

Los ingenieros mecánicos no tienen dificultad en detectar cuando hay nervios embebidos en objetos: pueden imaginar cómo trabajará el objeto para resistir las cargas para las que está diseñado. Pueden, por lo tanto, deducir si dicho objeto necesitará reforzar su estructura sin incrementar su peso. Sin embargo, detectar tal función es una habilidad compleja, difícil de replicar, no sólo para las máquinas sino también para los estudiantes que empiezan su formación en ingeniería. Afortunadamente, sabemos que tienen algunas peculiaridades geométricas fáciles de detectar.

El aspecto geométrico más característico de los nervios, es que están constituidos por paredes delgadas. El indicio o señal ligada a una pared delgada es que las caras que forman el borde del nervio (o caras frontera) son estrechas y rectangulares. Como ya dijimos anteriormente, admitimos que un paralelogramo en 2D es un indicio indirecto de un rectángulo en 3D.

Como el nervio está unido a todo el objeto, la mayoría de las caras frontera que delimitan el grosor de la pared del nervio están incrustadas en el objeto. Sin embargo, por lo general una de esas caras frontera no está embebida en el objeto, por lo que la primera tarea a la hora de detectar nervios es buscar caras que describan un borde fino, es decir, caras de cuatro lados con dos aristas bastante cortas opuestas y dos aristas más largas.

En segundo lugar, los nervios son “paredes”, son formas extruidas. La cara frontera debería ser un paralelogramo, y las dos caras conectadas a las aristas largas de la cara frontera, deberían ser iguales. Cuando la entrada de información es un dibujo alámbrico, ambas caras pueden ser detectadas, y por lo tanto, esto ayuda a desambiguar elementos característicos candidatos a nervios.

En tercer lugar, como el nervio interrumpe las caras en las que está incrustado (al menos si el objeto es poliédrico), las aristas conectadas a los vértices de las caras laterales pero que no pertenecen al nervio (a los que denominaremos como “aristas externas”) deberían ser colineales con la arista externa correspondiente en el lado opuesto del nervio. Esta colinealidad de aristas externas no se considera como un requisito, pero es un indicio indirecto que refuerza la presunción de que el fragmento es un nervio. Por lo tanto, si esta condición se cumple, la figura de mérito se debería incrementar.

Por último, puesto que el algoritmo detecta paredes delgadas y los divisores se describen como paredes delgadas, podemos afirmar que el algoritmo también detecta divisores. La función de los divisores es dividir el espacio en regiones independientes o limitar el

movimiento con respecto a otra pieza. Por lo tanto, es probable que los divisores tengan más de una cara frontera, y es probable que sus caras laterales sean cuadriláteros. Estas diferencias se utilizan en el algoritmo para discriminar entre las nervios y divisores: los nervios con múltiples caras frontera se re-etiquetan como divisores. Y si las caras laterales del elemento característico son paralelogramos, se incrementa la probabilidad de que el elemento característico sea un divisor, y disminuye la probabilidad de que sea un nervio.

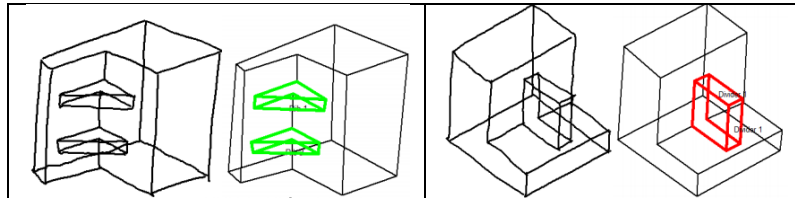


Figura 70. Ejemplo de entradas bocetadas y sus dibujos delineados con los elementos característicos detectados

Guías y Ranuras

Algunos nervios lineales están presentes para proporcionar un refuerzo estructural, pero otros actúan en pareja junto a ranuras en otras piezas, y su función es producir uniones con deslizamiento entre las piezas adyacente en el ensamblaje (Figura 71). A estos elementos característicos los denominamos guías. La forma de las guías es complementaria a la de las ranuras en la pieza complementaria. De ahí que el procedimiento para detectar guías sea muy similar al de detectar ranuras.

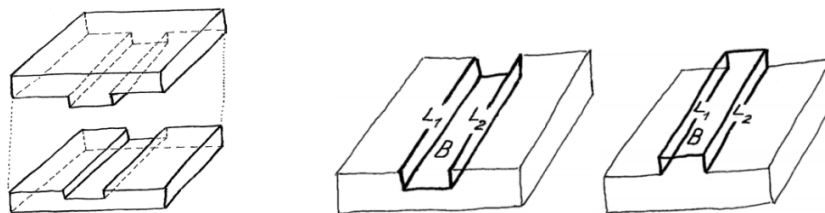


Figura 71. Guía y ranura (izquierda), y algunos de sus indicios 2D (derecha)

En primer lugar, las ranuras se pueden considerar como agujeros muy alargados y estrechos, mecanizados sobre una superficie plana. Una ranura mecanizada produce un resultado parecido a un prisma incompleto, donde la cara frontera/inferior y las caras laterales de la ranura son todas cuadriláteras (Figura 71 derecha). En segundo lugar, las caras laterales deben tener la misma forma. En tercer lugar, ya que la guía/ranura interrumpe las caras en las que está embebida, la figura de mérito que mide la probabilidad de que el elemento característico candidato resulte ser una guía/ranura se debe aumentar si las aristas externas de las caras laterales son colineales.

Como la mayoría de las guías y ranuras son más anchas que profundas, la figura de mérito se incrementa si los laterales (L_1 y L_2) son delgados (cuadriláteros y estrechos).

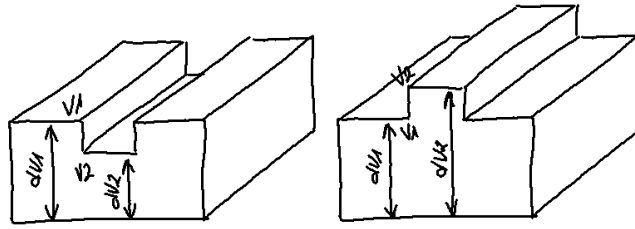


Figura 72. Alturas de los vértices de la sección transversal del elemento característico.

Por último se discrimina entre guía y ranura comparando las alturas de los vértices de la sección transversal $V1$ y $V2$, tal y como indica la Figura 72, si $dV1 > dV2$, entonces nos encontramos con una ranura, en caso contrario ($dV1 < dV2$) nos encontramos con una guía.

5.5 Conclusiones

En el presente capítulo hemos partido de una teoría del campo de la psicología de la percepción introducida por Biederman [Bie87]—reconocimiento por componentes—según la cual una imagen bidimensional de un objeto puede ser descompuesta en elementos básicos, denominados geones. Los geones se pueden considerar como características invariantes ya que pueden ser reconocidas por los humanos desde cualquier punto de vista, y pueden emplearse en la reconstrucción de representaciones tridimensionales. En el campo del SBM, podemos asemejar los geones a los elementos característicos de forma. Por lo tanto, nuestra propuesta es emplear un método de reconocimiento que imite la percepción humana empleando el reconocimiento de elementos característicos y así poder obtener información geométrica de alto nivel semántico para la reconstrucción del modelo tridimensional.

Una vez reconocidos los elementos característicos de forma existentes en el dibujo y analizando sus combinaciones, debería ser posible determinar la intención de diseño del objeto representado. Esta información es de mucha utilidad puesto que en la etapa de reconstrucción ayudaría a obtener el modelo del objeto representado con mayor calidad y menos errores.

Hemos llevado a cabo unos experimentos para determinar: (a) si el método propuesto se corresponde al modo en que los ingenieros interpretan generalmente los dibujos y (b) si puede ser replicado algorítmicamente. Los resultados de los experimentos muestran que: a) los diseñadores poseen unos conocimientos previos comunes, un conjunto de elementos característicos que pueden identificar en un dibujo 2D, y b) en la mayoría de las piezas, pueden deducir la intención de diseño, incluso si las piezas dibujadas están aisladas y descontextualizadas.

Se ha presentado un catálogo de los elementos característicos de formas más comunes que se pueden encontrar en bocetos de ingeniería. El catálogo es incompleto, y así se mantendrá. Los ingenieros de diseño son creativos, y generan nuevos elementos característicos de diseño más rápidamente de lo que se puede catalogar. Aún así, detectar tantos elementos característicos de forma comunes como es posible sigue siendo útil y factible.

Todos los anteriores resultados han sido objeto de la publicación [PVC13].

Por último, como aportación particular de esta tesis, se ha diseñado e implementado un algoritmo para buscar un tipo específico de elementos característicos de diseño aislados como son los escalones y los vaciados. Para ello se han empleado señales o indicios indirectos embebidos en dibujos lineales 2D. El algoritmo devuelve una lista de “escalones” y “vaciados” candidatos, junto con la probabilidad estadística de que las líneas asociadas representen dichos elementos característicos. Este procedimiento está descrito en la publicación [PCVM13].

Capítulo 6. Construcción del árbol de elementos característicos 2D

6.1 Introducción

Obtener árboles CSG de modelos de ingeniería parece un problema resuelto, ya que es una tarea que la mayoría de las aplicaciones comerciales de CAD 3D resuelven bien; produciendo satisfactoriamente modelos geométricos representados mediante un árbol CSG. Estos árboles contienen información de las relaciones mutuas y de las estructuras geométricas internas de diferentes elementos geométricos (denominados “primitivas”) producidos por medio de operaciones de barrido generalizadas sobre perfiles paramétricos, e interrelacionados por operaciones booleanas.

Pero, hasta el momento, este proceso es dirigido y no automático, requiriendo tiempo y dedicación por parte del diseñador. Además, antes de que el usuario comience el proceso de modelado, es necesario que tanto la topología como la geometría del modelo estén totalmente detalladas y fijadas, al menos en la mente del diseñador. Esto se convierte en un inconveniente para que las aplicaciones CAD puedan ser útiles durante la fase del diseño conceptual. En tercer lugar, el diseñador debe emplear su propia experiencia para seleccionar una estrategia de construcción apropiada que produzca un árbol de modelo completo, consistente y coherente. Uno de los requerimientos deseables es que el modelo posea la capacidad de aceptar operaciones de re-diseño. Obtener modelos con estas propiedades requiere formar a los futuros diseñadores, que deben ser expertos en la manipulación de herramientas CAD, en vez de ser expertos en producir nuevos diseños.

Nuestra intención es ayudar a los diseñadores en el proceso de diseño conceptual, cuando las ideas del diseñador fluyen y ni la topología ni la geometría del objeto están totalmente definidas. Por eso, nuestra propuesta es crear herramientas de diseño que perciban los modelos representados en los bocetos—replicando la percepción humana—evitando que el diseñador tenga que interrumpir o adaptar su proceso creativo al uso de herramientas de diseño.

Nuestro método se inspira en el trabajo de Li y otros [LLM06], cuyo objetivo general es representar la intención de diseño geométrico de un modelo empleando un árbol de elementos característico ampliado con restricciones geométricas que describen regularidades. Una de las principales etapas de su trabajo es descomponer un modelo de frontera (B-Rep) en un árbol de elementos característicos con regularidades (RFTs en sus siglas en inglés). Las

principales diferencias con nuestro método son que ellos trabajan con modelos 3D en vez de con dibujos 2D, y que no buscan elementos característicos de diseño sino regularidades y relaciones geométricas entre partes de la pieza.

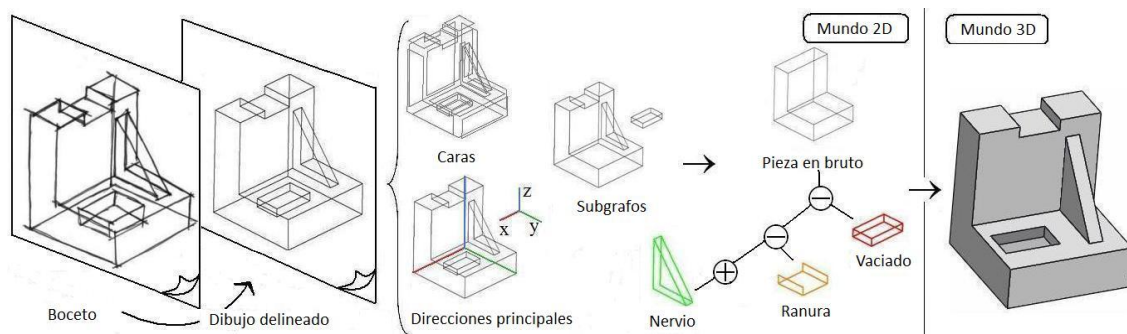


Figura 73. Diagrama del proceso para obtener un modelo 3D a partir de un boceto

Tal y como muestra la Figura 73, nuestra propuesta consiste en conseguir la reconstrucción del modelo 3D a partir de trazos bocetados del dibujo 2D, mediante la información jerarquizada en un árbol de elementos característicos detectados directamente sobre el dibujo 2D. Las etapas previas comienzan con la sub-etapa de vectorización—que desarrollamos en el capítulo 3 y que incluye la tarea de segmentación—obtenemos un dibujo delineado, en el que los nodos representan los vértices del boceto y las líneas que conectan dichos nodos representan las aristas del boceto. Tal como se explicó en el capítulo 4, el reconocimiento de indicios—basado en el reconocimiento de grafos de bajo nivel—proporciona claves o indicios relacionados con las formas, tales como sub-grafos, caras, direcciones principales y grupos de líneas que representan aristas paralelas en el espacio. Todas estas etapas previas proporcionan la información de entrada con la que se lleva a cabo el reconocimiento de elementos característicos 2D—como se ejemplifica y describe en el capítulo 5 para el caso de escalones y vaciados.

En el presente capítulo, nos centramos en la etapa de reconstrucción, para la que proponemos un nuevo método para organizar y construir un árbol de elementos característicos. El proceso comienza reconociendo todos los elementos característicos del dibujo. A continuación, se selecciona el más apropiado. Se añade al árbol del modelo, y se eliminan aquellas partes del dibujo que corresponden al elemento característico seleccionado. Aplicando recursivamente este proceso, se descubren sucesivamente los elementos característicos que permanecían “enmascarados” por otros. El proceso recursivo finaliza al llegar a la pieza en bruto (tocho de material en el que se puede trabajar añadiendo o substrayendo elementos característicos para obtener la pieza terminada) del objeto representado.

El método es viable siempre y cuando se encuentre una secuencia válida para ir detectando y suprimiendo elementos característicos. Obviamente, dicha secuencia debe seguir un orden inverso al esquema padre-hijo de los árboles de modelo CSG. Pero ni existe una única secuencia inversa (hijo-padre) ni es trivial decidir cual o cuales de los elementos característicos detectados en una imagen son hijos del último nivel del árbol CSG. Para resolver éste problema, el método propone un conjunto de criterios perceptuales para determinar aquel elemento característico que sea hijo de último nivel y que, al mismo tiempo, sea lo más “local” posible. Por “local” entendemos que se trate de un elemento característico

que sea hijo de un único padre y que no tenga vínculos indirectos con otros elementos. Luego, el método propone simplificar el dibujo (eliminando la parte del mismo que corresponde al elemento ya detectado y “restaurando” o “completando” las zonas afectadas por la eliminación). Gracias a la simplificación, el método puede repertirse de manera recursiva hasta completar el árbol del modelo.

Así pues, en el siguiente apartado 6.2 se describe las características del árbol de elementos característicos 2D que se pretende obtener. En el apartado 6.3 se describen los criterios de selección del elemento característico más adecuado para añadir al árbol de modelo. En el apartado 6.4 se explica en qué consiste el proceso de simplificación del dibujo. La recursividad se comenta en el apartado 6.5. En el 6.6 se representan algunos ejemplos de los resultados obtenidos, y en el apartado 6.7 se sintetizan las conclusiones del capítulo.

6.2 Árbol de elementos característicos 2D.

Muchas herramientas de modelado cuentan con una herramienta de edición del árbol de modelo. Éste lista los elementos característicos en el orden en que son creados, proporcionando la historia de la secuencia de la creación de los elementos que constituyen el diseño. Sin embargo, la secuencia de creación no es lo importante: se puede alterar. Lo que sí es importante son las relaciones de dependencia que se establecen entre los elementos durante su creación (los elementos hijos dependen de sus elementos padre). Y esta secuencia es inalterable, porque es la base para definir las operaciones booleanas que vinculan los diferentes elementos que componen el modelo. Además, hay que tener en cuenta que el orden en el que dichos elementos se van creando influye en la forma final del modelo obtenido.

Podemos describir un árbol de modelo teniendo en cuenta que la pieza en bruto del diseño—que es el elemento que no posee elementos predecesores—determina el nodo raíz del árbol. A partir de él se añaden los siguientes elementos característicos a diferentes niveles. Los elementos directamente conectados al nodo raíz, los denominamos elementos de alto nivel. Los elementos más alejados del nodo raíz, que determinan los nodos hoja—es decir, aquéllos que no tienen sucesores—los denominamos elementos de bajo nivel. El nivel de los elementos intermedios dependerá de su posición respecto del nodo raíz, dándose el mínimo salto de nivel entre elementos padres e hijos.

Los árboles de modelo CSG están pensados para construir el modelo a partir de sus elementos constituyentes, a los que denominamos genéricamente elementos característicos puesto que engloban tanto elementos característicos de forma como de diseño o de fabricación. El usuario de una aplicación CAD 3D va construyendo el árbol del modelo al tiempo que va construyendo cada uno de los elementos que lo componen y los va relacionando entre sí mediante las correspondientes operaciones booleanas. La única secuencia viable es construir primero los elementos padre y luego los elementos hijo.

El problema que planteamos aquí es diferente, puesto que se pretende que el sistema primero detecte los elementos característicos presentes en una imagen, y luego descubra cómo se relacionan entre sí.

La intención por tanto es desplazarse desde los elementos característicos hijos hasta los padres, es decir desde las hojas del árbol del modelo hasta la raíz. Por tanto, cuando analizamos un boceto estamos aplicando una *estrategia de inversión de orden*: primero tratamos de encontrar los elementos característicos 2D hijos, los eliminamos del dibujo y entonces procedemos a considerar los elementos característicos 2D padres. La estrategia de eliminar los elementos característicos 2D ya detectados ayuda a revelar elementos característicos 2D de mayor nivel, que, debido a sus interacciones con los elementos característicos 2D hijos, quedan enmascarados en el dibujo 2D. El proceso continua hasta que se alcanza la pieza en bruto.

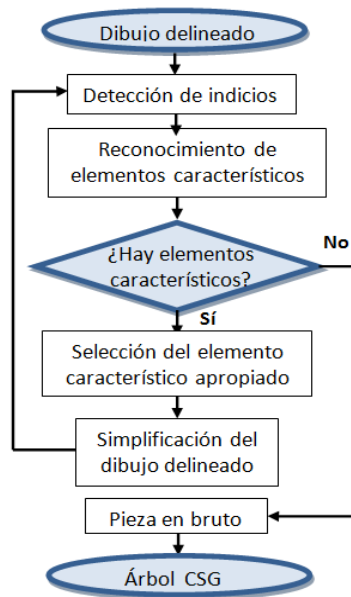


Figura 74. Proceso iterativo hasta obtener la pieza en bruto

Nuestro objetivo final es construir un árbol de elementos característicos 2D que pueda servir directamente para obtener automáticamente un modelo CSG.

La pretensión es emplear la estrategia de inversión de orden en la historia del diseño representado en el boceto. Para estar en condiciones de empezar a determinar esa *historia de diseño inversa* buscamos elementos característicos 2D en el dibujo delineado (tal como se ha explicado en el capítulo 5). A partir de esta información se asume que los elementos característicos 2D que consideramos “padres” son de mayor nivel, y los elementos característicos 2D hijos tienen un nivel inferior. Además las características propias de la pareja de elementos característicos 2D seleccionados como padre e hijo, determinan el operador Booleano correspondiente que los vincula entre sí.

6.3 Selección del Elemento característico 2D

Como tratamos de construir el árbol del modelo aplicando la historia de diseño inversa, el objetivo de esta sub-etapa es determinar la jerarquía de los elementos característicos 2D, distinguiendo sus diferentes niveles.

El criterio que utilizamos es asumir que primero se selecciona el elemento característico de menor nivel en el dibujo, y se etiqueta como un elemento característico hijo. El siguiente elemento característico seleccionado será aquél que esté vinculado con el elemento característico hijo, es decir el padre; el cual en la siguiente iteración, se etiquetará como elemento hijo para repetir el proceso. Y así sucesivamente hasta alcanzar la pieza en bruto.

Dado que tras cada etapa se remueven los elementos hijo ya considerados, se deduce que cada vez que el algoritmo tiene que comenzar una nueva rama, tiene que seleccionar el elemento característico de menor nivel en el dibujo. Esta selección puede llegar a ser crítica puesto que si no se emplean criterios adecuados y se elimina erróneamente un elemento de alto nivel en las iteraciones iniciales del proceso, el resto del dibujo puede ser difícil de interpretar si, por ejemplo, queda dividido en fragmentos desconectados (Figura 75).

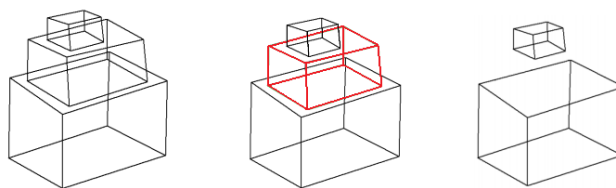


Figura 75. *La selección de elementos característicos puede ser crítica*

Para evitar estos casos, el algoritmo propuesto se rige por la siguiente jerarquía de criterios de selección de elementos característicos hijos de menor nivel:

1. Los redondeos y chaflanes son los elementos característicos 2D de menor nivel en un diseño. Generalmente se añaden en la última etapa del proceso de diseño como detalles finales del producto. Por lo tanto serán los primeros en ser eliminados del dibujo. Además, no generan ramas en el árbol del modelo.
2. Los nervios se añaden generalmente en las últimas etapas de diseño, ya que normalmente se emplean para reforzar un diseño existente. Por lo tanto después de haber eliminado los redondeos y chaflanes serán los siguientes en ser buscados para ser eliminados.
3. Lo más probable es que los diseñadores comiencen a dibujar los elementos característicos 2D más grandes (ya que pueden actuar como elementos característicos 2D contenedores) para terminar con los más pequeños (generalmente contenidos dentro de los primeros). Por lo tanto, consideramos los elementos característicos 2D con rectángulos delimitadores más pequeños como elementos de menor nivel y por tanto serán los siguientes en ser seleccionados.
4. Los diseñadores generalmente comienzan dibujando elementos característicos 2D aditivos (guías, escalones y protuberancias), para posteriormente proceder con los elementos característicos 2D sustractivos (ranuras, vaciados y agujeros). Por ello en caso de elementos característicos con rectángulos delimitadores similares, se seleccionará como elemento de menor nivel aquél que represente un elemento característico sustractivo.
5. Los diseñadores tienden a dibujar primero elementos característicos 2D que estén ubicados en caras paralelas a los planos coordenados, antes que aquéllos ubicados en caras inclinadas. Por tanto, en caso de ambigüedad, se seleccionará como elemento de menor nivel aquél vinculado con caras inclinadas.

6. En el resto de casos se seleccionará el elemento característico más probable (aquél al que se ha asignado una cifra de mérito mayor durante su proceso de detección).

Para buscar vínculos que permitan encontrar los elementos característicos padres el algoritmo también trata de replicar el comportamiento observado en los diseñadores cuando producen modelos CSG por medio de aplicaciones CAD 2D:

- Lo más probable es que los elementos característicos 2D más grandes actúen como contenedores, siendo los más pequeños los elementos contenidos. Por lo tanto, consideramos que el vínculo contenido-contenedor está relacionado tanto con el tamaño como con la posición relativa entre dos elementos. En consecuencia, entendemos que un elemento característico es candidato a ser padre de otro si es más grande y lo contiene.
- El contacto entre caras también es un indicio importante de vínculo padre-hijo, por lo tanto intentamos detectar parejas de caras coplanarias pertenecientes respectivamente al elemento característico hijo y al elemento característico candidato a ser padre.

Una vez se ha seleccionado un elemento característico 2D y su padre, y antes de pasar a la subetapa siguiente de simplificación del dibujo, la información geométrica del elemento característico se almacena en el árbol de elementos característicos 2D, creando o siguiendo su rama correspondiente. A su vez se almacena la operación booleana que relaciona a la pareja de elementos característicos padre-hijo. Hasta el momento y para evitar cualquier pérdida de información, en el árbol de elementos característicos 2D se almacena toda la información geométrica referente al elemento característico en cuestión (vértices y aristas).

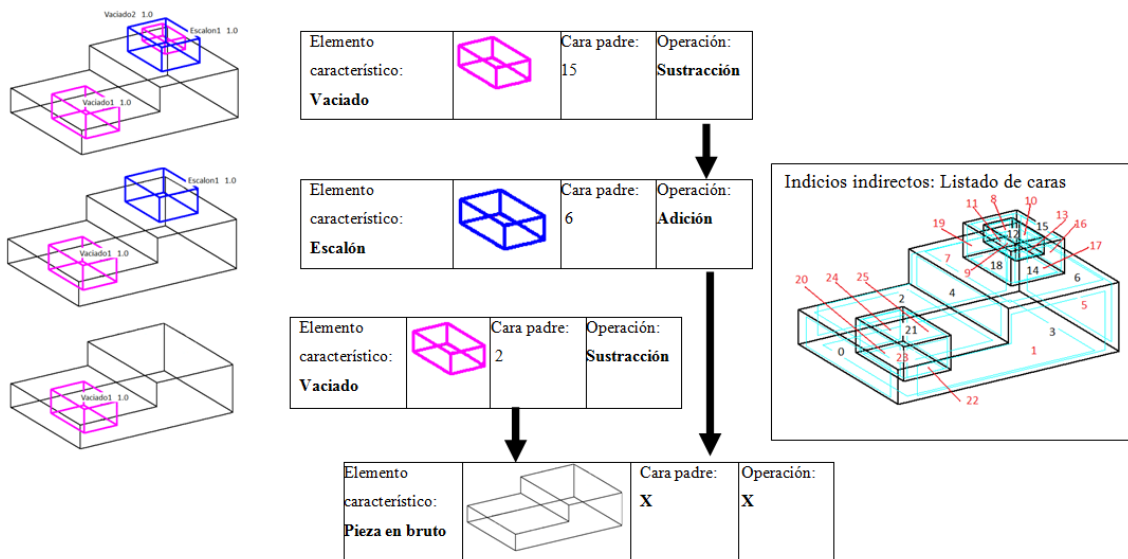


Figura 76. Ejemplo de cómo se almacena y se guarda la información del árbol de elementos característicos

Esta información deberá ser adaptada cuando se empleen formatos normalizados de ficheros de geometría, también llamados “neutros” (por ejemplo uno de los más empleados y conocidos es el formato STEP) para crear el árbol del modelo. La información del árbol de elementos característicos 2D deberá ser adaptada siguiendo los criterios del estándar

seleccionado (ISO 10303 en el caso del formato STEP). El estudio del empleo de dicho formato estándar y del volcado de información queda como trabajo futuro para el grupo de investigación REGEO.

6.4 Simplificación del dibujo delineado

Una vez que un elemento característico 2D ha sido seleccionado, la siguiente sub-etapa consiste en removerlo del dibujo. Simplificar el dibujo consiste en remover las aristas y vértices que pertenecen al elemento característico 2D seleccionado.

La simplificación es fácil si el elemento característico 2D determina un subgrafo, desconectado de por sí del resto del dibujo, ya que entonces basta con remover las aristas y vértices de dicho subgrafo. Por ejemplo, cuando el elemento característico seleccionado es un escalón, la eliminación del mismo en el dibujo no conlleva ninguna modificación en el resto del dibujo (Figura 77).

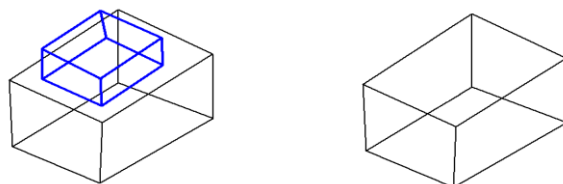


Figura 77. Elemento característico constituido por un subgrafo (escalón) y simplificación del dibujo

En otro caso, la simplificación del dibujo delineado puede requerir modificaciones adicionales. Por ejemplo, en el caso de eliminar ranuras o nervios—que siempre interrumpen al menos una arista de la cara contenedora del elemento padre—las aristas adyacentes de la cara contenedora que se reconozcan como colineales deben sustituirse por una única arista, reduciéndose el número de aristas del dibujo, como se refleja en la Figura 78.

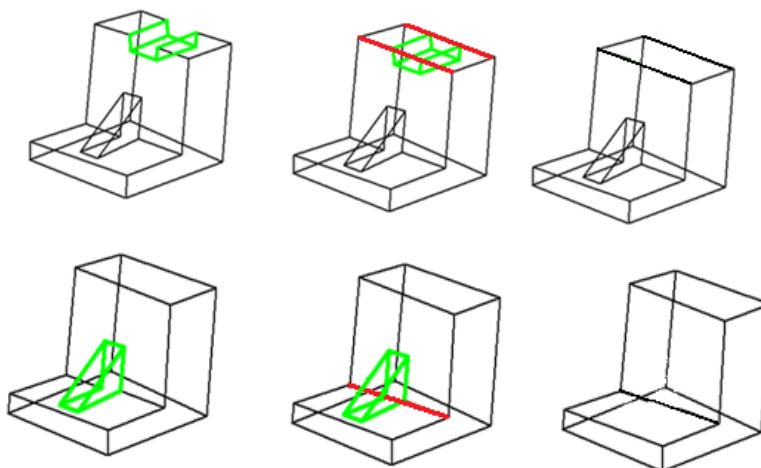


Figura 78. Ejemplo de aristas colineales de la pieza en bruto que son alargadas al eliminar una ranura (arriba) y un nervio (abajo)

6.5 Implementación de la Recursividad

Las sub-etapas descritas en los apartados anteriores 6.3 y 6.4 se aplican de manera recursiva hasta que se alcanza la pieza en bruto del objeto representado (Figura 74).

El proceso comienza seleccionando el elemento característico 2D de menor nivel del dibujo, aplicando para ello los criterios jerárquicos descritos en el apartado 6.3. En ese momento el indicador del algoritmo *ActiveBranch* se activa. A partir de ahí el algoritmo “desciende” por la rama seleccionada, dando prioridad a las relaciones padre-hijo que se dan entre los elementos característicos 2D detectados, y que en el método propuesto se basan en la interacción de contenedor-contenido que puede existir entre dos elementos característicos. Para ello también se emplea la información de indicios extraída en la etapa de *reconocimiento de indicios*. Por ejemplo, la mayoría de los elementos característicos 2D que detectamos (excepto redondeos y chaflanes) tienen una cara (a la que nos referiremos como *cara contenida*) que descansa en una cara perteneciente al elemento característico 2D padre o *contenedor*. Si existe, este elemento característico 2D padre será el siguiente en ser eliminado en la siguiente iteración. Así se determinan las ramas del árbol siguiendo las relaciones de elementos característicos 2D contenedores-contenidos hasta que la última cara pertenece a la pieza en bruto. En este momento, el indicador *ActiveBranch* se desactiva. Esto finaliza la rama actual del árbol y, si nuevos elementos característicos 2D son detectados, empezamos de nuevo para obtener el elemento característico de menor nivel—nodo hoja—de la nueva rama.

Cabe destacar que cada iteración requiere ejecutar previamente la etapa de reconocimiento de indicios y la sub-etapa de reconocimiento de elementos característicos 2D. Ya que la simplificación del dibujo lineal puede producir variaciones en la información de los indicios del dibujo o de los elementos característicos detectados.

La recursividad del algoritmo se detiene cuando alcanzamos la pieza en bruto del objeto o cuando no se detectan nuevos elementos característicos. Si algún elemento característico no es reconocido por el sistema, queda englobado en la pieza en bruto. Aunque de este modo no existe pérdida de información, la doctoranda admite que esta solución no conduce al resultado más óptimo. Por ello, y como trabajo futuro se plantea la idea de implementar nuevas estrategias para verificar la estructura de la pieza en bruto.

Otra consideración que se debe tener presente, es que por el momento, el algoritmo sólo puede procesar elementos característicos 2D que interactúen entre sí con una relación de hijo-padre sencilla, pero no considera otro tipo de interacciones más complejas. Por ejemplo, no reconoce relaciones múltiples hijos-padre, hijo-padres, u otro tipo de interacciones entre elementos característicos como puede ser la intersección (Figura 81). Actualmente sólo puede trabajar con ramas independientes sin interferencias debidas a intersecciones.

Por lo tanto, queda como trabajo futuro para el grupo REGEO aumentar el catálogo de elementos característicos que el algoritmo sea capaz de reconocer, y capacitar al algoritmo para considerar nuevas interacciones entre elementos característicos.

6.6 Ejemplos

Las Figuras 79, 80 y 81 muestran ejemplos del método de simplificación secuencial. En la Figura 79, se detectan en la primera iteración una ranura (con una cifra de mérito de 0.86) y un divisor (con cifra de mérito de 0.41). Después de eliminar la ranura, el divisor se detecta como un nervio, que estaba enmascarado por la ranura. Después de eliminar el nervio, la forma que queda es la pieza en bruto, ya que no hay más elementos característicos 2D que detectar.

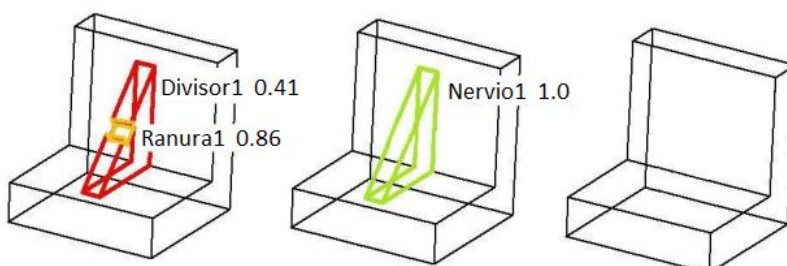


Figura 79. Bloque con un nervio que a su vez contiene una ranura

En la Figura 80, el elemento característico 2D más pequeño (Vaciado 1) es eliminado del dibujo en la primera iteración. A continuación se elimina el elemento característico 2D que lo contiene, el Escalón 2, incluso aunque exista otro escalón más pequeño en una cara lateral. Esto es debido a que se prioriza la detección de la rama.

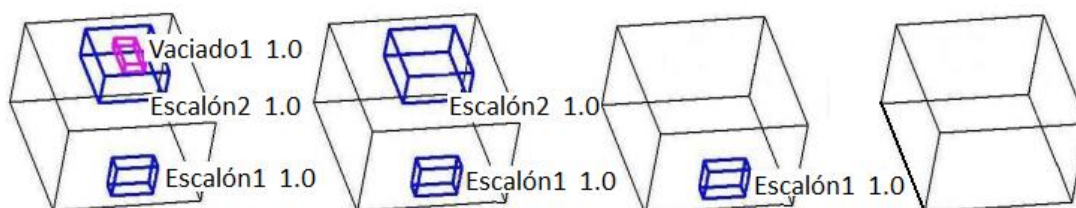


Figura 80. Bloque con dos ramas independientes

Finalmente, la Figura 81 muestra un ejemplo en el que el algoritmo detecta tres ranuras en la primera iteración y después de eliminar dos de ellas, la tercera ranura se transforma en un vaciado. Sin embargo un diseñador hubiera percibido el ejemplo como una única ranura interrumpida por un vaciado—lo que daría una interpretación más simple. Tales interferencias, sin embargo aún no están incluidas en nuestro análisis, y permanecen como un tema de mejora para trabajo futuro.

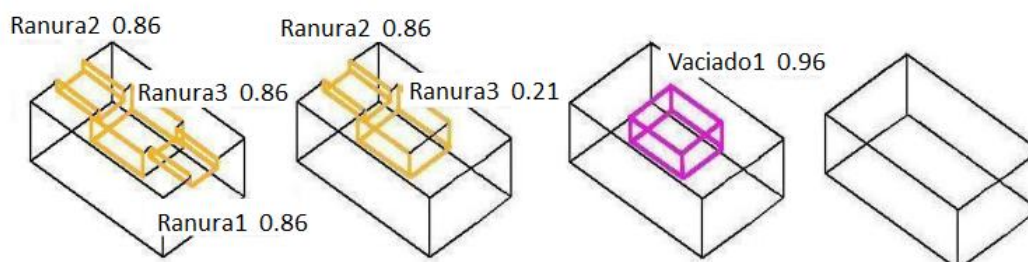


Figura 81. Interferencias entre elementos característicos

6.7 Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto un método general para obtener un árbol de elementos característicos 2D que describe un modelo CSG, que corresponde al modelo 3D reconstruido a partir de un boceto o de un dibujo lineal. Dicho método supone una contribución novedosa de la presente tesis y consiste en aplicar una estrategia recursiva donde los elementos característicos hijos son detectados y clasificados mediante un conjunto jerárquico de criterios basados en la percepción humana y en nuestro conocimiento de las estrategias más habituales de diseño y modelado. El elemento característico más adecuado, se selecciona y se elimina del dibujo, permitiendo que el dibujo se simplifique. La simplificación facilita el proceso de reconocimiento ya que ciertos elementos característicos que previamente se podrían encontrar enmascarados, pueden ser entonces reconocidos. De esta manera se puede determinar la interacción entre elementos característicos padre-hijo.

Hasta el momento el método puede alcanzar la pieza en bruto a partir de bocetos con una lista limitada de tipos de elementos característicos de diseño. Queda como trabajo futuro para el grupo REGEO aumentar el catálogo de elementos característicos que el algoritmo sea capaz de reconocer, implementar nuevas estrategias para verificar la estructura de la pieza en bruto, y capacitar al algoritmo para considerar interacciones más complejas entre elementos característicos que la relación un padre-un hijo que es la única considerada en la versión actual.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 Contribuciones Originales

Las aportaciones principales de la tesis en el ámbito del modelado basado en bocetos (SBM) son:

- Se han presentado nuevos métodos aplicados al reconocimiento de primitivas 2D, particularmente al reconocimiento de líneas rectas y arcos de elipse, del proceso de vectorización, para la obtención del dibujo lineal a partir del boceto inicial. Se ha conseguido que dichos métodos repliquen la percepción humana a la hora de interpretar trazos. Para ello se han llevado a cabo experimentos con seres humanos que nos han permitido conocer el comportamiento y los patrones de percepción detectados experimentalmente en grupos de sujetos.
- Se ha demostrado que es viable desarrollar métodos algorítmicos para detectar elementos característicos en bocetos basándose en indicios indirectos vinculados a la percepción, o en otras palabras, se ha conseguido replicar el comportamiento que tienen los humanos cuando interpretan y construyen mentalmente modelos 3D a partir de bocetos 2D realizados a mano alzada, a pesar de sus intrínsecas inexactitudes. Respecto a los indicios indirectos, se ha aportado un nuevo método de detección de aristas paralelas.
- Para la obtención del modelo 3D se ha desarrollado un método que consiste en reconocer y organizar los elementos característicos de un dibujo lineal, generando un árbol de elementos característicos 2D que describen un modelo CSG. El árbol de modelo se obtiene aplicando una estrategia recursiva basada en invertir la historia de diseño.
- En todos los métodos propuestos se han tenido en cuenta criterios perceptuales a la hora de diseñar los algoritmos. Para ello se han revisado los trabajos realizados por otros autores hasta el momento, se han tratado de adaptar según los requerimientos perceptuales, y en caso de no encontrar una adaptación viable, se han propuesto nuevos métodos y algoritmos.

7.2 Publicaciones

Como resultado de la presente tesis se han obtenido diferentes publicaciones en congresos y revistas científicas:

- [CVP11] COMPANY P., VARLEY P.A.C. AND PLUMED R.: Sketch input of engineering solid models. *International Workshop on Visual Languages and Computing in conjunction with The 17th International Conference on Distributed Multimedia Systems, Proc. of DMS 2011*, 262-267.

- [PCV13a] PLUMED R., COMPANY P., VARLEY P.A.C. (2013) Human-like Recognition of Straight Lines in Sketched Strokes. CEIG 2013, Spanish Computer Graphics Conference, pp. 57-66.
- [PVC13] PLUMED R., VARLEY P.A.C. AND COMPANY P. (2013) Features and design intent in engineering sketches. *Studies in Comput. Intelligence*, 441, pp. 77-106.
- [CVPM12] COMPANY P., VARLEY P.A.C., PLUMED R. AND MARTIN, R. (2012) Perceiving ribs in single-view wireframe sketches of polyhedral shapes. LNCS 7432, 2012, pp. 557-567.
- [PCVM13] PLUMED R., COMPANY P., VARLEY P.A.C., MARTIN R.R. (2013) From sketches to CAM models: Perceiving pockets and steps in single-view wireframe sketches of polyhedral shapes. *ACM conf. on Pervasive and ubiquitous computing, adjunct publication*, pp. 951-958.
- [PCPV10a] PLUMED R., COMPANY P., PIQUER A. AND VARLEY P.A.C. (2010) Do engineers use convergence to a vanishing point when sketching?. Proc. Int. Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence 2010. (DCAI'10), pp. 241-250.
- [PCV13b] PLUMED R., COMPANY P., VARLEY P.A.C. (2013). Metrics of human perception of vanishing points in perspective sketches. WSCG 2013, 21st WSCG Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2013, WSCG 2013 Full Papers Proceedings, pp. 59-68
- [CVP14] COMPANY P., VARLEY P.A.C., PLUMED R. (2014) An Algorithm for Grouping Lines Which Converge to Vanishing Points in Perspective Sketches of Polyhedra. Graphics Recognition. Current Trends and Challenges. Lecture Notes in Computer Science 2014, pp 77-95.
- [PCVM14] PLUMED R., COMPANY P., VARLEY P.A.C., MARTIN R.R. (2014) CSG Feature Trees from Engineering Sketches of Polyhedral Shapes. *Eurographics 2014, short papers*, pp 33-36, ISSN 1017-4656, DOI: 10.2312/egsh.20141008.

El trabajo [CVP11] preparatorio de la presente tesis se resume en un documento de posicionamiento que discute el diseño tradicional a partir del lápiz y el papel y cómo este paradigma se ha adaptado a los nuevos métodos de interpretación de bocetos con ordenador. El trabajo concluye que las herramientas SBM parecen las adecuadas para asistir a los diseñadores en la etapa de diseño conceptual, pero aún problemas abiertos y mejoras que realizar. La investigación realizada en la presente tesis está dirigida a resolver y/o plantear mejoras a los problemas del proceso SBM. El trabajo no se menciona como una contribución de la tesis, sino como un antecedente de la misma.

A partir de aquí durante el periodo de investigación de la presente tesis se han trabajado varios de los problemas abiertos que plantea el proceso de modelado basado en bocetos en distintas de sus fases.

En la primera etapa del proceso SBM, Reconocimiento del boceto, el trabajo [PCV13a] revisita la etapa de vectorización y concretamente el problema de ajuste de trazos a líneas rectas. En dicho documento se expone el procedimiento experimental llevado a cabo para comparar la

percepción humana y la percepción-máquina de líneas rectas. A continuación evalúa algunos algoritmos ya existentes para comprobar si se adaptan al comportamiento de percepción humana observado en dichos experimentos concluyendo que dichos algoritmos no son fáciles de ajustar para tener un comportamiento parecido a la percepción humana. Se propone entonces un nuevo método (la Transformada de Hough Normalizada, NHT por sus siglas en inglés) que replica mejor la percepción humana. Se propone un segundo criterio para rechazar los casos dudosos con ondulaciones y oscilaciones, y evitar falsos positivos. Y se comprueba la influencia de la oblicuidad de trazos para concluir que se debe considerar como un factor secundario en la percepción de líneas rectas. También se han presentado los estudios de campo realizados para conocer las claves perceptuales de los seres humanos que posteriormente se han aplicado en los algoritmos propuestos para reconocer trazos como líneas rectas o arcos elípticos. Estos nuevos métodos emplean métricas que ayudan a replicar la percepción humana. Si bien los nuevos métodos propuestos no son una contribución original de la presente tesis, los estudios de campo realizados, y las métricas definidas han ayudado a la implementación de dichos métodos y sí son contribuciones originales de la presente tesis. En el momento de presentación de la presente tesis se encuentran en proceso de evaluación en revistas científicas dos trabajos relacionados con los métodos de reconocimiento y ajuste propuestos para líneas rectas—*“A new approach for perceptually-based fitting strokes into straight segments”*—y arcos elípticos—*“A fast approach for perceptually-based fitting strokes into elliptical arcs”*.

En la etapa de Reconocimiento de indicios, se ha trabajado en particular un indicio indirecto como es la detección de grupos de líneas del dibujo que representan aristas paralelas del objeto que representa. Este estudio ha dado lugar a tres trabajos [PCPV10a], [PCV13b] y [CVP14]. El primer trabajo, presenta el problema de la representación en 2D de aristas paralelas en el espacio. Tras un estudio experimental se concluye que los ingenieros no tienden a emplear la proyección cónica en los bocetos de ingeniería y que en ese caso, los trazos que representan aristas paralelas en el espacio pueden contener errores angulares de hasta 8° . Para ampliar el tipo de bocetos que podemos interpretar con las estrategias propuestas en la presente tesis, se decidió estudiar los casos de la existencia de direcciones convergentes en un dibujo. El trabajo [PCV13b] describe el estudio de campo realizado para conocer cómo los humanos perciben puntos de fuga en un boceto, además se proponen métricas y parámetros perceptuales que las describen. La información de este estudio se emplea en el trabajo [CVP14] para implementar un algoritmo capaz de replicar la percepción humana para crear grupos de líneas que representan aristas paralelas en el espacio tanto si existen o no direcciones convergentes. Si bien dicho algoritmo no se considera una aportación directa de la presente tesis, los estudios de campo preliminares sí son una contribución de la tesis y han ayudado a implementar dicho algoritmo.

La última etapa del proceso SBM es la reconstrucción del modelo. En la presente tesis se propone un método basado en dos etapas. La primera de ellas consiste en la detección de elementos característicos 2D. Los trabajos [PVC13], [CVPM12] y [PCVM13], están relacionados con ella. En [PVC13] se presenta un catálogo de los elementos característicos de diseño más comunes que se pueden encontrar en los bocetos de ingeniería. También se describen dos experimentos que verifican las hipótesis de que los ingenieros son capaces de detectar los mismos tipos de elementos característicos 2D y que en la mayoría de los casos son capaces de

extraer la intención del diseño a pesar de que las piezas estén aisladas y fuera de contexto. El trabajo [CVPM12] no constituye una aportación directa de la presente tesis, pero los algoritmos descritos para la detección de ciertos elementos característicos se emplean como entrada de información en la siguiente etapa del proceso de reconstrucción. En [PCVM13] se describe la aportación de la presente tesis para detectar escalones y vaciados.

La segunda etapa del proceso de reconstrucción consiste en la construcción del árbol CSG. En [PCVM14] se describe el método que proponemos para organizar los elementos característicos 2D del árbol CSG. Se propone aplicar la estrategia recursiva de “inversión de la historia del diseño” donde los elementos característicos hijos se detectan primero, se añaden al árbol de elementos característicos y se eliminan del dibujo, obteniendo un dibujo simplificado que facilita el reconocimiento de nuevos elementos característicos que podrían estar enmascarados anteriormente. El proceso acaba cuando se alcanza la pieza en bruto, o cuando ya no se detectan más elementos característicos.

En la presente tesis se han abordado diferentes etapas de un mismo problema: la obtención de un modelo tridimensional a partir de un boceto de ingeniería aplicando herramientas SBM. Durante el periodo de investigación se han revisitado algunas de las etapas del proceso SBM y se han estudiado los problemas abiertos para aportar nuevos métodos basados en una estrategia perceptual, poco considerada hasta el momento pero que como se ha argumentado y comprobado, muy adecuada para resolver los problemas planteados. Los métodos propuestos han conseguido mejoras en algunas de las etapas, y un flujo de información global viable, aunque aún queda un amplio margen de mejoras futuras.

7.3 Trabajo futuro

Durante el desarrollo del documento se ha hecho referencia en diferentes ocasiones a trabajos futuros que el grupo REGEO puede seguir desarrollando en el proceso de modelado basado en bocetos. En la mayoría de las ocasiones, se trata de mejoras a las propuestas realizadas. A continuación se resumen estas ideas:

- En la etapa de *reconocimiento del boceto*, se ha realizado un experimento piloto que verifica la hipótesis según la cual los humanos son más estrictos a la hora de percibir trazos aislados, y menos estrictos cuando dichos trazos pertenecen a una escena de un objeto reconocible. Esto ha dado lugar a plantearnos nuevas hipótesis sobre cómo la máquina debe replicar la percepción humana, y en lugar de realizar un reconocimiento de trazos aislados, aplicar un reconocimiento cooperativo en el que la información de trazos ya reconocidos ayuden a desambiguar aquellos casos que resulten dudosos. Este tipo de planteamientos, nos conduce a la introducción de nuevas estrategias para mejorar los flujos colaborativos y romper con la estrategia tradicional de seguir un flujo secuencial.
- En la etapa de *reconocimiento de indicios*, queda abierto el proceso de estudio y reconocimiento de nuevos indicios en bocetos que ayude a la extracción de información del dibujo delineado para facilitar las tareas de reconocimiento de las etapas posteriores de SBM. Los nuevos métodos deberían ser más tolerantes a las

imperfecciones de los bocetos y menos dependientes de la tipología del objeto representado.

- En la etapa de *reconstrucción*, se han planteado como trabajo futuro algunas mejoras para paliar las limitaciones detectadas en el método iterativo propuesto para obtener un árbol de elementos característicos 2D. Entre éstas se encuentra (a) aumentar el catálogo de elementos característicos que el algoritmo sea capaz de reconocer, (b) implementar nuevas estrategias para verificar la estructura de la pieza en bruto y que se defina como volúmenes iniciales previsibles y reproducibles, y (c) capacitar al algoritmo para considerar nuevas interacciones entre elementos característicos, como puede ser la intersección entre elementos característicos o la obtención de ramas con múltiples bifurcaciones.
- Por último, el objetivo final del trabajo presentado en esta tesis sería obtener modelos CSG a partir de bocetos, e integrarlos en el flujo de las aplicaciones CAD, CAM, CAE comerciales. Para ello, queda como trabajo futuro almacenar la información del árbol de elementos característicos 2D en archivos de formato estándar, por ejemplo en formato STEP (acrónimo de *Standar for the Exchange of Product model data*, ISO 10303) para poder trabajarlo en cualquier herramienta actual de modelado.

Bibliografía

- [AFA13] ALBERT F, FERNANDEZ-PACHECO D.G., ALEIXOS N. (2013). New method to find corner and tangent vertices in sketches using parametric cubic curves approximation. *Pattern Recognition*, 46(5), pp. 1433 – 1448
- [ALF10] AWRANGJEB M., LU G., FRASER C.S. (2010) A comparative study on contour-based corner detectors. *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA 2010)*, art. no. 5692546, pp. 92-99.
- [AS11] ARANDJELOVIC R., SEZGIN T.M. (2011) Sketch recognition by fusion of temporal and image-based features. *Pattern Recognition*, 44(6), pp. 1225–1234
- [Att54] ATTNEAVE F. (1954) Some informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, 61 (3). pp. 183-193.
- [BCF94] BRANCO V., COSTA A., FERREIRA, F.N. (1994) Sketching 3D models with 2D interaction devices. *Computer Graphics Forum* 13, 3, pp. 489-502.
- [BNM08] BABIC B., NESIC N., MILKOVIC Z. (2008) A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition. *Computers in Industry* 59(4), 321–337.
- [BELN11] BORRMANN D., ELSEBERG J., LINGEMANN K., NÜCHTER A. (2011) The 3D Hough Transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design. *3D Research*, 2(2).
- [Ber67] BERTIN J. (1983) *Semiology of graphics: diagrams, networks, maps*. University of Wisconsin Press. (Originally in French: *Semiologie Graphique*, 1967)
- [Bie87] BIEDERMAN I. (1987) Recognition-by-Components: A theory of human image understanding. *Psychological review*, 94, pp. 115-147.
- [Boy99] BOYER K.L. (1999). Perceptual Organization in Computer Vision: Status, Challenges, and Potential. *Computer Vision and Image Understanding*, 76(1), pp. 1–5.
- [Bro12] BROWN K. (2012). Perpendicular Regression of a Line. in *MathPages*. www.mathpages.com/home/kmath110.htm. Accessed, February 2012
- [BS12] BROWNE J. AND SHERWOOD T. (2012) Mobile Vision-Based Sketch Recognition with SPARK. *SBIM12, Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling 2012*, pp. 87-96.
- [BWMN95] BERTOLINE R., WIEBE E. N., MILLER C. L., NASMAN L. O: *Engineering graphics communication*, Ed. Richard D Irwing, Inc., (1995) ISBN 0-256-11418-8

- [CCPA03] CONESA J., COMPANY P., PIQUER A. Y ALEIXOS N. (2003) Ampliación del método de inflado axonométrico para la reconstrucción de poliedros. XIII ADM–XV INGEGRAF International Conference on Tools and Methods Evolution in Engineering Design, Napoli/Salerno, 4 a 6 de junio de 2003
- [CCCP04] COMPANY P., CONTERO M., CONESA J., PIQUER A. (2004) An optimization-based reconstruction engine for 3D modelling by sketching. *Computers & Graphics* 28, pp. 955-979.
- [CCVAN09] COMPANY P., CONTERO M., VARLEY P.A.C., ALEIXOS N., NAYA F. (2009) Computer-Aided Sketching as a Tool to Promote Innovation in the New Product Development Process. *Computers in Industry* 60 (8), pp. 592–603.
- [CHM14] CHERNOV N., HUANG Q., MA H. (2014) Fitting Quadratic Curves to Data Points. *British Journal of Mathematics & Computer Science* 4(1), pp. 33-60.
- [CK12] CHANSRI N., KOOMSAP P. (2012) Automatic single-line drawing creation from a paper-based overtraced freehand sketch. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 59(1-4), pp. 221-242.
- [Con07] Consejo de la Unión Europea. (2007). Consejo de Europa de Bruselas, 8 y 9 Marzo 2007. Conclusiones de la Presidencia. (Publicación Nº. 7224/1/07 REV 1). P. 21. Recuperado desde:
http://www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/ec/93135.pdf
Último acceso: Agosto 2014
- [CPCCN05] COMPANY P., PIQUER A., CONTERO M., CONESA J. AND NAYA F. (2005) A Survey on Geometrical Reconstruction as a Core Technology to Sketch-Based Modelling, *Computers and Graphics*, vol. 29, pp. 892-904.
- [Cus11] CUSTOMERPARTNET. Recuperado desde:
<http://www.custompartnet.com/lessons/>
Último acceso: Diciembre 2012
- [CV08] COMPANY P., VERGARA M. (2008) Dibujo técnico. Publicacions de la Universitat Jaume I., 2008. (252 pags.) (Universitas. Núm. 25). ISBN 978-84-8021-654-8.
- [CV09] COMPANY P., VARLEY P.A.C. (2009) Operating modes in actual versus virtual paper-and-pencil design scenarios. *Intelligent User Interfaces (IUI) Workshop on Sketch Recognition*, 2009.
- [CV10] COMPANY P., VARLEY P.A.C. (2010) A method for reconstructing sketched polyhedral shapes with rounds and fillets. *LNCS 6133*, 152-155.
- [CV95] CUTTING J.E., VISHTON P. M. (1995) Perceiving Layout and knowing distance: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds), *Perception on Space and Motion*, (pp. 69-117). San Diego, Academic Press.

- [CVPVS10] COMPANY P., VARLEY P.A.C., PIQUER A., VERGARA M., SANCHEZ-RUBIO J. (2010) Human Perception in Segmentation of Sketches. J.-M. Ogier, W. Liu, and J. Lladós (Eds.): *GREC 2009, LNCS 6020*, pp. 106–117.
- [Dav96] DAVIS T. (1996) Code to find the equation of a conic. Retrieved from <<http://mathforum.org/library/drmath/view/51735.html>> Last Access November 2013.
- [DH72] DUDA R. O., HART P.E. (1972) Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communication of the ACM*, 15, (1), pp. 11-15.
- [Dij95] VAN DIJK C.G.C. (1995). New insights in computer-aided conceptual design. *Design Studies*, 16(1), pp. 62–80.
- [DJ94] DUBUISSON M.P., JAIN A.K. (1994) A modified Hausdorff distance for object matching, *ICPRIP*, pp. 566-568.
- [Dur59] DURBIN J. (1959) Efficient Estimation of Parameters in Moving Average Models. *Biometrika*, 46, pp. 306–316.
- [DV99] DEAN A. M., VOSS D. T. (1999) Design and analysis of experiments. Springer Text in Statistics. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- [Ebe04] EBERLY D. (2004) Distance from a Point to an Ellipse, an Ellipsoid, or a Hyperellipsoid. Internet publication: "Distance from a point to an ellipse in 2D". Geometric Tools, LLC, www.geometrictools.com. Book publication: "3D Game Engine Design", 2nd edition. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 2007. (see Section 14.13.1)
- [EDYL12] ELSEN C., DEMARET J.-N., YANG M.C., LECLERCQ P. (2012) Document Sketch-based interfaces for modeling and users' needs: Redefining connections. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 26(3), pp. 281-301.
- [EEMFD09] EL MESEERY M., EL DIN M.F., MASHALI S., FAYEK M., DARWISH N. (2009). Sketch recognition using particle swarm algorithms. 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Vols. 1-6, pp. 1997-2000.
- [FB86] FISCHLER MA., BOLLES R.C. (1986) Perceptual organization and curve partitioning. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8* (1), pp. 100-105.
- [FBC09] FARRUGIA P., BORG J.C., CAMILLERI K.P. (2009). Cameraphones as new design tools. *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design* 5, pp. 49-60.
- [Fer92] FERGUSON E. S. (1992) *Engineering and Mind's Eyes*. The MIT Press Cambridge, London (England).

- [FJ00] FONSECA M. J., JORGE J.A. (2000) Using Fuzzy Logic to Recognize Geometric Shapes Interactively. The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ IEEE 2000. Volume1, pp. 291-296.
- [FPF99] FITZGIBBON A., PILU M., FISHER R.B. (1999). Direct least square fitting of ellipses. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 21 (5), pp. 476-480.
- [Gol99] GOLDSTEIN, E.B., Sensation & Perception. Wadsworth Publishing Company, 1999, ISBN 0-534-34680-4
- [GM95] GRIMSTEAD I. J., MARTIN R. R. (1995) Creating solid models from single 2D sketches. Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and applications, pp.323-337, Salt Lake City, Utah, USA.
- [Han96] HAN, J.H. (1996) Survey of Feature Research. Technical Report IRIS-96-346, University of Southern California Institute for Robotics and Intelligent Systems
- [Han97] HAN, J.H. (1997) On Multiple Interpretations. In ed. C. Hoffmann and W. Bronsvort, Proceedings: Fourth Symposium on Solid Modeling and Applications, pp. 311-321, ACM Press.
- [Har14] Harrison C. (2014). An Investigation of Graham's Scan and Jarvis' March. Recuperado desde:
< <http://www.chrisharrison.net/index.php/Research/ConvexHull>>
Último acceso September 2014.
- [HF98] HALIR R., FLUSSER J. (1998) Numerically Stable Direct Least Squares Fitting Of Ellipses. Proc. 6th Int. Conf. in Central Europe on Computer Graphics and Visualization WSCG98, vol. 1, pp. 125–132.
- [HKR93] HUTTENLOCHER D.P., KLANDEMAN G.A., RUCKLIDGE W.J. (1993) Comparing images using the Hausdorff distance, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence 15(9): 850-863.
- [HLPJPWT10] HAMMOND T.A., LOGSDON D., PAULSON B., JOHNSTON J., PESCHEL J.M., WOLIN A., TAELE T. (2010). A Sketch Recognition System for Recognizing Free-Hand Course of Action Diagrams. Proceedings of the Twenty-Second Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (IAAI-10), pp 1781-1786.
- [HN05] HSE, H.H., NEWTON, A.R. (2005) Recognition and beautification of multi-stroke symbols in digital ink. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 29 (4), pp. 533-546.
- [Hof00] HOFFMANN, D. (2000) Visual Intelligence. How we create what we see, New York: WW Norton & Company.

- [HPR00] HAN, J.H., PRATT, M., REGLI, W. (2000) Manufacturing Feature Recognition from Solid Models: A Status Report. *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 16(6), pp. 782–796
- [HS11] HEROLD J., STAHOVICH T.F. (2011). ClassySeg: A machine learning approach to automatic stroke segmentation. *Proceedings -SBIM 2011: ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, pp. 109-16.
- [Hwa91] HWANG T.S. (1991) The Design Capture System: Capturing Back-Of-The-Envelope Sketches. PhD thesis, Oregon State University.
- [IMT99] IGARASHI T., MATSUOKA S., TANAKA H. (1999) Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. *ACM SIGGRAPH'99*, Los Angeles, pp. 409-416.
- [Jac02] JACOBS R.A. (2002) What determines visual cue reliability? *TRENDS in Cognitive Sciences* Vol. 6 No.8, pp. 345-51. August 2002.
- [JF00] JORGE J.A., FONSECA M.J. (2000) A Simple Approach to Recognize Geometric Shapes Interactively. *GREC'99, LNCS 1941*, pp. 266–274.
- [JGHD09] JOHNSON G., GROSS M.D., HONG J., DO E.Y.L. (2009) Computational Support for Sketching in Design: A Review. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2(1), 1–93
- [JM92] JENKINS D.L., MARTIN R.R. (1992) Applying constraints to enforce users' intentions in free-hand 2-D sketches. *Intelligent System Engineering*. 1 (1), pp. 31-49.
- [JNR83] JANSEN H., NULLMEIER E., ROEDIGER K.H. (1983) Handsketching as a human factor aspect in graphical interaction. *Computer and Graphics*, 9(3), pp. 195-210.
- [Kan81] KANADE, T. (1981) Recovery of the Three-Dimensional Shape of an Object from a Single View. *Artificial Intelligence* 17, pp. 409-460
- [KML04] KANG D. J., MASRY M., LIPSON H. (2004) Reconstruction of a 3D object from main axis system. In *AAAI Fall Symposium Series: Making Pen-Based Interaction Intelligent and Natural*.
- [Kot10] KOTAGIRI S. (2010). C# Implementation for Fitting an Ellipse for a Set of Points. Srikanth Kotagiri's Blog. Recuperado desde: <http://skotagiri.wordpress.com/2010/06/19/c-implementation-for-fitting-an-ellipse-for-a-set-of-points/>
- Último acceso Noviembre 2013.
- [KS04] KARA L.B., STAHOVICH T.F. (2004) Hierarchical parsing and recognition of hand-sketched diagrams. *UIST: Proceedings of the Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 13-22

- [LB90] LAMB D., BANDOPADHAY A. (1990) Interpreting a 3D object form a rough 2D line drawing. In VIS'90: Proceedings of the 1st conference on visualisation'90, IEEE Computer Society Press, pp 59-66.
- [Lee06] LEE K. (2006) Application of the Hough Transform, Unpublished Research Paper No. 2006-005, University of Massachusetts Lowell, Dept. of Computer Science, Lowell, MA 01854.
- [LF92] LECLERC Y.G., FISCHLER A. (1992) An optimization-based approach to the interpretation of single line drawings as 3D wire frames. *International journal of Computer Vision*, 9(2), pp. 113-36.
- [LH05] LEE H., HAN S.: Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 2D orthographic views. *Computer-Aided Design* 2005; 37(13): 1388-98.
- [LKS07] LEE W., KARA, L.B., STAHOVICH T.F. (2007) An efficient graph-based recognizer for hand-drawn symbols. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 31 (4), 554-567
- [LLM06] LI M., LANGBEIN F.C. AND MARTIN R.R.: Constructing regularity feature trees for solid models. *LNCS 4077*, 2006, 267-86.
- [LS96] LIPSON H., SHPITALNI M., (1996) Optimization-based reconstruction of a 3D object from a single freehand line drawing. *Computer-Aided Design*; 28(8), pp. 651-63.
- [Mar91] MARILL T. (1991) Emulating the human interpretation of line-drawings as three dimensional objects. *International Journal of Computer Vision* 6(2), pp. 147-61.
- [Mas08] MASOOD A. (2008) Optimized polygonal approximation by dominant point deletion. *Pattern Recognition*, 41 (1), pp. 227-239.
- [MB05] MCGRATH M.B., BROWN J.R. (2005) Visual learning for science and engineering. *Computer Graphics and Applications IEEE*, 25(5), pp. 56-63.
- [MK95] MCLEAN G.F., KOTTURI D. (1995) Vanishing point detection by line clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(11), pp 1090-95.
- [Mon99] MONGE G. (1799) *Geometría descriptiva, lecciones dadas en las escuelas normales/traducido por Agustín Betancourt*. Madrid: Imprenta real 1803. Facsímil editado por: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1 ed. (10/1996).
- [Mon04] MONTGOMERY D. C. (2004) *Diseño y Análisis de Experimentos*. 2ª ed. Ed. Limusa Wiley, México 2004, ISBN 968-7270-60-8.
- [MP93] MEERAN S., PRATTS M.J. (1993) Automated feature recognition from 2D drawings. *Computer Aided Design*, 25(1), pp. 7-17.
- [MS07] MASOOD A., SARFRAZ M. (2007) Corner detection by sliding rectangles along planar curves. *Computers & Graphics* 31, pp. 440-448.

- [MT99] MEERAN S., TAIB J.M. (1999) A generic approach to recognising not-interacting, nested and interacting features from 2D drawings. *Computer-Aided Design*, 31(14), pp. 891-910.
- [NCAC07] NAYA F., CONTERO M., ALEIXOS N., COMPANY P. (2007) ParSketch: A Sketch-based interface for a 2D parametric geometry editor. *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques. LNCS*, vol 4551, pp 115-124.
- [OCCC14] OTTEY J., COMPANY P., CONTERO M., CAMBA J.D. (2014). A Review of the Design Intent Concept in the Context of CAD Model Quality Metrics. *ASEE Annual Conference and Exposition in Indianapolis, Indiana June 15-18*
- [OSJC09] OLSEN L., SAMAVATI F.F., COSTA SOUSA M., JORGE J.A. (2009) Sketch-based modeling: A survey. *Computers & Graphics* 2009; 33(1): 85-103
- [Pal99] PALMER S.E., *Vision science, Photons to phenomenology*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1999.
- [PCES11] PEI E., CAMPBELL I., EVANS M. (2011) A Taxonomic Classification of Visual Design Representations Used by Industrial Designers and Engineering Designers. *The Design Journal*, 14(1), pp. 64-91.
- [PCPV10b] PLUMED, R., COMPANY, P., PIQUER, A., VARLEY, P.A.C. (2010) Convergence measure of sketched engineering drawings. *Regeo Technical Report Ref. 07/2010 Regeo. Geometric Reconstruction Group*, <http://www.regeo.uji.es>
- [Per68] PERKINS, D. N. (1968) Cubic Corners, *Quarterly Progress Report 89*, 207-214, MIT Research Laboratory of Electronics.
- [Piq03] PIQUER A. (2003) *Percepción artificial de dibujos lineales*. Tesis doctoral. Universitat Jaume I, 2003 (<http://www.tdx.cesca.es/TDX-1216103-134957/>)
- [PJBF00] PEREIRA J.P., JORGE J.A., BRANCO V.A., FERREIRA F.N. (2000) Towards Calligraphic Interfaces: Sketching 3D Scenes with Gestures and Context Icons. In *WSCG (2000)*
- [PSD10] PETERSON E.J., STAHOVICH T.F., DOI E., ALVARADO C. (2010) Grouping strokes into shapes in hand-drawn diagrams. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence 2*, pp. 974-979.
- [PT94] PARODI P., TORRE V.(1994) On the Complexity of Labeling Perspective Projections of Polyhedral Scenes, *Artificial Intelligence* 70, pp. 239-76
- [Pui86] PUIG P. (1986) *Curso de geometría métrica. Tomo II complementos*. Euler editorial S.A. Madrid. ISBN: 84-85731-06-9.
- [Qin05] QIN S. F.: Intelligent Classification of Sketch Strokes. *IEEE EUROCON2005, Computer as a Tool*, (2005) 1374-77.

- [QWJ01] QIN S. F., WRIGHT D. K., JORDANOV I. N. (2001) On-Line Segmentation of Freehand Sketches by Knowledge-Based Nonlinear Thresholding Operations. *Journal. Pattern Recognition*, 34 (10), pp. 1885-1893.
- [Ric14] RICHARDSON M. C++ for scientific computing, "Special topic", University of Oxford, 2009. Retrieved from: <http://people.maths.ox.ac.uk/richardsonm/> Last Access May 2014
- [Rob63] ROBERTS L.G. (1963). Machine perception of three-dimensional solids. Lexington, Mass: M.I.T. Technical report 315, Lincoln Laboratory.
- [Ros93] ROSIN P.L. (1993) Ellipse fitting by accumulating five-point fits. *Pattern Recognition Letters*, 14, pp. 661-69.
- [Rot02] ROTHER C. (2002) A new approach to vanishing point detection in architectural environments. *Image and Vision Computing*, 20(9-10), pp 647-55.
- [Sau99] SAUND E. (1999) Bringing the marks on a whiteboard to electronic life. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 1670 (Cooperative Buildings. Integrating Information, Organizations, and Architecture), pp. 69-78.
- [SB93] SARKAR S., BOYER K.L. (1993) Perceptual Organization in Computer Vision: A Review and a Proposal for a Classificatory Structure. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(2), pp. 382-399.
- [SCH12] SZPAK Z., CHOJNACKI W., VAN DEN HENGEL A. (2012) Guaranteed Ellipse Fitting with the Sampson Distance. LNCS 7576. Proc. 12th European Conference on Computer Vision. (ECCV), pages 87-100.
- [SC04] SHES A., CHEN B. (2004) Smartpaper: An interactive and user friendly sketching system. In Proc. of Eurographics.
- [SG03] SONI S., GURUMOORTHY B. (2003) Handling solids of revolution in volume-based construction of solid models from orthographic views. *Journal of Computing and Information* 2003; 3(3), pp. 250-9.
- [Sha91] SHAH J. J. (1991) Assessment of features technology. *Computer-Aided Design*, vol. 23, pp. 331-343
- [Sha08] SHAHIN T.M.M. (2008) Feature-Based Design - An Overview. *Computer-Aided Design and Applications* 5(5), pp 639-653
- [SL97] SHPITALNI S., LIPSON H.: Classification of sketch strokes and corner detection using conic sections and adaptive clustering. *Trans. ASME J. Mech. Design*, 119 (2), (1997) 131–135
- [SLYY01] SHUM SSP., LAU WS., YUEN MMF., YU KM. (2001) Solid reconstruction from orthographic views using 2 stage extrusion. *Computer Aided Design* 2001; 33, pp. 91-102.

- [SM94] SAUND E., MORAN T.P. (1994) A perceptually-supported sketch editor. Proceedings UIST, pp. 175-184
- [SMFLL02] SAUND E., MAHONEY J., FLEET D., LARNER D., AND E. LANK E. (2002) Perceptual organization as a foundation for intelligent sketch editing. AAAI Spring Symposium on Sketch Understanding, pp. 118–125, American Association for Artificial Intelligence
- [SNS11] SIMMONS, J. P., NELSON, L. D., SIMONSOHN, U. (2011). False-positive psychology: Undisclosed flexibility in data collection and analysis allows presenting anything as significant. *Psychological Science*, 22, pp. 1359–1366.
- [ST94] SUGIMOTO K, TOMITA F. (1994) Boundary segmentation by detection of corner, inflection and transition points. Proceedings of IEEE Workshop on Visualization and Machine Vision, pp. 13-17
- [Sug86] SUGIHARA K. (1986) Machine interpretation of line drawings. The MIT Press, Cambridge Massachusetts.
- [Suh06] SUH Y. S. (2006) Reconstructing polyhedral swept volumes from a single view sketch. IEEE International Conference on Information Reuse and Integration 2006, pp. 585-88.
- [Szp14] SZPAK Z.L. Research Themes: Ellipse fitting. Recuperado desde: <https://sites.google.com/site/szpakz/research/ellipse-fitting>. Último acceso Mayo 2014.
- [SZS09] SWATI Z.N.K., ZAMAN S., SARFRAZ M. (2009) A novel corner detector approach using sliding two ellipses and one rectangle. 7th International Conference on Frontiers of Information Technology. DOI: 10.1145/1838002.1838086.
- [Tar09] TARDIF J.P. (2009) Non-Iterative approach for fast and accurate vanishing points detection. 12th International Conference on Computer Vision, IEEE, pp 1250-7.
- [TD98] TYAN L.W., DEVARAJAN V. (1998) Automatic identification of non-intersecting machining features form 2D CAD input. *Computer Aided Design* 1998; 30:357-66.
- [TS13] TUMEN R.S., SEZGIN T.M. (2013). DPFrag: Trainable stroke fragmentation based on dynamic programming. *IEEE Computer Graphics and Applications* 33 (5), art. nº. 6365195 , pp. 59-67
- [Var03] VARLEY P.A.C. Automatic creation of boundary-representation models from single line drawing. PhD Thesis. Dept. of Computer Science. Univ. of Wales, (2003)
- [Var09] VARLEY P.A.C. (2009) Implementing the new algorithm for finding faces in wireframes. Regeo Technical Report Ref. 05/2009 Regeo Geometric Reconstruction Group, <http://www.regeo.uji.es>
- [Vas08] VASEGHI, S.V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. Wiley, 2008 (fourth edition).

- [VC10] VARLEY P.A.C., COMPANY P. (2010) A new algorithm for finding faces in wireframes, *Computer-Aided Design* 42, 4, pp. 79-309
- [VR93] VANDENBRANDE, J.H., REQUICHA, A.A.G. (1993) Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 15, 12, pp. 1269-1285
- [VTMS04] VARLEY P.A.C., TAKAHASHI Y., MITANI J., SUZUKI H. (2004) A two-stage approach for interpreting line drawings of curved objects. In: Proceedings of eurographics workshop on sketch-based interfaces and modeling (SBIM04), pp. 117-26.
- [WEH08] WOLIN A., EOFF B., HAMMOND T. (2008) Shortstraw: a simple and effective corner finder for polylines. SBIM 2008, pp. 33-40.
- [WFH11] WOLIN A., FIELD M., HAMMOND, T. (2011) Combining Corners from Multiple Segmenters. Proceedings of the eighth Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling, pp. 117-124.
- [WG89] WANG W., GRINSTEIN G.G. (1989) A Polyhedral Object's CSG-rep Reconstruction from a single 2D line drawing. In Proc. SPIE Int. Robots and Computer Vision III: Algorithms and Techniques, 1192, pp. 230-238.
- [WWGY13] WANG S., WANG G., GAO M., YU S. (2013). Using fuzzy hybrid features to classify strokes in interactive sketches. *Advances in Mechanical Engineering*. Volume 2013, Article ID 259152, 7 pages.
- [XL10] XIONG Y, AND LAVIOLA J. (2010). A shortstraw-based algorithm for corner finding in sketch-based interfaces. *Computers & Graphics* 34 (5), pp. 513-527.
- [Yan06] YANG C. (2006) Sketch-based Modeling of Parameterized Objects. PhD. Thesis, The University of British Columbia, April 2006.
- [Yin04] YIN P.Y. (2004) A discrete particle swarm algorithm for optimal polygonal approximation of digital curves. *J. Visual Communication and Image Representation*, 15 (2), pp. 241-260.
- [YKP12] YU J., KULKARNI S.R., POOR H.V. (2012) Robust ellipse and spheroid fitting. *Pattern Recognition Letters* 33(5), pp. 492-499
- [YTJ08] YUAN S., TSUI L. Y., JIE S. (2008) Regularity selection for effective 3D object reconstruction from a single line drawing. *Pattern Recognition Letters* 29, pp. 1486-1495.
- [ZSDL06] ZHANG X., SONG J., DAI G., LYU M.R. (2006) Extraction of line segments and circular arcs from freehand strokes based on segmental homogeneity features. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 36 (2).

Anexo I: Experimentos de la etapa de reconocimiento de primitivas

Caso 1

Los ejemplos listados en la Figura 6 se distribuyeron en tres cuestionarios con diez imágenes cada uno (Figura 82). Esta disposición aseguraba que las imágenes eran suficientemente grandes para ser percibidas sin problemas, y que en cada cuestionario se podían recopilar se recuperaron un conjunto significativo de respuestas sin cansar a los sujetos. Se recopilaron un total de 97 cuestionarios. De manera que de los ejemplos 1-10 se recopilaron 33 respuestas y de los ejemplos 11-30 se recopilaron un total de 32 respuestas.



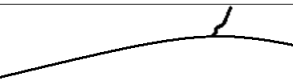

<u>STRAIGHT LINES INTERPRETATION</u>			
Following images represent freehand lines, they are not perfect. Please, classify them as Straight line, not straight line, or if you are not sure, tick the "uncertain" answer.			
	<input type="checkbox"/> Straight line <input type="checkbox"/> Not straight line <input type="checkbox"/> Uncertain		<input type="checkbox"/> Straight line <input type="checkbox"/> Not straight line <input type="checkbox"/> Uncertain
	<input type="checkbox"/> Straight line <input type="checkbox"/> Not straight line <input type="checkbox"/> Uncertain		<input type="checkbox"/> Straight line <input type="checkbox"/> Not straight line <input type="checkbox"/> Uncertain

Figura 82. Cuestionario experimento 1 apartado 3.2.1.1

No se recopilaron datos demográficos (como sexo, nivel de educación...) ya que aunque en cierta medida pueden ser factores que influyan la percepción, no se han considerado factores de interés en el estudio de campo actual. La mayoría de los sujetos encuestados fueron estudiantes de grado de las titulaciones de tecnologías industriales o diseño industrial. Otros sujetos fueron profesores de diferentes áreas tecnológicas. También se incluyó una pequeña muestra de personas sin formación en dibujo técnico y con un nivel educativo no superior a la educación secundaria. Mujeres y hombres fueron representados prácticamente en partes iguales.

Por lo tanto, la mayoría de las respuestas recopiladas provinieron de personas con formación técnica, y por lo tanto los datos podrían estar sesgados. Pero esto es exactamente lo que se buscaba, ya que nuestro trabajo está orientado a la percepción automática de bocetos de ingeniería (es decir, bocetos empleados por ingenieros para comunicarse entre ellos). Además, la inclusión en el estudio de personas sin perfil técnico, atenúa el sesgo de la muestra y nos permite evaluar si aparecen diferencias significativas entre los dos grupos. En nuestro estudio, dichas diferencias no fueron aparentes, por lo que aceptamos que la muestra se ajustaba a las necesidades de nuestro estudio.

En la Tabla 20 se muestran algunas características de los trazos presentados en los ejemplos. En cada columna se presenta:

- El número que identifica al ejemplo (tal y como se muestra la Figura 6 que aparece en el cuadro de la izquierda).
- El número de puntos o nodos que contiene el trazo.
- La longitud del trazo, medido como la longitud del rectángulo que lo delimita.
- La densidad de puntos que definen el trazo (calculado como la relación entre el número de puntos del trazo y la longitud del trazo)—si la densidad del trazo es pobre, puede ocurrir que variaciones significativas en el recorrido del trazo queden ocultas.
- Velocidad del trazado, calculada como la relación entre la longitud del trazo y el tiempo que se tardó en dibujarlo. Una velocidad alta produce una densidad baja.
- La inclinación de la línea que mejor se ajusta a los datos (según el método de regresión lineal explicado en el apartado 3.2.1.3). Los valores vienen representados en grados sexagesimales.

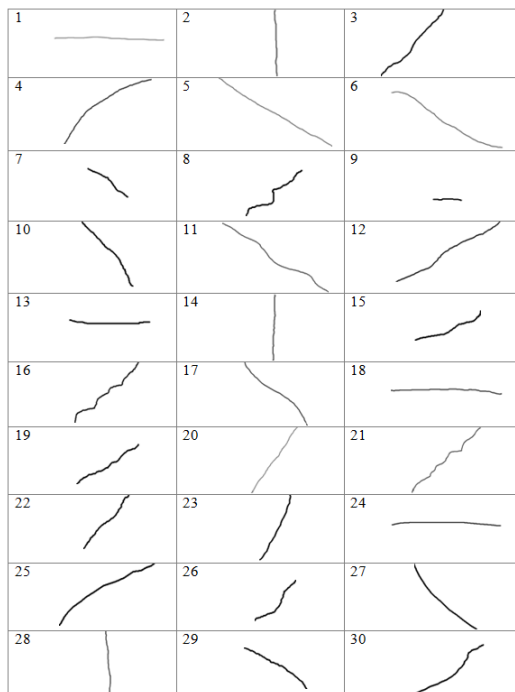


Figura 3: Colección de ejemplos

Ejemplo	N° Nodos	Longitud Trazo	Densidad (%)	Velocidad	Pendiente (grados)
1	53	782	7	1.39	-1.08
2	60	311	19	0.57	-88.51
3	67	214	31	0.31	47.34
4	136	413	33	0.29	36.22
5	393	904	43	0.25	-30.82
6	257	767	33	0.29	-31.09
7	93	120	78	0.07	-37.28
8	120	187	64	0.12	38.06
9	48	60	80	0.07	-0.69
10	73	183	40	0.23	-51.13
11	387	1801	21	0.54	-32.66
12	110	375	29	0.34	-149.54
13	101	167	60	0.11	-0.54
14	80	260	31	0.32	-91.71
15	57	163	35	0.18	22.31
16	210	286	73	0.09	40.35
17	75	394	19	0.28	-41.99
18	172	410	42	0.20	-1.92
19	121	175	69	0.11	31.55
20	194	619	31	0.34	54.33
21	257	540	48	0.21	41.66
22	76	170	45	0.20	48.38
23	23	171	13	0.76	-115.46
24	15	366	4	2.26	-0.86
25	23	244	9	0.74	31.75
26	98	137	72	0.10	48.27
27	18	203	9	1.00	-45.27
28	198	262	76	0.10	94.50
29	99	176	56	0.15	-32.93
30	38	197	19	0.32	38.06

Tabla 20 Características de los trazos de los ejemplos

Caso 2

Cada uno de los trazos se define mediante una etiqueta formada por el identificador del ángulo de la Tabla 3 (IdAng), seguido del identificador de la familia.

Id familia	Puntos	Longitud	%Linealidad	Tolerancia
Familia 1	641	760,79	94,51	1,71
Familia 2	193	743,60	97,63	4,67
Familia 3	578	686,10	91,54	2,20
Familia 4	111	658,28	97,91	5,67
Familia 5	301	799,64	95,93	3,80
Familia 6	433	771,42	93,21	3,35

Tabla 21 Parámetros generales de cada familia.

Cada familia se caracteriza por parámetros como el número de puntos o nodos del trazo, la longitud, la linealidad y la tolerancia. Los valores de dichos parámetros se muestran en la Tabla 21.

Cada trazo original se rotó de manera que la recta de regresión ortogonal se orientara según los ángulos listados en la Tabla 22 (por lo tanto cada familia contiene doce trazos. Cada ejemplo se etiquetó mediante su identificador del ángulo (IdAng) seguido del identificador de su familia.

Idangle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Angles	0°	9°	27°	45°	54°	72°	90°	99°	117°	135°	144°	162°
Obliq.	0	0.2	0.6	1	0.8	0.4	0	0.2	0.6	1	0.8	0.4

Tabla 22 Valores de los ángulos utilizados en el experimento

Respecto a los cuestionarios:

- Cada cuestionario contenía doce ejemplos diferentes elegidos al azar y sin repetición. Cada imagen se etiquetó con el identificador del ejemplo. Las figuras se distribuyeron en dos páginas para facilitar su visualización. Para minimizar la influencia de los demás ejemplos en la percepción de una de las figuras, cada ejemplo aparece en dos cuestionarios diferentes. Para que todos los ejemplos cumplieran esta condición se crearon doce cuestionarios diferentes.
- Las hojas de respuestas contenían las instrucciones del experimento, y también una escala Likert para clasificar la “rectitud” percibida de cada figura. Cada sujeto clasificó cada ejemplo con un valor entre 5 (cuando la figura se percibió como una línea recta) y un valor de 1 (cuando la figura se percibió como una línea no recta). La tabla de clasificación por lo tanto constaba de 5 columnas (el rango de valores de la clasificación) y doce filas (una por cada ejemplo clasificado).
- Un requerimiento esencial para obtener unos resultados válidos era que los cuestionarios no debían ser rotados por los sujetos durante el proceso de visualización y percepción de los ejemplos. Para ello, el cuestionario fue diseñado para sugerir claramente la orientación de lectura, y también se incluyó explícitamente este requerimiento en las instrucciones del cuestionario.

La Figura 83 muestra un ejemplo de un cuestionario y una hoja de respuestas.

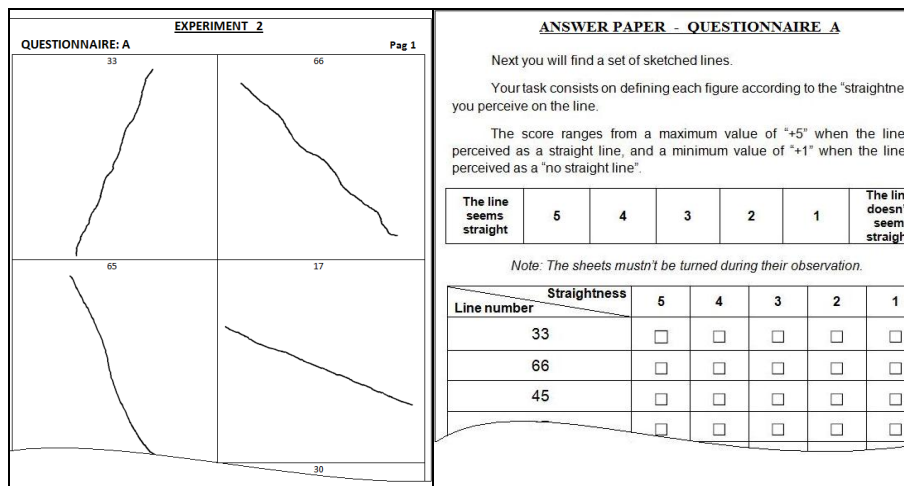


Figura 83. Ejemplo del cuestionario y el formulario de respuestas del experimento 2 del apartado 3.2.1.2

Para verificar la segunda hipótesis de trabajo, se empleó un análisis ANOVA, tomando como factores principales la identificación de la familia y las pendientes de los trazos, teniendo en cuenta únicamente aquellos trazos con ángulos de 0° y 90°. Atendiendo a estas condiciones, se obtuvo una tabla de clasificación 2x6. Y los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 23:

Test de inter-sujetos

Variable dependiente: Puntuación de rectitud

Origen	Suma de	gl	Media	F	Sig.
Modelo corregido	205.927 ^a	11	18.721	20.141	0.000
Intersección	2194.531	1	2194.531	2360.983	0.000
Idfamilia	195.323	5	39.065	42.028	0.000
Pendiente	3.337	1	3.337	3.590	0.059
Idfamilia * Pendiente	7.267	5	1.453	1.564	0.170
Error	256.542	276	0.929		
Total	2657.000	288			
Total corregido	462.469	287			

a. R al cuadrado = 0.445 (R al cuadrado y corregida = 0.423)

Tabla 23 Resultados del análisis ANOVA para los trazos con oblicuidad igual a cero.

Se comprueba que mientras que los grupos definidos por el factor de la familia (Idfamilia) obtiene una puntuación media de percepción considerablemente diferente (Sig= 0.000 < 0.05), el factor de la pendiente no tiene un efecto significativo sobre la puntuación media de la percepción (Sig = 0.059 > 0.05). De ahí que podamos confirmar la hipótesis 2.

Para verificar la tercera hipótesis de trabajo, empleamos un análisis ANOVA, tomando como factores principales la familia a la que pertenece cada trazo y los seis niveles de oblicuidad. Con estos factores, se obtuvo una tabla de clasificación 6x6. Los resultados del ANOVA se presentan en la Tabla 24.

Test de inter-sujetos

Variable dependiente: Puntuación de rectitud

Origen	Suma de	gl	Media	F	Sig.
Modelo corregido	1141.298 ^a	35	32.609	35.320	0.000
Intersección	13139.598	1	13139.598	14232.213	0.000
Idfamilia	1055.621	5	211.124	228.680	0.000
Oblicuidad	47.385	5	9.477	10.265	0.000
Idfamilia * Oblicuidad	38.292	25	1.532	1.659	0.022
Error	1562.104	1692	0.923		
Total	15843.000	1728			
Total corregido	2703.402	1727			

a. R squared = 0.422 (R squared and corrected = 0.410)

Tabla 24 Resultados del ANOVA para la segunda hipótesis

Según los resultados, ambos factores poseen un efecto significante sobre la percepción de la rectitud (en ambos casos Sig = 0.000 < 0.05). Por lo tanto, las diferentes familias de líneas se perciben con diferentes grados de rectitud, y los diferentes miembros de cada familia también se perciben de manera diferente, es decir, que tanto la calidad como la dirección de la línea influyen la percepción de rectitud.

Además el factor de interacción $I_{\text{familia}} * \text{Oblicuidad}$ muestra un grado de significación de $\text{Sig} = 0.022$ (inferior a 0.05), lo que significa que incluso en cada una de las familias, la percepción de la rectitud difiere de acuerdo al valor de la oblicuidad.

Sin embargo, el peso de la variable oblicuidad está lejos de considerarse tan importante como el de la familia, tal y como sugiere el valor del parámetro F-test que en el caso de I_{familia} posee un valor de $F = 228.68$, frente al valor de oblicuidad $F = 10.265$.

Por lo tanto podemos aceptar que aunque la oblicuidad parece afectar al modo en que la gente tiende a percibir la rectitud de una línea, ésta debería considerarse como un factor secundario, con menos importancia que aquéllos que de alguna manera caracterizan las diferentes familias (que serán los que se definirán posteriormente cuando se consideren los algoritmos geométricos). El modelo obtenido únicamente con estos dos factores sólo explica el 42.2% (valor de R al cuadrado) de las variaciones en las respuestas.

Respecto al resultado del análisis Post-Hoc de Tukey, de grupos homogéneos y presentados en la Tabla 4. Podemos ver que los trazos con baja oblicuidad pero diferentes del valor cero, tienen la media de percepción de rectitud más baja. Sus puntuaciones están prácticamente un 5% más baja que la media de la puntuación del segundo grupo (que incluye los trazos con oblicuidad cero). Por otra parte, el tercer grupo, que poseen los mayores valores de oblicuidad, tiene una puntuación media un 3% superior al segundo grupo.

Puntuación de rectitud

Tukey B^{a,b}

Oblicuidad	N	Subconjunto		
		1	2	3
0,2	288	2.54		
0,4	288	2.56		
0,0	288		2.76	
0,6	288		2.80	
0,8	288		2.88	2.88
1,0	288			3.01

La tabla muestra las medias de los subconjuntos de grupos homogéneos.

a. Emplea el tamaño simple de la media armónica = 288.000

b. Alfa = 0.05

Tabla 4

Caso 3

A continuación se presentan las tablas con los resultados de los experimentos del apartado 3.2.2 sobre la percepción del ajuste de líneas rectas:

Suj	Posición											
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1	1	2	3	4	6	5	8	7	9	11	10	12
2	1	2	3	4	6	5	8	7	9	11	10	12
3	1	2	3	4	6	8	5	7	9	12	10	11
4	1	2	4	3	6	8	5	7	9	10	12	11
5	1	3	4	2	6	8	5	7	9	10	12	11
6	1	2	3	4	6	8	7	5	10	9	12	11
7	1	2	3	4	6	8	9	7	5	12	10	11
8	1	2	4	3	6	8	5	7	9	12	10	11
9	1	2	4	3	6	8	5	7	9	10	12	11
10	1	2	4	3	6	5	8	7	9	10	11	12
11	1	2	3	4	6	8	5	7	10	12	9	11
12	1	2	4	3	6	5	7	9	8	10	12	11
13	1	3	2	4	6	8	5	7	9	12	10	11
14	1	3	2	4	6	8	12	7	5	9	10	11
15	1	4	2	3	6	8	12	10	9	5	7	11
16	1	2	4	3	6	8	12	10	9	5	7	11
17	1	2	4	3	6	5	7	8	9	11	10	12
18	1	3	4	2	6	8	7	9	5	12	10	11
19	1	3	2	4	6	5	8	7	9	10	11	12
20	1	2	3	4	6	7	8	5	9	12	10	11
21	1	2	3	4	6	5	7	9	8	10	12	11
22	1	2	4	3	6	8	5	7	9	10	12	11

Tabla 25 Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 3

Suj	Posición											
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1	-1	-2	-3	-4	-6	-5	-8	-7	-9	-12	-10	-11
2	-1	-2	-4	-3	-6	-5	-7	-9	-8	-10	-12	-11
3	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-5	-9	-7	-10	-12	-11
4	-1	-4	-2	-3	-6	-5	-7	-8	-9	-10	-12	-11
5	-1	-4	-2	-3	-6	-9	-5	-8	-7	-10	-11	-12
6	-1	-4	-3	-2	-6	-5	-7	-9	-10	-8	-12	-11
7	-1	-3	-4	-2	-6	-5	-7	-9	-10	-12	-8	-11
8	-1	-2	-3	-4	-6	-5	-7	-8	-9	-10	-12	-11
9	-1	-4	-3	-2	-6	-8	-5	-9	-7	-10	-12	-11
10	-1	-3	-4	-2	-6	-5	-7	-9	-8	-10	-12	-11
11	-1	-2	-4	-3	-6	-5	-7	-9	-8	-10	-12	-11
12	-1	-3	-4	-2	-6	-8	-5	-7	-9	-10	-12	-11
13	-1	-2	-3	-4	-6	-5	-7	-8	-9	-12	-10	-11
14	-1	-4	-6	-2	-3	-5	-9	-7	-8	-10	-12	-11
15	-1	-4	-2	-3	-6	-5	-7	-8	-9	-10	-12	-11
16	-1	-4	-2	-3	-6	-7	-5	-9	-8	-10	-12	-11
17	-4	-1	-2	-6	-3	-5	-8	-9	-7	-10	-12	-11
18	-1	-2	-3	-4	-6	-5	-8	-9	-7	-10	-11	-12
19	-1	-4	-3	-2	-5	-6	-7	-9	-8	-10	-11	-12
20	-1	-3	-4	-2	-6	-5	-7	-9	-8	-10	-12	-11
21	-1	-4	-2	-3	-6	-7	-9	-5	-8	-10	-12	-11
22	-1	-2	-4	-3	-6	-8	-5	-9	-7	-10	-12	-11

Tabla 26 Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 4

Sujetos	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1	1	2	4	3	6	8	10	5	7	9	-12	-11
2	1	2	3	4	6	5	7	9	12	10	-8	-11
3	1	3	6	4	5	10	12	7	9	11	-2	-8
4	1	2	3	6	4	8	5	12	10	11	-9	-7
5	2	3	-1	6	-4	8	9	10	7	5	12	11
6	1	2	3	4	8	5	7	-6	9	10	11	-12
7	2	3	4	-1	6	7	-5	9	8	10	12	11
8	2	4	3	6	7	8	5	9	10	12	-1	-11
9	1	2	4	6	8	5	9	10	-3	-7	12	11
10	1	3	4	2	8	-5	-6	7	9	10	12	11
11	1	2	3	4	7	5	-6	8	9	12	11	-10
12	1	2	-4	3	6	7	5	8	-9	12	10	11
13	1	2	3	4	6	8	5	9	12	10	-7	-11
14	3	2	4	6	5	8	9	-1	7	12	11	-10
15	1	2	4	6	8	5	10	12	9	11	-3	-7
16	1	3	4	8	5	7	-2	-6	10	9	12	11
17	2	4	3	6	-1	-5	7	10	8	9	12	11
18	1	2	6	3	5	-4	-7	8	10	9	12	11
19	1	4	3	5	8	-6	-2	7	9	10	12	11
20	1	2	6	4	8	5	9	10	12	-3	11	-7
21	1	4	3	-2	6	7	5	9	-8	10	12	11
22	2	3	6	-1	-4	8	7	5	9	10	11	12
23	2	4	3	6	8	9	7	10	12	-1	-5	11
24	1	4	6	8	-3	-2	7	5	9	11	10	12
25	1	2	4	6	3	7	-5	-8	9	10	12	11
26	1	2	5	6	-4	-3	7	8	9	10	12	11
27	1	2	4	3	-6	7	5	9	-8	10	12	11
28	1	2	4	-3	6	5	8	9	-7	10	12	11
29	1	4	-2	3	5	6	-7	8	9	10	12	11
30	2	4	-1	3	6	7	5	-8	9	10	11	12
31	1	2	3	4	-6	-5	8	9	7	10	12	11
32	1	2	3	5	7	8	-6	-4	9	10	11	12

Tabla 27 Trazos de rectas ordenados por los sujetos en el experimento 5

Caso 4

A continuación se presentan las tablas con los resultados de los experimentos del apartado 3.3.2 sobre la percepción del ajuste de arcos elípticos:

Posición												
Suj	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1	3	1	5	2	7	4	8	6	9	10	11	12
2	1	3	5	2	4	7	6	8	9	11	10	12
3	1	3	2	5	8	4	6	7	11	9	10	12
4	1	5	3	2	4	7	6	8	9	10	11	12
5	3	1	5	4	7	2	6	8	9	11	10	12
6	3	2	1	5	6	4	7	8	9	11	10	12
7	3	1	2	5	6	4	8	7	9	11	10	12
8	3	2	1	5	4	7	8	9	6	11	12	10
9	3	1	2	5	6	7	4	8	9	11	12	10
10	1	3	2	5	4	7	8	6	9	11	10	12
11	5	3	2	1	4	6	7	8	9	10	11	12
12	1	3	2	5	4	6	8	7	9	11	10	12
13	1	3	2	5	4	6	8	7	9	10	11	12
14	5	1	2	3	7	4	6	8	9	11	10	12
15	1	5	3	2	4	6	8	7	9	11	10	12
16	3	1	5	2	4	6	8	7	9	11	10	12
17	3	1	2	5	4	6	8	7	9	10	11	12
18	1	5	3	2	7	4	6	8	9	10	11	12
19	1	4	5	3	2	8	6	9	7	11	10	12
20	1	3	5	2	4	7	8	6	9	11	10	12
21	1	5	3	4	7	2	6	8	9	11	10	12
22	1	3	5	2	4	7	6	8	9	11	10	12
23	3	1	4	5	2	6	9	8	7	11	12	10
24	1	3	2	5	4	6	8	7	9	10	11	12
25	1	2	5	3	4	8	6	7	9	11	10	12
26	1	5	3	2	4	6	7	8	9	11	10	12
27	1	3	4	2	5	7	6	8	9	11	10	12
28	1	2	5	3	4	7	6	8	9	11	10	12
29	1	3	2	6	8	4	5	7	9	11	10	12
30	1	3	2	6	5	4	7	8	9	11	10	12
31	5	1	3	2	7	4	6	8	9	10	11	12
32	1	5	2	3	7	4	8	6	9	11	10	12

Tabla 28 Trazos de arcos ordenados por los sujetos en el experimento 1

Posición												
Suj	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1	1	5	3	2	4	6	8	7	9	11	10	12
2	3	1	2	5	4	6	8	7	9	10	11	12
3	3	2	1	5	4	7	6	8	9	10	11	12
4	1	5	3	2	7	4	6	8	9	11	10	12
5	1	3	5	7	4	2	6	8	9	11	10	12
6	5	1	3	2	4	6	8	7	9	10	11	12
7	5	3	1	2	7	4	8	6	9	11	10	12
8	1	3	2	6	5	4	7	8	9	11	10	12
9	1	3	2	5	7	4	6	8	9	11	10	12
10	1	3	5	4	7	2	8	6	9	11	10	12
11	1	3	5	2	7	4	8	6	9	11	12	10
12	3	5	1	2	4	7	6	8	9	10	11	12
13	1	2	3	5	4	6	7	8	9	11	10	12
14	3	5	4	2	1	8	7	6	9	11	10	12
15	5	1	2	3	4	7	6	8	9	11	10	12
16	3	1	5	4	2	6	7	8	9	11	10	12
17	1	3	2	6	4	5	7	8	9	10	11	12
18	1	3	2	5	4	6	8	7	9	11	10	12
19	3	1	5	4	2	6	7	8	9	11	10	12
20	1	3	2	4	5	6	8	9	7	11	12	10
21	1	3	5	4	2	7	6	8	11	10	9	12
22	1	2	4	3	5	6	8	7	9	11	10	12
23	2	1	3	5	4	6	8	7	9	10	11	12
24	1	3	2	4	5	6	8	7	9	11	10	12
25	3	1	5	2	4	6	7	8	9	11	10	12
26	1	3	2	4	5	7	8	6	9	11	10	12
27	1	4	3	5	2	9	8	6	7	11	12	10
28	1	3	2	5	7	4	6	8	9	10	11	12
29	3	2	1	4	6	5	8	7	9	11	12	10
30	3	1	2	4	6	5	8	7	9	11	10	12

Tabla 29 Trazos de arcos ordenados por los sujetos en el experimento 2

		Posición											
Suj	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º	
1	1	2	4	3	7	6	8	11	10	5	9	12	
2	1	3	5	7	2	4	11	8	10	9	6	12	
3	3	5	2	1	4	7	6	11	10	8	12	9	
4	2	1	4	3	7	6	5	8	11	10	12	9	
5	3	5	1	4	2	7	10	6	8	11	12	9	
6	1	3	2	4	7	5	6	11	8	10	12	9	
7	5	3	2	4	1	7	11	6	8	10	12	9	
8	2	3	4	7	8	6	10	11	5	12	9	1	
9	3	5	2	7	1	4	6	10	11	8	12	9	
10	1	4	2	5	3	7	6	8	11	12	10	9	
11	1	2	3	4	7	5	6	8	11	10	9	12	
12	3	2	7	5	1	4	6	8	11	9	10	12	
13	3	4	1	2	5	7	6	10	8	11	9	12	
14	3	9	7	5	1	10	11	2	8	4	12	6	
15	3	2	1	4	5	6	7	8	11	10	9	12	
16	2	1	3	7	4	5	6	8	9	11	10	12	
17	5	7	3	9	2	1	10	6	11	8	12	4	
18	3	5	1	2	10	7	11	8	4	6	9	12	
19	1	2	4	3	5	6	7	8	11	10	12	9	
20	3	2	7	1	5	4	8	6	9	11	10	12	
21	3	5	9	7	2	1	4	6	10	11	8	12	
22	1	2	4	3	5	7	11	8	6	10	12	9	
23	1	2	3	4	5	7	6	11	10	8	12	9	
24	1	3	2	4	5	7	10	8	6	11	12	9	
25	1	2	4	5	3	7	6	11	8	10	12	9	
26	1	2	3	7	4	5	6	11	8	10	12	9	
27	3	5	1	7	10	2	8	6	4	12	11	9	
28	3	5	7	2	1	4	10	9	11	8	6	12	

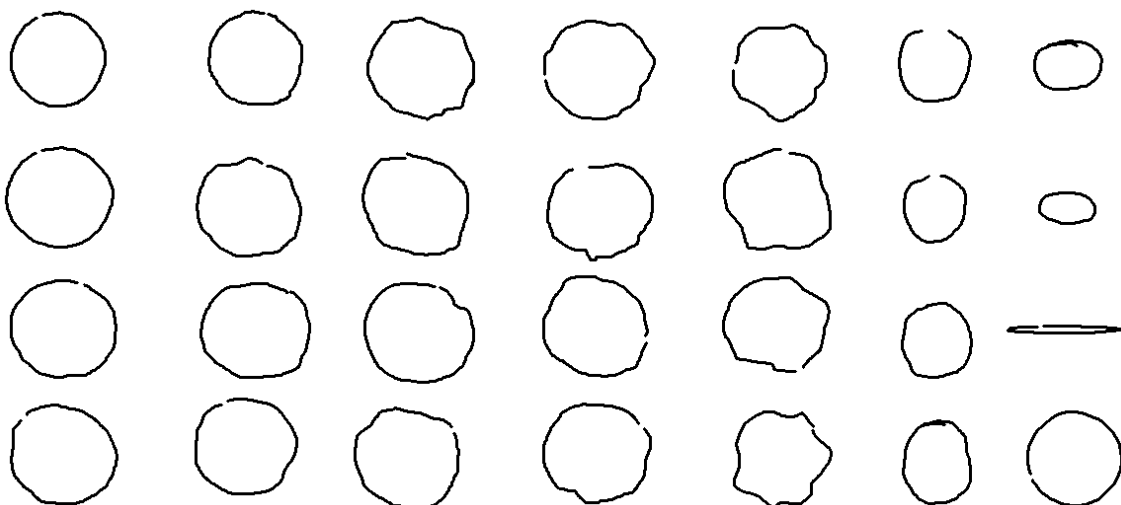
Tabla 30 Trazos de arcos cortos, ordenados por los sujetos en el experimento 3

		Posición											
Su	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º	
1	3	2	4	5	6	8	7	1	10	9	12	11	
2	1	2	4	5	6	7	3	8	10	9	11	12	
3	1	2	5	4	3	6	7	8	10	9	11	12	
4	3	2	4	5	6	8	7	1	10	9	12	11	
5	4	2	5	1	6	10	11	7	9	3	8	12	
6	4	5	2	7	9	6	10	11	3	8	12	1	
7	1	4	2	6	3	5	8	10	7	9	11	12	
8	3	2	4	5	1	6	7	8	9	12	10	11	
9	1	6	4	2	3	12	5	11	7	10	9	8	
10	4	1	2	3	5	6	7	8	10	11	9	12	
11	1	4	6	5	2	10	7	11	9	3	8	12	
12	2	4	3	1	5	6	7	8	9	12	10	11	
13	4	6	2	1	5	3	7	8	9	12	10	11	
14	1	4	3	2	6	7	8	5	9	11	10	12	
15	1	3	4	2	6	5	7	8	12	10	9	11	
16	1	4	6	5	2	3	10	11	7	8	9	12	
17	4	1	6	2	5	3	10	7	8	11	9	12	
18	2	5	4	1	6	7	9	10	11	3	8	12	
19	3	2	4	1	6	5	7	9	10	12	8	11	
20	1	2	3	4	12	6	7	5	9	10	8	11	
21	4	2	3	1	6	5	7	8	9	10	12	11	
22	2	3	4	1	6	5	7	8	10	9	11	12	
23	3	2	4	1	6	5	7	11	8	10	9	12	
24	1	2	3	5	4	6	7	9	8	12	10	11	
25	2	4	3	7	5	1	6	8	12	9	10	11	
26	2	4	1	3	6	5	7	8	9	10	12	11	
27	1	2	6	4	3	5	8	7	10	9	12	11	
28	1	2	4	6	5	3	8	7	9	12	10	11	
29	1	2	4	3	5	6	12	9	8	7	10	11	
30	1	2	8	4	3	6	5	7	12	9	10	11	
31	1	4	5	6	2	12	3	7	8	9	10	11	
32	3	2	4	7	9	8	5	1	6	10	12	11	

Tabla 31 Trazos de arcos de diferentes longitudes, ordenados por los sujetos en el experimento 4

Caso 5

A continuación se presentan el conjunto de ejemplos de trazos que se han empleado para el análisis del método de ajuste de arcos elípticos en el apartado 3.3.5.1.



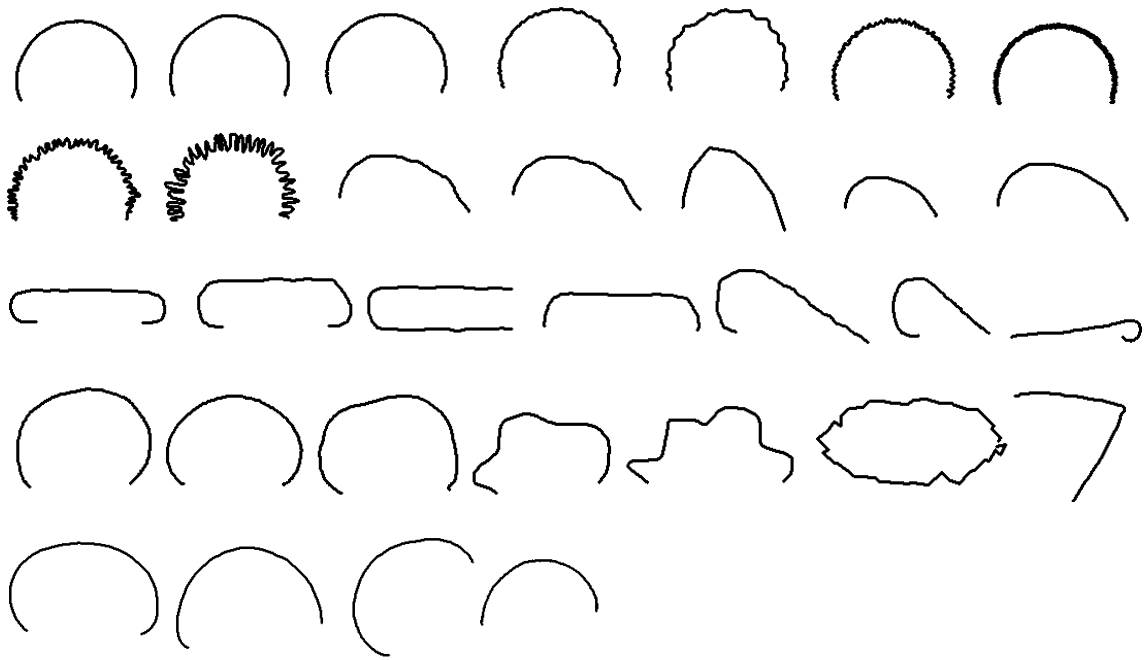
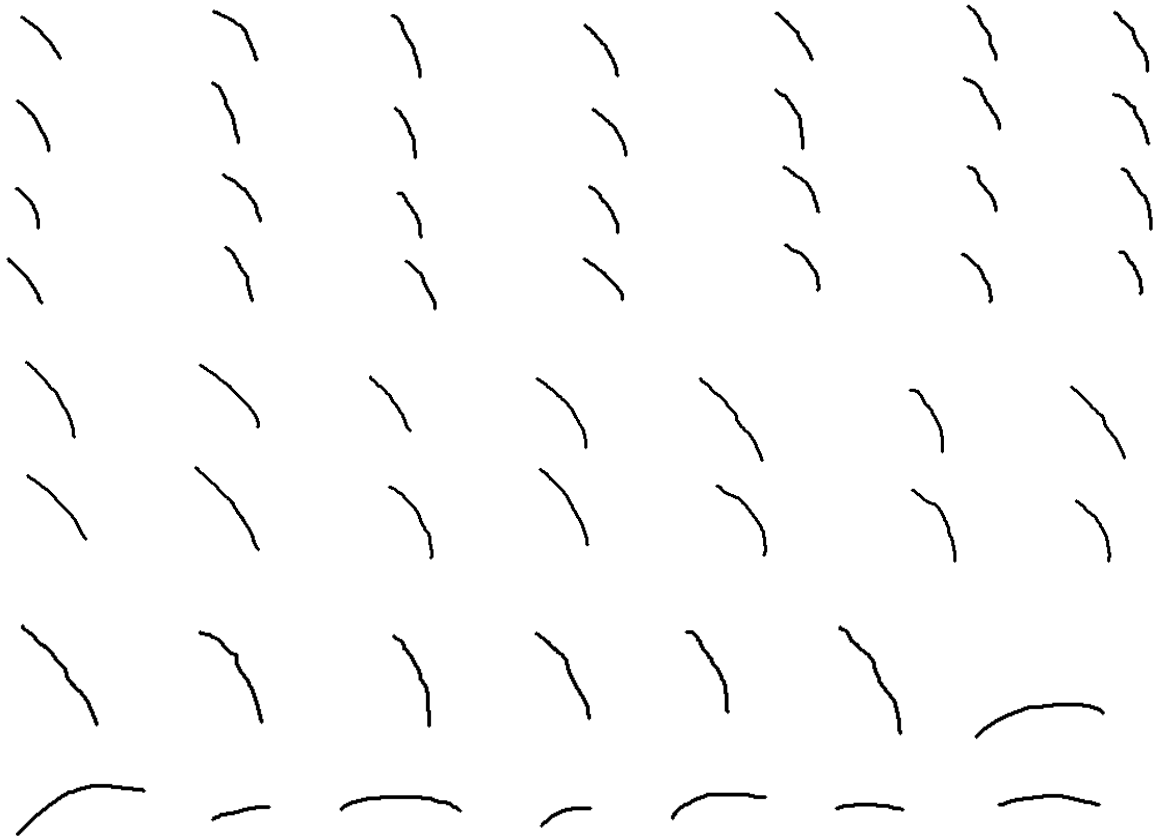


Figura 84. Trazos que abarcan ángulos largos empleados en el análisis general del método de reconocimiento de arcos (apartado 3.3.5.1)



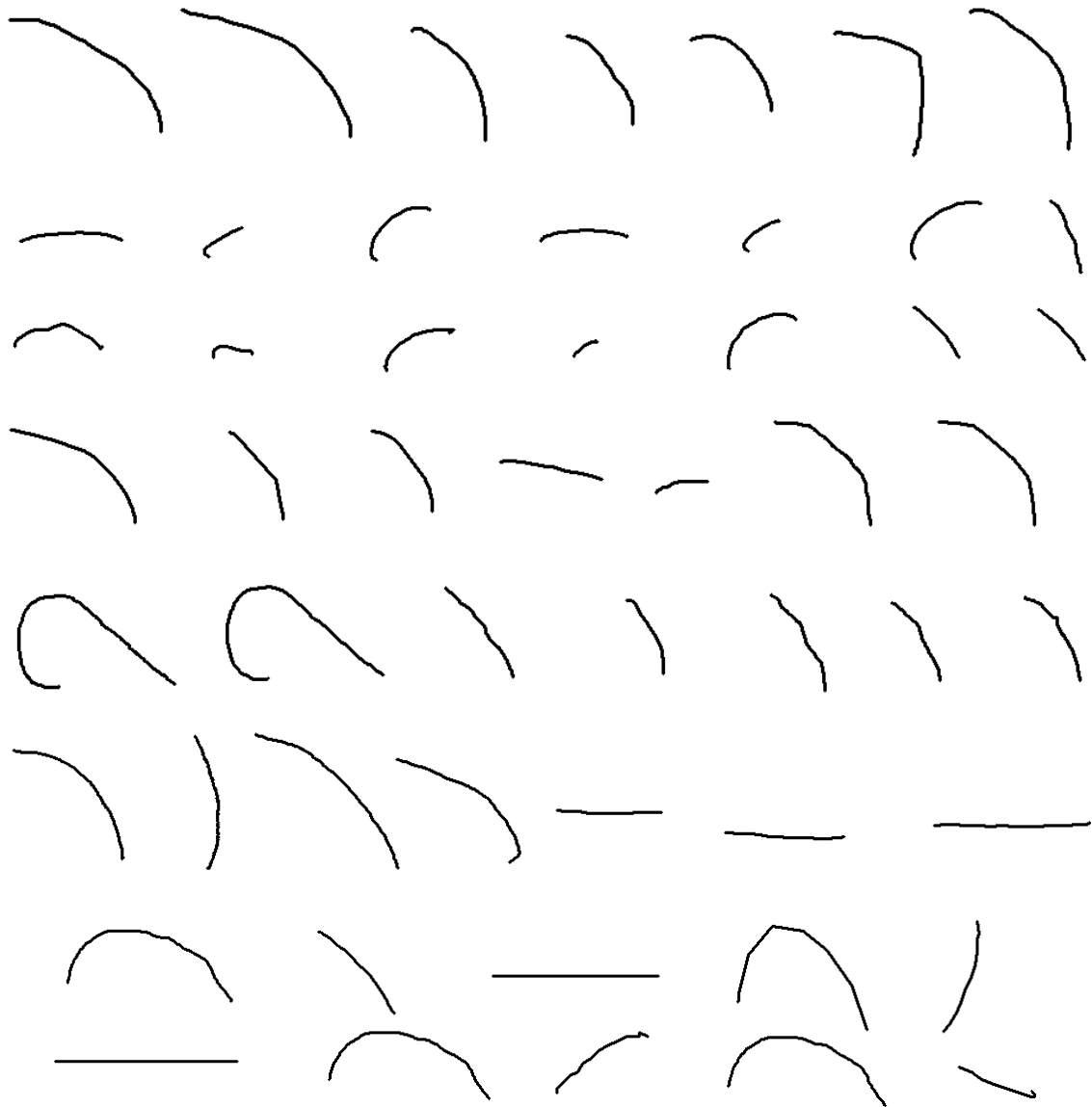


Figura 85. *Trazos que abarcan ángulos cortos empleados en el análisis general del método de reconocimiento de arcos (apartado 3.3.5.1)*

Anexo II: Experimentos de la etapa de reconocimiento de indicios indirectos

Caso 1

Al diseñar el experimento, es importante evitar cualquier tipo de restricción implícita o explícita, y evitar cualquier influencia sobre cómo los sujetos deben realizar la tarea propuesta. Para ello, en este experimento se ha evitado predisponer a los sujetos a usar o no de líneas ocultas, así como a elegir la orientación del modelo en el dibujo.

Para ello se confeccionó un cuestionario minimalista (Figura 86) que evita en todo lo posible cualquier tipo de guía sobre los participantes. Como una descripción verbal de la tarea podría implicar algún tipo de sugestión o restricción en el proceso de bocetado, la tarea descriptiva en el cuestionario toma forma de ejemplo visual: una fotografía de un objeto físico y su representación a mano alzada.

Para evitar cualquier pista de cómo deben representarse las aristas paralelas del objeto, o si las líneas ocultas deberían dibujarse, el objeto físico que se representó en el ejemplo gráfico fue un tetraedro (que obviamente no contiene aristas paralelas) orientado de manera que todas sus aristas fueran visibles. La Figura 86 muestra una copia parcial de uno de los cuestionarios.


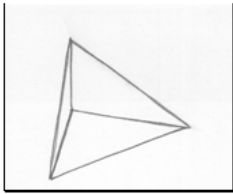
<u>REALIZACION DE BOCETOS</u>			
Por favor, rellene la siguiente información previa:			
• Grado de estudios:	<input type="checkbox"/> Secundaria	<input type="checkbox"/> Bachiller	<input type="checkbox"/> FP/Ciclos formativos
	<input type="checkbox"/> Estudiante Universitario	Curso:	<input type="checkbox"/> Licenciado/ Diplomado
	<input type="checkbox"/> Estudiante de Máster		
• Estudios en el campo de:	<input type="checkbox"/> Ingeniería	<input type="checkbox"/> Diseño	<input type="checkbox"/> Arquitectura
	<input type="checkbox"/> Topografía	<input type="checkbox"/> Ninguno de los anteriores	<input type="checkbox"/> BBAA
• Sexo:	<input type="checkbox"/> Hombre	<input type="checkbox"/> Mujer	Edad:
En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo del dibujo a mano alzada de un tetraedro, cuyo modelo aparece fotografiado en la imagen de la izquierda.			
			
A continuación, represente en el siguiente recuadro un dibujo a mano alzada del modelo físico que se le ha entregado, teniendo en cuenta que:			
<ul style="list-style-type: none"> • Deben visualizarse la mayor parte de los detalles del modelo. • Puede emplear la posición de la pieza que considere más apropiada. • No tiene que considerar las imperfecciones del material. 			

Figura 86. Cuestionario experimento 1 apartado 4.3.1

Sin embargo a pesar de todo, la breve descripción de la tarea contiene una pista implícita: los participantes son influenciados para emplear proyecciones pictóricas, en lugar de proyecciones multivista ortogonal.

El cuestionario incluye además, un marco rectangular de 15x11 cm, donde los participantes pudieran dibujar las representaciones de los objetos. Este marco de referencia en general permitió a los participantes organizar el espacio del papel, y conseguir así dibujos de tamaños parecidos.

Como parte del proceso experimental, también se recopiló información personal sobre los sujetos encuestados. Esta información en ningún momento comprometió el anonimato de los sujetos, y la información puede emplearse en la etapa de de análisis para correlacionar los resultados obtenidos con otra información como el nivel de estudios, campo de estudios, sexo y edad.

La mayoría de la población encuestada provenía de diferentes departamentos de la misma universidad, e incluía ingenieros industriales, mecánicos, arquitectos, diseñadores y artistas (formación en bellas artes). El nivel de experiencia oscilaba desde estudiantes universitarios hasta profesores. También se incluyó una muestra pequeña de participantes sin formación en dibujo técnico.

Finalmente se recopilaron un total de 147 cuestionarios. Distribuidos de la siguiente manera:

- 16 cuestionarios (10.88% del total) fueron realizados por sujetos sin formación universitaria. De éstos 16, 2 cuestionarios (12.5%) fueron cumplimentados por sujetos con una formación de secundaria hasta los 16 años. Otros 3 (18.75%) tenían un nivel de bachillerato. Los otros 11 sujetos (68.75%) tenían una formación con orientación profesional. El rango de edades oscilaba entre los 27 y los 66 años. Por sexos, 11 fueron hombres (68.75%) y 5 mujeres (31.25%).
- 73 cuestionarios (49.66%) fueron resueltos por estudiantes universitarios, 58 de los cuales (79.45%) estaban estudiando un grado de ingeniería (mecánica, tecnología...), 7 estudiaban arquitectura (9.59%), y 8 estaban cursando otros estudios universitarios (10.96%). Sus edades oscilaban entre los 18 y los 43 años. En este grupo 53 de los encuestados fueron hombres (72.6%) y 20 mujeres (27.4%).
- 58 cuestionarios (39.46%) fueron recopilados por sujetos con graduación universitaria o superior. 29 de ellos (50%) tenían una titulación de ingeniero, 14 (24.14%) estaban graduados en arquitectura, 8 (13.79%) tenían una formación artística vía estudios de diseño o de Bellas Artes, y 7 (12.07%) eran graduados en otros campos. Sus edades oscilaban entre los 26 y los 56 años. 35 fueron hombres (60.34%) y 23 mujeres (39.66%).

Respecto a la clasificación de resultados diremos que de los 147 cuestionarios recopilados, 20 (13.6%) fueron descartados por desacuerdos en la clasificación de los expertos. Otros 9 se descartaron por considerarse dibujos de muy mala calidad, y 7 por considerarse dibujos no pictóricos, es decir que no representan en una única vista las tres dimensiones del objeto representado.

Después del filtrado de cuestionarios, quedaron 111 bocetos válidos, de los cuales:

- 71 (63.96%) habían sido creados por diseñadores de producto (graduados y estudiantes de grado de carreras de ingeniería). Todos ellos fueron clasificados como dibujos axonométricos por los expertos.
- 26 (23.42%) de los bocetos válidos habían sido creados por diseñadores gráficos (graduados y estudiantes de grado de arquitectura, diseño y estudios artísticos). De éstos, 3 fueron clasificados por los expertos como dibujos con perspectiva central o cónica.
- Los 14 restantes (12.61%) habían sido dibujados por sujetos sin ninguna formación en dibujo.

Para comparar las proporciones obtenidas y analizar estadísticamente la independencia de las variables cualitativas que definen el ámbito del sujeto (ingeniero de producto o diseñador gráfico), y el empleo de convergencia en el dibujo (Sí o No), planteamos una tabla de contingencia:

	Convergencia Sí	Convergencia No	Totales marginales
Ing producto	0 (a1)	71 (a2)	71 (Na)
Diseñador gráfico	3 (b1)	23 (b2)	26 (Nb)
Totales marginales	3 (N1)	100 (N2)	103 (T)

Tabla 32 *Tabla de contingencia entre el ámbito de los encuestados y el empleo de convergencia*

Las frecuencias esperadas de cada casilla se obtienen del siguiente modo:

E11	$(Na \cdot N1)/T = 71 \cdot 3/103 = 2.067$
E12	$(Nb \cdot N1)/T = 26 \cdot 3/103 = 0.76$
E21	$(Na \cdot N2)/T = 71 \cdot 100/103 = 58.93$
E22	$(Nb \cdot N2)/T = 26 \cdot 100/103 = 25.24$

Tabla 33 *Frecuencias esperadas*

Puesto que una de las muestras no es numerosa ($Nb < 30$) y que algunas frecuencias esperadas tienen un valor igual o inferior a 2, aplicamos el test de Fisher. La hipótesis nula H_0 plantea la independencia de las dos variables de estudio, es decir en este caso verificaremos si la variable ámbito es independiente del uso de convergencia al bocetar.

El test exacto de Fisher se basa en evaluar la probabilidad asociada a cada una de las tablas 2 x 2 que se pueden formar manteniendo los mismos totales marginales de filas y columnas que los de la tabla observada. Dicha probabilidad se calcula a partir de la expresión:

$$p = \frac{Na! Nb! N1! N2!}{T! a1! a2! b1! b2!}$$

En la tabla siguiente se muestran las probabilidades de todas las tablas de contingencia 2x2 que se pueden obtener sin variar los totales marginales. La primera fila (tabla 1) muestra la probabilidad para nuestra Tabla 32 de referencia.

	a1	a2	b1	b2	p
Tabla 1	0	71	3	23	0.0176
Tabla 2	1	70	2	24	0.1565
Tabla 3	2	69	1	25	0.4382
Tabla 4	3	68	0	26	0.3876

Tabla 34 Probabilidades de las tablas de contingencia derivadas 2x2

El valor p de Fisher se calcula sumando aquellas probabilidades iguales o inferiores a la probabilidad de la tabla observada (Tabla 32), en este caso $p = 0.0176$, y no hay otro caso con una probabilidad igual o menor. Por lo tanto como el valor p obtenido es pequeño ($p < 0.05$) rechazamos la hipótesis nula de independencia, asumiendo por tanto que ambas variables están asociadas estadísticamente.

Del mismo modo, para analizar la independencia entre las variables “dificultad del modelo” y “existencia de convergencia”, planteamos la siguiente tabla de contingencia en la que describimos el modelo 1 (prismático) como modelo sencillo, y los modelos 2 y 3 como modelos complejos. Los resultados observados son los reflejados en la Tabla 35.

	Convergencia Sí	Convergencia No	Totales marginales
Mod. sencillo	3 (a1)	36 (a2)	39 (Na)
Mod. complejo	0 (b1)	72 (b2)	72 (Nb)
Totales marginales	3 (N1)	108 (N2)	111 (T)

Tabla 35 Tabla de contingencia entre la complejidad del modelo y el empleo de convergencia

Con las frecuencias esperadas:

E11	$(Na \cdot N1) / T = 39 \cdot 3 / 111 = 1.054$
E12	$(Nb \cdot N1) / T = 39 \cdot 108 / 111 = 37.95$
E21	$(Na \cdot N2) / T = 72 \cdot 3 / 111 = 1.95$
E22	$(Nb \cdot N2) / T = 72 \cdot 108 / 111 = 70.05$

Tabla 36 Frecuencias esperadas

Como algunas de ellas poseen un valor inferior a 2, aplicamos de nuevo el test de Fisher. El cálculo de las probabilidades de las tablas de contingencia 2x2 derivadas viene reflejada en la siguiente tabla donde el resultado de referencia (Tabla 35) viene reflejada en la primera fila (tabla 1):

	a1	a2	b1	b2	p
Tabla 1	3	36	0	72	0.041
Tabla 2	2	37	1	71	0.2405
Tabla 3	1	38	2	70	0.4494
Tabla 4	0	39	3	69	0.2689

Tabla 37 Probabilidades de las tablas de contingencia derivadas 2x2

Para obtener la p de Fisher hay que sumar de la Tabla 37 aquellas probabilidades iguales o inferiores a la probabilidad de la tabla observada (Tabla 35), en este caso $p = 0.041$, vemos que no se da otro caso en la tabla de probabilidad igual o inferior. En este caso, el valor obtenido es inferior a 0.05 por lo que podemos rechazar la hipótesis nula de independencia, asumiendo que la complejidad del modelo influye en el empleo de convergencia al bocetar, sin embargo,

como la probabilidad obtenida se encuentra cerca del límite de aceptación. Sería conveniente realizar un experimento específico para revalidar este resultado.

Caso 2

La obtención de dibujos lineales a partir de las imágenes escaneadas se realizó mediante una vectorización manual. Para ello, en primer lugar, se identificaron las posiciones de los vértices, y a continuación se dibujaron las aristas como nuevas líneas trazadas de vértice a vértice.

En la mayoría de los casos, la localización de los vértices estaba claramente definida por la intersección entre dos o más segmentos tal y como se muestra en la Figura 87 (a).

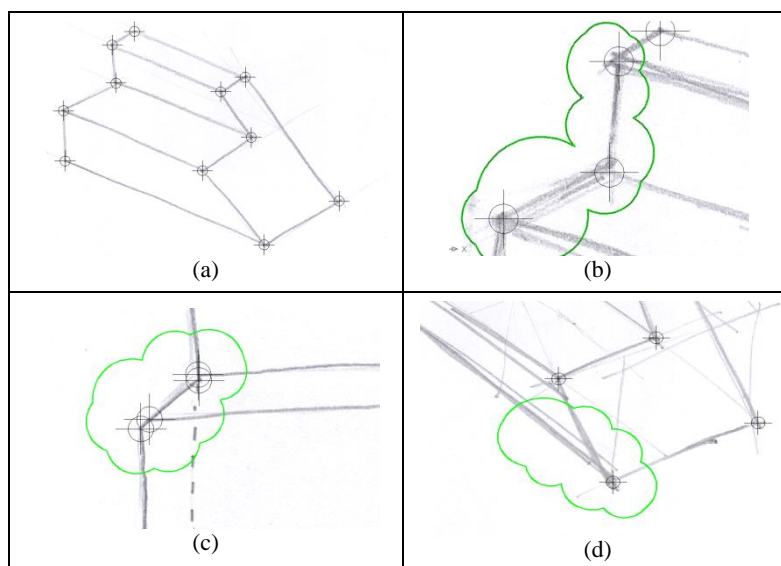


Figura 87. Vértices definidos por puntos de intersección

Sin embargo, hubo casos en los que la localización era más difícil de precisar:

- En los casos de sobretrazado, como en la Figura 87(b), se producían diferentes intersecciones entre diferentes líneas. En estos casos, se definieron las posiciones de los vértices como la intersección de los ejes medios de cada segmento.
- En otros casos, como en la Figura 87(c), las intersecciones entre varias líneas que se supone que debían coincidir en el mismo vértice, se encontraban suficientemente separadas como para considerarlas como vértices diferentes. En nuestro procedimiento, decidimos unificar cualquier pareja de vértices que distaran entre sí una longitud inferior al 3.5% de la arista más pequeña que intersectara en dichos vértices.
- Por último, algunos participantes, emplearon líneas auxiliares para hacer el esqueleto del objeto que se entremezclaban con las líneas pictóricas, como se representa en la Figura 87(d). Asumimos que las líneas gruesas son líneas pictóricas y que líneas finas son las líneas del esqueleto, y por lo tanto, para buscar la posición de los vértices sólo se tuvieron en cuenta las intersecciones de las líneas pictóricas.

Una vez todos los vértices fueron definidos, se redibujaron las líneas pictóricas en diferentes colores, dependiendo de las direcciones (Figura 51, replicada de nuevo en este mismo apartado). Las líneas ocultas también se vectorizaron, ya que también representan aristas del dibujo, pero no así líneas auxiliares como los ya mencionados ejes y esqueletos del dibujo.

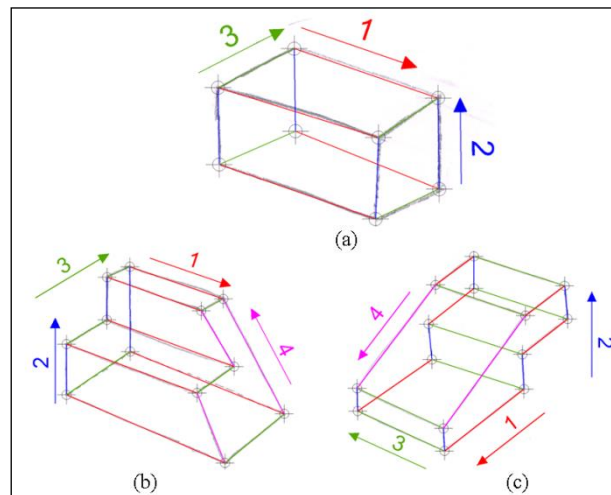


Figura 51. Dibujos lineales, vectorizados manualmente

Caso 3

La colección de dibujos del experimento reflejados en la Figura 54, se recopilaron de ejercicios típicos docentes de asignaturas de diseño en grados de ingenierías. Los bocetos seleccionados tenían que cumplir las siguientes características:

- Tenían que ser sencillos, sin contener elementos característicos innecesarios que pudieran desviar la atención.
- Debían ser representativos de formas que generalmente se empleen en bocetos de procesos de diseño.
- Debían representar formas poliédricas, empleando representaciones tanto de modelo de alambre como dibujo natural.
- Debían ser dibujos con perspectiva cónica, y representar diferentes variedades de perspectiva cónica (de uno, dos, tres puntos de fuga).
- Algunos de ellos debían contener puntos de fuga oblicuos.

La primera tarea de los sujetos encuestados fue encontrar y señalar los puntos de fuga de un boceto dado. El cuestionario constaba de una breve explicación de la tarea, un ejemplo visual (Figura 88) y dos de los bocetos seleccionados aleatoriamente.

La segunda tarea consistía en que los sujetos etiquetaran las líneas del dibujo según formaran parte de un mismo grupo de líneas paralelas a una dirección. De esta manera obtuvimos información sobre por qué algunos puntos de fuga no fueron señalados, ¿eran puntos de fuga dudosos, o el grupo de líneas se percibió como no convergentes?

La mayoría de los sujetos encuestados provenían de diversos departamentos de la misma universidad, e incluían ingenieros mecánicos, eléctricos e industriales, arquitectos, diseñadores y artistas. El nivel de experiencia oscilaba entre estudiantes y profesores de la universidad. De los 149 participantes, 92 (61.7%) eran ingenieros, 23 (15.4%) eran arquitectos, 20 (13.4%) tenían conocimientos artísticos, y 14 (9.4%) eran estudiantes no universitarios con formación en dibujo técnico.

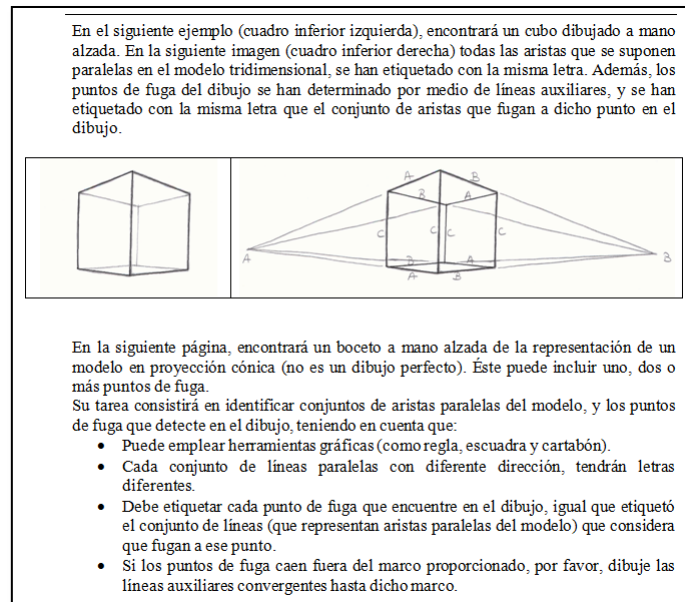


Figura 88. Cuestionario del experimento de puntos fuga

Tras analizar los resultados, no se comprobaron diferencias significativas entre los diferentes grupos de sujetos, por lo tanto en los siguientes análisis se trató a los sujetos como un único grupo homogéneo para el estudio.

En el experimento se emitieron 298 cuestionarios, de los cuales se resolvieron 291. En la siguiente etapa, se filtraron los cuestionarios que no transmitían resultados coherentes. Los errores más comunes fueron debidos a:

- La mala interpretación del concepto de puntos de fuga, marcando puntos de fuga erróneos que no correspondían a intersecciones de las líneas del dibujo (Figura 89 a).
- No comprender el dibujo como una representación de una forma 3D con aristas paralelas, marcando puntos de fuga erróneos en la intersección de líneas del dibujo que no representan aristas paralelas del objeto 3D representado (Figura 89 b).
- Otros cuestionarios fueron rechazados o parcialmente considerados ya que eran difíciles de interpretar (Figura 89 c). La mayoría de estos casos se dieron con el ejemplo 15.

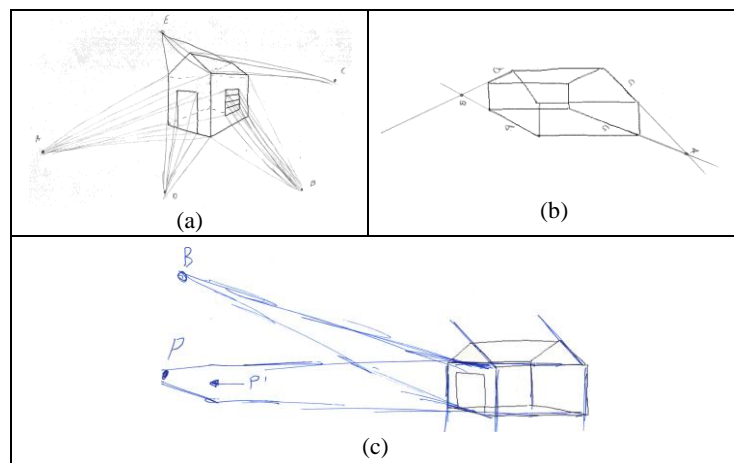


Figura 89. Puntos de fuga erróneos

Después de este filtrado, del total de los 291 dibujos recopilados, se mantuvieron 266 dibujos de respuestas coherentes. De los cuales, en 7 explícitamente se indicó la no existencia de puntos de fuga, de estos 7 dibujos, 4 pertenecían al ejemplo 18, 2 al ejemplo 15 y un dibujo era del ejemplo 11.

Caso 4

Al superponer los dibujos para ubicar los puntos de fuga, advertimos de paso que en 4 de los cuestionarios donde el objeto se representa como un dibujo natural, los sujetos dibujaron las líneas ocultas para localizar los puntos de fuga. Esto demuestra que supieron interpretar el dibujo, pero no se sentían capaces de fijar la ubicación del punto de fuga con precisión. En la Figura 90 (dibujo 12) muestra cómo uno de los sujetos encuestados traza líneas ocultas para ubicar un punto de fuga que se corresponde

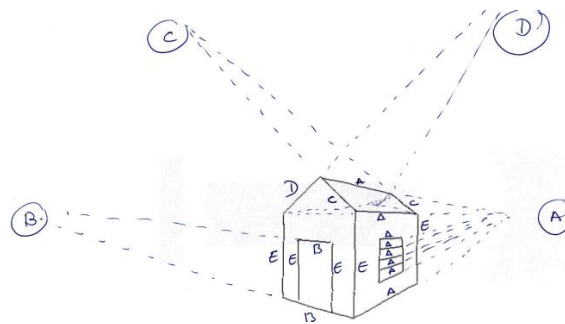


Figura 90. Líneas ocultas para ubicar los puntos de fuga del dibujo 12.

Analizando los cuestionarios, observamos que para superar las imperfecciones de los bocetos y encontrar la posición más apropiada de los puntos de fuga, los sujetos emplearon una de las siguientes tres estrategias:

- Algunos de los sujetos seleccionaron las líneas más representativas del grupo y las emplearon para encontrar los puntos de fuga. Para seleccionar estas líneas, a su vez, emplearon las siguientes estrategias: (a) seleccionar las líneas más externas del grupo (es decir aquéllas entre las que se encuentran todas las líneas del grupo, como en la Figura 91 a), (b) descartar las líneas más cortas del grupo (Figura 91 b) o las líneas más erráticas (Figura 91 c); o (c) simplemente estimar a una localización aproximada empleando un conjunto aleatorio de líneas (Figura 91 d).

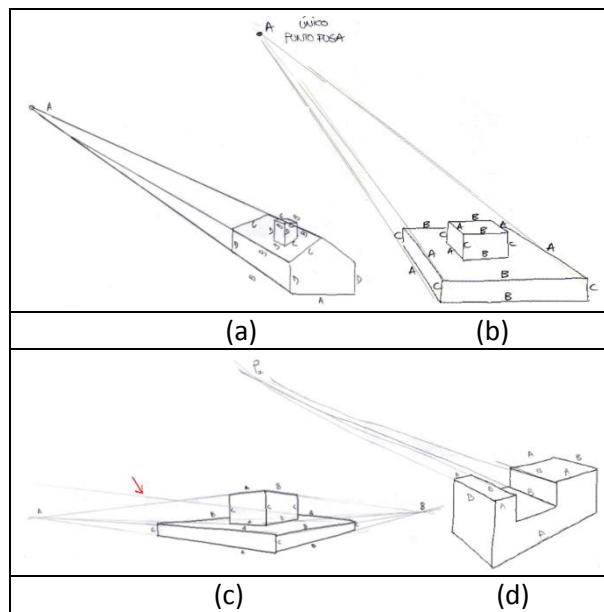


Figura 91. Estrategias para seleccionar la ubicación más probable de los VPs

- Algunos sujetos calcularon más de una localización para el mismo punto de fuga. Estos sujetos identificaron la convergencia de dos maneras: (a) por medio de una nube de puntos creados por la intersección de las líneas del mismo grupo (Figura 92 a), o (b) definiendo diferentes grupos de líneas que pertenecen a la misma dirección (Figura 92 b, c y d).

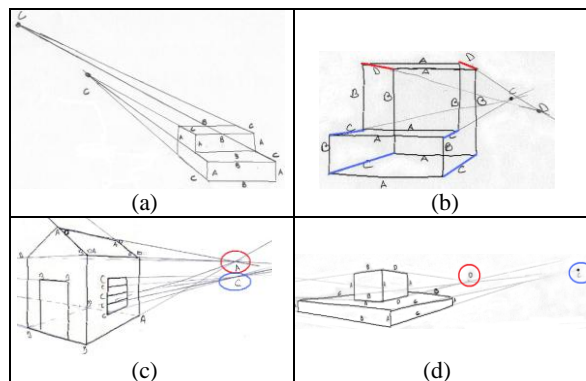


Figura 92. Nube de puntos para la definición de puntos de fuga

- En otros casos, los sujetos parecían detectar convergencia pero no localizaron ningún punto de fuga.

Caso 5

En la siguiente tabla se representan todos los parámetros calculados para cada dibujo y cada dirección. Los resultados se muestran en orden decreciente de frecuencia de detección de convergencia:

Dib.	Direc.	Det	AD	Disp	DRC	LeD	NL	LoD
3	1	100.00	16.99	27.54	3.15	12.61	3	7.23
4	1	100.00	27.95	51.92	2.19	1.91	6	4.76
5	1	100.00	15.25	45.26	3.46	14.46	7	37.17
6	1	100.00	31.67	35.54	2.03	3.34	6	6.85
9	1	100.00	51.51	50.89	1.69	7.44	6	50.18
12	1	100.00	41.24	22.31	1.91	8.98	8	10.69
13	1	100.00	23.73	32.11	1.72	12.19	5	20.11
16	2	100.00	17.42	23.30	3.18	1.67	5	7.04
17	1	94.74	16.12	44.48	3.66	9.33	4	9.99
8	2	94.44	15.23	46.23	4.70	1.58	5	5.06
2	2	94.12	24.65	26.51	2.16	12.09	6	22.61
7	2	93.75	16.85	39.22	3.70	11.47	3	7.66
1	2	93.33	16.35	39.05	3.46	4.39	5	14.87
10	2	92.86	16.32	96.48	4.00	13.19	7	26.21
13	2	92.31	14.21	36.53	2.11	20.59	5	25.36
6	2	85.71	15.12	30.89	2.93	8.95	6	22.06
17	3	84.21	21.27	200.23	3.53	2.43	4	12.89
5	2	84.21	26.42	78.50	2.82	0.95	6	14.84
14	1	83.33	13.57	40.21	3.02	8.37	6	16.51
6	3	78.57	21.04	86.08	4.18	6.30	5	29.35
11	2	77.78	7.24	25.93	3.11	5.15	2	4.82
4	2	76.92	27.29	194.10	1.64	5.11	6	27.50
12	2	76.47	12.20	33.43	3.14	11.17	2	13.92
7	4	75.00	17.07	62.57	3.92	4.18	4	5.38
14	3	75.00	44.09	20.41	1.75	0.94	6	90.77
3	2	72.22	15.31	224.17	3.39	1.67	3	14.74
8	1	72.22	14.05	161.48	5.94	4.84	5	14.88
10	4	71.43	16.45	26.16	2.38	6.73	3	7.32
7	1	68.75	33.87	12.41	2.33	2.73	4	5.26
18	3	68.75	19.70	63.05	3.49	4.63	8	61.74
17	4	68.42	5.95	68.31	4.82	3.57	2	0.67
3	4	66.67	8.52	44.61	4.22	2.27	2	0.60
15	2	57.14	6.23	86.23	4.19	6.14	3	14.47
1	1	46.67	1.55	545.13	8.02	2.67	5	6.09
11	4	44.44	8.93	20.18	5.63	2.44	2	5.33
15	5	42.86	3.90	164.41	7.14	1.41	2	4.62
12	4	35.29	6.10	15.12	3.31	4.26	2	7.94
1	3	33.33	6.36	197.15	4.61	2.12	5	18.98
11	5	33.33	1.62	113.02	7.52	2.60	2	9.45
17	2	31.58	4.60	479.19	1.99	2.61	4	14.12
15	1	28.57	1.06	0.00	18.07	1.47	5	2.73
15	3	28.57	2.12	1429.85	20.07	2.38	6	21.68
15	4	28.57	2.29	0.00	16.70	0.61	2	1.91
2	3	23.53	7.03	144.20	2.52	1.46	6	92.01
11	1	22.22	1.92	0.00	1.79	4.09	5	2.43
2	1	17.65	3.82	745.68	12.49	21.37	6	83.56
18	2	12.50	4.18	0.00	1.78	24.38	8	9.63
14	2	8.33	1.54		3.38	19.12	6	19.98
9	2	7.14	1.17		4.15	5.73	6	8.66
10	1	7.14	5.29		2.31	13.76	3	30.75
16	1	6.67	3.73		5.76	7.29	5	23.03
7	3	6.25	3.26		12.89	4.67	4	10.96
18	1	6.25	5.89		2.41	29.39	8	16.92
12	3	5.88	1.61		2.18	9.51	7	17.04
12	5	5.88	0.00		3.26		1	
3	3	5.56	1.71		10.14	2.60	3	19.86
5	3	5.26	4.08		4.71	6.71	6	17.25
4	3	0.00	1.88			8.98	6	43.72
8	3	0.00	1.91			4.49	5	17.59
9	3	0.00	1.76			8.11	6	26.04
10	3	0.00	2.82			2.52	6	30.36
10	5	0.00	0.00				1	
11	3	0.00	1.76			1.53	4	35.24
13	3	0.00	3.27			4.88	6	252.70
16	3	0	2.05			8.16	5	28.28

Tabla 38 Parámetros que influyen en la percepción de convergencia

Hipótesis 1:

A partir de la Tabla 38, se puede comprobar que para aquellas direcciones para las que $\text{Det} > 75\%$, el valor mínimo de AD es 7.24° (dibujo 11 dirección 2, o Figura 93 a). Este valor puede emplearse como un valor umbral mínimo, particularmente porque se encuentra cerca del máximo valor umbral de 8° propuesto en el apartado 4.3.2. Sin embargo, en el análisis cualitativo de la primera hipótesis, se comprobó que el dibujo 11 poseía algunos resultados dudosos. Si excluimos este resultado, encontramos un valor umbral mínimo más conservador de $\text{AD} = 12.2^\circ$ (dibujo 12 dirección 2, o Figura 93 b).

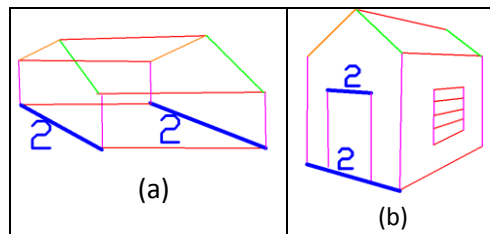


Figura 93. Dibujos 11 y 12

Considerando los casos dudosos de la Tabla 38 (es decir, aquéllos detectados entre el 50-75%), observamos que tres de ellos (boceto 17 dirección 4, dibujo 3 dirección 4 y dibujo 15 dirección 2) tienen valores de AD cercanos a 8° , tal y como se predijo con el criterio anterior. Sin embargo, otros casos como el dibujo 3 dirección 2 (Figura 94 a), el dibujo 8 dirección 1 (Figura 94 b), el dibujo 10 dirección 4 (Figura 94 c), el dibujo 7 dirección 1 (Figura 94 d) y el dibujo 18 dirección 3 (Figura 94 e), tienen un AD superior a 12° , que de acuerdo con nuestro criterio, deberían alentar a los sujetos a percibirlos como convergentes sin ninguna ambigüedad. Observamos que todas estas direcciones son las que contienen las líneas más cortas de sus dibujos respectivos (a veces junto a líneas de longitud media), y además son grupo de poca densidad de líneas (es decir, no sólo tienen un número de líneas bajo—3 o 4 líneas, excepto el dibujo 8, que tiene 5 líneas en la dirección 1—sino que éstas están dispersas por todo el dibujo en vez de concentradas o agrupadas). Esta observación parece reforzar nuestra tercera hipótesis según la cual, las longitudes de las líneas influyen la percepción de sus convergencias.

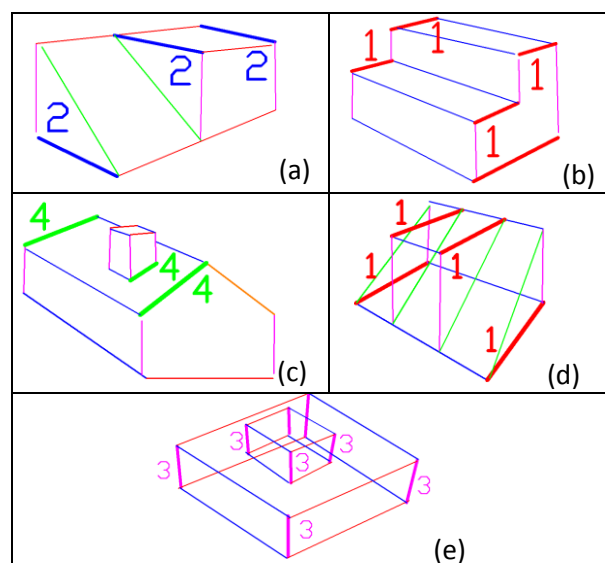


Figura 94. Dibujos y direcciones

Hipótesis 2:

A partir de la Tabla 38, se puede observar que para aquellos puntos de fuga detectados por todos los sujetos (Det = 100), el valor de DRC varía entre 1.6 y 3, excepto en aquellos casos donde el grupo de líneas incluye las líneas más largas del dibujo (dibujo 3 dirección 1, dibujo 5 dirección 1, dibujo 16 dirección 2), en los que la longitud de las líneas parece alentar a los sujetos a localizar los puntos de fuga más lejanos, y el valor de DRC sube hasta 3.46. Estas ubicaciones corresponden con valores pequeños o medianos de *dispersión* de la nube de puntos (con un valor de Disp entre 22.31% y 51.92%), lo que indica que los sujetos coincidieron al localizar los puntos de fuga dentro de un área pequeña.

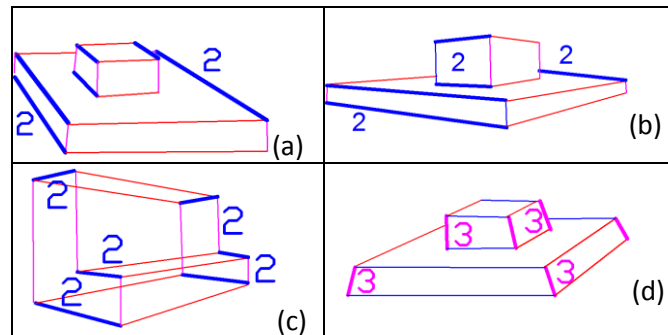


Figura 95. Dibujos y direcciones

Para Det en el rango entre 99-75%, el valor de DRC se encuentra entre en el rango de 3 a 5. La excepción son aquellos ejemplos que son inciertos o tienen un valor de DRC ligeramente inferior a 3. Tanto en el dibujo 2 dirección 2 (Figura 95 a), como en el dibujo 13 dirección 2 (Figura 95 b), la diferencia de longitudes de línea es evidente, y las líneas más cortas forman un grupo visual distinto del que forman las líneas largas. Otras excepciones son el dibujo 4 dirección 2 (Figura 95 c), dibujo 14 dirección 3 (Figura 95 d), dibujo 6 dirección 2 y dibujo 5 dirección 2 en los que las líneas cortas y medianas se encuentran dispersas por el dibujo.

Los casos con una detección inferior al 50% generalmente tienen valores de DRC superiores a 5, excepto el dibujo 12 dirección 4 (que contiene únicamente dos líneas en una dirección oblicua, Figura 96 a), el dibujo 1 dirección 3 (Figura 96 b), dibujo 17 dirección 2 (Figura 96 c) y el dibujo 2 dirección 3 (Figura 96 d), que contienen líneas cortas y medianas muy dispersas en el dibujo.

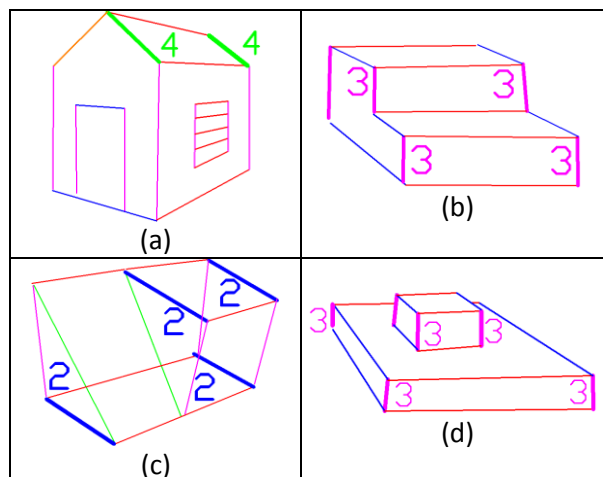


Figura 96. Dibujos y direcciones

Los casos con una detección inferior al 50% también poseen generalmente un valor de Disp superior al 100%, excepto en dos casos de direcciones oblicuas: el dibujo 11 dirección 4 y el dibujo 12 dirección 4 (Figura 96 a), donde los sujetos parecen alcanzar un acuerdo sobre las localizaciones.

No se han considerado aquellos casos con muy baja densidad de nube de puntos, ya que la información es insuficiente para extraer cualquier conclusión significativa. Por ejemplo, la cercanía del centroide de la nube de puntos al dibujo en el dibujo 11 dirección 1 (Figura 97) es claramente irrelevante.

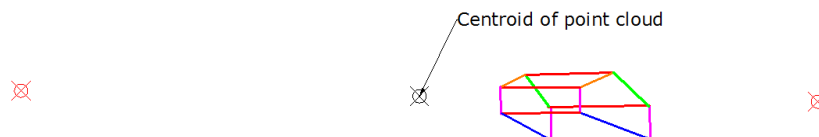


Figura 97. Nube de puntos para el dibujo 11 dirección 1.

Hipótesis 3

De acuerdo a la Tabla 38 los valores de LoD superiores a 70 (líneas cortas muy dispersas en el dibujo), los sujetos parecen seguir los criterios descritos en las hipótesis anteriores, y los parámetros AD y DRC reflejan la respuesta de la percepción humana.

Valores de LoD por debajo de 5 pueden ser el resultado de un grupo de líneas largas con una posición homogénea en el dibujo (como describe la Figura 98). Sin embargo, un valor bajo también puede ser debido a un grupo de líneas poco numeroso, hecho que distorsiona la medida de la desviación estándar. Para grupos de menos de 4 líneas, este parámetro puede no dar información fidedigna.

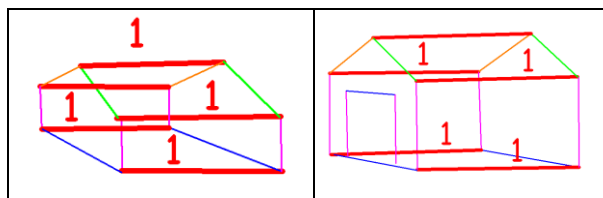


Figura 98. Dibujos 11 y 15 con un valor de LoD bajo

Valores de LoD entre 5-70 parece influenciar la percepción humana de dos maneras diferentes:

- A veces el grado de detección es ligeramente diferente a aquél predicho por los parámetros AD y DRC—por ejemplo, en el dibujo 18 dirección 3 (Figura 94 e), parece que a pesar de tener un AD superior a 12, la separación entre líneas, que además representan las líneas más cortas del dibujo, impide a los humanos percibir la convergencia (el 25% de los sujetos que se trataba de un dibujo axonométrico).
- Otras veces el grado de acuerdo sobre la posición del punto de fuga disminuye, lo que da lugar a valores superiores de Disp.

La Tabla 39 es una sub-tabla de la Tabla 38 reordenada en orden descendiente de Disp. A partir de esta tabla se observa que valores muy altos de Disp (Disp > 500) parece que se corresponden con grupos de de aristas bastante paralelos (AD < 4). Valores de Disp en el rango

(100 hasta 500) parecen ser una combinación de efectos entre un grupo de líneas no numeroso ($NL \leq 3$), y/o una alta dispersión de la posición de líneas LoD € (5, 70).

Dibujo	Dirección	Det	AD	Disp	DRC	LeD	NL	LoD
15	3	28.57	2.12	1429.85	20.07	2.38	6	21.68
2	1	17.65	3.82	745.68	12.49	21.37	6	83.56
1	1	46.67	1.55	545.13	8.02	2.67	5	6.09
17	2	31.58	4.60	479.19	1.99	2.61	4	14.12
3	2	72.22	15.31	224.17	3.39	1.67	3	14.74
17	3	84.21	21.27	200.23	3.53	2.43	4	12.89
1	3	33.33	6.36	197.15	4.61	2.12	5	18.98
4	2	76.92	27.29	194.10	1.64	5.11	6	27.50
15	5	42.86	3.90	164.41	7.14	1.41	2	4.62
8	1	72.22	14.05	161.48	5.94	4.84	5	14.88
2	3	23.53	7.03	144.20	2.52	1.46	6	92.01
11	5	33.33	1.62	113.02	7.52	2.60	2	9.45
10	2	92.86	16.32	96.48	4.00	13.19	7	26.21

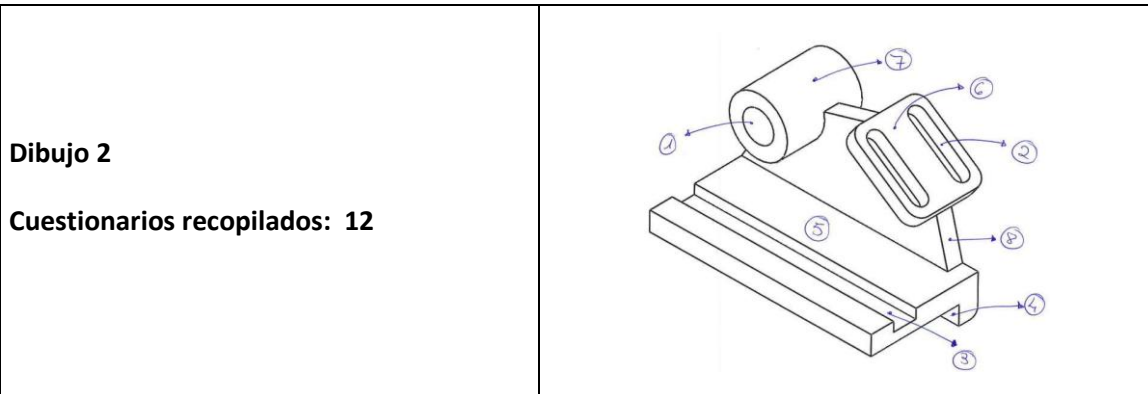
Tabla 39 Direcciones de fuga percibidas

Anexo III: Experimentos de la etapa de reconocimiento de elementos característicos 2D

Caso 1

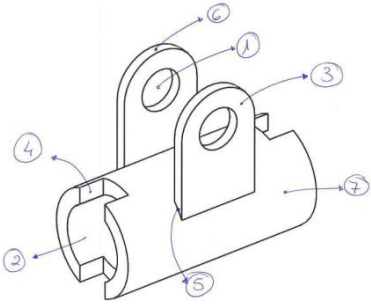
A continuación se presentan los resultados detallados del experimento #1 del apartado 5.3.1. Cada dibujo o ejemplo se acompaña de una tabla resumen en el que se detalla el % de veces que cada elemento característico fue percibido. Las denominaciones (y % de coincidencias) que los sujetos dieron a cada elemento característico, y la función asignada (si la dieron, y el % de coincidencias) a cada uno de ellos.

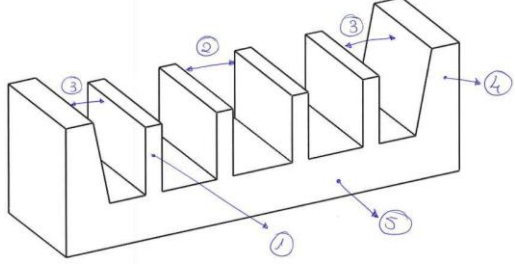
Elem			Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1			12	100	Chavetero	6	50,0	Transmisión de movimiento (giro)	8	66,7
					Ranura	5	41,7	Fijación de poleas, engranajes	2	16,7
					Encaje	1	8,3	Fijación de eje, bloqueo de giro	1	8,3
					Vaciado	1	8,3	Acoplamiento y guía de posicionamiento	1	8,3
2			12	100	Chavetero	9	75,0	Transmisión de movimiento (giro)	9	75,0
					Ranura	1	8,3	Fijación de piezas, bloqueo movimiento	1	8,3
					Ranurado ciego	1	8,3	Fijación de poleas, engranajes	2	16,7
					Encaje	1	8,3			
					Cajeado	1	8,3			
3			3	25	Rebaje	2	66,7	Encajar piezas	2	66,7
					Cambio sección	1	33,3	Limitación de desplazamiento lateral de la pieza	1	33,3
4			7	58	Eje	4	57,1	Transmisión de movimiento	2	28,6
					Muñón	1	14,3	Acoplamiento en otros elementos (rodamientos)	2	28,6
					Superficie saliente	1	14,3	Apoyo en otra pieza	1	14,3
					Rebaje	1	14,3	Ajuste agujero-eje	1	14,3
					Ranurado cilíndrico	1	14,3	Posicionamiento radial y axial	1	14,3
5			2	17	Eje	1	50,0	Ajuste agujero-eje	1	50,0
					Cilindro base	1	50,0	Posicionamiento radial	1	50,0



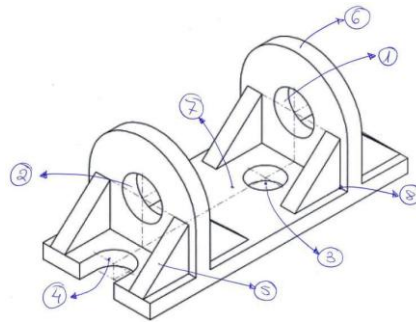
Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	12	100	Cilindro hueco	1	8,3	Alojar eje o cilindro	3	25,0
			Taladro	5	41,7	Acoplar/Unir/Fijar piezas	6	50,0
			Agujero	5	41,7	Posicionamiento relativo del eje	1	8,3
			Soporte eje	1	8,3			
2	11	91,67	Ranura	5	45,5	Fijar/Encajar a otra pieza	7	63,6
			Corredera	1	9,1	Permitir holgura o movimiento limitado para regular o posicionar piezas	4	36,4
			Guías	2	18,2			
			Taladros fresados	1	9,1			
			Ojales de ajuste	1	9,1			
			Chaveteros	1	9,1			
3	12	100	Cajeado	1	8,3	Fijación de pieza	1	8,3
			Ranura	6	50,0	Encajar/Acoplar/Alojar piezas	3	25,0
			Acanaladura	1	8,3	Permitir deslizamiento entre piezas complementarias	7	58,3
			Guía	2	16,7	Impedir movimiento transversal	1	8,3
			Chavetero	1	8,3			
			Vaciado	1	8,3			
4	8	66,7	Rebaje	4	50,0	Acoplar pieza	6	75,0
			Tope	2	25,0	Evitar desplazamientos laterales	1	12,5
			Saliente	1	12,5	Posicionamiento	1	12,5
			Escuadra					
			posicionamiento	1	12,5			
5	2	16,7	Base	1	50,0	Para poder alojar una pieza en su superficie	2	100
			Soporte	1	50,0			
6	5	41,7	Base	1	20,0	Encajar otra pieza	2	40,0
			Plataforma	1	20,0	Soporte ranuras colisas	3	60,0
			Saliente	1	20,0			
			Chapa saliente	1	20,0			
			Protusión	1	20,0			
7	2	16,7	Pivote cilíndrico	1	50,0	Para alojar agujero	2	100
			Cilindro base	1	50,0			
8	2	16,7	Cartela de soporte	1	50,0	Soportar elementos	1	50,0
			Nervio	1	50,0	Orientarlos	1	50,0

Dibujo 3			Cuestionarios recopilados: 11					
Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	10	90,9	Bulones	1	10,0	Acoplar/Encajar dos piezas	3	30,0
			Dientes	2	20,0	Centrado de la pieza de encaje	4	40,0
			Pivotes	4	40,0			
			Salientes	1	10,0			
			Protuberancias	1	10,0			
			Cilindros	1	10,0			
2	10	90,9	Saliente	3	30,0	Montaje/Acoplamiento entre piezas	6	60,0
			Mechón	1	10,0	Unión entre piezas	1	10,0
			Pestaña	1	10,0	Transmisión de giro	2	20,0
			Chaveta	1	10,0	Posicionamiento a giro	1	10,0
			Elemento unión	1	10,0			
			Orejas con pivote	1	10,0			
			Lengüeta	1	10,0			
			Protusión	1	10,0			
3	1	9,09	Taladro	1	100,0	Fijación de pieza	1	100,0
4	3	27,3	Taladro	2	66,7	Alojamiento pieza	2	66,7
			Agujero pasante	1	33,3			
5	2	18,2	Acoplamiento rueda	1	50,0	Ajuste agujero-eje	1	50,0
			Base circular	1	50,0	Posicionamiento radial	1	50,0

Dibujo 4								
Cuestionarios recopilados: 12								
Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	9	75,00	Orificios	1	11,1	Fijación de piezas	3	33,3
			Taladros	4	44,4	Soporte/posicionado eje	4	44,4
			Huecos	1	11,1	Anclaje/elevación pieza	1	11,1
			Perforación	1	11,1	Permitir giro	1	11,1
			Agujero	2	22,2			
2	2	16,67	Hueco	1	50,0	Montaje/Acoplamiento entre piezas	1	50,0
			Taladro	1	50,0	Montaje sobre un eje	1	50,0
3	8	66,67	Orejas	4	50,0	Alojamiento/soporte de un eje	3	37,5
			Placas	1	12,5	Anclaje pieza	2	25,0
			Pestañas	1	12,5	Anclaje/elevación pieza	1	12,5
			Ojales de sujeción	1	12,5	Permitir una unión separada de la pieza principal	1	12,5
			Nervios	1	12,5	Alojamiento de agujeros	1	12,5
4	12	100,00	Cajeado	1	8,3	Acoplamiento entre piezas	9	75,0
			Ranura	6	50,0	Fijación/Impedir movimiento de giro	1	8,3
			Rebaje	2	16,7	Transmisión par	1	8,3
			Encaje	1	8,3	Localización radial	1	8,3
			Escote	1	8,3			
			Corte	1	8,3			
5	1	8,33	Rebaje	1	100,0	Para adoptar forma cilíndrica	1	100,0
6	1	8,33	Redondeo	1	100,0			
7	2	16,67	Tubo	1	50,0	Base de la construcción	1	50,0
			Cilindro	1	50,0			

Dibujo 5								
Cuestionarios recopilados: 12								
Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	8	66,7	Dientes	2	25,0	Disipar calor	2	25,0
			Aletas	2	25,0	Aligeración pieza	1	12,5
			Separador	1	12,5	Separación piezas	1	12,5
			Peine-guía	1	12,5	Cremallera	1	12,5
			Nervios	1	12,5	Dar rigidez a la pieza	1	12,5
			Rebajes en altura	1	12,5			
			2	6	50,0	Canales	1	16,7
Ranuras	3	50,0				Acoplamiento de pieza(s) complementaria(s)	3	50,0
Vaciados	1	16,7				Acoplamiento de engranajes	1	16,7
Cortes	1	16,7				Impedir movimiento transversal y permitir longitudinal	1	16,7
3	1	8,3	Ranuras con forma	1	100,0	Acoplamiento de pieza complementaria	1	100,0
4	2	16,7	Extremos soporte	1	50,0	Unión/Conexión	1	50,0
			Inclinación	1	50,0	Dar rigidez a la pieza	1	50,0
5	1	8,3	Base	1	100,0	Cuerpo o elemento de partida	1	50,0

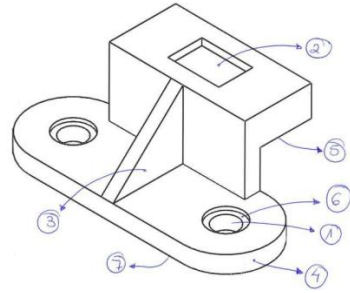
Elem		Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1		14	100	Agujero	5	35,7	Alojamiento de eje	9	64,3
				Alojamiento eje	1	7,1	Permitir giro de pieza alojada	2	14,3
				Eje	3	21,4	Fijación de pieza	1	7,1
				Taladros	4	28,6	Alojamiento de rodamientos/cojinetes	2	14,3
				Huecos	1	7,1			
2		13	92,86	Agujero	5	38,5	Alojamiento de eje	8	61,5
				Alojamiento eje	1	7,7	Permitir giro de pieza alojada	2	15,4
				Eje	2	15,4	Fijación de pieza	1	7,7
				Taladros	4	30,8	Alojamiento de rodamientos/cojinetes	2	15,4
				Huecos	1	7,7			
3		11	78,57	Agujero	6	54,5	Para fijar o acoplar a otra pieza	9	81,8
				Fijación bancada	1	9,1	Soporte de eje	1	9,1
				Taladro	3	27,3	Para transmisión (con engranaje)	1	9,1
				Hueco	1	9,1			
4		13	92,86	Muesca	2	15,4	Encajar o apoyar en otra pieza	4	30,8
				Agujero	2	15,4	Permitir holguras/regulación/posicionamiento	4	30,8
				Rebaje	1	7,7	Fijar a otra pieza	5	38,5
				Fijación bancada	1	7,7			
				Taladro	1	7,7			
				Ranura	3	23,1			
				Encaje	1	7,7			
				zona de anclaje	1	7,7			
				Taladro abierto	1	7,7			
5		10	71,43	Nervios	7	70,0	Refuerzo estructural	10	100
				Refuerzos triangulares	1	10,0			
				Rigidizadores	1	10,0			
				Cartela	1	10,0			
6		3	21,43	Redondeo	2	66,7	Evitar aristas	2	66,7
				Orejeta	1	33,3	Soporte eje	1	33,3
7		2	14,29	Plano	1	50,0	Soporte estructural	1	50,0
				Base	1	50,0	Apoyo o acople con otra pieza	1	50,0
8		1	7,14	Rebaje	1	100	Para pletinas	1	100



Dibujo 6

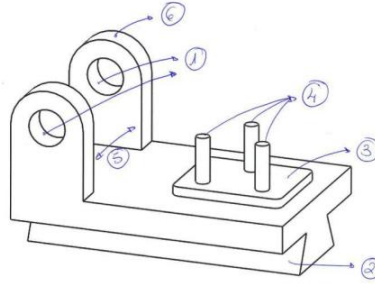
Cuestionarios recopilados: 14

Elem		Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1		12	85,7	Agujero	4	33,3	Fijación de pieza (preferentemente tornillería)	9	75,0
				Taladros	6	50,0	Ensamblaje	1	8,3
				Taladro avellanado	2	16,7	Para permitir paso cuerpo de un elemento de unión	1	8,3
2		14	100	Parte rebajada	1	7,1	Fijación de pieza	1	7,1
				ventana control visual	1	7,1	Apoyo/encaje con otras piezas	10	71,4
				Cajeteado	4	28,6	Deslizamiento entre piezas	1	7,1
				Hueco	3	21,4	Control visual de acoplamiento	1	7,1
				Ranura	2	14,3			
				Orificio	2	14,3			
				Cavidad	1	7,1			
3		9	64,3	Nervio	6	66,7	Refuerzo estructural	8	88,9
				Rigidizador	1	11,1	Reparto de esfuerzos	1	11,1
				Cartela	1	11,1			
				¿?	1	11,1			
4		1	7,1	Redondeo	1	100,0	Evitar cantos afilados o permitir acople	1	100,0
5		4	28,6	Presilla	1	25,0	Posicionar/encajar otra pieza	1	25,0
				Escalón	1	25,0	Apoyarse en otra pieza	2	50,0
				Escuadra	1	25,0			
6		9	64,3	Asiento cabeza tornillo	1	11,1	Alojar cabeza tornillo	5	55,6
				Rebaje	3	33,3	Ensamblaje (tornillería)	3	33,3
				Avellanado	4	44,4			
				Contrataladro	1	11,1			
7		3	21,4	Plano	1	33,3	Soporte estructural	1	33,3
				Base	2	66,7	Apoyo o acople con otra pieza	1	33,3

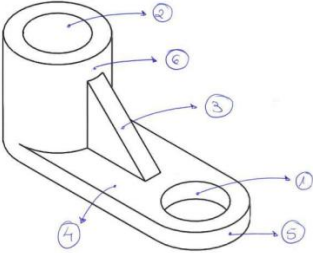


Dibujo 8

Cuestionarios recopilados: 14

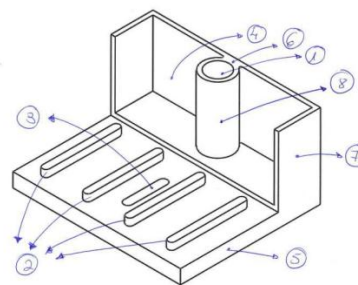


Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	13	92,86	Agujero	5	38,5	Alojamiento de eje	8	61,54
			Taladros	4	30,8	Permitir giro de pieza alojada	2	15,38
			Eje	3	23,1	Fijación de pieza	1	7,69
			Hueco	1	7,7	Alojamiento de rodamientos/cojinetes	2	15,38
2	13	92,86	Cola de milano	4	30,8	Encajar con otra pieza	1	7,69
			Protuberancia de forma	1	7,7	Ensamble con deslizamiento	11	84,62
			Soporte de carro	1	7,7			
			Guía	3	23,1			
			Macho	1	7,7			
			Ala de mosca	1	7,7			
			Base trapezoidal	1	7,7			
			¿??	1	7,7			
3	6	42,86	Base	2	33,3	Encaje/ensamble	2	33,33
			Base de tetones	1	16,7	Soporte	3	50,00
			Resalte	1	16,7			
			Cajetín	1	16,7			
			Soporte de encaje	1	16,7			
4	13	92,86	Pilones	1	7,7	Anclaje/ensamblaje de otra pieza	10	76,92
			Tetones	2	15,4	Posicionamiento de otra pieza	3	23,08
			Protuberancias cilíndricas	1	7,7			
			Pivotes	3	23,1			
			Cilindros	1	7,7			
			Bulones	2	15,4			
			Machos	1	7,7			
			Ejes	1	7,7			
			Espárragos	1	7,7			
			5	1	7,14			
6	3	21,43	Orejas	3	100	Alojamiento de un eje	1	33,33
						Limitador de espacio	1	33,33

Dibujo 9			Cuestionarios recopilados: 13					
								
Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	12	92,31	Agujero	5	41,7	Alojamiento de eje	3	25,0
			Taladros	4	33,3	Permitir giro de pieza alojada	2	16,7
			Alojamiento eje	1	8,3	Fijación de pieza	8	66,7
			Hueco	1	8,3	Zona de interrelación	1	8,3
			¿?	1	8,3			
2	11	84,62	Agujero	6	54,5	Alojamiento/acoplamiento de eje	10	90,9
			Guía	1	9,1	Permitir giro de pieza alojada	2	18,2
			Hueco	1	9,1	Fijación pieza	2	18,2
			Taladro	2	18,2	Guiado lineal de un eje	1	9,1
			¿??	1	9,1			
3	11	84,62	Nervio	8	72,7	Refuerzo estructural	8	72,7
			Cartela	1	9,1			
			Refuerzo	2	18,2			
			¿??	1	9,1			
4	4	30,77	Base	2	50,0	Soporte estructural	1	25,0
			Plano	1	25,0	Apoyo en otra pieza	1	25,0
			¿??	1	25,0	Distancia constante de giro	1	25,0
5	1	7,69	Orejeta	1	100	En este caso parecen para colocar una sujeción de una pieza	1	100
6	3	23,08	Cilindro	2	66,7	Alojamiento de un eje	1	33,3
			Pivote cilíndrico	1	33,3	Limitador de espacio	1	33,3

Dibujo 10

Cuestionarios recopilados: 14



Elem	Percibido	%perc	Denominación	Qty	%	Función descrita	Qty	%
1	14	100	Agujero	7	50,0	Alojamiento/acoplamiento de eje	6	42,9
			Taladro	3	21,4	Permitir giro de pieza alojada	2	14,3
			Alojamiento de un terminal	1	7,1	Fijación de pieza (o tornillería)	5	35,7
			Hueco	1	7,1	Zona de interrelación	2	14,3
			Eje	1	7,1	Alojamiento de un terminal, por ejemplo toma de tierra o masa.	1	7,1
			Guía	1	7,1	Guiado lineal de un eje	1	7,1
2	14	100	Partes que sobresalen	1	7,1	Encajar/Acoplar piezas	8	57,1
			Terminales eléctricos	1	7,1	Posicionamiento de pieza	2	14,3
			Protuberancias	1	7,1	Aumentar rigidez pieza	1	7,1
			Elementos fijación	1	7,1	Evitar deslizamiento	3	21,4
			Salientes	3	21,4	Permitir deslizamiento	1	7,1
			Resaltes	2	14,3	Unir dos partes de la carcasa	1	7,1
			Chavetas	2	14,3			
			Ranurados	1	7,1			
			Posicionador	1	7,1			
			Acoplamiento montaje	1	7,1			
3	14	100	Agujero no redondo	1	7,1	Encajar/Fijar a otra pieza	6	42,9
			Agujero	1	7,1	Posicionamiento de la base de un circuito	1	7,1
			Ranura	6	42,9	Ventilar	1	7,1
			Hueco	1	7,1	Unir dos partes de la carcasa	1	7,1
			Chavetero	2	14,3	Acoger eje con movimiento	1	7,1
			Taladro rasgado	1	7,1	Impedir movimiento relativo mediante chaveta	1	7,1
			Ranura colisa	2	14,3	Zona de interrelación	1	7,1
4	4	28,6	Hueco	1	25,0	Para encaje con otra pieza	2	50,0
			Vaciado	3	75,0	Cotener sustancia	1	25,0
						Característica geométrica	1	25,0
5	3	21,4	Base	1	33,3	Superficie para facilitar montaje y posicionamiento ensamblaje	2	66,7
			Plano	1	33,3			
			Superfice	1	33,3			
6	1	7,1	Nervio	1	100	Nervio	1	100
7	4	28,6	Tapa de cierre	1	25,0	Tapa de cierre de un enchufe, que además asegura su posicionamiento, impidiendo su rotación y haciendo que los terminales se conecten de forma unívoca.	1	25,0
			Nervio	1	25,0	Refuerzo	1	25,0
			Pared	1	25,0	Limitador de espacio	1	25,0
			Laterales	1	25,0	Lateral de encaje	1	25,0
8	1	7,1	Pivote cilíndrico	1	100	Unión, estilo bisagra	1	100