



Capítulo 2

**ESTADO DEL
ARTE.**

- ⊕ Metodologías de diseño
- ⊕ El diferencial semántico
- ⊕ El método Kano para la satisfacción del cliente
- ⊕ El análisis factorial
- ⊕ La ingeniería Kansei
- ⊕ Teoría de conjuntos difusos (fuzzy set theory)

2.1. METODOLOGÍAS DE DISEÑO.

*El propósito de hacer una recopilación de estas metodologías es hacer notoria la falta de mecanismos estructurados de identificación y análisis de las necesidades y su interpretación en términos de requerimientos de diseño. La fuente de estas necesidades, el **cliente**, usualmente comunica su **percepción** del problema, la cual tiene dos características fundamentales: primeramente se comunica en un lenguaje poco técnico y, por otro lado, la percepción del problema no siempre es equivalente a la necesidad **real**. La tendencia natural del diseñador es buscar soluciones para el problema percibido antes de comprender totalmente aquello que ha de ser diseñado. Esta predisposición, aunada a la falta de una definición apropiada de la tarea, puede conducir a que el diseñador desperdicie tiempo y recursos en la búsqueda de solución a un problema que no corresponde a una realidad¹.*

¹ La identificación y definición de la necesidad de mercado debe entenderse como un prerequisite para el desarrollo de productos (Kroll et al., 2001), debido a que su definición incorrecta enfoca la atención sobre aspectos no relevantes o soluciones a problemas inexistentes, o sea respuestas magníficas a preguntas que nadie formuló (Pugh, 1993).

2.1.1. Introducción.

Nuestro entorno está pleno de herramientas, utensilios, máquinas, edificaciones, mobiliario y otros muchos objetos mediante los cuales se satisfacen necesidades de todo tipo. De hecho, todas las cosas que nos rodean y que no tienen origen en la naturaleza han sido diseñadas por alguna persona; sin embargo, aunque hay una gran actividad de diseño a nivel mundial los mecanismos que utiliza la gente que realiza esta labor históricamente han sido poco comprendidos y estudiados.

Antes de intentar encontrar la racionalidad en el proceso de diseño de ingeniería, algunas opiniones y prejuicios -paradigmas- deben eliminarse radicalmente, entre ellas que (Hubka y Eder, 1996):

- El diseño es un arte y únicamente personas especialmente talentosas pueden ejecutar esta tarea.
- El diseño no es una actividad generalizable, sino que está siempre ligada a una actividad particular de diseño.

Como base para este trabajo de tesis, se retoman las premisas planteadas por Hubka:

- El diseño es una actividad racional (cognitiva), la cual puede dividirse en fases/etapas claramente diferenciadas y reconocibles.
- El proceso de diseño depende, de hecho, del objeto a ser diseñado, sin embargo puede ser estudiado y presentado en forma general. Aún esto, en clases particulares de diseño se puede lograr definir este proceso a un mayor nivel de detalle.

Estos dos planteamientos no implican que el proceso de diseño deba ser seguido linealmente o rigurosamente, sin dejar margen a la intuición y al sentido común. Al contrario, los mecanismos empleados en este proceso creativo deben ser lo suficientemente flexibles para poder ser adaptados al tipo de objeto de diseño, las características del diseñador y al ambiente en el cual se realiza la labor de diseño².

2.1.2. Definición del diseño.

² Christopher Jones (1981) señala: "...no confundir el diseño con un arte, con una ciencia o unas matemáticas. Es una actividad híbrida que depende para su ejecución con éxito, de una correcta combinación de las tres, y es más improbable su éxito si lo asociamos exclusivamente a una de estas tres especialidades..."

Algunos autores ofrecen interpretaciones de lo que es el diseño, y aún cuando algunas definiciones se enfocan a disciplinas específicas, la mayoría se formulan en términos generales. No obstante, se pueden encontrar dos formas de interpretar el sentido de este término: por un lado, la definición inicia con *diseñar es...*; otro tipo de definición inicia con *diseño como...* A continuación se presentan ejemplos del primer tipo:

- El diseño de ingeniería es el proceso de aplicar técnicas variadas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso, o un sistema a un nivel de detalle que permita su realización física. (Hubka, 1993)
- El diseño de un producto es mucho más que un dibujo. Primeramente, es un proceso de pensamiento dirigido a un objetivo específico mediante el cual se analiza un problema, se definen y ajustan objetivos, se formulan propuestas de solución y por último se realiza una evaluación de la calidad de estos planteamientos (Roozenburg y Eekels, 1995).
- La realización de un complejo acto de fe (Jones, 1981)

Algunos ejemplos del segundo tipo (*el diseño como...*) se relacionan con:

Un proceso cognitivo.	Un proceso iterativo.
Un proceso creativo.	Un proceso de aprendizaje.
Un proceso de toma de decisiones.	Un proceso de resolución de problemas.
Un proceso dialéctico.	Un proceso de reflexión – acción.
Un proceso dinámico.	Un proceso racional.
Un proceso exploratorio.	La refinación de representaciones abstractas.
Una actividad de procesamiento de información.	Un proceso social.

Tabla 2.1 Algunas definiciones de diseño.

2.1.3. La investigación en la ciencia del diseño.

Esta investigación de tesis se sitúa en el campo de la investigación en diseño, misma que en términos conceptuales se asocia con lo que se ha dado en llamar la ciencia del diseño, y a un nivel más práctico a la definición de metodologías de diseño. Nigel Cross (1996) establece una distinción entre estos términos:

Las metodologías de diseño incluyen el estudio de la manera de trabajar y pensar del diseñador, el establecimiento de las estructuras adecuadas para representar el proceso de diseño así como el desarrollo y aplicación de nuevos métodos y técnicas, aunada a la reflexión sobre la naturaleza y alcance del conocimiento con objeto de aplicarla a problemas de diseño.

Lo anterior es complementado por Roozenburg (1995), quien afirma que una metodología de diseño es el estudio científico de los métodos que son, o pueden ser aplicados al diseño; Es por esto, agrega, una actividad normativa que se puede catalogar estrictamente como un sub campo de la filosofía del diseño.

La ciencia del diseño (figura 2.1) se refiere a la aproximación al diseño como un proceso explícito, organizado, racional y sistemático; no solamente a la utilización del conocimiento científico de "artefactos", sino al diseño como una actividad científica en sí (Hubka y Eder, 1996). Es por esto, añade Hubka, que esta ciencia debe en consecuencia explicar las relaciones causales en su conjunto, planteando un sistema de conocimiento con terminología propia, clases (taxonomía), relaciones (incluyendo *inputs*, *throughputs*³, y *outputs*), leyes, teorías e hipótesis, con el fin de que esto sirva de guía para la actividad de diseño.



Figura 2.1. La ciencia del diseño vista como un sistema de información. Elaboración propia. Tomado y adaptado de Hubka y Eder (1996:72)

³ Definido según el diccionario Webster como: "The amount passing through a system from input to output" "la cantidad que pasa a través del sistema a partir de los insumos hasta obtener el producto (salida)"

2.1.4. La ciencia del diseño como vínculo entre las actividades de diseño.

La Ciencia del Diseño⁴, es un término que engloba tres disciplinas: la práctica del diseño, la educación en diseño y la investigación en diseño, actividades que son, en esencia, las tres áreas fundamentales en el mundo del diseño industrial. Estas áreas se vinculan entre si de esta manera (figura 2.2):

1. La investigación en diseño recibe información desde los campos de la educación y la práctica del diseño, desarrollando teorías y soporte teórico para uso futuro en la educación y la práctica del diseño.
2. La educación en diseño, por otro lado, utiliza los resultados de la investigación, recibe información de los practicantes del diseño y proporciona a su vez realimentación para la investigación en diseño.
3. La práctica del diseño utiliza los apoyos desarrollados por la investigación y transmitidos por la educación en diseño, y a la vez proporciona información para la educación e investigación en diseño.

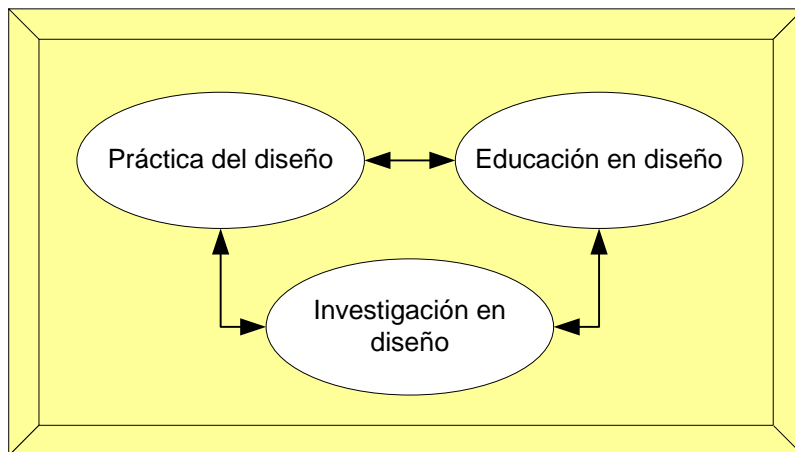


Figura 2.2. Interacciones entre los tres campos de "atención" en el diseño. Elaboración propia.

⁴ "The term *Design Science* is to be understood as a system of logically related knowledge, which should contain and organize the complete knowledge about and for designing" (Hubka y Eder, 1996). "El término *Ciencia del Diseño* debe ser entendido como un sistema de conocimiento relacionado lógicamente, el cual debe incluir y organizar el conocimiento completo acerca y para diseñar"

2.1.5. Productos de la investigación.

Los resultados de la investigación en diseño se dividen a su vez en filosofías, teorías, métodos, estrategias y los modelos de la actividad. Los primeros dos, describen como diseñan las personas y pueden ser clasificados como descriptivos, los métodos y estrategias son de tipo normativo y los modelos pueden ser tanto descriptivos como normativos.

Resultado de la investigación	Características
Filosofía de diseño	Representa una escuela de pensamiento expresado por diseñadores e investigadores en cuanto a como debería ser o como debería realizarse el diseño. (Evbuomwan et al., 1996).
Teoría de diseño	Es una colección de conceptos, principios y relaciones verificadas experimentalmente, útiles para explicar el proceso de diseño, así como para proveer un fundamento y entendimiento básico necesario para proponer métodos útiles y aprovechables. (Evbuomwan et al., 1996).
Método de diseño	Es cualquier método, técnica, auxiliar o herramienta para diseñar. Los métodos de diseño representan un número variado de actividades que el diseñador puede combinar en el proceso de diseño (Cross, 1996)
Estrategia de diseño	Describe el plan general de acción para un proyecto particular de diseño así como la secuencia de actividades que el diseñador espera realizar durante el proyecto (Cross, 1996). El tener una estrategia implica el estar consciente de a donde se va y de los medios para llegar a ese fin.
Modelo de diseño	Es una representación de una filosofía o estrategia propuesta para demostrar como se debe realizar la labor de diseño (Evbuomwan, et al., 1996).

Tabla 2.2. Definiciones de los diferentes resultados de la investigación en diseño.

2.1.6. Tópicos de investigación en la ciencia del diseño.

2.1.6.1. Estudios descriptivos. Este tipo de investigación intenta contestar preguntas del tipo: ¿Qué es el diseño? o ¿Cómo diseña la gente?, de esta forma, el proceso de diseño así como el producto que se diseña es sujeto de investigación. Las teorías de diseño describen los procesos cognitivos de los diseñadores, las herramientas y actividades de diseño, la estructura y organización del proceso de diseño y/o el contexto de este. Por otro lado, parte de los estudios descriptivos se enfocan en los diferentes tipos de productos,

el tipo de problemas de diseño, la búsqueda de soluciones a problemas particulares y a la creación de la base de conocimiento necesaria para estas actividades.

2.1.6.2. Estudios normativos (prescriptivos). Este tipo de investigación se enfoca en responder las preguntas de ¿Cómo diseñar? Y ¿Cómo apoyar a los diseñadores?; es decir, en el desarrollo y aplicación de estrategias, métodos, técnicas y herramientas para su uso en el diseño con el objeto de respaldar la organización y actividades del proceso de diseño.

2.1.6.3. Estudios filosóficos. Estos estudios se concentran, en forma resumida, en tres ejes generales:

1. Problemas epistemológicos. Por ejemplo la naturaleza y extensión del conocimiento en diseño, la relación entre la ciencia y la tecnología y el rol de las ciencias naturales en el proceso de diseño.
2. Problemas metodológicos. Los tipos de métodos, los tipos de problemas y las restricciones que posee cada uno de ellos.
3. Problemas éticos. Por ejemplo las responsabilidades del diseñador relacionadas con el fruto de la labor de diseño.

A continuación se presentan las principales teorías y métodos de diseño de tipo descriptivo, las cuales son aplicables en diversas áreas del diseño.

2.1.7. Métodos descriptivos.

En la filosofía de la ciencia se distinguen dos tendencias importantes: el positivismo y el constructivismo, el primero tradicionalmente relacionado con las ciencias naturales y el segundo con las ciencias sociales. La idea central de la filosofía positivista sostiene que fuera de nosotros existe una realidad totalmente hecha, acabada y plenamente externa y objetiva, y que nuestro aparato cognitivo es como un espejo que la refleja dentro de sí. De esta forma, ser objetivo es copiar bien esa realidad sin deformarla, y la verdad consistiría en la fidelidad de nuestra imagen interior a la realidad que representa.

En contraste, el planteamiento constructivista parte de que el conocimiento se va produciendo como resultado de la interacción del individuo y su medio ambiente y su conocimiento no es una copia de la realidad, sino una construcción que hace la persona

misma. Esta construcción resulta de la representación inicial de la información y de la actividad, externa o interna, que desarrollamos al respecto.

En este sentido, dentro del paradigma del positivismo, las siguientes teorías y modelos son los más representativos:

2.1.7.1. La teoría de resolución racional de problemas (rational problem solving theory), descrita por (Newell et al, 1972). En esta teoría el ser humano –el diseñador- es representado como un sistema de procesamiento de información. Este planteamiento combina los siguientes factores: un sistema cognitivo (representado por quien resuelve el problema de diseño), el conjunto de características particulares del problema de diseño, el ambiente en el que se desarrolla la tarea, y el problema de diseño propiamente dicho.

Este tipo de metodología parte de la concepción de que el diseño es un tipo especial de resolución de problemas. Se habla de un “problema” cuando se desea llegar a una meta (el propio diseño) y los medios para lograrlo no resultan inmediatamente obvios. La resolución de problemas comprende el proceso de pensamiento mediante el cual esos medios son intencionalmente buscados.

La manera en que cada persona resuelve problemas, como es lógico pensar, resulta ser muy particular, sin embargo, se han identificado ciclos de actividades similares. De Groot (citado por Roozenburg y Eekels, 1995) llama a esto “el ciclo empírico” y lo caracteriza de esta manera (figura 2.3):

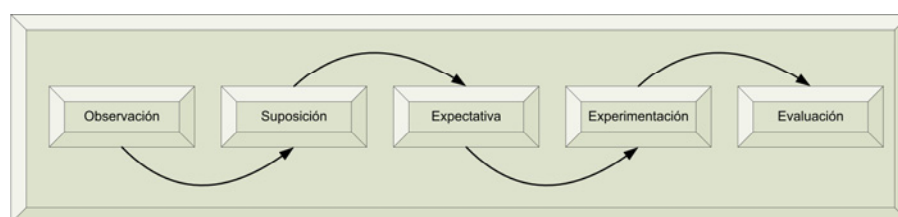


Figura 2.3. Ciclo empírico de diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Roozenburg y Eekels (1995).

Este ciclo da inicio con la observación de la situación que representa el problema, seguida por el surgimiento de un conjunto de suposiciones relativas a acciones que podrían resolver este inconveniente junto a un conjunto de expectativas resultantes de estas acciones, estas conjeturas se someten entonces a prueba con el fin de comparar el efecto logrado en comparación al efecto buscado. Después de esto, el diseñador evalúa el

resultado de este ejercicio mental preguntándose: ¿Es esta la solución óptima? ¿Cómo se puede utilizar la experiencia adquirida en subsiguientes ciclos?

No resulta difícil reconocer un ciclo empírico en esta descripción de la resolución de problemas; en este sentido, se pueden identificar tres características principales:

- La resolución de problemas corresponde básicamente a un mecanismo de prueba-error en el cual las soluciones son provisionales y tentativas, seleccionadas y puestas a prueba, después de lo cual existe una evaluación, y de ser necesario, la posterior ejecución de medidas correctoras.
- Las soluciones usualmente no se ponen a prueba en realidad, sino en “la imaginación”. Esto significa que generalmente el diseñador hace un ejercicio mental previo, en el cual se forma una imagen de los efectos de una imagen y realiza una evaluación de estos efectos, utilizando la reflexión o bien algún tipo de modelo mental. La resolución de problemas no representa una forma primitiva e inconsciente de prueba y error en la cual una solución aleatoria es seleccionada y examinada, sino que este “probar” representa un ejercicio mental consciente e intencionado.
- La búsqueda de la solución se realiza normalmente en forma de espiral convergente con sucesivas iteraciones del ciclo básico, mismas que proporcionan soluciones a la problemática cada vez más eficientes.

2.1.7.2. El ciclo básico de diseño (Basic design cycle), representado por Roozenburg y Eekels (1995). El ciclo básico de diseño, presentado en la figura 2.4, es una forma particular del método de resolución de problemas cuyas actividades se dirigen a partir de los objetivos (funciones) hacia los medios (el diseño). El ciclo básico del diseño utiliza una terminología propia con contenidos específicos en varios de sus pasos:

1. **Análisis.** El primer paso inicia con el enunciado del problema y con base al análisis de las funciones técnicas, sociales, económicas, psicológicas o ambientales del producto o servicio, se formulan conjuntos de especificaciones, mismas que deben guiar las etapas siguientes y que además constituirán los criterios de evaluación de soluciones futuras.

Las actividades que lleva a cabo el diseñador para formarse una idea del problema (el análisis propiamente dicho) son esenciales en el proceso de diseño y deben orientarse a

determinar posibilidades y límites de especificaciones para que, dentro de lo posible, conformen un sistema no redundante.

2. Síntesis. El segundo paso consiste en la generación de una o más propuestas de solución (los diseños iniciales) a partir de la combinación de distintos elementos, ideas, filosofías de diseño (síntesis) para formar conjuntos que funcionen como un todo y que respondan adecuadamente a las especificaciones.

Aunque la síntesis abre las posibilidades de generación de alternativas y aumenta las perspectivas de solución, el ciclo básico de diseño constituye una unidad que ofrece la totalidad de sus frutos si las actividades creativas están bien articuladas y presentes en el resto de actividades del ciclo (análisis, simulación, evaluación y decisión).

3. Simulación. El tercer paso consiste en obtener los comportamientos de los diseños iniciales. Dado que estos diseños iniciales suelen estar definidos por modelos que no siempre resultan adecuados para estudiar su comportamiento, la simulación se convierte en una actividad compleja que comprende dos etapas, las cuales poseen asimismo diferentes alternativas.

La primera etapa consiste en establecer modelos adecuados de los diseños iniciales (prototipos), representativos de uno o más de sus aspectos, mientras que la segunda etapa consiste en obtener el comportamiento de estos prototipos (simulación).

4. Evaluación. Esta etapa consiste en establecer la utilidad, la calidad y la aceptación o no aceptación de las soluciones candidatas, esto en base a contrastar los comportamientos de los prototipos de los diseños obtenidos por la simulación, ensayo u opinión, con las expectativas establecidas anteriormente (criterios de evaluación).

5. Decisión. Una vez evaluados los comportamientos de las soluciones candidatas (el valor de los diseños), el siguiente paso es seleccionar la alternativa a seguir bajo estas pautas:

- Elegir un diseño inicial, el diseño aceptado, mismo que se convierte en el origen de la etapa siguiente del proceso de diseño, o de fabricación.
- Establecer una nueva iteración en una de las etapas anteriores con la incorporación de determinadas propuestas de mejora.
- En casos extremos, el abandono del diseño.

El ciclo básico de diseño es una unidad fundamental que se aplica de forma iterativa a lo largo de todo el proceso de diseño en forma de espiral convergente, en donde se pretende que después de cada ciclo las soluciones obtenidas se aproximan más a los objetivos y requerimientos enunciados en el problema.

Sin embargo, debido a su carácter general y abstracto, no ofrece el suficiente alcance para establecer una metodología de diseño, por lo que conviene estructurar el proceso de diseño en grupos de actividades relacionadas que conduzcan a ciertos estados de desarrollo.

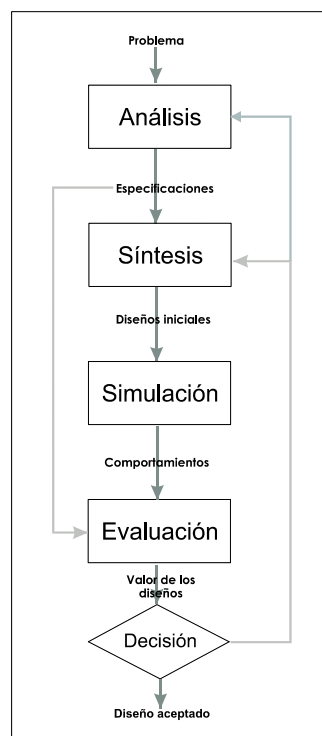


Figura 2.4. El ciclo básico de diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Roozenburg y Eekels (1995).

2.1.7.3. El método de transformación (transformation approach) al diseño, explicado en (Hubka, 1993). Este modelo parte del hecho de que la satisfacción de las necesidades humanas depende de un gran número de transformaciones, las cuales son dependientes de la tecnología. Hubka señala que esta tecnología genera, en forma paralela, una variedad de procesos e instrumentos técnicos; en este sentido, el fin que se atribuye a las transformaciones es el lograr un estado particular de un objeto (de diseño), este estado (output) es entonces el resultado del proceso de transformación.

El cambio en el estado (y consecuentemente el cambio de sus propiedades) de los *inputs* puede ser logrado mediante el uso adecuado de la tecnología. Estos cambios se realizan mediante un sistema de ejecución, el cual comprende tanto a los sistemas humanos como técnicos y que tiene como requisitos de calidad el contar con la suficiente información relevante, una dirección adecuada del proceso (administración, objetivos definidos y liderazgo para lograr las metas) y que las influencias externas, ambientales, no excedan unos límites determinados.

Estos factores (humanos, sistemas técnicos, la información disponible, los factores organizacionales y el medio ambiente) son llamados los operadores del proceso de transformación. Los valores de los *input* pueden variar, dentro de ciertos límites, estas variaciones son las que producen las llamadas salidas secundarias en la figura 2.5.

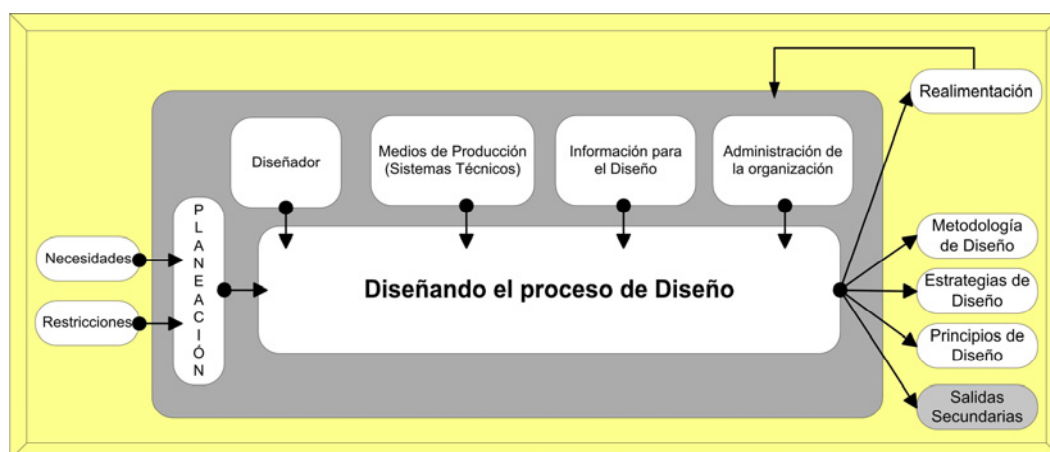


Figura 2.5. El método de transformación. Elaboración propia. Traducido de Hubka (1993).

2.1.7.4. La teoría de diseño independiente de su dominio (domain independent design theory) la cual utiliza aspectos simbólicos de modelación lingüística, propuesta por (Korn, 1996), esta teoría comprende al diseño como un proceso de “completar una situación incompleta”.

Dentro del paradigma constructivista, las siguientes teorías y modelos han sido clasificados como los más importantes:

2.1.7.5. El mecanismo de practica reflexiva (reflective practice mechanism) descrito por (Schon, 1983). Este modelo se basa en las descripciones hechas del proceso de diseño hechas por profesionales, en este proceso se pueden apreciar las siguientes actividades: enumerar, encuadrar, movilizar y evaluar (name, frame, make a move and

evaluar). Schön percibe el diseño como una “práctica reflexiva con la situación de diseño”: los diseñadores trabajan enumerando los factores relevantes a la situación, enmarcando el problema, moviéndose en dirección a la solución, evaluando los resultados de esos movimientos.

2.1.7.8. El lenguaje social para la descripción de los procesos de diseño (social language for the description of design processes) (Friedrich, 2003) quien señala que el diseño debe ser visto como un conjunto de procesos sociales, interaccionales y de interpretación.

2.1.8. Métodos prescriptivos (en base a patrones establecidos).

2.1.8.1. Introducción.

Antes de tratar más a detalle estos modelos, es justo mencionar los trabajos de Christopher Jones (1981), como pionero del estudio de los métodos de diseño y proyectuales⁵, quien señala que el ciclo de diseño comprende 3 etapas: análisis, síntesis y evaluación, mismas que renombra como divergencia, transformación y convergencia para asociarlas a la labor de diseño y define estas etapas de la siguiente manera:

1. Divergencia.

Es el acto de ampliar los límites de la situación de diseño y la obtención de un espacio de investigación lo suficientemente amplio y fructífero para la búsqueda de una solución. La investigación divergente es un análisis de la estabilidad de todo lo que está conectado con el problema para identificar lo que es susceptible de cambio y lo que se puede considerar puntos fijos de referencia. El objetivo del diseñador es evitar la imposición de modelos prematuros de manera que sean postergadas las decisiones hasta la próxima etapa (transformación), en la que conocerá el fondo del problema y podrá prever las consecuencias probables de cualquier selección.

⁵ Junto a Christopher Alexander (1963), quien aborda los métodos de diseño desde la perspectiva de la Arquitectura. Además destaca el trabajo de Herbert Simon (1973) en el diseño de sistemas informáticos.

2. Transformación.

Esta es la etapa de alto nivel creativo en donde se combinan los juicios de valor subjetivos y las valoraciones técnicas que reflejan las realidades políticas, económicas y operacionales de la situación de diseño. Es la etapa de elaboración de un modelo de carácter general, considerado adecuado pero sin posibilidades de comprobación.

Las principales características de esta etapa las resume Jones de esta manera:

- El principal objetivo es la imposición de un modelo suficientemente preciso como para permitir la convergencia hacia un solo diseño a detallar.
- Es la etapa de fijación de objetivos y límites del problema, de identificación de las variables críticas, de imposición de condicionantes y de emisión de juicios.
- Es la etapa de división del problema en subproblemas.
- El establecimiento de requerimientos.

3. Convergencia.

Es la última de las tres etapas en la que, tradicionalmente, se está más cerca del diseño total. Es la etapa posterior a la definición del problema, a la identificación de las variables y al acuerdo de los objetivos. El objetivo del diseñador estriba en alcanzar una única alternativa entre las muchas disponibles, mediante una reducción progresiva de las incertidumbres secundarias (etapa que tiene una semejanza relativa a la espiral del diseño mencionada por Pugh (1993) hasta llegar a una solución final.

Bajo esta clasificación, se presenta en la Tabla 2.3 un resumen de las técnicas que este autor considera más importantes, mismas que son definidas a fondo en su obra.

Clasificación	Método	Finalidad
Estrategias prefabricadas (Convergencia)	Investigación sistemática	Resolver problemas de diseño con certeza lógica.
	Análisis de valor	Incrementar la importancia del aprendizaje de las organizaciones de diseño y fabricación en la reducción del coste de un producto.
	Ingeniería de Sistemas	Obtener la compatibilidad interna entre los componentes de un sistema y la compatibilidad externa entre el sistema y su entorno.
	Diseño del sistema hombre – máquina	Obtener la compatibilidad interna entre los componentes humanos y los de máquina de un sistema y la compatibilidad externa entre el sistema y su entorno
	Investigación de los límites	Encontrar los límites dentro de los cuales existen soluciones aceptables.
	Estrategia acumulativa de Page	Hacer innecesario desarrollar malos diseños con objeto de aprender como desarrollar los buenos.
	Método CASA (Collaborative Strategy for Adaptable Architecture)	Capacitar a los interesados en el diseño para influir en las decisiones que afectan la adaptabilidad y compatibilidad del producto.
Control de estrategias	Cambio de estrategia	Permitir que el pensamiento espontáneo influya en el pensamiento dirigido y viceversa.
	Método fundamental de diseño de Matchett (M.F.D.)	Capacitar al diseñador en la percepción y control del modelo de sus pensamientos y relacionar este modelo con todos los aspectos de la situación de diseño.
Métodos de exploración de situaciones de diseño (Divergencia)	Definición de objetivos	Identificar condiciones externas con las cuales el diseño debe ser compatible
	Revisión bibliográfica	Encontrar información publicada que pueda influir favorablemente en el output de los diseñadores y que pueda obtenerse sin costes y retrasos inaceptables.
	Investigación de inconsistencias visuales	Encontrar las direcciones de búsqueda de oportunidades de mejora del diseño.
	Entrevistas a usuarios	Para extraer información de viva voz de los usuarios del producto o sistema.
	Cuestionarios	Para recolección de información útil de poblaciones numerosas.
	Investigación del comportamiento de usuario	Explorar patrones de comportamiento para predecir los límites de desempeño del producto o potenciales usuarios de un nuevo diseño.
	Ensayos sistemáticos	Identificar las acciones capaces de producir los cambios deseados en situaciones demasiado complejas para entenderlas.
	Selección de escalas de medición	Relacionar las mediciones y cálculos con las incertidumbres de la observación, con los costes de la toma de datos y con los objetivos del proyecto de diseño.
	Bitácoras de uso	Inferir y resaltar patrones de uso de los cuales dependen decisiones críticas de diseño.

Tabla 2.3. Herramientas metodológicas para el diseño. Elaboración propia. Tomado de Jones (1981).

Clasificación	Método	Finalidad
Métodos de búsqueda de ideas (Divergencia y transformación)	Tormenta de ideas (Brainstorming)	Estimular grupos de trabajo para generar ideas de diseño.
	Sinestesia (Synectics ⁶)	Dirigir la actividad espontánea del cerebro hacia la exploración y transformación de problemas de diseño.
	Eliminación de bloques mentales	Encontrar nuevas direcciones de búsqueda de soluciones ante situaciones que aparentan no tener una respuesta válida.
	Cuadros morfológicos	Ampliar el ámbito de búsqueda de soluciones a problemas de diseño.
	Matriz de interacciones	Permitir una búsqueda sistemática de conexiones entre los elementos de un problema.
Métodos de exploración de la estructura del problema (Transformación)	Red de interacciones	Exhibir patrones de relación entre elementos de un problema de diseño.
	Análisis de áreas de decisión interconectadas	Identificar y evaluar los conjuntos relacionados de sub-soluciones de diseño.
	Transformación del sistema	Encontrar formas de transformación de un sistema insatisfactorio mediante la remoción de sus defectos intrínsecos.
	Innovación por cambio de límites	Cambiar los límites de un problema insoluble, de manera que puedan utilizarse nuevos recursos exteriores en su resolución.
	Innovación funcional	Encontrar diseños innovadores capaces de crear nuevos mercados.
	Método de determinación de componentes de Alexander	Encontrar los correctos componentes de una estructura física, de manera que cada uno pueda alterarse independientemente para adaptarse a futuros cambios en el entorno.
	Clasificación información de diseño	Dividir un problema de diseño en problemas más sencillos de manejar.
Métodos de evaluación (Convergencia)	Listas de comprobación	Permitir a los diseñadores utilizar el conocimiento de los requerimientos que se ha comprobado son relevantes en situaciones similares.
	Criterios de selección	Decidir como un diseño aceptable debe ser reconocido.
	Clasificación y valoración	Comparar un conjunto de diseños alternativos usando una escala común de medición.
	Definición de especificaciones	Describir criterios de evaluación de diseños futuros.

Tabla 2.3 (Continuación). Herramientas metodológicas para el diseño. Tomado de Jones (1981).

⁶ Definición del diccionario Webster: "the fitting together of seemingly diverse elements". Esta técnica utiliza intercambios de información metafóricos y analogías dentro de un grupo cuidadosamente seleccionado de individuos de personalidades y de áreas de especialización variada, con un líder del equipo que desempeña un papel dominante durante la discusión. La Sinéctica funciona bajo el principio de que, usando la capacidad notable de la mente de conectar elementos aparentemente irrelevantes, es posible impulsar que nuevas ideas se puedan desarrollar más adelante en soluciones factibles y novedosas a problemas.

2.1.8.2. El modelo de fases.

Desde la década de 1960 se han creado modelos del proceso de diseño. Respecto a la ingeniería de diseño, estas propuestas convergen en el modelo de fases (Rozenburg y Eekels, 1995), mismo que se puede encontrar en interpretaciones muy similares en autores como French (1985) –figura 2.6-, Pahl y Beitz (1988) –figura 2.8-, Hubka (1993). Más formalmente, este modelo es descrito en la guía VDI 2221 (1986) –figura 2.7- y con diferencias menores, es el que emplean autores como Pugh (1993), Ullman (1996), Ulrich y Eppinger (2004) y Priest (1988).

El modelo de fases se fundamenta en la idea de que el diseño puede expresarse en cuatro niveles generales de definición que determinan los resultados de las etapas sucesivas (tabla 2.4):

Etapa 1: Clarificación de la tarea	Resultados: Especificación
Etapa 2: Diseño conceptual	Resultados: Principios de solución, estructura funcional, estructura modular.
Etapa 3: Diseño de materialización	Resultados: Planos de conjunto
Etapa 4: Diseño de detalle	Resultados: Planos de pieza, documentos de fabricación.

Tabla 2.4. Modelo de fases de diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Rozenburg y Eekels (1995).

La figura 2.7 reproduce el esquema de etapas de proceso dado por la norma alemana VDI 2221 (1986). En los apartados siguientes se realiza una breve descripción y caracterización de estas etapas.

2.1.8.2.1. Clarificación de la tarea. Esta es una etapa fundamental del proceso de diseño y parte del enunciado inicial del producto y establece las acciones destinadas a definirlo de forma completa y precisa. En general, el enunciado inicial hace referencia a una idea o a determinados aspectos sobre el producto, pero no tiene el nivel de concreción suficiente para permitir iniciar el trabajo de diseño con una garantía de acierto.

Este apartado tiene el objetivo de establecer un conjunto de determinaciones completa y suficiente que se organizan en forma de documento de especificación. El establecimiento de la especificación permite al equipo de diseño explorar las posibilidades y

limites del problema. En esta etapa fundamental para el desarrollo posterior del proyecto hay que informarse y documentarse sobre aspectos como:

- Modos de operación principal, ocasional y accidental.
- Condiciones del entorno (ambientales y de uso)
- Proceso de manufactura
- Variables externas, tales como aspectos mercadotécnicos y la normatividad incidente sobre el producto.

Este documento de especificación orienta el trabajo en todas las demás fases del proceso de diseño. Sin embargo, es posible que las actividades que se realicen en etapas posteriores del proceso modifiquen la percepción sobre el problema y como consecuencia de ello se hagan revisiones sobre la especificación inicial, como lo demuestra la línea de realimentación de la figura 2.15.

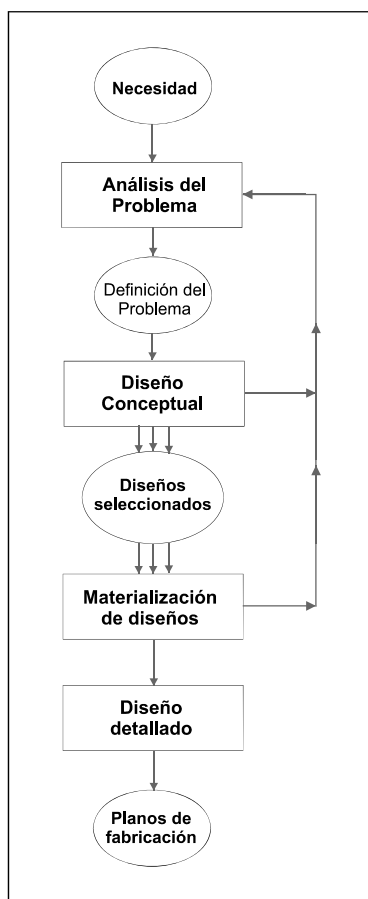


Figura 2.6. Las fases del proceso de Diseño según French. Elaboración propia. Tomado y traducido de French(1985).

2.1.8.2.2. Diseño conceptual. Esta etapa del proceso de diseño parte de la especificación del producto y origina diversas alternativas de solución, las cuales después de ser evaluadas, conducen a la selección de la más conveniente. El diseño conceptual está muy directamente relacionado con la especificación debido a que, a menudo, se debe renegociar algún requerimiento debido a que las soluciones resultan demasiado complejas o costosas. Esta etapa es a nivel general la más innovadora y sus soluciones suelen llevar el germen de todo desarrollo posterior. Por esta razón, señalan Ulrich y Eppinger (2004), es necesario promover el ambiente propicio a la creatividad entre los miembros del equipo de diseño y, al mismo tiempo, debe fomentarse un sentido crítico y riguroso en la evaluación de las soluciones debido a que cualquier omisión, olvido o error de concepto ocasiona más adelante grandes dificultades. El diseño conceptual es visto como la fase más importante del proceso de diseño (Roozenburg y Eekels, 1995) debido a que las decisiones tomadas en esta etapa influirán en los fases posteriores.

2.1.8.2.3. Diseño de materialización. Una vez elegido el principio de solución debe materializarse el producto por medio de un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y otros elementos que se realizarán con una combinación de materiales, formas, dimensiones y acabados que en conjunto, al final de esta etapa tienen como resultado los planos de conjunto de producto que muestran como se articulan las diferentes partes. Este proceso es el que mas se acerca a la actividad tradicional de los departamentos de diseño.

En el modelo de Pahl y Beitz (1988) (figura 2.8) el diseño de materialización se subdivide en dos etapas. La primera etapa conduce a un conjunto de diseños preliminares que son refinados en su forma, materiales y ensamble hasta encontrar la combinación óptima. En la segunda etapa, se selecciona el mejor diseño preliminar se desarrollan al grado de pruebas de funcionalidad, uso, apariencia, percepción del cliente, durabilidad y facilidad de manufactura.

2.1.8.2.4. Diseño de detalle. Última etapa del proceso de diseño que, partiendo de una definición proporcionada por los planos de conjunto y la memoria anexa, tiene como objeto el despliegue de todos los documentos necesarios para la fabricación del producto. El diseño de detalle no debe limitarse al despliegue del diseño de materialización sino que tiene funciones propias como la comprobación de las funciones y la depuración de las soluciones para simplificar o eliminar elementos (DFMA).

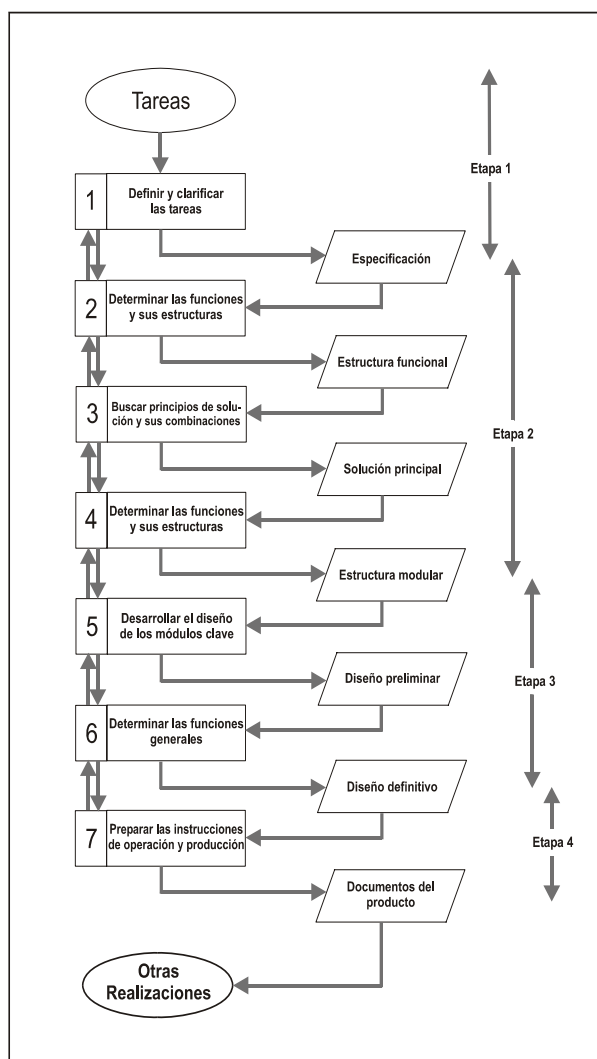


Figura 2.7. Diagrama de la norma VDI 2221. Elaboración propia. Tomado y traducido de Rozenburg y Eekels (1995).

2.1.8.2.5. Críticas al modelo. Este modelo ha sido criticado, por las causas que se resumen a continuación:

1. Los autores que manejan este modelo acentúan que no es posible establecer límites rígidos en las fases, además de que no siempre se sigue el orden marcado, sino que en ocasiones el proceso es iterativo, con retrocesos a etapas anteriores.
2. Este modelo no refleja el proceso de resolución de problemas, mismo por el cual se generan soluciones de diseño, se prueban y se evalúan con herramientas diversas, este proceso básico de diseño se repite en cada una de las fases.

3. En cada fase se pueden encontrar soluciones de diseño alternativas, mismas que si se consideran en su totalidad conducen a un crecimiento exponencial de posibilidades de desarrollo. Sin embargo, al no considerar estas posibilidades y seguir un camino lineal se pueden ignorar mejores propuestas de diseño.
4. Finalmente, este modelo se dirige al diseño de productos técnicamente innovadores, dándole mucha importancia a la fase de diseño conceptual y dejando de lado las siguientes etapas; no se tiene en cuenta que muchos proyectos de diseño parten de conceptos conocidos y de eficacia comprobada.

Además de lo anterior, Roozenburg (1995) considera que en aquellos productos en los cuales la apariencia y la percepción estética es un factor importante, esta debe de ser definida en un proceso anterior o paralelo al diseño funcional.

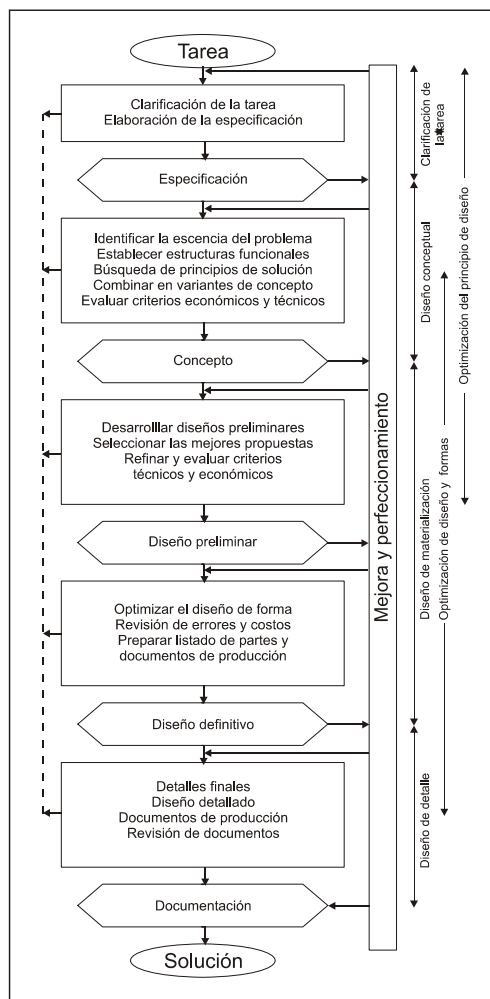


Figura 2.8. Modelo de Pahl y Beitz del proceso de diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Pahl y Beitz (1988).

2.1.8.3. Modelo de etapas del proceso de desarrollo de productos.

Este tipo de modelo comprende tanto el diseño de producto como la planificación de las actividades de producción y comercialización, concebidas como un todo y también establece las etapas y secuencias a realizar. El desarrollo global de un producto requiere la dedicación de importantes recursos humanos, recursos materiales, así como de estrategias mercadotécnicas para su venta.

En los límites del proceso de diseño, determinados aspectos como las demandas de los usuarios, las consideraciones financieras, comerciales y de fabricación aparecen tan solo como especificaciones externas que hay que cumplir o negociar, mientras que bajo la perspectiva de desarrollo integral esos aspectos pasan a formar parte de las variables para la mejora global de la solución. Hay que tener presente que no todos los productos que se desarrollan tienen el éxito esperado por lo que el riesgo que se corre es elevado. Una buena planificación y ejecución del proceso de desarrollo, con la división en subproyectos y el establecimiento de etapas y procedimientos de validación, delimita en gran medida estos riesgos y aporta elementos para la toma de decisiones sobre las medidas a adoptar en relación a las desviaciones en las prestaciones, los costes o los plazos e, incluso, llegado el caso, sobre el abandono del proyecto.

Un modelo general de etapas (Roozenburg y Eekels, 1995) del proceso de desarrollo ha sido propuesto, que puede ser adaptado a cada organización y proyecto de diseño a sus necesidades particulares, a continuación se describe brevemente en la Tabla 2.5:

Etapa	Actividades
I. Planeación Estratégica	<p>Formulación de políticas.</p> <p>Establecimiento de objetivos estratégicos. Establecimiento de calendarios, presupuestos y guías de innovación.</p>
II. Investigación	<p>Investigación preliminar.</p> <p>Selección de base tecnológica para el producto. Identificación del área de oportunidad de negocio. Establecimiento del estado del arte (condiciones de mercado). Descripción verbal de las especificaciones del producto. Identificación de posibles áreas críticas.</p>
	<p>Estudio de Factibilidad.</p> <p>Establecimiento de la factibilidad técnica. Establecimiento de la viabilidad financiera. Propuestas iniciales de diseño. Estimaciones de tiempo por fase y análisis de riesgos</p>
III. Diseño	<p>Desarrollo de diseño.</p> <p>Definición de especificaciones de diseño. Desarrollo detallado. Estimación de desempeño técnico y de coste de producto. Preparación de documentos de diseño. Diseño de mecanismos de evaluación de producto.</p>
	<p>Desarrollo de prototipos.</p> <p>Construcción. Pruebas de laboratorio. Evaluación de desempeño técnico. Pruebas de mercado. Evaluación de desempeño de uso.</p>
	<p>Estudio de mercado.</p> <p>Reconsideración del potencial de mercado después de pruebas. Reconsideración de costos. Consideración de problemas de mercadeo y producción. Revisión de objetivos iniciales. Revisión de especificaciones de desempeño.</p>

Tabla 2.5. El proceso de Diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Roozenburg y Eekels (1995).

Etapa	Actividades
IV. Desarrollo	<p>Desarrollo de producción.</p> <p>Desarrollo de diseño para producción. Documentación de producción. Diseño de pruebas de técnicas y de uso. Construcción de prototipos de pre-producción. Pruebas técnicas, de uso y de mercado Evaluación de pruebas.</p>
	<p>Planes de producción.</p> <p>Planes de mercadotecnia. Planes de producción. Diseño de empaques y de documentación para el usuario. Diseño de herramental y proceso de producción.</p>
V. Manufactura y mercadotecnia	<p>Preparación de herramental y mercado.</p> <p>Corridas previas de producción. Pruebas de corridas previas. Producción de materiales de mercadotecnia. Instalación de mecanismos de producción y mercadotecnia.</p>
VI. Producción	<p>Producción y ventas.</p> <p>Campaña de mercadotecnia. Inicio de producción y ventas. Recolección de la percepción del mercado sobre el producto. Recomendaciones para futuras generaciones de producto. Recomendaciones de investigación de nuevos mercados.</p>

Tabla 2.5 (continuación). El proceso de Diseño. Elaboración propia. Tomado y traducido de Rozenburg y Eekels (1995).

2.2. EL DIFERENCIAL SEMÁNTICO.

El diferencial semántico es un instrumento creado por el investigador social Charles Osgood (1957), en conjunto con un grupo de colaboradores. El fin de dicho instrumento era explorar las dimensiones del significado; por lo que consiste en una serie de adjetivos extremos que califican al objeto de actitud ante los cuales se solicita la reacción del sujeto. Es decir, éste debe calificar al objeto de actitud en un conjunto de adjetivos bipolares, entre cada par de adjetivos se presentan varias opciones y el sujeto selecciona aquella que refleje su actitud en la mayor medida. Los pares de adjetivos de esta escala tiende a clasificarse en tres categorías de percepción, siendo éstas: Valores, Habilidades y Actitudes.

2.2.1. Introducción.

El diferencial semántico es un instrumento creado por el investigador social Charles Osgood (1957), en conjunto con un grupo de colaboradores. Osgood se ve influido por el conductismo, centrándose en el estudio de las actitudes por medio del lenguaje, del cual destaca dos significados particulares:

- Significado denotativo → El significado tal cual define un diccionario.
- Significado connotativo → El significado que para cada persona tiene un objeto, es el significado que interesa evaluar a la técnica de diferenciales semánticos.

El objetivo entonces de esta técnica es el proveer un sustento cuantitativo que permita obtener una medida objetiva del significado psicológico que para el sujeto tienen una serie de acontecimientos, objetos o personas, (a quienes de manera general denomina conceptos). Para ello se utilizan una serie de escalas descriptivas de adjetivos bipolares, en

base a los cuales se establece el grado de semejanza o disparidad entre diferentes conceptos.

Estos adjetivos extremos, sirven para calificar al objeto de actitud ante los cuales se solicita la reacción del sujeto (para esta investigación particular, el usuario de silla de ruedas), expresa su percepción hacia el objeto de actitud mediante un conjunto de adjetivos bipolares, entre los cuales se presentan varias opciones, de los cuales el sujeto selecciona aquella que refleje su actitud en la mayor medida.

A continuación se presenta la mecánica de la construcción y aplicación de la técnica de diferenciales semánticos como instrumento de medición. También se describirán las clases de información que proporciona este y los variados medios de análisis de esta información.

2.2.2. Construcción y administración del diferencial semántico.

Aún cuando usualmente se refiere al método de diferenciales semánticos (MDS) como si este fuera algún tipo de "examen", el cual tiene un número determinado de preguntas y sujeto a un resultado específico, este no es el caso. Por el contrario, es una técnica de medición con un alto grado de generalización que debe ser adaptada a los requerimientos particulares de cada aplicación. No existen conceptos ni escalas estándar, estas dependen también de los propósitos particulares de la investigación. La estandarización, y de ahí la comparabilidad se basa en la asignación de los conceptos a un espacio común definido por un conjunto de factores generales, a pesar de la variabilidad en las escalas y conceptos particulares.

2.2.1. Selección de conceptos. El término concepto se utiliza en un sentido general para referirse al estímulo al cual el sujeto responde. Lo que funciona como concepto en este sentido tan amplio es prácticamente infinito, puede ser una palabra, un color, una textura, un olor, etc., aunque generalmente se emplean palabras escritas por simplicidad. Se recomienda seleccionar conceptos que:

- A. reflejen diferencias entre individuos.
- B. tengan un sentido único para cada individuo.
- C. resulten familiares a los individuos.

2.2.3. Administración del diferencial semántico.

2.2.3.1 Cantidad de material. Los experimentadores se encuentran limitados usualmente por la cantidad de tiempo que pueden demandar de los sujetos, y los recursos disponibles para el manejo de datos. Por eso, es útil saber, aun cuando sea aproximadamente, cuanto tiempo toma a los sujetos completar diferenciales de diferentes tamaños y cuantos datos se acumulan y ajustar en consecuencia el tamaño de este a las características particulares del estudio.

2.2.3.2 Forma del diferencial. Según estudios realizados, se ha encontrado más recomendable la presentación del tipo II (Osgood, 1957, p. 81), en la cual se utiliza una hoja de papel para cada concepto con todos los criterios evaluados presentados en sucesión y con una dirección de la polaridad constante, en donde el sujeto marca su percepción del concepto en una escala no numerada (figura 2.9).

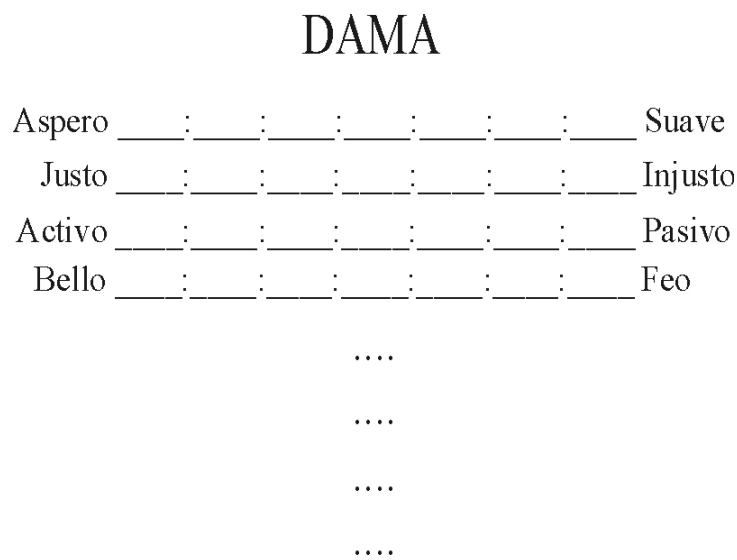


Figura 2.9. Ejemplo de escala sin numeración. Elaboración propia. Tomado y traducido de Osgood (1957).

Sin embargo, también se señala como correcta la utilización del mismo tipo de escala con la variante de casillas numeradas, tal como lo muestra la tabla 2.6:

Palabra clave: _____

Pasivo	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Activo
Chico	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Grande
Blando	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Duro
Malo	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Bueno
Admirable	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Despreciable
Joven	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Viejo
Lento	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Rápido
Simpático	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Antipático
Enano	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Gigante
Fuerte	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Débil
Menor	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Mayor
Agradable	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Desagradable

Tabla 2.6. Ejemplo de escala numerada. Elaboración propia. Tomado y traducido de Osgood (1957).

Los datos en bruto obtenidos con el diferencial semántico son solamente una colección de puntos marcados en escalas bipolares. Para cada una de las posiciones en esas escalas, usualmente 7, se asigna arbitrariamente un dígito, ya sea 1,2,3,4,5,6,7 o +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3 (lo cual no tiene ningún significado en cuanto al tratamiento matemático, las diferencias son sobre todo heurísticas, al asignar un valor neutro (0) al centro de la escala y no un 4). Lo importante y realmente relevante de esta técnica es el análisis de estos datos, que a continuación se describe brevemente.

2.2.4. Análisis de los resultados.

Los adjetivos que sirven al sujeto para evaluar un determinado concepto se clasifican o encuadran en tres categorías o factores (Osgood les llamó dimensiones), mismas que a continuación se describen.

- a. **Valoración o evaluación del concepto.** Es un factor determinante del significado ya que implica la evaluación de la actitud hacia el concepto, por ejemplo: bueno-malo, justo-injusto
- b. **Mayor o menor potencia.** Hace referencia a la potencia o la fuerza que para un sujeto tiene un determinado concepto, por ejemplo: grande-pequeño, duro-blando

- c. **Mayor o menor actividad.** Este termino se refiere a la actividad o agilidad que representa el concepto para el sujeto, por ejemplo rápido-lento

Según esta técnica, todos los conceptos giran alrededor de estos tres ejes, de manera que el significado de un concepto se define por su valor en las dimensiones de evaluación, potencia y actividad, factores que son la base contextual en donde queda encuadrado el espacio semántico.

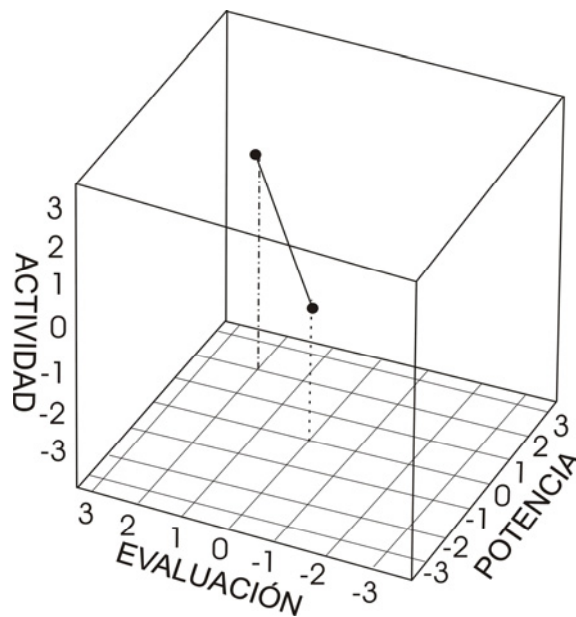


Figura 2.10. El espacio semántico. Elaboración propia.

Las dos aportaciones principales de esta técnica son las que otorga lo que Osgood llamó espacio semántico y la distancia semántica, que se describen brevemente a continuación.

El espacio semántico. Para entender mejor este importante concepto, se puede establecer un paralelismo con el espacio físico, representado por un espacio tridimensional delimitado por los factores de evaluación, actividad y potencia. De esta manera, la localización de un concepto estará dada por la confluencia de las tres puntuaciones en los tres factores ya mencionados.

Como vemos en la figura 2.10, el concepto a evaluar está representado por la letra C, este, obtuvo una puntuación de +2 en el factor actividad, -2 en el factor evaluación y +1

en potencia. Se entiende por concepto neutro el punto de referencia de cara a establecer las llamadas distancias semánticas, aquel que puntúa 0 en los tres factores.

La importancia del espacio semántico esta dada por su capacidad de mostrar de forma gráfica la percepción que tiene una persona (o conjunto de estas en caso de representar una muestra o población) sobre un concepto.

La distancia semántica. Fundamentalmente este concepto es útil de cara a establecer la distancia existente ya no tanto con el concepto neutro sino entre dos o más conceptos, es decir para establecer el grado en que dos conceptos diferentes provocan mismas reacciones en el sujeto, para ver las semejanzas semánticas existentes entre conceptos.

Ahora que conocemos estos conceptos importantes, vemos que la importancia del Diferencial semántico reside en que nos permite conocer el perfil semántico de cada persona, o bien de grupos de personas y al obtener este perfil se tiene la capacidad construir el mapa conceptual de cada persona y como cada concepto se estructura en este.

El diferencial semántico se usa cada vez más por las organizaciones de investigación de mercado, ya que permite obtener información más completa sobre la conducta del consumidor, que sería muy difícil obtener con las técnicas de investigación cuantitativa.

Es de gran ayuda para los estudios enfocados a la medición de actitudes hacia la "imagen", -ya sea de marca, comparativa o ambos- la eficacia del método depende de la rapidez con que se responda.

2.3. EL MÉTODO KANO PARA LA SATISFACCIÓN DEL USUARIO.

La identificación e interpretación de la “voz del cliente” es el primer paso en el proceso de gestión del valor-calidad. Sólo después de haberse identificado las necesidades o exigencias, latentes o explícitas, del cliente, podrá realizarse la traducción a “funciones” y de éstas a la definición de características técnicas, que serán la base para hacer operacional la definición del producto o servicio a desarrollar.

Ahora bien, el proceso de “escucha de la voz del cliente” presenta un problema fundamental: la dificultad de lograr una adecuada comunicación entre el usuario y el diseñador. El método Kano (1984) es una herramienta eficaz en este sentido debido a que permite realizar una clasificación singular de los requerimientos del cliente hacia el producto y su posterior caracterización en el diseño industrial.

2.3.1. Introducción.

Hacia fines de la década de 1970, Noriaki Kano, académico japonés de la universidad de Tokio, amplió el concepto de calidad utilizado hasta entonces, que juzgaba a la calidad de los productos sobre una sola escala, de "bueno" a "malo" (Kano, 1984). Siguiendo en parte la tradición de las teorías de Herzberg (1966) sobre motivación e higiene, Kano utilizó dos dimensiones para evaluar la calidad: el grado de rendimiento de un producto y el grado de satisfacción del cliente que lo utiliza.

Trabajando sobre un plano bidimensional de funcionalidad-satisfacción, Kano definió tres tipos de calidad: calidad obligatoria, calidad unidimensional y calidad atractiva, partiendo de los siguientes supuestos:

1. Las ideas "invisibles" de la calidad pueden hacerse visibles.
2. Para algunos requerimientos del cliente, la satisfacción es proporcional a la funcionalidad del producto.
3. Algunos requerimientos del cliente no son unidimensionales, existen también elementos "obligatorios" y "atractivos".

Durante mucho tiempo existió la creencia de que la satisfacción de los clientes era proporcional a la funcionalidad de las diversas características del producto, lo que se ha llamado "unidimensionalidad", esta proporcionalidad no siempre se manifiesta, y en algunos casos el cliente está menos satisfecho cuando el producto es poco funcional, pero no está más satisfecho si la funcionalidad supera cierto nivel (requerimientos "obligatorios"). En otros casos, el cliente no está insatisfecho por la falta de funcionalidad, pero si esta se incrementa su satisfacción aumenta (requerimientos "deleitosos" o "atractivos").

Kano ideó un cuestionario que clasifica a las características de un producto para facilitar su diseño y orientar la estrategia de mercadotecnia. Para hacer un mejor uso de los datos obtenidos en los cuestionarios de satisfacción, ampliamos el análisis básico de Kano siguiendo al Center for Quality of Management (1993).

2.3.2. Tipos de requerimientos de los clientes.

El método mide la relación entre la funcionalidad, especificada en un sentido amplio, de los productos y la satisfacción que esta funcionalidad le brinda a los clientes. La funcionalidad es una medida del grado en que un producto cumple con sus propósitos utilitarios en una cierta dimensión.

El método de Kano establece, para cada requerimiento del cliente, la relación entre satisfacción y funcionalidad y permite discriminar y clasificar los requerimientos. La figura 2.11 ayuda a comprender esta agrupación. En el se han dibujado tres tipos ideales de atributos, en función de la relación entre funcionalidad y satisfacción.

Los requerimientos atractivos son aquéllos que, por debajo de cierto umbral de funcionalidad, mantienen un nivel de satisfacción relativamente bajo y constante, pero que,

una vez superado ese umbral, producen un aumento significativo de la satisfacción. Los requerimientos atractivos suelen denominarse deleitosos (del inglés *delighter*).

Los requerimientos unidimensionales se caracterizan porque la satisfacción que producen aumenta de modo aproximadamente proporcional al nivel de funcionalidad. Responden a la percepción tradicional de la relación entre funcionalidad y satisfacción: a mayor funcionalidad, se observa una mayor satisfacción, de aquí el nombre alternativo de satisfactores para estos requerimientos.

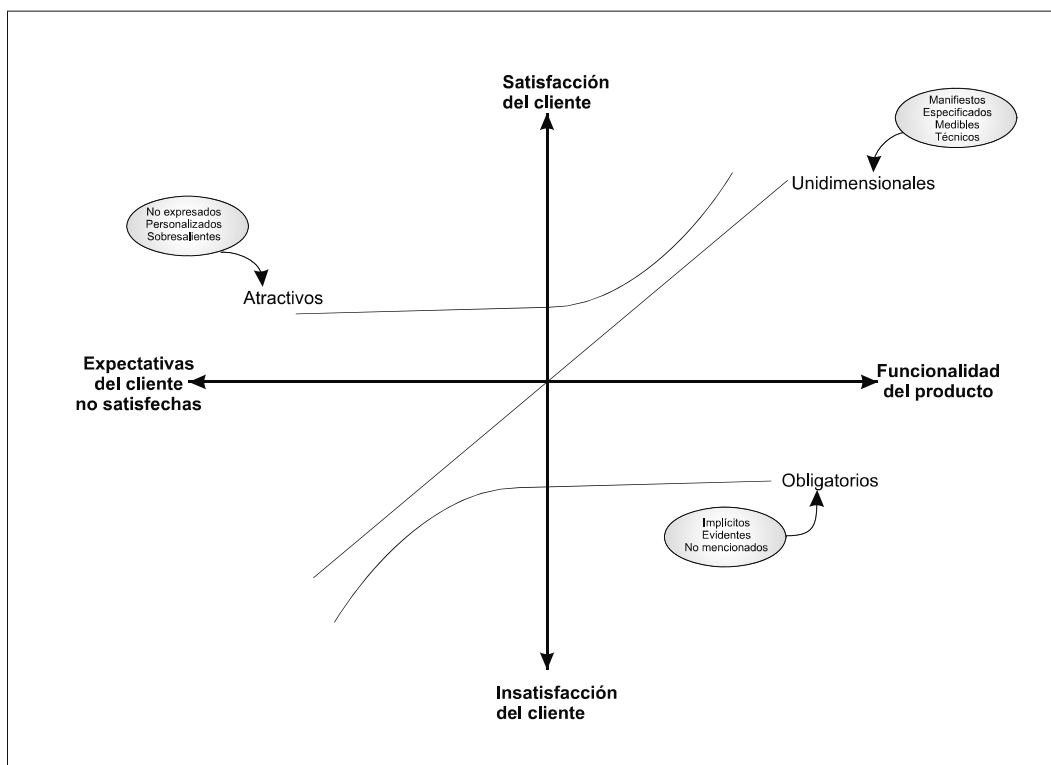


Figura 2.11. Tipos de Requerimientos del cliente. Elaboración propia. Tomado y traducido de Matzler y Hinterhuber (1998).

Los requerimientos obligatorios son aquellos que, hacia las gamas bajas de funcionalidad, aumentan la satisfacción en relación directa con la funcionalidad pero que, superado cierto umbral, dejan de producir un incremento importante en la satisfacción, de aquí el nombre alternativo de insatisfactores.

2.3.3. Análisis básico de los datos.

La manera que ideó Kano para llegar a esta clasificación es mediante un cuestionario, en el cual cada pregunta se compone de dos secciones en donde se cuestiona:

- ¿Cómo se siente si la característica x esta presente en el producto? (requerimientos funcionales)
- ¿Cómo se siente si la característica x NO esta presente en el producto? (requerimientos disfuncionales)

Para cada sección, el cliente responde entre 5 opciones⁷, como se muestra en la Tabla 2.7.

En base a las respuestas a las dos secciones de cada pregunta se busca su combinación en la tabla 2.8 y es así que la característica del producto (en el ejemplo el rendimiento de combustible) se puede clasificar en una de estas 6 categorías:

¿Si el rendimiento de combustible es bueno, como te sientes?	1. Me agrada.
	2. Es de esperarse
	3. Neutral
	4. Lo acepto
	5. Me desagrada
¿Si el rendimiento de combustible NO es bueno, como te sientes?	1. Me agrada.
	2. Es de esperarse
	3. Neutral
	4. Lo acepto
	5. Me desagrada

Tabla 2.7. Ejemplo de cuestionario Kano. Elaboración propia. Tomado y traducido de Center for Quality Manegement (1993).

A: Atractivo

O: Obligatorio

U: Unidimensional

I: Indiferencia

Inv.: Respuesta inversa

⁷ Aunque también ha sido propuesta esta escala: 1.Lo disfruto, 2. Es una necesidad básica, 3. Neutral, 4. Me desagrada, pero lo acepto, 5. Me desagrada y no lo acepto.(Center for Quality Management, 1993, p.25)

D: Respuesta dudosa

Las tres primeras clasificaciones ya han sido descritas, detalleemos las faltantes: un cliente puede ser Indiferente a una característica de calidad, y su figura se representaría como una recta paralela al eje horizontal de la figura 2.10, esto indica que una mayor o menor funcionalidad respecto a esta característica no se refleja en un aumento o disminución de la satisfacción del cliente; una respuesta inversa indica que la interpretación de criterios funcionales y disfuncionales del diseñador es la inversa a la percepción del cliente (lo que la pregunta supone como funcional es percibido como no funcional por quien responde). Por último, cuando existe una contradicción en las respuestas a las preguntas, se clasifica en el último grupo, el de respuesta dudosa (ante un par de preguntas complementarias no es razonable contestar “me desagrada” a la pregunta funcional y “me desagrada” a la disfuncional).

		Requerimientos disfuncionales				
		1	2	3	4	5
Requerimientos Funcionales	1	D	A	A	A	U
	2	Inv.	I	I	I	O
	3	Inv.	I	I	I	O
	4	Inv.	I	I	I	O
	5	Inv.	Inv.	Inv.	Inv.	D

Tabla 2.8. Clasificación de requerimientos. Elaboración propia. Tomado y traducido de Center for Quality Management (1993).

2.3.4. Análisis detallado de los datos.

2.3.4.1 El mapa de las respuestas.

El análisis detallado comienza con una observación minuciosa del mapa de las respuestas, es decir, se crea una tabla de concentración de respuestas correspondiente a cada una de las preguntas del cuestionario (se muestra un ejemplo en la tabla 2.9), en donde el objetivo es observar la dispersión de las respuestas. Otros autores (Matzler y

Hinterhuber, 1998) prefieren hacer un gráfico en dos dimensiones con estos datos, en donde también se pueden identificar patrones de agrupaciones de respuestas.

A continuación se confeccionan índices que sintetizan la información del análisis básico y tablas que ordenan los atributos según su tipo: primero los obligatorios, seguidos de los unidimensionales, los atractivos, los indiferentes y, finalmente, los inversos.

Pregunta X		Requerimientos disfuncionales				
Requerimientos Funcionales		1	2	3	4	5
	1			
	2				..	
	3				
	4		
	5				

Tabla 2.9. Concentración de respuestas. Elaboración propia. Tomado y traducido de Center for Quality Management (1993).

2.3.4.2. Una prueba estadística.

El cuestionario de Kano se utiliza generalmente en contextos de desarrollo de productos donde tienen primacía los enfoques cualitativos. Sin embargo, no daña contar con una prueba estadística que permita evaluar la significatividad de la clasificación de Kano. Fong (Fong, 1996) ideó una prueba que consiste en calcular el valor de la diferencia absoluta de las dos frecuencias más votadas de las alternativas (A, O, U, I, Inv., y D) y compararlo con el estadístico

$$Q = \sqrt{(a+b)(2n-a-b)/2n} \quad (2.1)$$

Donde:

a, b: las frecuencias de las dos observaciones más frecuentes

n: número total de respuestas.

Este valor Q se compara con el de la diferencia absoluta Abs (*a-b*), y si la diferencia absoluta es menor, esto indica que no hay una diferencia significativa entre las dos

clasificaciones más frecuentes de cada pregunta, por lo que debe investigarse más a fondo, para descubrir la presencia de segmentos de mercado identificables o problemas en la formulación de la pregunta.

2.3.4.3. Cuestionario de atribución de importancia.

Aún habiendo unanimidad en las respuestas, conviene saber si el requerimiento es considerado importante por los clientes. Para ello se utiliza la Parte II de la encuesta, el cuestionario de atribución de importancia (Tabla 2.10), que también se utiliza para las representaciones alternas de requerimientos.

2.3.4.4. Una representación alterna.

Se ha propuesto una interpretación alterna de la clasificación de los requerimientos, basada en el incremento de la satisfacción (indicado en la fórmula 2.2 como Mejor) o bien el decremento de la misma (indicado en la fórmula 2.3 como Peor) debida a la inclusión o no de una necesidad como característica del producto. Estas fórmulas se obtienen de la percepción de ser Mejores que la competencia al satisfacer requerimientos tipo A (Atractivos) y U (Unidimensionales) o bien de la de ser Peores que la competencia al no satisfacer requerimientos tipo U (Unidimensionales) y O (Obligatorios). En el denominador de ambas fórmulas aparece una sumatoria de las percepciones de atributo A (Atractivos), O (Obligatorios), U (Unidimensionales) e I (Indiferencia). Nótese que se han suprimido de esta sumatoria las percepciones de Inv. (Respuesta inversa) y D (Respuesta dudosa) por su propio carácter confuso.

Para simplificar los cálculos es conveniente hacer una tabla de concentración de los resultados (tabla 2.11). En esta se agrupan los resultados obtenidos para cada uno de los requerimientos en torno a la clasificación obtenida. En base a las fórmulas 2.2 y 2.3 las columnas C1 y C2 (Tabla 2.11) se obtienen de multiplicar los valores obtenidos de Mejor y Peor por la Importancia promedio (la octava columna de la tabla 2.11), la cual es a su vez obtenida a partir del promedio de la evaluación de importancia del requerimiento. Estos valores C1 y C2 se grafican en una escala bidimensional de Mejor y Peor en donde se puede identificar la clasificación del tipo de requerimiento (figura 2.12).

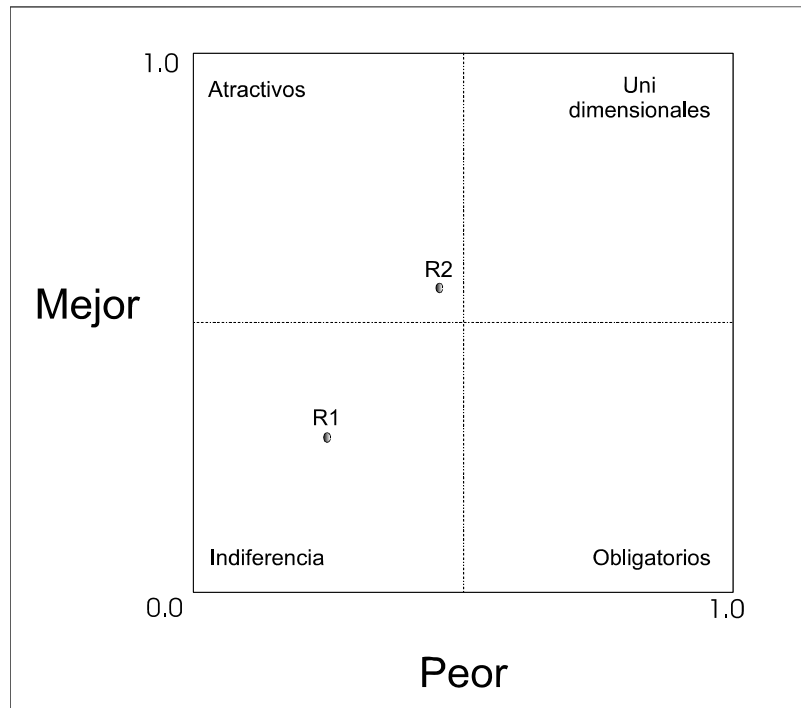


Figura 2.12. Tipos de Requerimientos del cliente (2). Elaboración propia. Tomado y traducido de Center for Quality Manegement (1993).

2.3.5. Producto básico, producto esperado, producto aumentado: su ciclo dinámico.

En general, los clientes no compran solamente un producto básico, sino un bien más complejo, integrado por atributos genéricos fundamentales y otros atributos complementarios. Es posible distinguir entre producto básico, producto esperado, producto ampliado y potencial, tal como lo muestra la tabla 2.12, teniendo muy claro que el concepto de producto básico, producto esperado y producto aumentado es dinámico (Yacuzzi y Martín, 2002). A medida que los mercados maduran, los clientes modifican sus expectativas y exigencias con respecto a los productos. Así, lo que hoy se considera un producto aumentado mañana puede ser un producto básico o un producto esperado y las empresas deben trabajar continuamente para diferenciar sus productos con nuevos atributos. En esta tarea puede ayudar el método de Kano.

Tipo de producto	Atributos requeridos en la clasificación de Kano
Producto básico	Atributos obligatorios
Producto esperado	Atributos obligatorios + Atributos unidimensionales
Producto ampliado	Atributos obligatorios + Atributos unidimensionales + Atributos atractivos incorporados
Producto potencial	Atributos obligatorios + Atributos unidimensionales + Atributos atractivos incorporados + Atributos atractivos aún no incorporados

Tabla 2.12. Diferentes combinaciones de requerimientos. Elaboración propia. Tomado de Yacuzzi y Martin (2002).

Con el método de Kano se busca fundamentalmente discriminar entre requerimientos atractivos, obligatorios y unidimensionales, poniéndolos en correspondencia con la clasificación de la figura 2.11. Esta discriminación tiene valor a la hora de tomar decisiones estratégicas. En efecto, en el momento de asignar los recursos, es recomendable concentrarlos en el diseño y la implantación de aquellos requerimientos que harán a nuestro producto o servicio más atractivo. Dado que los requerimientos de los clientes son generalmente numerosos, es importante lograr una mezcla adecuada de atributos: se deben incorporar todos los requerimientos obligatorios (que conforman el producto básico), una cantidad razonable de requerimientos unidimensionales (equivalentes a tener un producto esperado que sea competitivo) y algunos requerimientos atractivos (para ofrecer un producto ampliado que se destaque respecto a los de los de la competencia). Sobre esta base se desarrolla un producto ampliado y una estrategia de mercadeo que combine los requerimientos del siguiente modo:

1. Deben incluirse todos los requerimientos obligatorios y unidimensionales (producto esperado)
2. Deben incluirse algunos requerimientos atractivos (producto ampliado).
3. Otros requerimientos atractivos deben dejarse para versiones futuras del producto (producto potencial). No todos los requerimientos atractivos deberían incluirse en la primera versión del producto. Independientemente de la capacidad de desarrollo del laboratorio, siempre es posible algún tipo de competencia que imite algunas características innovadoras de nuestro producto. Por lo tanto, es conveniente dejar para versiones sucesivas algunos requerimientos atractivos.
4. Los requerimientos indiferentes deben omitirse o bien estudiarse con más profundidad para futuras versiones del producto.

2.3.6. Estudios recientes sobre el método Kano.

En la medición de la satisfacción del cliente en la industria del transporte, (Grigoroudis y Siskos, 2004), la modelación matemática utilizando modelos de programación lineal para medir la satisfacción del cliente (Grigoroudis et al, 2004) modelos de desagregación para medición y análisis de la satisfacción del cliente (Grigoroudis y Siskos, 2002) y de medición de la satisfacción de usuarios del sector bancario.(Mihelis et al., 2001), (Bhattacharyya y Rahman, 2004).

Además, los estudios orientados a la orientación de mercado en el desarrollo de nuevos productos (Redfern y Davey, 2003) y su relación con QFD (Shen et al., 2000), en el incremento de la satisfacción del cliente (Matzler et al., 1996) (Matzler y Hinterhuber, 1998), en el diseño de automóviles (Burns et al., 1999) y en el diseño de productos farmacéuticos (Yacuzzi y Martín, 2002).

2.4. EL ANÁLISIS FACTORIAL.

El análisis factorial es un método multivariante que intenta explicar un conjunto de variables observables mediante un número reducido de variables no observables llamadas factores. En cierto sentido, como toda técnica multivariante, se puede considerar que es un método de reducción de la dimensión por cuanto el espacio p -dimensional de las variables se reduce a un espacio m -dimensional de factores ($m < p$).

2.4.1. Introducción.

El análisis factorial es una técnica de análisis estadístico que trata de identificar la estructura de un conjunto de variables observadas. Su uso apropiado implica el estudio de las interrelaciones entre las variables (determinadas por las correlaciones o por la covarianza estadística), con el fin de hallar un nuevo conjunto de variables, menor en número que el de variables originales, que expresa lo que hay en común entre las variables originales. Cuando el número de variables originales es muy grande, con el análisis factorial se puede reducir este conjunto a otro menor de factores, reteniendo la mayor parte de la varianza de las variables originales (Santesmases, 1997:243).

Esto es debido a que cuando se recogen un gran número de variables de forma simultánea, se puede estar interesado en averiguar si las preguntas de un cuestionario se agrupan de alguna forma característica. Aplicando un análisis factorial a las respuestas de los sujetos, es posible encontrar grupos de variables con significado común, reduciendo así el número de indicadores necesarios para explicar las respuestas de los sujetos.

A diferencia de lo que ocurre en otras técnicas como el análisis de varianza o el de regresión, en el análisis factorial todas las variables del análisis cumplen el mismo papel: todas ellas son independientes en el sentido de que no existe a priori una dependencia conceptual de unas variables sobre otras.

Una clasificación general del Análisis Multivariado considera dos grupos básicos: Métodos de Dependencia y Métodos de Interdependencia. Este autor indica que el objetivo de los Métodos de Interdependencia es dar significado a un conjunto de variables o tratar de agrupar las cosas. Por tanto, el Análisis Factorial se ubicaría dentro de éstos últimos.

2.4.2. Antecedentes históricos.

Los antecedentes del Análisis Factorial se encuentran en las técnicas de regresión lineal, iniciadas por Galton. Un continuador suyo fue Pearson (1901), que presentó la primera propuesta del "método de componentes principales", primer paso para el cálculo del Análisis Factorial.

El origen del Análisis Factorial como tal, suele atribuirse a Spearman (1904), quien en su clásico trabajo sobre inteligencia distingue un factor general (factor G) y cierto número de factores específicos. Hotelling (1933), desarrolló un método de extracción de factores sobre la técnica de "componentes principales".

Después, Thurstone (1947) expresó la relación entre las correlaciones y las saturaciones de las variables en los factores. Introdujo el concepto de estructura simple. También desarrolló la teoría y método de las rotaciones factoriales para obtener la estructura factorial más sencilla. En un principio las rotaciones eran gráficas. Kaiser (1958) desarrolló el método Varimax para realizar rotaciones ortogonales mediante procedimientos matemáticos.

2.4.3. Supuestos del análisis factorial.

- a. Las variables observables están sustancialmente relacionadas y sus relaciones pueden explicarse a partir de un número de factores⁸ comunes mucho más reducido que el número inicial de variables.

⁸ Un factor es una combinación lineal de las variables originales. Los factores se representan geoméricamente mediante ejes ortogonales, es decir perpendiculares, lo que implica que los factores son independientes e

- b. Las variables observables son métricas, continuas e ilimitadas. Las distribuciones de estas variables son similares y no extremas (en algunos casos se asume que estas distribuciones son normales).
- c. Los factores comunes son variables métricas, continuas e ilimitadas y carecen de error de medida. Se suponen distribuidos con media 0 y varianza 1.
- d. Todas las relaciones del modelo son lineales.
- e. Los errores son aleatorios e independientes, tanto entre sí como de los factores. Se suponen normalmente distribuidos con media cero y varianza constante (homocedasticidad).

2.4.4. Modelo matemático general.

El modelo matemático del Análisis Factorial es parecido al de la regresión múltiple, de forma que cada variable se expresa como una combinación lineal de factores no observables directamente.

$$F_{ij} = P_{i1}Z_1 + P_{i2}Z_2 + \dots + P_{ir}Z_r = \sum_1^r F_{il}Z_l \quad (2.4)$$

Donde:

F_{ij} = La puntuación factorial del individuo j en el factor i .

P_{il} = Es la ponderación factorial de la variable l en el factor i .

Z_l = Son las puntuaciones típicas del sujeto con cada variable.

2.4.5. Tipos de análisis factorial.

Se puede hacer una distinción entre el Análisis Factorial Exploratorio, donde no se conocen los factores a priori, sino que se determinan mediante el Análisis Factorial y, por otro lado estaría el Análisis Confirmatorio donde se propone a priori un modelo, según el cual hay unos factores que representan a las variables originales, siendo el número de estos superior al de aquellos.

Para que el Análisis Factorial tenga sentido deberían cumplirse dos condiciones básicas: Parsimonia e Interpretabilidad, Según el principio de parsimonia los fenómenos

intercorrelacionados entre si. Los factores se generan de forma ordenada, según su importancia en la explicación de la varianza de las variables originales. (Santesmases, 1997:244)

deben explicarse con el menor número de elementos posibles. Por lo tanto, respecto al Análisis Factorial, el número de factores debe ser lo más reducido posible y estos deben ser susceptibles de interpretación sustantiva. Una buena solución factorial es aquella que es sencilla e interpretable.

2.4.6. Pasos del análisis factorial.

Esta técnica consta de tres fases características: (1) el cálculo de una matriz capaz de expresar la variabilidad conjunta de todas las variables, (2) la extracción del número óptimo de factores, (3) la rotación de la solución para facilitar su interpretación y (4) la estimación de las puntuaciones de los sujetos en las nuevas dimensiones (Ehrenberg, 1982).

2.4.6.1. Examen de la matriz de correlaciones (el cálculo de una matriz capaz de expresar la variabilidad conjunta de todas las variables).

El primer paso en el Análisis Factorial será calcular la matriz de correlaciones entre todas las variables que entran en el análisis. Para esto se debe obtener, en primer lugar, una matriz en la que se ubican las correlaciones entre todas las variables consideradas. Es conveniente realizar una serie de pruebas conexas (tests) que nos indicarán si es pertinente, desde el punto de vista estadístico, llevar a cabo el Análisis Factorial con la data y muestras disponibles. Al respecto, Miquel et al. (1999) señalan que la mayoría de programas computarizados que realizan el Análisis Factorial disponen de una serie de tests que permiten verificar si es posible llevar a cabo el mismo. Para explicar detalladamente todo esto, tomaremos en cuenta los resultados de un caso de análisis factorial realizado con SPSS⁹ (2001) utilizando para ello los datos del anexo 1.

Correlation Matrix^a

	Nivel educativo	Categoría laboral	Salario actual	Salario inicial	Meses desde el contrato	Experiencia previa (meses)	Fecha de nacimiento
Correlation Nivel educativo	1,000	,515	,661	,633	,050	-,252	,281
Categoría laboral	,515	1,000	,780	,755	,004	,062	-,010
Salario actual	,661	,780	1,000	,880	,084	-,097	,144
Salario inicial	,633	,755	,880	1,000	-,018	,045	,009
Meses desde el contrato	,050	,004	,084	-,018	1,000	,002	-,053
Experiencia previa (meses)	-,252	,062	-,097	,045	,002	1,000	-,802
Fecha de nacimiento	,281	-,010	,144	,009	-,053	-,802	1,000

^a. Determinant = ,012

Tabla 2.13. Matriz de Correlaciones. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

⁹ Statistical Package for the Social Sciences, <http://www.spss.com/>

2.4.7. Métodos de comprobación del grado de asociación entre las variables.

2.4.7.1. El determinante de la matriz de correlaciones. Un determinante muy bajo indicará altas intercorrelaciones entre las variables, pero no debe ser cero (matriz no singular), pues esto indicaría que algunas de las variables son linealmente dependientes y no se podrían realizar ciertos cálculos necesarios en el Análisis Factorial. En el caso del ejemplo (Tabla 2.13), se obtiene un determinante de .012, lo que indica una correlación muy buena.

2.4.7.2. Test de Esfericidad de Bartlett. La prueba de esfericidad de Bartlett (Bartlett, 1950) contrasta la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones es una matriz identidad. Asumiendo que los datos provienen de una distribución normal multivariante, el estadístico de Bartlett se distribuye aproximadamente según el modelo de probabilidad chi-cuadrado y es una transformación del determinante de la matriz de correlaciones. Si el nivel crítico (Sig) es mayor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula de esfericidad y, consecuentemente, no se puede asegurar que el modelo factorial sea adecuado para explicar los datos.

La formula correspondiente asume la siguiente expresión:

$$X^2 = - \left[n - 1 - \frac{1}{6} * (2 * v + 5) \right] * \ln |R| \quad (2.5)$$

Donde:

n = tamaño muestral.

v = número de variables.

\ln =logaritmo neperiano.

R =matriz de correlaciones.

En la tabla 2.14 del ejemplo, se advierte un Sig de 0.000 por lo tanto, los datos permiten realizar un análisis factorial.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,724
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	2075,310
	df	21
	Sig.	,000

Tabla 2.14. Índice KMO y test de Esfericidad de Bartlett. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

2.4.7.3. Índice KMO de Kaiser-Meyer-Olkin. La medida de adecuación muestral (KMO) contrasta si las correlaciones parciales entre las variables son suficientemente pequeñas. Permite comparar la magnitud de los coeficientes de correlación observados con la magnitud de los coeficientes de correlación parcial. La fórmula es la siguiente:

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} a_{ij}^2} \quad (2.6)$$

Donde:

r_{ij} = correlación simple.

a_{ij} = correlación parcial.

Valores bajos del índice KMO desaconsejan la utilización de Análisis Factorial. Para interpretar el índice KMO podría tomarse según Kaiser (en el caso del ejemplo, tabla 2.14, se obtiene un KMO=0.724, lo que indica un ajuste mediano en este indicador):

- 1 >= KMO >= 0.9 muy bueno
- 0.9 >= KMO >= 0.8 meritorio
- 0.8 >= KMO >= 0.7 mediano
- 0.7 >= KMO >= 0.6 mediocre
- 0.6 >= KMO > 0.5 bajo
- KMO <= 0.5 inaceptable

2.4.8. Extracción del número óptimo de factores.

La matriz factorial puede presentar un número de factores superior al necesario para explicar la estructura de los datos originales. Generalmente hay un conjunto reducido de factores, los primeros, que son los que explican la mayor parte de la variabilidad total. Los

otros factores suelen contribuir relativamente poco. Uno de los problemas que se plantean, por tanto, consiste en determinar el número de factores que debemos conservar.

Se han dado diversos criterios para determinar el número de factores a conservar. Uno de los más conocidos y utilizados es el criterio o regla de Kaiser (1960) que indica lo siguiente: "conservar solamente aquellos factores cuyos valores propios (eigenvalues) son mayores a la unidad". Este criterio es el que suelen utilizar los programas estadísticos por defecto.

Bartlett (1950) propuso una prueba estadística para contrastar la hipótesis nula de que los restantes $p-m$ autovalores son iguales (siendo p el número original de variables y m el número de factores o componentes retenidos). Cada autovalor es excluido de manera secuencial hasta que no puede ser rechazada la hipótesis nula a través de una prueba de Chi-cuadrado.

El Análisis Paralelo fue sugerido por Horn (1965) quien señala que a nivel poblacional los autovalores de una matriz de correlaciones para variables no correlacionadas tomarían valor 1. Cuando se generan matrices muestrales basadas en esa matriz poblacional por fluctuaciones debidas al azar los autovalores excederán levemente de 1 y los últimos estarán ligeramente por debajo de 1. Horn (op cit.) propone contrastar los autovalores encontrados empíricamente en los datos reales con los obtenidos a partir de una matriz de variables no correlacionadas basada en el mismo número de variables que los datos empíricos y en el mismo tamaño de muestra. Los componentes empíricos con autovalores superiores a los de la matriz son retenidos.

Existen otras herramientas que pueden ser útiles para decidir el número de factores a considerar. El software SPSS ofrece algunas, que a continuación se resumen brevemente.

2.4.8.1. Matriz factorial. A partir de una matriz de correlaciones, el Análisis Factorial extrae otra matriz que reproduce a la primera de forma más sencilla. Esta nueva matriz se denomina matriz factorial y adopta la siguiente forma (tabla 2.15):

	Componente		
	1	2	3
Fecha de nacimiento	,232	-,914	-,026
Nivel educativo	,806	-,172	,047
Categoría laboral	,843	,260	-,061
Salario actual	,944	,089	,041
Salario inicial	,910	,232	-,077
Meses desde el contrato	,043	,053	,996
Experiencia previa (meses)	-,179	,927	-,041

Tabla 2.15. Matriz de estructura factorial. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

En donde cada columna es un factor y hay tantas filas como variables originales. Los elementos P_{ij} pueden interpretarse como índices de correlación entre el factor i y la variable j , aunque estrictamente sólo son correlaciones cuando los factores no están correlacionados entre sí, es decir, son ortogonales. Estos coeficientes reciben el nombre de pesos o saturaciones factoriales. Los pesos factoriales indican el peso de cada variable en cada factor. Lo ideal es que cada variable cargue alto en un factor y bajo en los demás.

2.4.8.2. Eigenvalues (valores propios). La suma de los cuadrados de los pesos de cualquier columna de la matriz factorial es lo que denominamos eigenvalues (λ), indica la cantidad total de varianza que explica ese factor para las variables consideradas como grupo.

Las cargas factoriales pueden tener como valor máximo 1, por tanto el valor máximo que puede alcanzar el valor propio (eigenvalue) es igual al número de variables. En la tabla 2.16 se aprecia que el componente 1 posee una carga factorial de 3.167, el segundo 1.857, el tercero 1.008 y así sucesivamente.

Si dividimos el valor propio (la carga factorial total) entre el número de variables nos indica la proporción (porcentaje si se multiplica por 100) de las varianzas de las variables que explica cada factor (En la tabla 2.16 el factor 1 explica el 45.242%, el segundo factor el 26.528% y así sucesivamente).

Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	3,167	45,242	45,242	3,167	45,242	45,242
2	1,857	26,528	71,769	1,857	26,528	71,769
3	1,008	14,405	86,174	1,008	14,405	86,174
4	,429	6,125	92,299			
5	,247	3,523	95,822			
6	,194	2,776	98,598			
7	,098	1,402	100,000			

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Tabla 2.16. Varianza total explicada. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

2.4.8.3. Comunalidades. Se denomina comunalidad (communalities) a la proporción de la varianza explicada por los factores comunes en una variable, representa la suma de los pesos factoriales al cuadrado en cada una de las filas.

El Análisis Factorial comienza sus cálculos a partir de lo que se conoce como matriz reducida compuesta por los coeficientes de correlación entre las variables y con las comunalidades en la diagonal. En el Análisis de Componentes Principales como no se supone la existencia de ningún factor común la comunalidad toma como valor inicial 1 (tabla 2.17).

	Inicial	Extracción
Fecha de nacimiento	1,000	,889
Nivel educativo	1,000	,682
Categoría laboral	1,000	,782
Salario actual	1,000	,901
Salario inicial	1,000	,887
Meses desde el contrato	1,000	,997
Experiencia previa (meses)	1,000	,894

Tabla 2.17. Comunalidades. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

2.4.8.4. El gráfico de sedimentación. Otros criterios propuestos han sido por ejemplo, el Scree-test de Cattell (1966) consistente en representar en un sistema de ejes los valores que toman los eigenvalues (ordenadas) y el número de factor (abscisas). De esta forma, si un autovalor se aproxima a cero, significa que es incapaz de explicar una cantidad importante de la varianza total y se considera un factor residual y carente de sentido en el análisis.

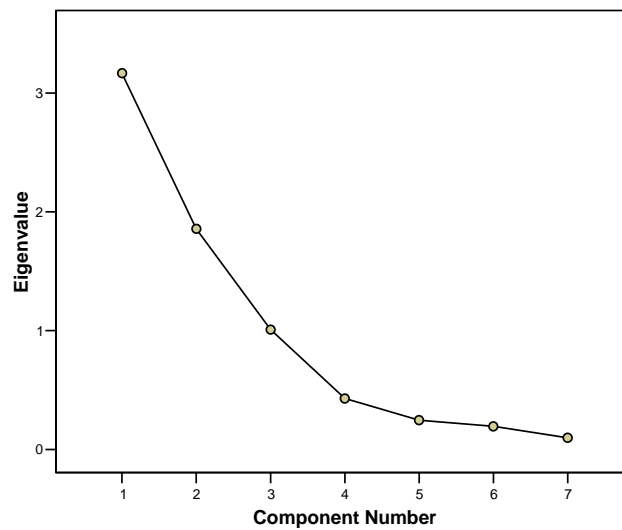


Figura 2.13. Gráfico de sedimentación. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

Al representar todos los autovalores (eigenvalues) según su tamaño, es posible formarse muy rápidamente una idea sobre si la cantidad de varianza asociada a cada uno de ellos es relevante para el análisis o si por el contrario se trata solo de varianza residual. Es conveniente inspeccionar el gráfico (2.13) de izquierda a derecha, buscando el punto de inflexión en el que los autovalores dejan de formar una pendiente significativa y comienzan a describir una caída de poca inclinación.

2.4.9. Rotaciones factoriales.

La matriz factorial indica, como se ha dicho, la relación entre los factores y las variables. Sin embargo, a partir de la matriz factorial muchas veces resulta difícil la interpretación de los factores.

Como se puede apreciar, esta matriz factorial (tabla 2.18) resulta difícil de interpretar pues no queda claro en que factor satura cada variable. Para resolver este problema, facilitando la interpretación, se realizan las rotaciones factoriales.

La rotación factorial pretende seleccionar la solución más sencilla e interpretable. En síntesis consiste en hacer girar los ejes de coordenadas, que representan a los factores, hasta conseguir que se aproxime al máximo a las variables en que están saturados.

	Componente		
	1	2	3
Fecha de nacimiento	,232	-,914	-,026
Nivel educativo	,806	-,172	,047
Categoría laboral	,843	,260	-,061
Salario actual	,944	,089	,041
Salario inicial	,910	,232	-,077
Meses desde el contrato	,043	,053	,996
Experiencia previa (meses)	-,179	,927	-,041

Tabla 2.18. Matriz de estructura factorial. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

La saturación de factores transforma la matriz factorial inicial en otra denominada matriz factorial rotada, de más fácil interpretación. La matriz factorial rotada (Tabla 2.19.) es una combinación lineal de la primera y explica la misma cantidad de varianza inicial.

	Componente		
	1	2	3
Fecha de nacimiento	,064	,940	-,046
Nivel educativo	,760	,317	,064
Categoría laboral	,877	-,104	-,030
Salario actual	,943	,085	,070
Salario inicial	,939	-,065	-,045
Meses desde el contrato	,020	-,021	,998
Experiencia previa (meses)	-,007	-,945	-,020

Tabla 2.19. Matriz factorial rotada. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

Existen varios métodos de rotación, tres de ellos ortogonales, mediante los cuales se respeta la independencia entre factores de la solución inicial (Kaiser, 1958). Estos métodos son:

1. **Varimax.** Método de rotación ortogonal que minimiza el número de variables que obtienen saturaciones altas en cada factor. De esta manera se pretende simplificar la interpretación de los factores optimizando la solución por columna. La tabla 2.19 se calculó utilizando este método.

2. **Quartimax.** Método de rotación ortogonal que minimiza el número de factores necesarios para explicar cada variable. Simplifica la interpretación de los factores optimizando la solución por columna.
3. **Equamax.** Método de rotación que es combinación del método Varimax, que simplifica los factores, y el método Quartimax, que simplifica las variables. Se minimiza tanto el número de variables que saturan alto en un factor como el número de factores necesarios para explicar la variable.

Existen también dos métodos de rotación oblicua, mediante los cuales pueden obtenerse factores relacionados entre sí. Los dos métodos principales son Oblimin directo y Promax (SPSS, 2001).

Como hemos dicho el objetivo de la rotación es obtener una solución más interpretable, una forma de conseguirlo es intentando aproximarla al principio de estructura simple (Thurstone, 1947). Según este principio, la matriz factorial debe reunir las siguientes características:

1. Cada factor debe tener unos pocos pesos altos y los otros próximos a 0.
2. Cada variable no debe estar saturada más que en un factor.
3. No deben existir factores con la misma distribución, es decir, los factores distintos deben presentar distribuciones de cargas altas y bajas distintas.

Estos tres principios en la práctica no suelen lograrse, lo que se trata es de alcanzar una solución lo más aproximada posible.

La correlación entre las variables puede representarse como el ángulo entre dos vectores, específicamente vendría dada como el coseno del ángulo entre dos vectores. Así tendremos una rotación ortogonal cuando la correlación entre factores sea nula o lo que es lo mismo, tienen un ángulo de 90 grados entre factores; y hablaremos de rotación oblicua cuando la correlación entre factores no sea nula y por tanto el ángulo distinto de 90 grados.

Lo más recomendable es la rotación ortogonal, aunque en el caso de que existan razones para pensar que los factores están correlacionados entonces utilizaremos la rotación oblicua. De entre las rotaciones ortogonales la más utilizada es la Varimax mientras en que las oblicuas es la Oblimin.

En la rotación oblicua las ponderaciones factoriales no coinciden con las correlaciones entre el factor y la variable, puesto que los factores están correlacionados entre sí. Por eso cuando hacemos rotación oblicua la matriz factorial no rotada se convierte en dos matrices diferentes: la matriz de ponderaciones (que es la que se utiliza en la interpretación) y la matriz de correlaciones entre factores y variables. También obtendremos otra matriz de correlaciones entre factores. La figura 2.14 muestra la rotación del conjunto de datos del ejemplo mediante una rotación Varimax y seleccionando tres factores.

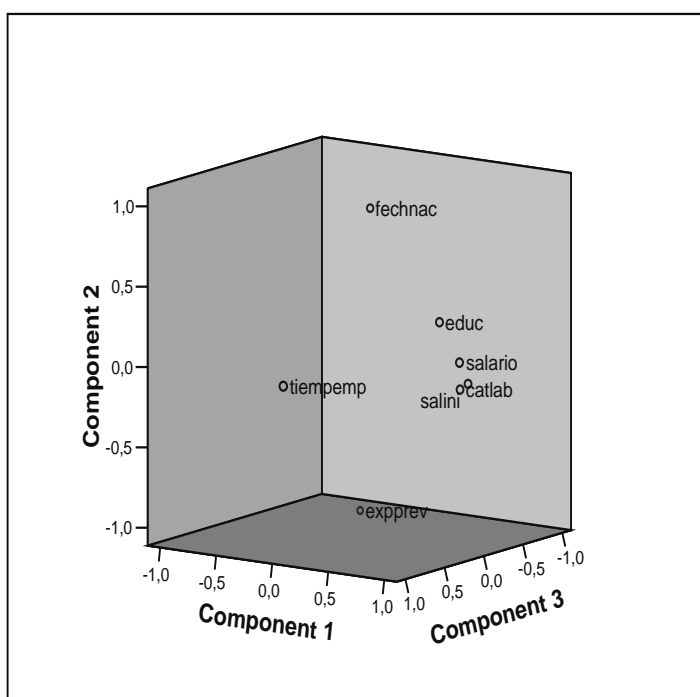


Figura 2.14. Gráfico factorial rotado. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

2.4.10. Puntuaciones factoriales.

Una vez que se tienen los factores puede interesar conocer que puntuación lograrían los sujetos en estos factores. Para contestar a esto hay que calcular lo que se conoce como puntuaciones factoriales de cada individuo.

El cálculo de las puntuaciones factoriales se realiza a partir de la matriz factorial rotada y se basa en el modelo de la regresión múltiple, de acuerdo con la fórmula:

$$F_{ij} = P_{i1}Z_{i1} + P_{i2}Z_{i2} + \dots + P_{ir}Z_{ir} = \sum_1^r F_{il}Z_{il} \quad (2.7)$$

Donde:

F_{ij} = La puntuación factorial del individuo j en el factor i .

P_{il} = Es la ponderación factorial de la variable l en el factor i .

Z_l = Son las puntuaciones típicas del sujeto con cada variable.

Las puntuaciones factoriales exactas sólo pueden calcularse estrictamente cuando el método de extracción ha sido el de Análisis de Componentes Principales. Con los otros métodos sólo podrán hacerse estimaciones por medio de algún método correlacionado.

Para los datos del ejemplo, se obtienen los siguientes datos en SPSS, al considerar la existencia de tres factores (Tabla 2.20):

	Componente		
	1	2	3
Nivel educativo	,255	-,093	,046
Categoría laboral	,266	,140	-,060
Salario actual	,298	,048	,041
Salario inicial	,287	,125	-,076
Meses desde el contrato	,014	,028	,988
Experiencia previa (meses)	-,056	,499	-,041
Fecha de nacimiento	,073	-,492	-,026

Tabla 2.20. Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones. Resultado de procesamiento con SPSS de datos anexo 1.

De esta manera, se puede calcular la puntuación factorial del individuo j en los factores 1, 2 y 3.

$$F_{1j} = 0.255(\text{Nivel educativo}) + 0.266(\text{Categoría laboral}) + 0.298(\text{Salario actual}) + 0.287(\text{Salario inicial}) + 0.014(\text{Meses desde el contrato}) - 0.056(\text{Experiencia previa}) + 0.073(\text{Fecha de nacimiento})$$

$$F_{2j} = -0.093(\text{Nivel educativo}) + 0.140(\text{Categoría laboral}) + 0.048(\text{Salario actual}) + 0.125(\text{Salario inicial}) + 0.028(\text{Meses desde el contrato}) + 0.499(\text{Experiencia previa}) - 0.492(\text{Fecha de nacimiento})$$

$$F_{3j} = 0.046(\text{Nivel educativo}) - 0.060(\text{Categoría laboral}) + 0.041(\text{Salario actual}) - 0.0767(\text{Salario inicial}) + 0.988(\text{Meses desde el contrato}) - 0.041(\text{Experiencia previa}) - 0.026(\text{Fecha de nacimiento})$$

Es así que se cumplen los objetivos del análisis factorial, que son el determinar el número de factores que influyen a un conjunto de mediciones, conocer la fuerza de las relaciones entre cada uno de estos factores y cada medición observada, de manera que se pueda conocer la naturaleza de las respuestas subyacentes en un área específica.

2.5. LA INGENIERÍA KANSEI.

La Ingeniería Kansei (Nagamachi, 1995), es una herramienta auxiliar en el desarrollo de nuevos productos orientada al consumidor, en base a trasladar y plasmar las imágenes mentales, percepciones, sensaciones y gustos del consumidor a los elementos de diseño que componen un producto.

2.5.1. Introducción.

Al recoger y analizar la voz del usuario para conocer los requisitos que éste desea que satisfaga un producto, puede ocurrir que su posterior traducción en especificaciones de diseño sea más o menos directa o inmediata. Es decir, puede saberse cómo cumplir un conjunto de requisitos y cómo medir si estos se alcanzan mediante una propuesta de diseño, o bien, no saber cómo materializarlos.

En caso contrario, se requiere un trabajo de investigación e interpretación de requerimientos subjetivos y poco definidos en el cual la labor del diseñador es dar forma a un nuevo producto integrando los deseos y demandas de sus usuarios, de forma que no solamente se consideren aspectos técnicos o funcionales, sino también factores estéticos, emocionales, las sensaciones de uso (Lee et al., 2003), es decir, el conjunto de **Chisei-**

Kansei¹⁰; logrando un balance entre las propiedades objetivas y subjetivas, entre la funcionalidad tecnológica y expresividad emocional, entre información e inspiración.

La ingeniería Kansei brinda una aproximación a la comprensión de la percepción emocional del usuario que tiene sus orígenes filosóficos en el trabajo del alemán Baumgarten, AESTHETICA. Así mismo, hace un replanteamiento de la teoría de Maslow (1987) de evolución de las necesidades del cliente enfocándola al diseño industrial.

Precisamente, Kansei es una palabra japonesa que se puede interpretar como la imagen mental y percepción psicológica del consumidor ante un nuevo producto que retoma las ideas de Herzberg (1966), de forma que permite que el diseño de producto corresponda a esa imagen (tal como muestra la figura 2.15) y lográndose como resultado la satisfacción plena de las expectativas del usuario (Jindo et al., 1995).

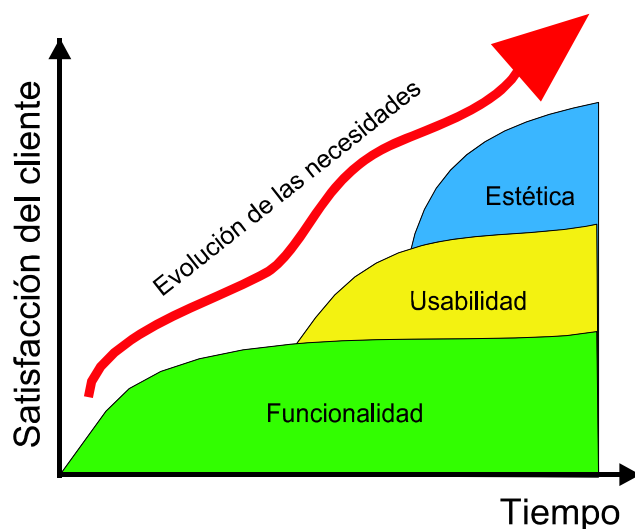


Figura 2.15. Evolución de las necesidades. Elaboración propia. Adaptación de la escala de necesidades de Maslow (1987).

Mitsuo Nagamachi inicio el tratamiento formal de esta técnica en la Universidad de Hiroshima en 1970 bajo la premisa de encontrar una metodología orientada a:

1. Comprender precisamente el Kansei del consumidor como base para determinar las diferencias de percepción entre los fabricantes y los consumidores

¹⁰ Kansei en el idioma japonés contrasta con Chisei. El Kansei representa los sentimientos subjetivos y estéticos mientras que el Chisei conjuga el conocimiento racional. En conjunto, el Kansei y el Chisei determinan la manera en la que las personas perciben e interactúan con el mundo.

2. Constituir criterios que determinen la lógica que utiliza el consumidor a la hora de elegir entre la amplia gama de productos que cubren la misma necesidad. Se busca la relación entre el criterio lógico "bueno-malo", y el criterio psicológico "me gusta-no me gusta". Más tarde se intenta clarificar el conflicto entre ambos criterios y determinar un método para tratar las divergencias.
3. Traducir los valores Kansei cuantificados al diseño del producto
4. Estandarizar el diseño orientado al Kansei como una filosofía organizacional.

2.5.2. Definición de Kansei.

No existe una definición comúnmente aceptada, sin embargo, la palabra Kansei incluye estos significados (Nagamachi, 1995):

1. Un sentimiento personal hacia un objeto, que al ser percibido, aumenta la calidad de un producto.
2. El conjunto de sentimientos y emociones que se perciben de un producto, en el contexto funcional y de su apariencia.
3. Los sentimientos y emociones difusos que se tienen de un producto y que no se expresan.

Una vez garantizada la durabilidad, seguridad, eficacia, apariencia agradable y un precio realista del producto, con la Ingeniería Kansei se pretende dotar al mismo de una sobrecalidad que permita una adaptación específica al usuario. "Hacer a la medida" según las preferencias del usuario se convierte en una de las máximas del método. Con esta metodología se pretende mejorar los atributos de diseño estudiando el modo con el que el usuario los percibe.

2.5.3. Procedimiento general de la ingeniería Kansei.

La aplicación de este método se puede dividir en tres etapas principales: (Nagamachi, 1995):

2.5.3.1. Obtención y cuantificación de la respuesta del usuario en términos Kansei (valoración psico-sociológica).

Esta actividad involucra decisiones acerca de que datos recolectar así como las técnicas a utilizar en esta etapa, siendo las formas más antiguas de recolección las basadas en cuestionarios de percepción del producto, la técnica de diferenciales semánticos (Osgood, 1957) junto con la de relleno de cuadros de texto son las más utilizadas, sin embargo esta última es criticada porque no otorga un rango de importancia a los adjetivos obtenidos (Faraday Packaging Partnership, 2004).

Existen otros métodos que recurren al subconsciente, utilizados por compañías como Seiko y Mazda (Faraday Packaging Partnership, 2004). Estas técnicas emplean sensores de movimiento ocular que registran el tiempo dedicado a la observación de objetos o elementos de diseño y lo relacionan con parámetros fisiológicos captados con otro conjunto de sensores durante este período.

2.5.3.2. Identificar las características de diseño de un producto desde la percepción del usuario.

En el análisis de datos de los métodos de cuestionario, las herramientas más utilizadas son las que recurren al análisis de regresión y a la extracción de datos (data mining). En el primero predomina el análisis de componentes principales (PCA), el análisis factorial y el análisis de grupos (cluster analysis).

2.5.3.3. Implantación de la herramienta a partir de los datos anteriores.

A continuación se detallan brevemente los principales métodos

Tipo 1: Categoría de clasificación

Este es un método en el cual una categoría Kansei de un producto se descompone en un árbol estructural hasta llegar a los detalles de diseño (figura 2.16).

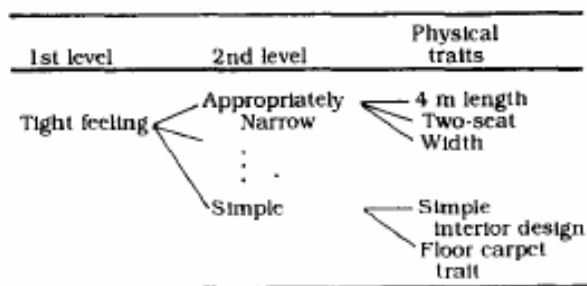


Figura 2.16. Ejemplo de Kansei Tipo 1. Tomado de Nakada (1997).

Tipo 2: -Sistema computarizado de ingeniería Kansei

El sistema de ingeniería Kansei (KES) es un sistema computarizado que emplea un sistema experto para transferir las imágenes y emociones del consumidor a detalles de diseño, a continuación se describe su estructura y funcionamiento.

Este tipo de Kansei consiste en un sistema experto que transforma los sentimientos que se desea que el producto transmita al consumidor ("Kansei") en elementos de diseño. El objetivo es que a partir de una o más palabras descriptivas del objetivo "Kansei" de diseño, el sistema experto genere por sí solo las características del diseño (colores, dimensiones, prestaciones etc.). Su arquitectura contiene principalmente cuatro bases de datos:

- i. La base de datos de palabras. se construye a través de la captación del universo semántico del producto (palabras que el consumidor utiliza para describir sus sensaciones del producto), así como de la configuración de las escalas semánticas (conceptos independientes entre sí) que lo caracterizan. Básicamente es un sistema capaz de encontrar las proyecciones de las palabras que describen el objetivo "Kansei" de diseño en un sistema de ejes semánticos independientes.
- ii. La base de datos de imagen. contiene las relaciones entre los elementos de diseño y las palabras utilizadas por el usuario. Esta base se construye a partir del tratamiento de datos obtenidos en la fase anterior y su relación con los elementos de diseño mediante la Teoría Cuantitativa Tipo I de Hayashi (1976), que es un tipo de análisis de regresión múltiple con datos cualitativos, o a través de técnicas de inteligencia artificial. Esta base es capaz de crear, a partir de componentes semánticas generadas por la base de datos de palabras, componentes de diseño del producto.
- iii. La base de conocimientos. a partir de los datos anteriores y de otras restricciones posibles decide cuáles son los elementos de diseño finales sugeridos para el producto. En esta base se establecen las reglas necesarias para decidir en cada caso los elementos de diseño más correlacionados con ciertos calificativos y viceversa.
- iv. La base de datos de diseño y de color. los detalles de diseño se implementan, al igual que los colores, considerando su correlación absoluta con las palabras del usuario.

Un KES funciona de la forma la siguiente: el usuario (fabricante, diseñador, e incluso consumidor) introduce en el sistema las palabras que identifican los atributos deseados en el producto. El sistema ve si las puede reconocer en su base de datos de palabras. Si puede

hacerlo, utiliza la base de datos de imagen y de reglas y decide los elementos de diseño y el color que más se ajustan a las palabras utilizadas por el usuario.

Para construirlo es necesario en primer lugar decidir el ámbito de aplicación. A partir de ahí se recopilan las palabras "Kansei" y se aplica el Diferencial Semántico (Osgood, 1957) para definir los ejes semánticos del producto. Seguidamente, con la definición de los elementos de diseño y con una muestra de productos que equilibre su distribución, se realizan pruebas con usuarios a partir de las cuáles será posible encontrar, mediante técnicas de tratamiento de datos más o menos complejas, las relaciones entre los calificativos usados por los usuarios y los elementos de diseño.

Con los datos de los que se dispone en este estadio, es posible construir y utilizar el KES de dos formas distintas.

- a. Como soporte para el diseñador: éste será capaz de traducir en elementos de diseño los sentimientos que desea transmitir al consumidor con el producto.
- b. Como sistema de evaluación de un diseño: el diseñador está en disposición de conocer cuál va a ser la interpretación del usuario a partir de combinaciones de parámetros de diseño y de colores.

El diagrama de funcionamiento se muestra en la figura 2.17.

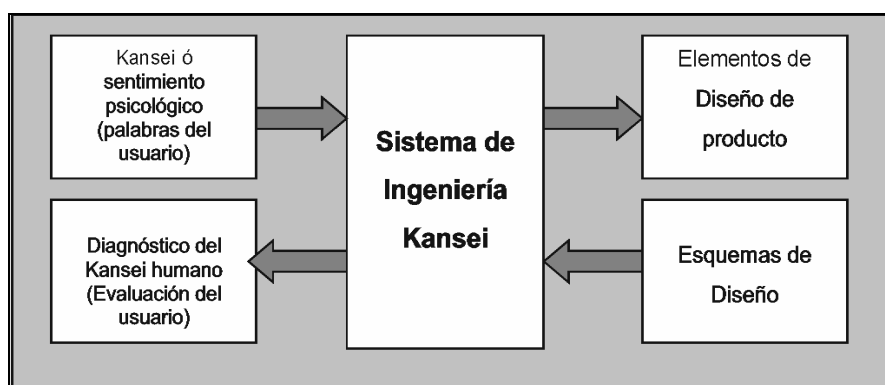


Figura 2.17. Diagrama de proceso del Kansei Engineering System (KES). Elaboración propia. Tomado y traducido de Yang et al. (1999).

La estructura del sistema que soporta la aplicación de la ingeniería Kansei es relativamente compleja. La figura 2.18 representa la estructura del sistema reversible (lo que se ha dado en llamar Kansei híbrido).

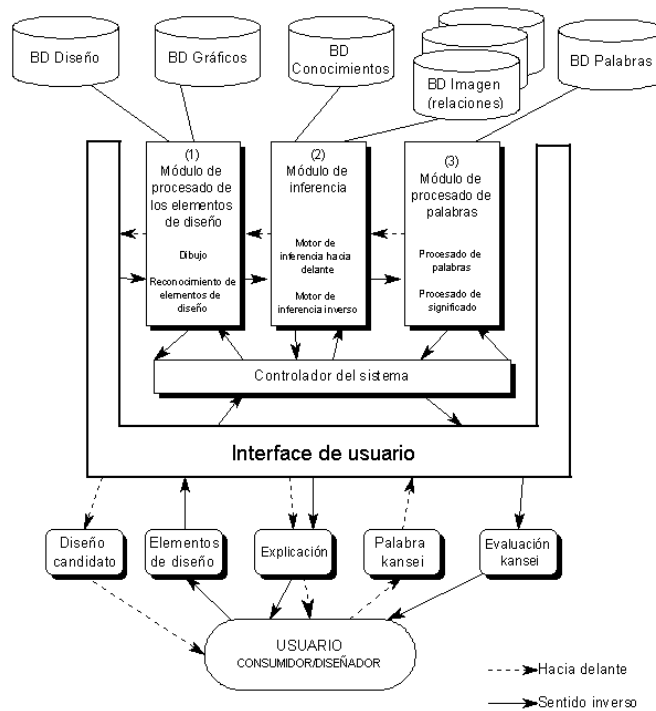


Fig. 2.18. Estructura del sistema del KES híbrido. Tomado de Yacuzzy y Martin (2002).

2.5.4. Campo de aplicación.

Las aplicaciones de la ingeniería Kansei al diseño de productos han sido relativamente frecuentes en los últimos 10 años en los países orientales. En un principio se aplicó al desarrollo de la industria del automóvil, ámbito en el que se conocen el mayor número de aplicaciones. Nissan, Mazda y Mitshubishi, en las fueron los primeros en la aplicación del Kansei al desarrollo de componentes de sus modelos como volantes, velocímetros o frontales (Nagamachi, 2002) (Nagamachi, 1995), en el de la forma del panel de instrumentos (Hsiao y Huang, 2002), en la percepción del interior del automóvil (Tanoue et al., 1997).

En la industria de muebles de oficina, para sistemas de fotocopiado e impresión (Nagamachi, 2002), de sillas de oficina (Jindo et al., 1995) (Hsiao y Chen, 1997), teléfonos (Hsu et al., 2000) y mobiliario variado (Lee et al., 2003).

Así, se encuentran en la literatura aplicaciones tan diversas como el diseño de uniformes para escolares (Nagamachi et al., 1988), de cocinas (Matsubara y Nagamachi, 1997), de copas para vino (Petiot y Yannou, 2004), diseño de gafas (Fujie, et al., 1997), de

prótesis mamarias (Maekawa, 1997), y en el incremento de la facilidad de uso en grabadoras de videocasete (Nagasawa, 1999).

La ingeniería Kansei es de aplicación a cualquier producto, estando especialmente indicada en aquéllos en los que los aspectos de percepción cobran mayor importancia. En definitiva, lo que se pretende con la Ingeniería Kansei es diseñar más allá de lo que los ojos pueden ver, para cubrir las expectativas del consumidor que superan las básicas exigencias de calidad y funcionalidad.

2.6. TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS (FUZZY SET THEORY).

La lógica clásica, o lógica binaria, no resulta adecuada cuando se trata de describir el razonamiento humano, ya que solo "conoce" dos valores, verdad (1) y falsedad (0), mientras que en la vida real, y en particular en el diseño industrial, existen eventos que no se pueden definir como totalmente verdaderos o totalmente falsos sino que tienen un grado de verdad, o falsedad, que puede variar de 0 a 1, que requieren la aproximación matemática no binaria que brinda la lógica difusa.

En este apartado se presenta una descripción breve de los principios de este tipo de razonamiento matemático, sin la pretensión de mostrar definiciones matemáticas que pueden resultar complejas (aunque no se niega su importancia), sino más bien con el fin de sentar los principios básicos de esta rama y el enfoque que se desea dar a este trabajo de tesis.

2.6.1. Introducción.

La mayoría de los fenómenos que encontramos cada día son imprecisos, es decir, tienen implícito un cierto grado de difusidad en la descripción de su naturaleza. Esta imprecisión puede estar asociada con su forma, posición, momento, color, textura, o incluso en la semántica que describe lo que son; incluso existen casos en que el mismo concepto puede tener diferentes grados de imprecisión en diferentes contextos o tiempo (un día cálido en invierno no es exactamente lo mismo que un día cálido en primavera). Este tipo de imprecisión, asociado a infinidad de situaciones es un tema común en muchos campos de estudio: sociología, física, biología, finanzas, ingeniería, oceanografía, psicología, etc.

Sin embargo, aceptamos la imprecisión como una consecuencia natural de "la forma de las cosas en el mundo" y la dicotomía entre el rigor y la precisión del modelado matemático en todos los campos y la intrínseca incertidumbre de "el mundo real" no es generalmente aceptada por científicos y filósofos, sin embargo, se admite que lo que hace el ser humano es comprender, asimilar y procesar de manera implícita la imprecisión de la información fácilmente, de forma que esta capacitado para formular planes, tomar decisiones y reconocer conceptos con un alto nivel de vaguedad y ambigüedad.

Considere las siguientes expresiones:

- La temperatura está caliente
- La inflación actual aumenta rápidamente
- Los grandes proyectos generalmente tardan mucho
- Nuestros precios de venta están por abajo de los precios de la competencia

La teoría de conjuntos difusos es una generalización de la teoría de conjuntos clásica, y tiene como premisa fundamental que "Todo es cuestión de grado". Esta visión contrasta con la visión de la teoría clásica de conjuntos, bajo la cual se afirma que un objeto pertenece o no a un conjunto y para cualquier objeto se puede definir su pertenencia o no a un determinado conjunto.

La lógica difusa (también llamada lógica borrosa, o fuzzy logic), es básicamente una lógica multivaluada que permite valores intermedios para definir una forma en la que expresiones convencionales, como "más bien caliente" o "poco frío" pueden ser planteadas matemáticamente. De esta forma, se pretende aplicar una forma más humana de pensar en la modelación matemática. La lógica borrosa se inició en 1965 por Lotfi A. Zadeh (1965), profesor de ciencia de computadoras en la Universidad de California en Berkeley.

2.6.2. Breve reseña histórica.

Desde la época de los grandes filósofos griegos, se ha venido cuestionando la efectividad de la dicotomía cierto – falso, pensadores posteriores también formularon sus conceptos, mucho antes que Lotfi A. Zadeh definiera los conjuntos difusos y moldeara luego la teoría de la lógica difusa, como se puede apreciar en la siguiente reseña (tabla 2.21):

Año	Suceso
380 A.C.,	La ley del tercero excluido. Esta "ley básica del pensamiento" establece que cualquier proposición solo puede ser Verdadera o Falsa y que ningún otro valor de verdad intermedio está permitido. Incluso cuando Parmínedes (300 aC) propuso la primera versión de esta ley ya encontró serias e inmediatas objeciones. Heráclito propuso cosas que podían ser simultáneamente ciertas y falsas. Sería Platón quien pusiera la "primera piedra" de la Lógica Difusa indicando que "hay una tercera región entre lo verdadero y lo falso donde los opuestos se presentan juntos"
siglo XVIII	En Inglaterra el filósofo David Hume habla de la lógica del sentido común (razonamiento basado en la experiencia que la gente comúnmente adquiere de sus vivencias por el mundo). El filósofo norteamericano Charles Sander Pierce fue el primero en considerar la vaguedad en vez de la dicotomía cierto-falso, como una forma de enmarcar la forma en que el mundo y las personas funcionan. También en este siglo es desarrollada la teoría original de conjuntos clásicos (binaria) por el matemático alemán Georg Kantor.
	La idea de que la lógica produce contradicciones fue popularizada por el filósofo y matemático británico Bertrand Russell, a principios del siglo XX. Russell estudió las vaguedades del lenguaje y llegó a la conclusión que la vaguedad es un grado.
1920	El filósofo polaco Jan Lukasiewicz propone la primera lógica de vaguedad. Desarrolló conjuntos con posibles valores de pertenencia 0, $\frac{1}{2}$ y 1 (lógica trivaluada). Posteriormente los extendió hacia un número infinito de valores entre 0 y 1 (lógica multivaluada).
1962	Lotfi Zadeh cuestiona la efectividad de las matemáticas tradicionales, las cuales resultaban intolerantes ante la imprecisión y ante verdades parciales.
1964	Aparece por primera vez la noción de conjuntos difusos en un artículo debido al mismo Zadeh en la Universidad de California en Berkeley.
1965	La revista "Information and Control" publica el artículo anterior, en donde aparece el artículo de Zadeh, "Fuzzy Sets".
1971	Zadeh publica el artículo, "Quantitative Fuzzy Semantics", en donde Introduce los elementos formales que acabarían componiendo el cuerpo de la doctrina de la lógica difusa y sus aplicaciones tal como se conocen en la actualidad.
1974	El Británico Ebrahim Mamdami, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. Desarrolla el primer sistema de control Fuzzy práctico, la regulación de un motor de vapor.
1978	Los ingenieros daneses Lauritz Peter Holmbland y Jens-Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de control difuso comercial, destinado a una planta de cemento.
1987	Se inaugura en Japón el subterráneo de Sendai, uno de los más espectaculares sistemas de control difuso creados por el hombre.
1987	"FUZZY BOOM", se comercializan multitud de productos basados en la lógica difusa (sobre todo en Japón).
1989	Creación de LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering Research) por el Ministerio de Comercio Internacional e Industria en Japón (MITI).

Tabla 2.21. Reseña histórica del avance de la lógica difusa. Tomado de Mordeson y Premchand (2001).

2.6.3. ¿Qué es la Lógica Difusa?

La Lógica Difusa, que hoy en día se encuentra en constante evolución, se basa en una premisa fundamental: el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto esta determinado por una función de pertenencia (se presentará una definición formal más

delante), que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo $[0,1]$. La representación de la función de pertenencia de un elemento a un Conjunto difuso podría ser como la figura 2.19.

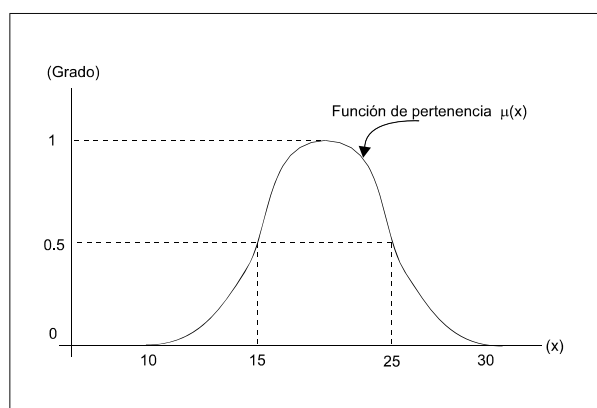


Figura 2.19. Ejemplo de una función de pertenencia de un Conjunto Difuso. Elaboración propia. Tomado de Zimmerman y Sebastián (1994).

Explicemos más a fondo esto que de primera mano se aparta de la lógica de conjuntos tradicional.

2.6.4. Conjuntos Difusos. Definiciones.

Los conjuntos clásicos se definen mediante un predicado que da lugar a una clara división del Universo de Discurso X en los valores "Verdadero" y "Falso". Sin embargo, el razonamiento humano utiliza frecuentemente predicados que no se pueden reducir a este tipo de división: son los denominados predicados vagos (Mordeson y Premchand, 2001).

Por ejemplo, tomando el Universo de Discurso formado por todas las posibles temperaturas ambientales en una ciudad determinada, se puede definir en dicho universo el conjunto A como aquél formado por las temperaturas "cálidas".

Por supuesto, es imposible dar a A una definición clásica, ya que su correspondiente predicado no divide el universo X en dos partes claramente diferenciadas. No podemos afirmar con rotundidad que una temperatura es "cálida" o no lo es. El problema podría resolverse en parte considerando que una temperatura es "cálida" cuando su valor supera cierto umbral fijado de antemano. Se dice que el problema tan sólo se resuelve en parte, y de manera no muy convincente, por dos motivos: por una parte el umbral mencionado se

establece de una manera arbitraria, y por otro lado podría darse el caso de que dos temperaturas con valores muy diferentes fuesen consideradas ambas como "cálidas". Evidentemente, el concepto "calor" así definido nos daría una información muy pobre sobre la temperatura ambiental.

La manera más apropiada de dar solución a este problema es considerar que la pertenencia, o no pertenencia de un elemento x al conjunto A no es absoluta, sino gradual. En definitiva, definiremos A como un Conjunto Difuso y su función de pertenencia ya no adoptará valores en el conjunto discreto $\{0,1\}$ (lógica Booleana), sino en el intervalo cerrado $[0,1]$. En conclusión, podemos observar que los Conjuntos Difusos son una generalización de los conjuntos clásicos.

Un conjunto difuso es un aquel que puede contener elementos con grados parciales de pertenencia, a diferencia de los Conjuntos Clásicos (Crisp Sets), en los que los elementos pueden solamente "perteneer" ó "No Perteneer" a dichos conjuntos.

Mediante notación matemática, se puede definir un Conjunto Difuso A como:

Definición 2.6.1 (Conjunto difuso).- Un conjunto difuso A en el universo (dominio) X es un conjunto definido por una función de pertenencia, la cual es una representación del universo X en el intervalo unitario:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (2.7)$$

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

Definición 2.6.2 (Función de pertenencia).- En términos generales, una función de pertenencia (Membership Function, MF), es una curva que determina el grado de pertenencia de los elementos de un conjunto. Se denota generalmente por μ y puede adoptar valores entre 0 y 1; por otro lado, si el valor de la función de pertenencia equivale a 1, x pertenece completamente al conjunto difuso y si equivale a cero, x no pertenece al conjunto.

$$\mu_A(x) \begin{cases} = 1 & x \text{ pertenece totalmente a } A \\ \in (0,1) & x \text{ pertenece parcialmente a } A \\ = 0 & x \text{ no es miembro de } A \end{cases} \quad (2.8)$$

Ejemplo 1

Sea un conjunto X , formado por todos los números reales entre 0 y 10 (Universo de Discurso). Sea un conjunto A (subconjunto de X) definido de la siguiente manera:

$$A = \{x \mid 5 \leq x \leq 8\}$$

El conjunto A se puede representar mediante su Función de Pertenencia (Función que asigna a cada elemento de X [1] ó [0], dependiendo si el elemento pertenece o no al conjunto) como se ilustra en la gráfica 2.20:

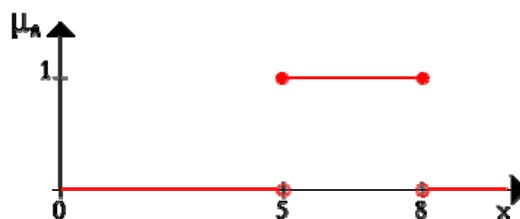


Figura 2.20. Conjunto "Crisp". Elaboración propia.

El conjunto A es un conjunto clásico (Crisp). Aunque este tipo de conjuntos tiene mucha aplicabilidad en distintas áreas, hay ocasiones en donde la falta de flexibilidad de estos conjuntos los hace inapropiados, como se muestra a continuación:

$$\text{Sea } B = \{\text{conjunto de la gente joven}\}$$

Un intento para construir este conjunto es definir un intervalo en años (conjunto clásico) de la siguiente manera:

$$B = [0,20] = \{x \mid 0 \leq x \leq 20\}$$

Lo anterior implicaría que una persona sería joven hasta el día de su cumpleaños número 20, pero al siguiente día ya no lo sería. Ahora, si se cambiase el límite superior del intervalo el problema persistiría.

Una forma más natural de construir el conjunto B , es eliminando esa estricta separación entre ser joven y no serlo, admitiendo grados de pertenencia intermedios entre [0] y [1]. Por lo tanto el conjunto B será un Conjunto Difuso (figura 2.21).

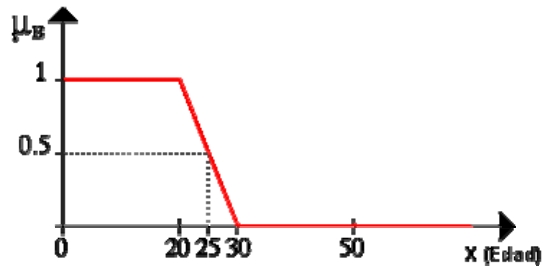


Figura 2.21. Ejemplo de un conjunto difuso. Elaboración propia.

La función de pertenencia que podría describir el conjunto B sería la siguiente:

$$B = (x, \mu_B(x)) \begin{cases} \mu_B(x) = 1 & 0 \leq x \leq 20 \\ \mu_B(x) = -0.1x + 3 & 20 < x < 30 \\ \mu_B(x) = 0 & x \geq 30 \end{cases}$$

De esta manera una persona de 25 años es todavía joven pero con un grado del 50%. Finalmente, se denomina Universo de Discurso al conjunto de valores que puede tomar una variable. La función de pertenencia se establece de una manera arbitraria, lo cual es uno de los aspectos más flexibles de los Conjuntos Difusos. Por ejemplo, se puede convenir que el grado de pertenencia de una temperatura de "45° C" al conjunto A es 1, el de "25° C" es 0.4, el de "6° C" es 0, etc.

Para operar en la práctica con los Conjuntos Difusos, se suelen emplear funciones de pertenencia del tipo representado en la figura 2.22.

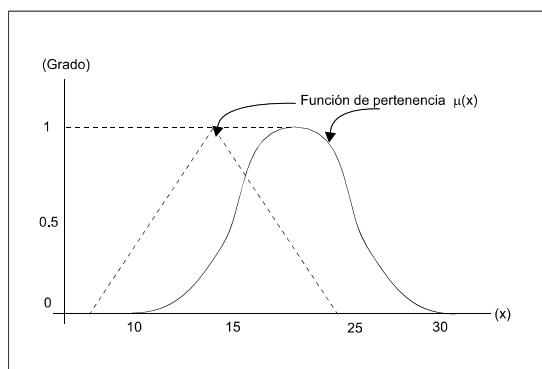


Figura 2.22. Tipos de funciones de pertenencia. Elaboración propia. Tomado de Zimmerman y Sebastian (1994).

En esta figura se pueden observar los dos tipos de funciones de pertenencia más comúnmente utilizados por su simpleza (Mc Neill y Thro, 1994): el tipo triangular, que puede ser un caso concreto del trapezoidal en el que los dos valores centrales son iguales, y el de forma de campana gaussiana; aunque, es necesario aclarar, existen otros tipos de funciones de pertenencia, como se muestra en la figura 2.23:

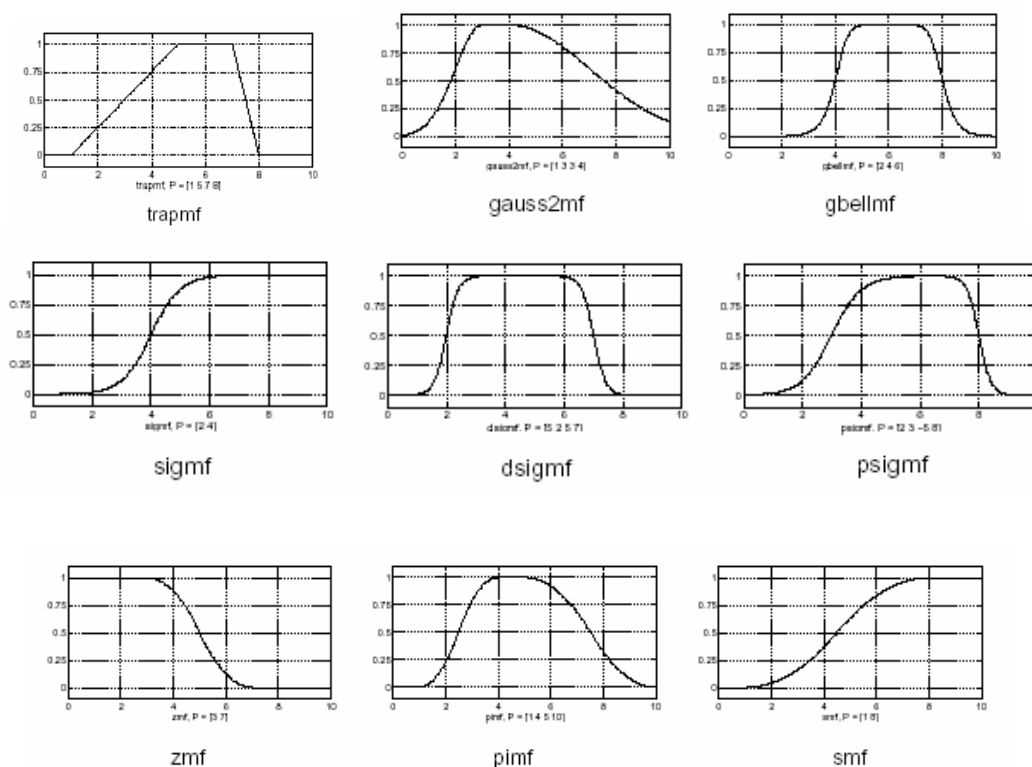


Figura 2.23. Diferentes funciones de pertenencia: trapezoidal (trapmf), variantes de gauss (gauss2mf y gbellmf), sigmoidal (sigmf), diferencia de sigmoidales (dsigmf), producto de dos sigmoidales (psigmf), y las polinomiales (zmf, pimf y smf) Tomado del manual de Fuzzy toolbox de Matlab (The MathWorks, 2000).

Ejemplo 2.

Tómese ahora el Universo de discurso de la edad. El Conjunto Difuso "Joven" representa el grado de pertenencia respecto al parámetro juventud que tendrían los individuos de cada edad. Es decir, el conjunto expresa la posibilidad de que un individuo sea considerado joven. Un Conjunto Difuso podría ser considerado como una distribución de posibilidad, que es diferente a una distribución de probabilidad.

Se puede observar que los Conjuntos Difusos de la figura 2.24 se superponen, por lo que un individuo x_i podría tener distintos grados de pertenencia en dos conjuntos al mismo tiempo: "Joven" y "Maduro". Esto indica que posee cualidades asociadas con ambos conjuntos. El grado de pertenencia de x en A , como ya se ha señalado anteriormente, se representa por $\mu_A(x)$. El Conjunto Difuso A es la unión de los grados de pertenencia para todos los puntos en el Universo de Discurso X , que también puede expresarse como:

$$A = \int_x \frac{\mu_A(X)}{X} \quad (2.9)$$

Bajo la notación de los Conjuntos Difusos, $\mu_A(x)/x$ es un elemento del conjunto A . La operación \cup_x representa la unión de los elementos difusos $\mu_A(x)/x$. Los Universos de Discurso con elementos discretos utilizan los símbolos "+" y "S" para representar la operación unión.

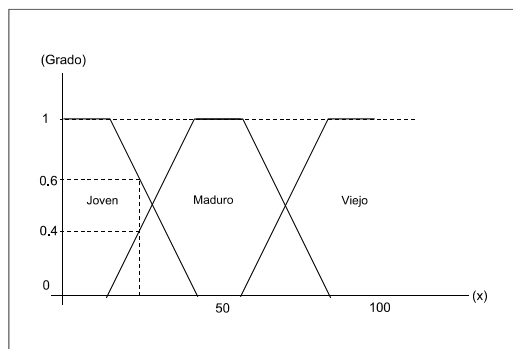


Figura 2.24. Ejemplo de Conjuntos Difusos en el universo de la edad. Elaboración propia.

Tómese un individuo x cuya edad sea de 20 años. Como se puede observar en la figura, pertenece al Conjunto Difuso "Joven" y al Conjunto Difuso "Maduro". Se puede

observar que posee un grado de pertenencia $\mu_A(x)$ de 0.6 para el Conjunto Difuso "Joven" y un grado de 0.4 para el Conjunto Difuso "Maduro"; también posee un grado de 0 para "Viejo". De este ejemplo se puede deducir que un elemento puede pertenecer a varios Conjuntos Difusos a la vez aunque con distinto grado. Así, nuestro individuo x tiene un grado de pertenencia mayor al conjunto "Joven" que al conjunto "Maduro" ($0.6 > 0.4$), pero no se puede decir, tratándose de Conjuntos Difusos, que x es joven o que x es maduro de manera rotunda.

2.6.5. Propiedades de los conjuntos difusos.

Para establecer el marco matemático necesario para trabajar con conjuntos difusos, es necesario definir algunas propiedades de los mismos. Esta sección hace una breve revisión de los conceptos más necesarios para este trabajo de tesis. Estos conceptos incluyen las definiciones de altura (height), soporte (support), núcleo (core), α -corte (α -cut), y cardinalidad (cardinality) en conjuntos difusos. Adicionalmente, se da una introducción a las propiedades de normalidad y convección. Para una explicación más completa, se puede acudir a (Klir, 1995) y (Mordeson y Premchand, 2001) y (Witold, 1993).

Definición 2.6.3 (Altura).- La altura de un conjunto difuso A es el valor máximo (supremum) de los grados de pertenencia de los elementos en A .

$$hgt(A) = \sup \mu_A(x), \quad x \in X \quad (2.10)$$

En un dominio discreto, X , el valor de la altura está dado por el valor máximo de pertenencia para todas las $x \in X$.

Definición 2.6.4 (Conjunto difuso normal).- Un conjunto difuso A es normal si $\exists x \in X$ tal que $\mu_A(x) = 1$. De esta manera, los conjuntos difusos no normales son llamados subnormales. El operador $norm(A)$ denota la normalización de un conjunto difuso:

$$A' = norm(A) \Leftrightarrow \mu_{A'}(x) = \mu_A(x) / hgt(A), \quad \forall x \quad (2.11)$$

Definición 2.6.5 (Soporte).- El soporte (support) de un conjunto difuso A es el subconjunto "abrupto" (crisp) en el cual todos sus elementos tienen grado de pertenencia diferente a cero.

$$\text{sup}(A) = \{ x / \mu_A(x) > 0 \} \quad (2.11)$$

Definición 2.6.6 (Centro).- El centro (core) de un conjunto difuso A es el subconjunto "abrupto" (crisp) en el cual todos sus elementos tienen grado de pertenencia diferentes a uno.

$$\text{core}(A) = \{ x / \mu_A(x) = 1 \} \quad (2.12)$$

En la literatura, al centro se le llama también el kernel, $\text{ker}(A)$.

Definición 2.6.7 (α -corte).- un α -corte de A_α en un conjunto difuso es el subconjunto "abrupto" del universo X en el cual todos sus elementos poseen grados de pertenencia mayores o iguales al nivel α :

$$A_\alpha = \{ x / \mu_A(x) \geq \alpha \}, \alpha \in [0, 1] \} \quad (2.13)$$

El operador α -corte de A_α es estricto si $\mu_A(x) \neq \alpha$ para cada $x \in A_\alpha$. El valor α es llamado el nivel α .

La figura 2.25 denota el centro, el soporte y el α -corte

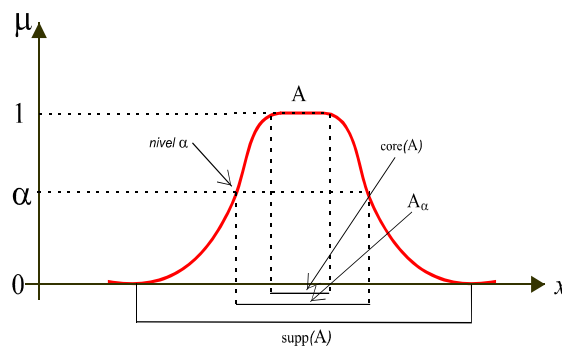


Figura 2.25. Centro, soporte y α -corte de un conjunto difuso. Elaboración propia. Tomado y traducido de Mordeson y Premchand (2001).

Así mismo, el centro (*core*) y soporte (*supp*) de un conjunto difuso pueden ser definidos a partir del α -corte:

$$\text{core}(A) = 1 - \alpha\text{-corte}(A) \quad (2.14)$$

$$\text{supp}(A) = 0 - \alpha\text{-corte}(A) \quad (2.15)$$

Definición 2.6.8 (Conjunto difuso convexo).- La función de pertenencia puede ser unimodal (con un solo máximo global) o multimodal (mas de un máximo). Los conjuntos difusos unimodales se llaman convexos y los multimodales, por otro lado, son llamados cóncavos.

La figura 2.26 muestra las diferencias entre estos.

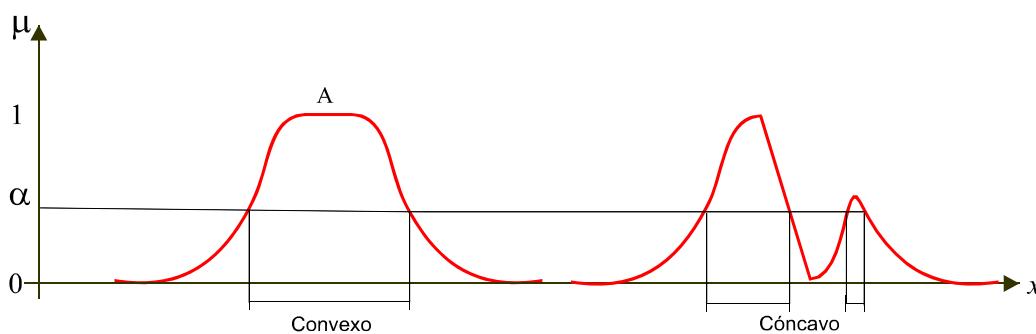


Figura 2.26. Conjuntos difusos convexos y no convexos. Elaboración propia. Tomado y traducido de Mordeson y Premchand (2001).

Definición 2.6.9 (Cardinalidad).- Si definimos a $A = \{\mu_A(x_i) / i=1,2,3, \dots, n\}$ como un conjunto discreto, la cardinalidad de este conjunto se define como la suma de los grados de pertenencia:

$$|A| = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) \quad (2.17)$$

2.6.6. Operaciones básicas entre conjuntos difusos.

Las operaciones lógicas que se pueden establecer entre conjuntos difusos son la intersección, unión y complemento, de igual forma que las utilizadas por la lógica binaria. Mientras que el resultado de operar dos conjuntos 'abruptos' es un nuevo conjunto 'abrupto',

las mismas operaciones con conjuntos difusos nos darán como resultado otros conjuntos también difusos. Dado que la lógica difusa es una extensión de la lógica binaria, las nuevas operaciones que se muestran para intersecar o unir conjuntos difusos son también aplicables a la lógica binaria obteniendo idénticos resultados.

Sean Los conjuntos difusos A y B que se muestran en la siguiente figura (2.27):

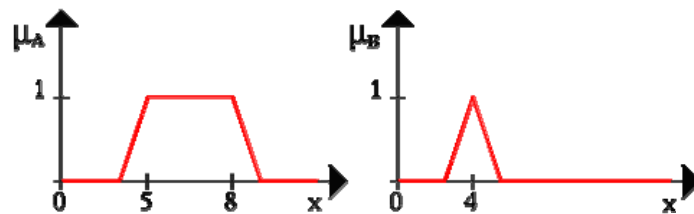


Figura 2.27. Ejemplo de conjuntos difusos. Elaboración propia.

La intersección entre A y B se define de la siguiente manera:

Definición 2.6.10 (intersección de conjuntos difusos).- Siendo A y B dos conjuntos difusos en X , la intersección de A y B es un conjunto difuso C , denotado $C = A \cap B$ tal que para cada $x \in X$:

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{2.18}$$

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \tag{2.19}$$

Esto se puede apreciar en la figura 2.28:

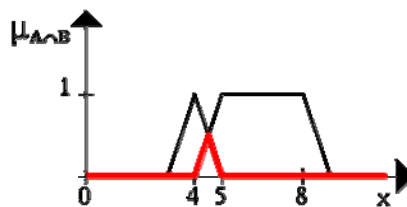


Figura 2.28. Intersección de conjuntos difusos. Elaboración propia.

La unión entre A y B se define de la siguiente manera:

Definición 2.6.11 (Unión de conjuntos difusos).- Siendo A y B dos conjuntos difusos en X , la unión de A y B es un conjunto difuso C , denotado $C = A \cup B$ tal que para cada $x \in X$:

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.20)$$

$$\mu_{A \cup B} = \min(1, \mu_A(x) + \mu_B(x)) \quad (2.21)$$

Esto se puede apreciar en la figura 2.29:

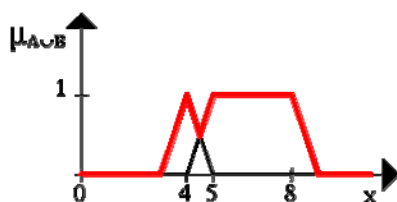


Figura 2.29. Unión de conjuntos difusos. Elaboración propia.

El complemento de un conjunto se define como:

Definición 2.6.12 (Complemento de un conjunto difuso).- Siendo A un conjunto difuso en X . El complemento de A es un conjunto difuso, denotado como \bar{A} , tal que para cada $x \in X$:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad (2.22)$$

Esto se puede apreciar en la figura 2.30:

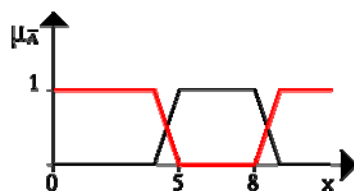


Figura 2.30. Complemento de conjuntos difusos. Elaboración propia.

2.6.7. T-normas y T-conormas.

En lógica difusa hay muchas maneras de definir estas operaciones. Cualquier operación que cumpla las restricciones de una **T-Norma**¹¹ puede ser usada para intersecar, igual que cualquier **S-Norma**¹² puede ser usada para unir conjuntos difusos. Las T-Normas especifican un conjunto de condiciones que deben reunir aquellas operaciones que deseen ser usadas para intersecar conjuntos, mientras que las S-Normas hacen lo propio para las uniones.

La intersección de dos conjuntos difusos puede ser especificada en una forma más general mediante una operación binaria en el intervalo unitario, por ejemplo una función de la forma:

$$T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad (2.23)$$

Para que una función T pueda calificar para representar una intersección-únión difusa, debe satisfacer algunas condiciones. Las funciones conocidas como t-normas (normas triangulares) poseen las propiedades de la intersección. De igual manera, las funciones llamadas t-conormas pueden ser utilizadas para la unión de conjuntos difusos.

Definición 2.6.13. (t-norma/intersección difusa).- Una t-norma T es una operación binaria en el intervalo unitario que satisface al menos uno de los siguientes axiomas para toda $a, b, c \in [0, 1]$ (Klir and Yuan, 1995).

$$T(a, 1) = a \quad (\text{condición de límite}) \quad (2.24)$$

$$b \leq c \text{ implica que } T(a, b) \leq T(a, c) \quad (\text{monotonidad}) \quad (2.25)$$

¹¹ **t-norma del mínimo:** La función $\min (T)$ es una t-norma, que corresponde a la operación de **intersección** en conjuntos clásicos cuyos grados de pertenencia están en $\{0, 1\}$. Por eso, esta función es la extensión natural de la intersección en conjuntos difusos.

¹² **s-norma del máximo:** La función $\max (S)$ es una s-norma, que corresponde a la operación de **unión** en conjuntos clásicos cuyos grados de pertenencia están en $\{0, 1\}$. Por eso, esta función es la extensión natural de la unión en conjuntos difusos.

$$T(a,b) = T(b,a) \quad (\text{conmutatividad}) \quad (2.26)$$

$$T(a,T(b,c)) = T(T(a,b),c) \quad (\text{asociatividad}) \quad (2.27)$$

Definición 2.6.14. (t-conorma/Unión difusa).- Una t-conorma s es una operación binaria en el intervalo unitario que satisface al menos uno de los siguientes axiomas para toda $a,b,c \in [0,1]$ (Klir and Yuan, 1995).

$$S(a, 0) = a \quad (\text{condición de limite}) \quad (2.28)$$

$$b \leq c \text{ implica que } S(a,b) \leq S(a,c) \quad (\text{monotonicidad}) \quad (2.29)$$

$$S(a,b) = S(b,a) \quad (\text{conmutatividad}) \quad (2.30)$$

$$S(a,S(b,c)) = S(S(a,b),c) \quad (\text{asociatividad}) \quad (2.31)$$

2.6.8. Proyección y extensión cilíndrica.

La proyección reduce a un conjunto difuso definido en un dominio multidimensional (tal como R^2 a un conjunto difuso definido en una dimensión menor (como R). La extensión cilíndrica es la operación contraria, es decir, la extensión de un conjunto difuso desde una dimensión menor hacia una mayor. Formalmente, estas operaciones se definen de la siguiente manera:

Definición 2.6.15 (Proyección de un conjunto difuso).- Si definimos a $U \subseteq U_1 \times U_2$ como subconjunto del espacio del producto cartesiano, donde U_1 y U_2 pueden ser asimismo productos cartesianos de dominios dimensionales menores. La proyección de un conjunto difuso definido en U sobre U_1 es el espacio $proj U_1 : F(U) \rightarrow F(U_1)$, definido por:

$$proj_{U_1}(A) = \left\{ \sup_{(u_2)} \mu_A(u) / u_1 \mid u_1 \in U_1 \right\} \quad (2.32)$$

El mecanismo de proyección elimina las dimensiones al tomar el supremum de la función de pertenencia para las dimensiones a ser eliminadas.

Ejemplo 3 (Proyección). Supongamos un conjunto difuso A definido en $U \subset X \times Y \times Z$ con $X = \{x_1, x_2\}$, $Y = \{y_1, y_2\}$ y $Z = \{z_1, z_2\}$, como sigue:

$$A = \{\mu_1/(x_1, y_1, z_1), \mu_2/(x_1, y_2, z_1), \mu_3/(x_2, y_1, z_1), \mu_4/(x_2, y_2, z_1), \mu_5/(x_2, y_2, z_2)\}$$

Calculando las proyecciones de A sobre X , Y y $X \times Y$:

$$Proj_X(A) = \{\max(\mu_1, \mu_2)/x_1, \max(\mu_3, \mu_4, \mu_5)/x_2\},$$

$$Proj_Y(A) = \{\max(\mu_1, \mu_3)/y_1, \max(\mu_2, \mu_4, \mu_5)/y_2\},$$

$$Proj_{X \times Y}(A) = \{\mu_1/(x_1, y_1), \mu_2/(x_1, y_2), \mu_3/(x_2, y_1), \max(\mu_4, \mu_5)/(x_2, y_2)\}$$

La proyección de \mathbb{R}^2 a \mathbb{R} puede ser fácilmente visualizada en la figura 2.31:

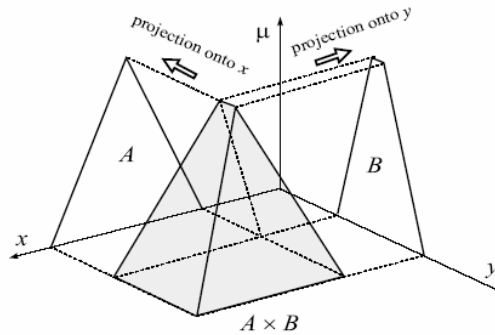


Figura 2.31. Representación de una proyección de un conjunto difuso. Tomado de Mneill y Thro (1994).

El proceso de proyección consigue reducir una relación (dos dimensiones) a un conjunto difuso (una sola dimensión).

La proyección de la relación R sobre Y se define como

$$P_Y(R) = \int_x \sup_y \left(\frac{\mu R(x, y)}{y} \right) \quad (2.33)$$

En realidad lo que hace la proyección es, para cada valor de y , buscar la máxima $\mu_r(x,y)$ respecto de las x , donde $\mu_r(x,y)$ es la función de pertenencia de la relación. Matricialmente, se expresa $P_y(R)$ donde R es "x aprox. igual que y":

Y	1	2	3	4
$P_y(R)$	1	1	1	1

Tabla 2.22. Función de pertenencia de una relación.

Definición 2.6.16 (Extensión cilíndrica).- Supongamos que $U \subseteq U_1 \times U_2$ es un subconjunto del espacio del producto cartesiano, donde U_1 y U_2 pueden así mismo ser productos de dominios de menor dimensión. La extensión cilíndrica del conjunto difuso A definida en U_1 sobre U es el espacio $ext_U: F(U_1) \rightarrow F(U)$ definido por:

$$ext_U(A) = \{ \mu_A(\mu_1) / \mu / \mu \in U \} \tag{2.34}$$

La extensión cilíndrica únicamente reproduce el grado de pertenencia de las dimensiones existentes en las nuevas dimensiones. La proyección de R a R^2 puede ser fácilmente visualizada en la figura 2.32:

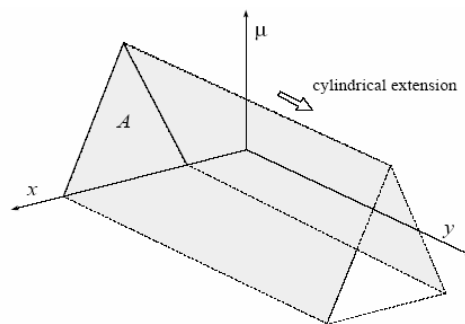


Figura 2.32. Representación de la extensión cilíndrica de un conjunto difuso. Tomado de Mneill y Thro (1994).

La extensión constituye el paso inverso a la proyección: a partir de un conjunto difuso obtenemos una relación.

$$CE(A) = \int_{x,y} \frac{\mu_A(x)}{(x,y)} \tag{2.35}$$

La extensión consiste en asignar el valor de la función de pertenencia de X a todos sus duplas en Y. Es decir, dado el conjunto difuso discreto X definido por:

X	1	2	3	4
M(x)	0	0.33	0.66	1

Tabla 2.23. Definición del conjunto difuso

$X = 0/1 + 0.33/2 + 0.66/3 + 1/4$ y el universo de discurso Y (1,2,3,4,5,6), al efectuar $CE(X)$, tenemos:

Como puede verse, para extender el conjunto difuso X hacia el universo Y, basta con hacer el producto cartesiano de ambos universos y asignar, para cada tupla, un valor de Y igual al valor de su X correspondiente en la dupla.

Y/X	1	2	3	4
1	0	0.33	0.66	1
2	0	0.33	0.66	1
3	0	0.33	0.66	1
4	0	0.33	0.66	1
5	0	0.33	0.66	1
6	0	0.33	0.66	1

Tabla 2.24. Ejemplo de extensión cilíndrica.

Definición 2.6.17. (Composición).- Esta operación se efectúa entre un conjunto difuso y una relación, dando como resultado un conjunto difuso nuevo. Por ejemplo, dados el conjunto difuso A y la relación R definidas por:

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{X} \quad (2.35) \text{ y } (2.36)$$

$$R = \int \frac{\mu_R(x,y)}{(x,y)}$$

La composición se efectúa por:

$$B = A \circ R = P\gamma(CE(A) \cap R) \quad (2.37)$$

La capacidad de la composición para concluir será muy útil cuando se trate de realizar inferencias con proposiciones condicionales. Un ejemplo de composición: Definamos $R = \text{"Agnes es algo más alta que Olga"}$

	Olga					
Agnes	1.700	1.725	1.750	1.775	1.800	1.825
1.700	0.4	0.1	0	0	0	0
1.725	0.7	0.4	0.1	0	0	0
1.750	1	0.7	0.4	0.1	0	0
1.775	0.7	1	0.7	0.4	0.1	0
1.800	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0.1
1.825	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0.4

Tabla 2.25. Ejemplo de composición.

Así, vemos que "algo mayor que" estaría bien descrito por "aproximadamente 5 cm. más alto que" (cuando la altura de Agnes supera la de Olga por 5 cm., hallamos un 1 en la función de pertenencia). Si la diferencia es de 15 cm. o más, asignamos un bajo valor de función de pertenencia (el motivo de este hecho aparentemente incorrecto reside en que en ese caso, sería más apropiado hablar de 'mucho más alta que'.)

Seguidamente definamos el conjunto difuso "Agnes es muy alta"

$$A = 0/1.700 + 0.1/1.725 + 0.4/1.750 + 0.7/1.775 + 0.9/1.800 + 1/1.825$$

Altura de A	1.700	1.725	1.750	1.775	1.800	1.825
M(altura)	0	0.1	0.4	0.7	0.9	1

Tabla 2.26. Definición del conjunto difuso de "Agnes es muy alta"

En la fórmula de la composición leemos que se debe escoger el mínimo de las dos relaciones obtenidas (la que relaciona un universo con otro (R) y la extensión cilíndrica que acabamos de efectuar). Intersecando A con R por la T-norm del mínimo (efectuamos el mínimo de ambas duplas).

Para efectuar la composición de A con R , el primer paso es extender cilíndricamente A . $CE(A) =$

Olga						
Agnes	1.700	1.725	1.750	1.775	1.800	1.825
1.700	0	0	0	0	0	0
1.725	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1.750	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1.775	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
1.800	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
1.825	1	1	1	1	1	1

Tabla 2.27. Extensión cilíndrica del conjunto difuso.

Definición 2.6.18. (Intersección del producto cartesiano).- Consideremos dos conjuntos difusos, A_1 y A_2 definidos en los dominios X_1 y X_2 respectivamente. La intersección de $A_1 \cap A_2$, también denotada como $A_1 \times A_2$ esta dada por:

$$A_1 \times A_2 = ext_{x_2}(A_1) \cap ext_{x_1}(A_2)$$

Este tipo de extensión cilíndrica usualmente se considera implícita y no se declara en la notación:

$$\mu_{A_1 \times A_2}(x_1, x_2) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2) \tag{2.38}$$

La figura 2.33 presenta una idea de esta operación.

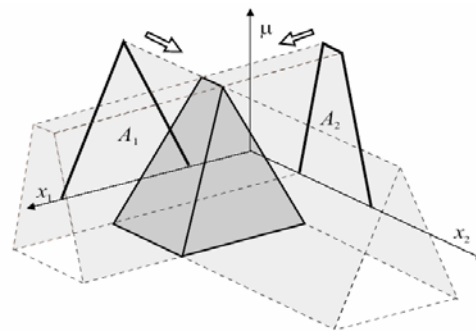


Figura 2.33. Representación de la intersección del producto cartesiano de conjuntos difusos. Tomado de Mneill y Thro (1994).

2.6.9. Variables Lingüísticas.

La Teoría de Conjuntos Difusos puede utilizarse para representar expresiones lingüísticas que se utilizan para describir conjuntos o algoritmos. Los Conjuntos Difusos son capaces de captar por sí mismos la vaguedad lingüística de palabras y frases comúnmente aceptadas, como "gato pardo" o "ligero cambio". La habilidad humana de comunicarse mediante definiciones vagas o inciertas es un atributo importante de la inteligencia, tal como lo indica la figura 2.34:

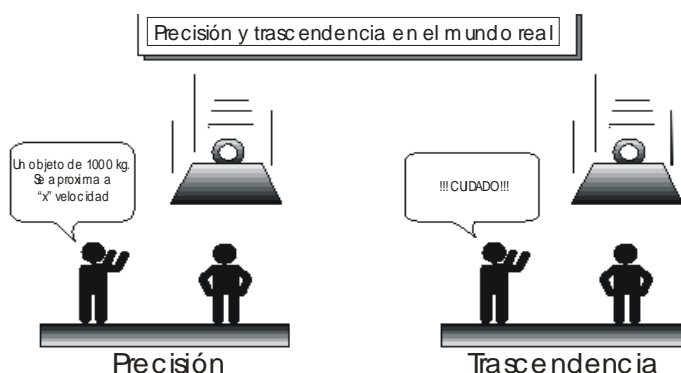


Figura 2.34. Precisión versus trascendencia. Tomado y traducido del manual de Fuzzy Logic Toolbox de Matlab 6.0 (Mathworks, 2000).

Una variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado. Para estas variables lingüísticas se utilizará un nombre y un valor lingüístico sobre un Universo de Discurso. Además, podrán dar lugar a sentencias generadas por reglas sintácticas, a las que se les podrá dar un significado mediante distintas reglas semánticas.

Los Conjuntos Difusos pueden utilizarse para representar expresiones tales como:

- Me gustaría un producto de color claro.
- La velocidad que debe alcanzar mi auto deseado debe ser rápida.
- Me gustaría que durara mucho tiempo.

Las expresiones anteriores pueden dar lugar a expresiones lingüísticas más complejas como:

- x no es pequeño.
- La velocidad deberá ser rápida pero no muy rápida.
- El auto deberá durar mucho tiempo y ser barato.

Así, se pueden ir complicando las expresiones. Por ejemplo, la expresión "x no es pequeño" puede calcularse a partir de la original calculando el complemento de la siguiente forma:

$$\mu_{NO PEQUEÑA}(x) = 1 - \mu_{PEQUEÑO}(x)$$

Tratando de esta forma los distintos modificadores lingüísticos (muy, poco, rápido, lento...) pueden ir calculándose todas las expresiones anteriores.

2.6.10. Relaciones difusas.

El siguiente paso es relacionar dos conjuntos difusos entre sí según una premisa (por ejemplo mayor que, más alto que...)

Como en la teoría clásica, para relacionar dos conjuntos efectuaremos el producto cartesiano de sus elementos. La diferencia residirá en que mientras en la teoría clásica los conjuntos están o no en relación, en una relación difusa cada par ordenado de los dos elementos puede gozar de una función de pertenencia que caracterice en qué grado dichos elementos están relacionados.

Por ejemplo, la relación difusa R = "X aproximadamente igual que Y", tiene la estructura matricial:

X Y	1	2	3	4
1	1	0.5	0.1	0
2	0.5	1	0.5	0.1
3	0.1	0.5	1	0.5
4	0	0.1	0.5	1

Tabla 2.28. Ejemplo de una relación difusa.

Donde expresamos el grado en que los elementos de ambos conjuntos están relacionados entre sí. Como se puede observar, el pico de la función de pertenencia se encuentra centrado en aquellas posiciones tales que los dos elementos son iguales, expresando así que los elementos se encuentran relacionados al máximo (función de pertenencia = 1) cuando son iguales.

2.6.11. El razonamiento aproximado.

El razonamiento aproximado trata de inferir conclusiones sobre una serie de proposiciones de naturaleza vaga. Es decir, intenta imitar el proceso de razonamiento humano usando las nociones de lógica difusa.

2.6.11.1. Proposiciones. Las proposiciones son meros enunciados acerca de un hecho. Para reproducirlos usaremos conjuntos difusos. 'La leche está tibia' puede modelarse perfectamente con una función de pertenencia triangular centrada en 17°. En este caso, la variable lingüística sería la temperatura de la leche, y "tibia" un valor lingüístico que expresariamos con un conjunto difuso al que asociariamos la anterior función de pertenencia.

2.6.11.2. Operaciones Lógicas. Cabe destacar que mientras las operaciones de conjunción y disyunción transcurren en el mismo universo de discurso, esto ya no tiene por qué ser así. Para superar este problema de dimensiones usaremos la extensión cilíndrica.

A.- conjunción

Dados los conjuntos difusos A = "la humedad es baja" y B = "la temperatura es normal", el grado de verdad de la conjunción de ambas proposiciones se define por la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.39)$$

No podemos intersecar el universo de la variable lingüística "temperatura" con el de la variable "humedad", luego buscaremos todos los puntos del plano de forma que exista tanto el conjunto difuso "temperatura normal" como "humedad baja".

Así, la extensión cilíndrica nos permitirá relacionar los dos universos, para hallar gráficamente un montículo de puntos en el plano, correspondiente a la proposición 'la humedad es baja y la temperatura normal'.

Representaremos la conjunción de dos proposiciones como la intersección por cualquier **T- Norma** de los conjuntos difusos que los representan. Si las proposiciones se refieren al mismo universo, nos quedará un conjunto difuso en una dimensión; de lo contrario, nos quedará una relación difusa (dos dimensiones).

B.- Disyunción

Por ejemplo, 'la humedad es baja o la temperatura normal', la disyunción de dos proposiciones se efectúa con la unión de los conjuntos difusos que los representan, usando cualquiera de los métodos explicados en el capítulo 2 o con cualquier artificio matemático que cumpla una S-norma. Al igual que antes, si la disyunción se refiere a dos universos distintos deberemos usar la extensión cilíndrica.

$$\mu A \cup B(x, y) = CE(\mu A(x)) \cup CE(\mu B(y))$$

2.6.11.3. Proposiciones condicionales. Estas son las proposiciones del razonamiento aproximado que revisten la mayor importancia. Son las que más adelante llamaremos "reglas difusas".

Su estructura es: "Si A entonces B". Llamaremos a A el antecedente y a B el consecuente de la regla. A y B pueden ser cualquier proposición, tan complicada como se quiera.

Lo que vamos a buscar es una relación difusa R cuya función de pertenencia exprese el grado de verdad de "Si A entonces B".

A esta acción se la denomina "**implicar**", y por bien que hay muchas formas de hacerlo, en la práctica se suelen usar dos, que más adelante explicaremos. Implicar es el paso previo a "**inferir**", que consiste en extraer una conclusión a partir de la relación generada por la implicación y de un conjunto difuso de entrada A. Dicha conclusión es un nuevo conjunto difuso, y la obtendremos, como se puede ya sospechar, mediante la composición de R con A. En otras palabras,

- Si "X es P" entonces "Y es Q" (implicación) -> relación difusa
- "X es P" (proposición) -> conjunto difuso
- "Y es Q" (conclusión) -> conjunto difuso

En la implicación, el antecedente es "X es P" y el consecuente = "Y es Q". A todo este proceso se le denomina **inferencia**.

La pregunta es, ¿cómo podemos implicar?

Las implicaciones más útiles son las de Mamdani (1997):

$$\begin{aligned} \mu_{Rmam}(A \rightarrow B) &= \min(CE(A), CE(B)) && (2.40) \text{ y } (2.41) \\ \mu_{Rlor}(A \rightarrow B) &= CE(A) \bullet CE(B) \end{aligned}$$

Para Mamdani, el grado de verdad de "Si A entonces B" es idéntico al de la proposición "A y B".

Esta argumentación se justifica de la siguiente manera: Para Mamdani, una condición tan sólo resulta cierta si el antecedente es cierto y el consecuente también. La lógica binaria argumenta que una condición es verdadera en todos los casos menos en el que el antecedente sea falso y el consecuente verdadero. Esto se demuestra con la siguiente tabla de verdad:

A	B	A entonces B
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Tabla 2.29. Inferencia Mamdani.

Una vez hemos generado la relación difusa de la proposición debemos preocuparnos por extraer alguna conclusión. Para ello usaremos la composición, es decir, extenderemos cilíndricamente el conjunto difuso de entrada para intersecarlo con la relación hallada previamente, proyectando el resultado sobre el universo de salida. Si para proyectar usamos el máximo, y para intersecar usamos el mínimo, tendremos que:

$$B = P\gamma(\mu A(x) \cap \mu B(x, y))$$

$$B = \max(\min(\mu A(x), \mu B(x, y)))$$

(2.42) y (2.43)

A esta composición se le llama **composición max min**, y es la más usada para inferir. Una vez más, hacemos notar que cualquier T-Norma puede ejercer la función de intersección. La composición max min presenta una extensión cilíndrica implícita.

2.6.12. Etapas de la lógica difusa.

1. Fusificación (Fuzzification). Las funciones de pertenencia definidas para las variables de entrada se aplican a sus valores actuales correspondientes, para poder determinar el grado de verdad para cada regla de la premisa.

2. Inferencia Lógica. El valor de verdad para la premisa de cada regla se calcula, y aplica a la parte de conclusiones de cada regla. Este resultado se asigna a un subconjunto difuso para ser asignado a cada variable de salida para cada regla.

3. Defusificación (Defuzzification). La cual es usada cuando se desea convertir la salida difusa en un valor puntual numérico. Existen muchos métodos de defusificación (al menos 30).

Los figuras 2.35 y 2.36 muestran en forma de esquema como se realiza la inferencia difusa explicada anteriormente. De la misma manera, la figura 2.37 hace una comparación del nivel de *difusidad* asociado a las diferentes etapas del diseño.

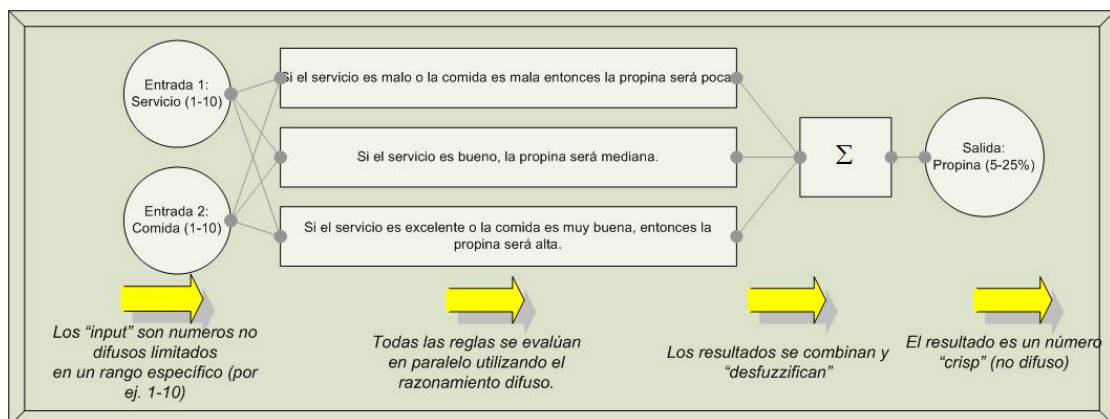


Figura 2.35. Proceso de inferencia difusa. Elaboración propia. Tomado y adaptado de Mathworks (2000).

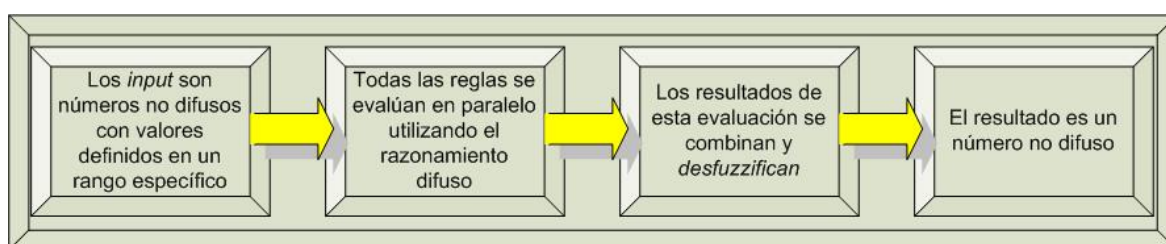


Figura 2.36. Proceso de inferencia difusa (esquema). Elaboración propia. Tomado y adaptado de (The MathWorks, 2000)

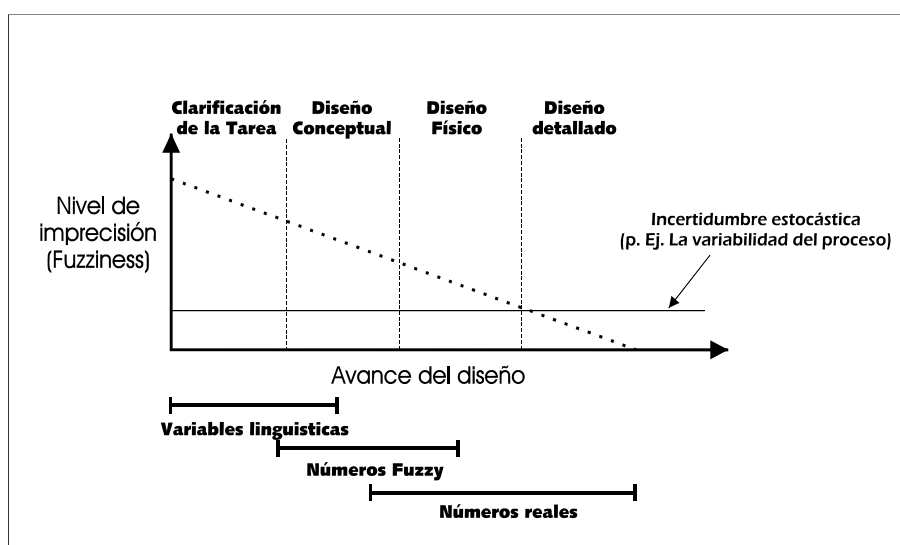


Fig. 2.37. Las etapas del diseño y su nivel de imprecisión. El tipo de variables que intervienen. Elaboración propia.

2.6.13. Algunas aplicaciones de lógica difusa que tienen relación con el diseño industrial.

Existen estudios que han combinado QFD (Quality Function Deployment) y lógica difusa en el desarrollo de productos, (Antonson, 1995), (Kim et al., 2000), (Tang et al., 2002), (Vanegas y Labib, 2001), (Harding et al., 2001). Algunos otros investigadores han formulado aplicaciones de lógica difusa que directa o indirectamente inciden sobre el desarrollo de productos, entre ellos se encuentran:

1. Verma y Knezevic (1996) en el aseguramiento de la confiabilidad de un producto durante su diseño conceptual.
2. Wang (2004) en el cumplimiento de los calendarios de desarrollo de producto.

3. En cuestiones de mercadotecnia, Hsieh y Chen (1999) en el posicionamiento de productos que se encuentran en la etapa de desarrollo conceptual. Turksen y Wilson (1995) en la predicción de la participación de mercado y la predicción de preferencias del cliente. Además, en la medición de la percepción del cliente de las categorías de productos (Hsu et al., 1998).
4. Tsuchiya (1996) en la percepción emocional de un producto en la etapa de diseño.
5. Pillay y Wang (2003), Guimarães (2004), Yadav y Singh (2003), Xu y Tang (2002) en el análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA: Failure Modes and Effect Analysis).
6. En la evaluación de alternativas de ciclo de producción utilizando el proceso analítico de jerarquías (AHP: Analytic Hierarchy Process) junto a lógica difusa (Weck et al., 1997).
7. Como sistema de apoyo a los procesos de la ingeniería concurrente (Jiang y Hsu, 2001).
8. En la aplicación de redes neuronales junto con lógica difusa a productos de consumo (Takagi, 1992).
9. En la evaluación de alternativas de personalización de producto (Tsai y Hsiao, 2004).
10. En la mejora de la capacidad de procesamiento de equipos de copiado (Fukushima et al., 1995).

En el siguiente capítulo se presenta una visión general del trabajo de tesis, partiendo desde una contextualización de la actividad de diseño tal como se percibe actualmente. En base a esto, se plantea el problema de investigación, los objetivos de la investigación y la Hipótesis de la tesis. Seguidamente se plantean las premisas rectoras del trabajo y los resultados deseados del mismo.

