

## **2. Diseño de planta piloto y construcción**

A la hora de validar una simulación hay dos posibilidades diferentes. Una - quizás la más fácil, porque no necesita equipo experimental - es la de la validación mediante un modelo matemático ya conocido y reconocido como correcto. Validar la simulación de un proceso con un modelo conocido tiene la desventaja, que no se puede comparar otro aspecto que la velocidad de cálculo. Si el modelo existente fuera "exacto", no habría ninguna necesidad de plantear alternativas y si no lo fuera sería siempre necesaria una validación experimental.

No existe ningún modelo "exacto" para ningún proceso y por lo tanto la única manera de validar un modelo nuevo de un proceso es validarlo con experimentos en una planta piloto. Con esta finalidad, una planta piloto de destilación discontinua fue construida y operada bajo diferentes condiciones de uso.

En el momento de diseñar una planta piloto, hay que tener en cuenta una multitud de factores, que influyen sobre el éxito que tendrán los experimentos una vez que se use el equipo. Por un lado están las exigencias respecto a exactitud y cantidad de mediciones y por otro lado el costo que conllevan. Es evidente que a mayor cantidad de sensores de medición, mejor se puede compara simulación y experimento. La columna en si debe ser suficientemente flexible para futuros cambios y apta para fines de investigación.

### **2.1. Tipo de columna y material**

Hay que diferenciar la elección del tipo de columna para fines de investigación de la elección de una columna para la producción. Una columna industrial generalmente se diseña para una determinada aplicación y para un determinado rango de trabajo, teniendo en cuenta sobre todo el costo de la misma. Para la investigación hay otros criterios más importantes, como por ejemplo, la flexibilidad, ya que las exigencias a la planta piloto pueden variar substancialmente con diferentes proyectos de investigación.

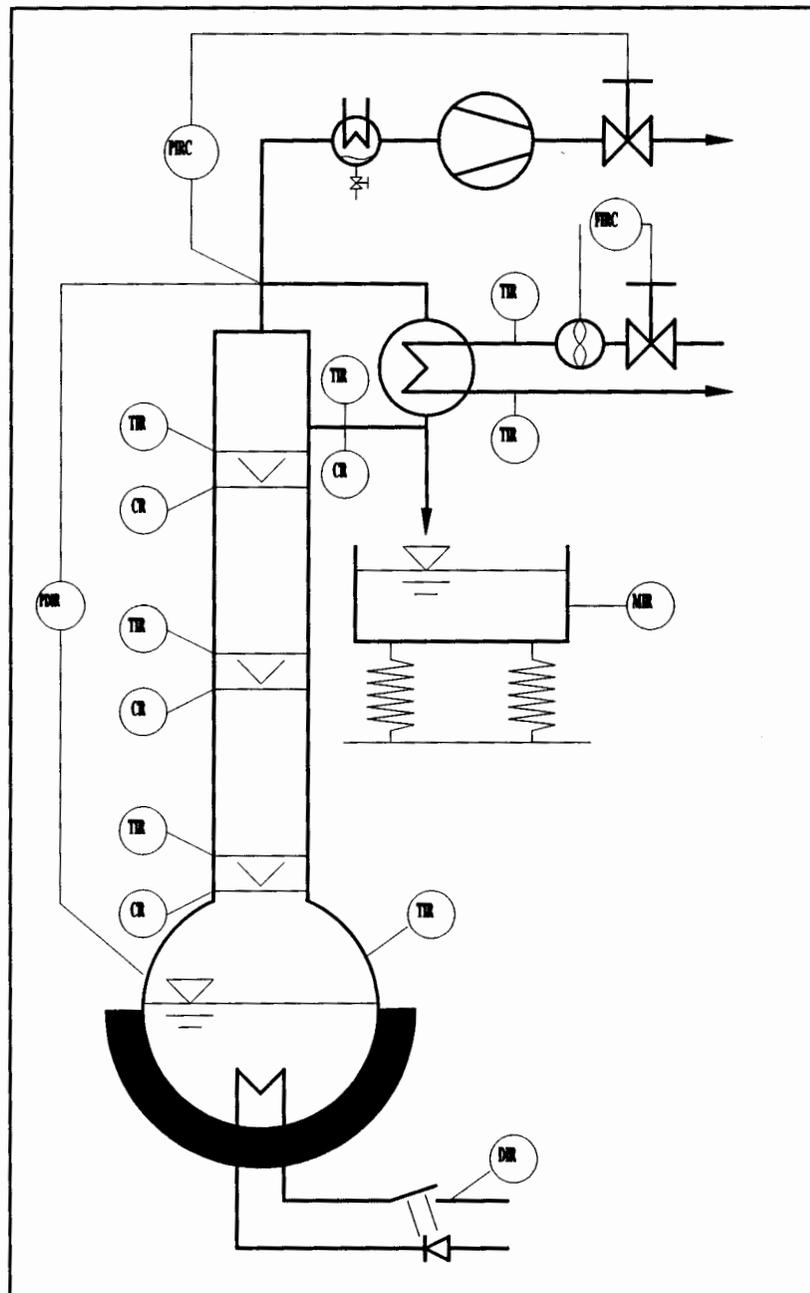
Dicha flexibilidad se alcanza montando la columna por secciones, que permiten efectuar cambios en la longitud del cuerpo de la columna o en la posición de la alimentación.

Sobre todo hay que considerar cuales son las necesidades para la planta piloto teniendo en cuenta la futura modelización de la misma. La modelización matemática de un proceso siempre incorpora determinadas suposiciones, que deben ser cumplidas por la instalación de la planta. Una de estas suposiciones es por ejemplo la hipótesis de un proceso adiabático. Para poder cumplir esta suposición de modelización lo mejor posible, se ha elegido un cuerpo de columna superaislado mediante revestimiento calorifugante. Respecto al tipo de plato de la columna se ha elegido una columna de platos perforados del tipo Oldershaw, porque por una parte el plato perforado es el tipo de plato más usado en columnas de destilación y por otra parte la mayoría de correlaciones para el cálculo de constantes hidráulicas existen para este tipo de plato.

Adicionalmente, la construcción del tipo Oldershaw se ha demostrado como una construcción muy apta para fines de investigación, porque mantiene el comportamiento hidráulico muy constante en un amplio margen de trabajo y por tanto sirve muy bien para un aumento de escala del nivel de laboratorio al nivel industrial (Fair, 1983). Para poder menospreciar la influencia de la maldistribución en el plato, se eligió un diámetro de 50 mm, ya que es el diámetro de columna para el cuál no se pueden observar diferencias radiales de concentración en el plato (Stichmaier, 1995).

## **2.2. Instrumentación**

El fin de la investigación es validar una modelización novedosa del proceso de destilación discontinua para columnas con platos. Para este fin, es preciso obtener datos acerca de temperatura y concentración a lo largo del proceso, con el fin de compararlos con las trayectorias calculadas. La Figura 1 demuestra la colocación de los sensores a lo largo de la columna. Para poder registrar el perfil de temperatura hay cinco sensores, de los cuales se encuentra uno en el calderín y otro en la cabeza de la columna. Los restantes están situados en el cuerpo de la columna, integrados en los adaptadores que permiten también la toma de muestra de líquido.



- CR : Concentration registration  
 TIR : Temperature indication and registration  
 MIR : Mass indication and registration  
 FIRC: Flow indication, registration and control  
 PDIR: Pressure difference indication and registration  
 PIRC: Pressure indication, registration and control  
 DIRC: Duty indication registration and control

Figura 1: Instrumentación de la planta piloto

### 2.2.1. Termoelementos

Los siete termoelementos instalados en la planta piloto son termoelementos del tipo Pt 100 con tolerancia de clase A, cuyo rango de trabajo es de 0 °C a 200 °C. La tolerancia admitida para las resistencias Pt100 de la clase A está fijada por la siguiente ecuación según DIN IEC 751:

Tolerancia admitida en °C  $\pm(0.15 + 0.002[t])$ , siendo t el valor de la temperatura en °C. Están conectados a convertidores analógico digital diseñados para rectificar la no-linealidad de los elementos termoeléctricos. Los convertidores forman parte de un sistema de adquisición de datos a base de un ordenador personal.

Los dos termoelementos que miden la temperatura del agua de refrigeración están colocados en entrada y salida del condensador midiendo así la diferencia de temperatura entre entrada y salida. Junto con el caudal de agua, que se está midiendo con un caudalímetro de agua, se puede calcular la potencia de enfriamiento del condensador según:

$$\dot{Q}_{condensador} = c_p \dot{m}_{agua} (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (1)$$

Esta potencia se calcula para poder cerrar el balance de energía en la cabeza de la columna y así determinar si el líquido cae subenfriado desde el condensador. Este es el caso normal, ya que no se ha implementado un control de la potencia del condensador.

### 2.2.2. Sensores de presión

Para medir la presión en el condensador existe un sensor de presión absoluta con un rango de 0 hasta 1000 mbar que se usa en caso de aplicar vacío a la columna. Cuando la columna trabaja a presión atmosférica tan solo se usa el sensor de presión diferencial y se determina la presión de trabajo de la columna con un barómetro ya que la resolución del sensor de presión absoluta no es suficientemente grande como para determinar la presión atmosférica con él. El sensor de diferencia de presión tiene un rango de 0 a 50 mbar.

La medición de la pérdida de presión en la columna sirve para comprobar el cálculo de la pérdida de presión del modelo de simulación. El sensor de presión absoluta genera una señal de 4 a 20 mA y el sensor de presión diferencial una señal del tipo 0-10 V.

### 2.2.3. Balanza

Hay una balanza instalada que mide continuamente el peso del recipiente del destilado. De esa manera se puede calcular, junto con la medida de tiempos, el caudal de masa del destilado. La balanza está equipada con un puerto paralelo del tipo V24 / RS-232C que transmite en un protocolo especial la lectura del peso. Este protocolo contiene 9 caracteres de los cuales uno es el punto decimal. El rango de trabajo de la balanza es de 0 a 6000g con una resolución de 1g.

Con la balanza se calcula en intervalos de un minuto el caudal de masa, dividiendo la diferencia entre lectura actual y anterior por el tiempo transcurrido. Este valor se graba junto con las lecturas de presión y temperatura en el archivo de datos correspondiente al experimento.

### 2.2.4. Caudalímetro

La potencia máxima de la manta de calefacción es de 1400W, lo que iguala la potencia máxima de enfriamiento del condensador. Para poder suponer una temperatura constante en toda la superficie del condensador, el caudal de refrigerante debe ser lo más elevado posible. Por otra parte, el caudal de refrigerante, tiene que ser suficientemente pequeño para generar una diferencia de temperatura del refrigerante suficientemente grande, para poder ser medido con poco error. Por eso se supone una diferencia de temperatura mínima de 5 K. Usando agua como refrigerante resulta con estas suposiciones un caudal máximo de agua de 4 l/min.

El caudalímetro elegido es de hélice para el rango de 0.25 a 6 l/min. La señal electrónica es de 4 -20 mA. Está montado en línea con una electroválvula de regulación, que

permite mantener constante el caudal de refrigeración en caso de tener variaciones de presión en la alimentación de agua.

### **2.2.5. Captación de señales**

Todos los sensores están conectados a un sistema de adquisición de datos por ordenador a base de PC. Este sistema es flexible respecto al tipo de señal analógica de entrada. Para cada tipo de señal, ya sea una señal de caudal tipo 4-20 mA, una señal de tensión tipo 0-5 V o la entrada procedente de un termoelemento tipo Pt 100, se coloca un adaptador, que convierte las distintas lecturas analógicas en un valor aritmético entre 0 y 4095. Estos valores pueden ser leídos en el puerto de la placa de adquisición de datos y almacenados en un fichero en disco duro.

Un valor de 0 siempre corresponde al límite inferior del rango de medición del sensor y un valor de 4095 corresponde al límite superior; los demás valores se calculan interpolando linealmente. Con el programa para el manejo de la adquisición de datos es posible definir la frecuencia de muestreo y la cantidad de canales a grabar. La frecuencia máxima de muestreo es de 100 kHz, pensado para capturar señales con transitorios muy rápidas. Esta frecuencia de muestreo es muy alta para aplicaciones en ingeniería química - salvo que se trate del estudio de reacciones fuera de control - y se reduce normalmente a una frecuencia de p. ej. 1/60 Hz, o sea una muestra por minuto.

La instalación de la columna consiste en una estructura metálica de tubos de acero inoxidable usando nueces especiales para unir los tubos entre ellos. La construcción con conectores desmontables (las nueces mencionadas) permite una gran flexibilidad en cuanto a ampliación y cambio. Todos los componentes electrónicos - como la fuente de alimentación, el adaptador de módulos, el relé de estado sólido, etc. - se encuentran en un armario aparte, que se conecta con un cable de baja tensión al ordenador personal.

## **2.3. Cálculo de los variables de diseño**

El diseño de la columna debe tener en cuenta, que se trata de una columna en una planta piloto, cuyo margen de trabajo debe ser lo más amplio posible. Una vez fijado el diámetro interior de la columna en 50 mm (50 mm para poder menospreciar la maldistribución en la columna) quedan como variables de diseño el volumen del calderín, la potencia de calefacción y la superficie del condensador. Normalmente el diámetro de la torre es una variable de diseño, que resulta directamente de la carga de vapor y líquido máxima y de la cantidad necesaria de producción. Como se trata de una columna en una planta piloto, no hay ningunas exigencias respecto a la cantidad de producción. Por lo tanto se calcula con el diámetro dado de la columna, los caudales máximos de líquido y de vapor para determinar un volumen razonable de calderín y de los recipientes.

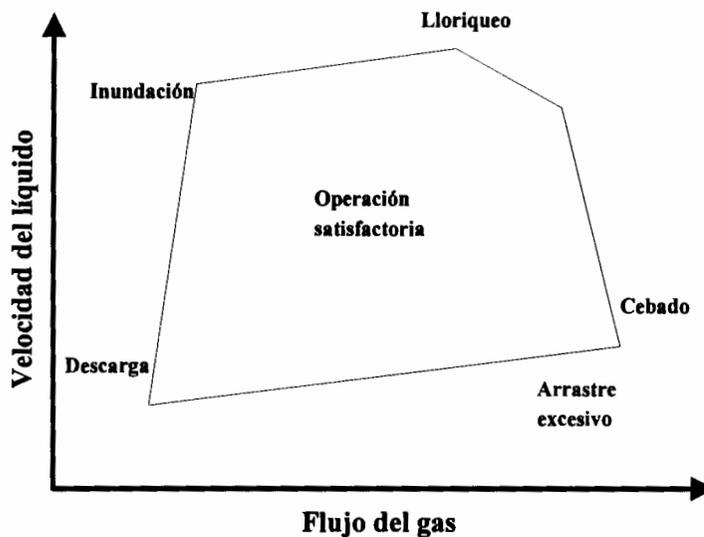


Figura 2 : Límites de operación de una columna (cualitativo)

Los márgenes de trabajo de una columna están limitados por los límites de lloriqueo, inundación y cebado. Una representación cualitativa de la zona de operación satisfactoria se encuentra en la Figura 2. Para que la columna trabaje en la zona de operación satisfactoria, la velocidad de vapor no debe superar el 80 al 85 % de la velocidad de vapor límite  $w_f$  para líquidos que no generan espuma y 75 % o menos para líquidos que generan espuma. En realidad se trata de un valor aproximado, sujeto a verificación con respecto a las características de arrastre del líquido en el gas y a la caída de presión. Según Treyball se puede determinar la velocidad de vapor límite  $w_f$  con la siguiente ecuación empírica :

$$w_f = C_f \left( \frac{\rho^L - \rho^V}{\rho^V} \right)^{1/2} \quad (2)$$

La constante de inundación  $C_f$  depende tanto de las unidades utilizadas como del diseño del plato. Relacionando la constante  $C_f$  con datos existentes sobre la inundación de platos perforados resulta la siguiente ecuación empírica :

$$C_f = \left[ \alpha \log \frac{1}{(\dot{L} / \dot{G}) \sqrt{\rho^V / \rho^L}} + \beta \right] \left( \frac{\sigma}{0.02} \right)^{0.2} \quad (3)$$

con  $\alpha = 0.0744t + 0.01173$  y  $\beta = 0.0304t + 0.015$

El valor más pequeño de la constante de inundación  $C_f$ , y por consiguiente el valor más pequeño de la velocidad de vapor límite  $w_f$ , resulta para reflujo total con  $\dot{L} = \dot{G}$ . Para una densidad de vapor de 3 kg/m<sup>3</sup> y una densidad de líquido de 1000 kg/m<sup>3</sup> resulta una constante de inundación de  $C_f$  de 0.01. De aquí se deduce una velocidad de vapor  $w_f$  de 0.17 m/s que junto con la superficie de la columna, que se calcula con el diámetro de la misma reduciéndolo en la superficie que ocupa el rebosadero, se obtiene una carga máxima de  $0.9 \cdot 10^{-3}$  kg/s con la densidad de vapor supuesta de 3 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3.1. Potencia de calefacción

Conociendo la carga máxima de la columna se puede calcular la potencia necesaria para la manta de calefacción. Para hacer un cálculo del 'caso peor' se puede elegir agua ya que tiene la entalpía de vaporización mayor de todos los líquidos, del orden de 2300 kJ/kg; metanol es otro fluido con elevada entalpía de evaporación, del orden de 1100 kJ/kg. Una de las mezclas usadas en los experimentos es la mezcla metanol agua con una entalpía de evaporación del orden de 1700 kJ/kg. Con un caudal máximo de  $0.9 \cdot 10^{-3}$  kg/s resulta una potencia necesaria del orden de 1.5 kW. Este cálculo contiene un amplio margen de cobertura, ya que por una parte solo se suele trabajar al 80 % de la carga máxima y por otra parte la entalpía de evaporación de la gran mayoría de todos los compuestos orgánicos es muy inferior a la de agua (p. ej. Ciclohexano a 1013 mbar: 360 kJ/kg). Finalmente se ha elegido una manta con una potencia de 1.4 kW.

### 2.3.2. Tamaño del calderín

El tamaño del calderín depende del tiempo que debe tener un proceso batch y de la constante de tiempo de la columna. La constante de tiempo de la columna depende de la cantidad de líquido acumulado en la columna, en los platos y en el tanque de reflujo del condensador. Es evidente que la cantidad de líquido en el calderín debe sobrepasar por ordenes de magnitud la cantidad de líquido en la columna para que las trayectorias de concentración sean suficientemente largas. Además existe una cantidad mínima de toma de muestra, que se establece por razones practicas en 1 ml. Las muestras se toman en cuatro puntos distintos de la torre de destilación varias veces por hora. La cantidad acumulada de muestra que se toma durante todo el batch tiene que ser despreciable en comparación con la cantidad total de líquido de la columna.

El tamaño máximo del calderín resulta de la necesidad de poder acabar un ensayo dentro de un turno de trabajo como máximo. Teniendo en cuenta la modificación de las concentraciones de las muestras por el almacenaje, resulta aconsejable tratar y analizar las muestras en un mismo día, delimitando así más el tiempo de operación posible. Junto con el caudal de vapor máximo calculado antes, y un tiempo de operación previsto de tres a cinco horas resulta conveniente un volumen aproximado de calderín de seis litros.

### 2.3.3. Superficie del condensador

Para el cálculo de la superficie del condensador hay que contemplar el caso de calentamiento con máxima potencia y máxima temperatura de entrada del líquido de refrigeración. Como no se ha previsto ningún criostato para bajar o bien mantener la temperatura del refrigerante, ésta puede variar ligeramente según las condiciones ambientales ya que se trata de agua de la red de agua potable.

El coeficiente de transferencia de calor del líquido refrigerante al vapor  $k$  se calcula con los coeficientes de transferencia de calor individuales  $\alpha_{int}$  y  $\alpha_{ext}$  de la siguiente manera:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{int}}} + \frac{\delta_{\text{vidrio}}}{\lambda_{\text{vidrio}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}}} \quad (4)$$

El condensador tiene varias espirales en los que fluye el refrigerante, que son muy largas en comparación a su diámetro, lo que significa que se pueden despreciar los efectos hidrodinámicos de entrada y salida. Para  $Re < 2300$  (caudal laminar) vale (VDI-Wärmeatlas, 1991) :

$$Nu_{m,g} = \left\{ Nu_{m,g,1}^3 + 0.7^3 + [Nu_{m,g,2} - 0.7]^3 \right\}^{1/3} \quad (5)$$

con

$$Nu_{m,g,2} = 1.615 \sqrt[3]{Re Pr d_i / \delta} \quad \text{y} \quad Nu_{m,g,1} = 3.66 \quad (6)$$

La transferencia de calor para un tubo horizontal, que no está influenciado por tubos alrededor, se calcula mediante una ecuación derivada por Nusselt. Esta ecuación no tiene en cuenta la tensión de cizallamiento entre vapor y líquido en la superficie del condensador. Por eso sirve especialmente a bajas velocidades de vapor.

$$Nu = 0.954 \left[ \frac{1 - \frac{\rho^y}{\rho^L}}{Re_L^\circ} \right] \quad (7)$$

El valor Reynolds de la lámina de líquido  $Re_L$  está definido por :

$$Re_L^\circ = \frac{\Gamma^\circ}{\eta} \quad \text{y} \quad \Gamma^\circ = \frac{\dot{M}_L}{\delta} \quad (8)$$

La relación entre superficie de condensador y el coeficiente de transferencia de calor es, usando la diferencia de temperatura logarítmica  $\Delta \vartheta_{lm}$ , la siguiente :

$$\dot{Q} = k A \Delta \vartheta_{lm} = k A \frac{(\vartheta_p - \vartheta_E) - (\vartheta_p - \vartheta_S)}{\ln \frac{\vartheta_p - \vartheta_E}{\vartheta_p - \vartheta_S}} \quad (9)$$

En caso de una columna perfectamente adiabática, la potencia máxima del condensador es igual a la potencia suministrada a la manta de calefacción. Calculando los diferentes coeficientes de transferencia de calor y usando  $\lambda = 0.8 \text{ W/mK}$  para vidrio resulta un

valor de  $k$  alrededor de  $400 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Con una diferencia de temperatura de  $5 \text{ K}$  entre entrada de agua y salida resulta una superficie de condensador de  $700 \text{ cm}^2$ . El tamaño más cercano de condensador adquirible es de  $1400 \text{ cm}^2$ . Eligiendo este condensador se trabaja entonces con un margen de cobertura del  $100 \%$ .

Tabla 1: Ficha técnica de la columna

Cuerpo de la columna	Vidrio superaislado al vacío, escalable, diámetro interior $50 \text{ mm}$ .
Calefacción	Eléctrica mediante una manta, potencia máxima $1400 \text{ W}$ , regulable.
Calderín	Vidrio, capacidad $6 \text{ litros}$ .
Condensador	Superficie de condensación $1400 \text{ cm}^2$ , refrigerado por agua, forma de condensador: Espiral.
Adquisición de datos	Placa de adquisición Advantech PCL-818 con $16$ entradas o salidas analógicas y $16$ entradas y salidas digitales. Frecuencia de muestreo $100\text{kHz}$ .
Termoelemento	Pt $100$ Clase A según DIN IEC 751.
Caudalímetro	Tipo: Corona móvil. Marca Kobold DF-6, margen de operación $0.25 - 6.0 \text{ l/min}$ , pérdida de carga a caudal máximo $1 \text{ bar}$ , diámetro de diafragma $3.2 \text{ mm}$ , presión máxima $16 \text{ bar}$ , temperatura máxima $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , alimentación $24 \text{ VDC}$ , señal $4-20 \text{ mA}$ .
Electroválvula	Tipo: Pistón. Marca: GSR A 1023, presión máxima $9 \text{ bar}$ , temperatura máxima $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , $K_v = 0.63 \text{ m}^3/\text{h}$ , alimentación $24 \text{ VAC}$ , señal de entrada y salida $0-10\text{V}$ .
Sensor de presión	Tipo: piezométrico, Marca: Huba Control 680, rango de presión $0-1000 \text{ mbar}$ , presión de rotura $30 \text{ bar}$ , señal $4-20 \text{ mA}$ .
Sensor de diferencia de presión	Tipo: Membrana - efecto Hall, Marca Huba Control 652, rango de diferencia de presión $0-50 \text{ mbar}$ , presión de rotura $30 \text{ bar}$ , señal $4-20 \text{ mA}$ .

#### 2.3.4. Análisis de riesgo de la planta piloto

La planta piloto es de un tamaño lo suficientemente pequeño como para no necesitar un permiso especial para su uso. No obstante hay diferentes riesgos involucrados en el uso de la planta piloto y vale la pena analizarlos para evitar incidentes, por pequeños que

sean. Estos riesgos son sobre todo los riesgos de fuga de líquido o de vapor. El líquido puede tener un impacto directo al operador por la temperatura que tiene. Las fugas de gas tienen el especial peligro de poder provocar explosiones, ya que se trabaja con sustancias inflamables.

Otro tipo de riesgo es el de entrada de aire a la columna después de un ciclo de operación como lo menciona Woodward (Woodward, 1996). Se trata de un riesgo típico para una planta de operación discontinua, porque es necesario vaciarla antes de un cambio de producto. Para la planta en cuestión, se soluciona cerrándola herméticamente después de cada ensayo y esperando a abrirla, por ejemplo para la próxima carga, hasta su completo enfriamiento.

Para saber si existe realmente peligro de alguna explosión se puede contemplar el peor caso, que sería el de la evaporación del contenido completo del calderín dentro del laboratorio con ventana y puerta cerradas sin ninguna ventilación. Bajo estas condiciones se puede calcular, si se alcanza el límite inferior de inflamabilidad (L.I.I.) de los componentes. Por debajo del límite inferior de inflamabilidad, no existe suficiente combustible como para propagar la combustión. Así, por ejemplo, si una mezcla del 1 por 100 de metanol en aire a presión atmosférica y temperatura de ambiente se pone en contacto con una llama abierta, el metanol irá consumiéndose paulatinamente a medida que las moléculas atraviesan las regiones de alta temperatura en las inmediaciones de la llama, pero la combustión no se propagará al conjunto de la mezcla gaseosa, como ocurriría si la mezcla estuviera dentro del intervalo de inflamabilidad.

De manera análoga, a concentraciones de combustible mayores que las del límite superior de inflamabilidad (L.S.I.), no hay suficiente comburente como para que la reacción se propague lejos de la fuente de ignición. En la Tabla 2 se listan los rangos de inflamabilidad de varias sustancias a condiciones estándar en aire.

Tabla 2: Características de inflamabilidad de algunas sustancias seleccionadas

Sustancia	L.I.I. en aire (%)	L.S.I. en aire (%)
Acetaldehido	4.0	60.0
Acetona	2.5	13.0
Acetileno	2.5	80-100
Benceno	1.3	7.9
Butano	1.6	8.4
Estireno	1.1	6.1
Etano	3.0	12.5
Etanol	3.3	19.0
Etileno	2.7	36.0
Formaldehido	7.0	73.0
Hexano	1.1	7.5
Hidrógeno	4.0	75.0
Metano	5.0	15.0
Propano	2.1	9.5
Propileno	2.4	1.0
Tolueno	1.2	7.0

La cantidad de volumen que ocupa un kmol de vapor se puede calcular mediante la ecuación ideal de los gases :  $pV = nRT$  que para una temperatura de 298 K es 24,4 m<sup>3</sup>/kmol. Conociendo el volumen total del espacio en el cual se evapora el componente (el laboratorio tiene aproximadamente 220 m<sup>3</sup> de volumen y se evapora un máximo de 6 litros) resulta, por ejemplo, para tolueno una concentración del 0.6 % y para etanol del 1% de vapor en el aire. Esto supone para tolueno un factor de seguridad de 2, ya que el límite inferior de inflamabilidad de tolueno es de 1.2 % ; para etanol el factor de seguridad sería de 3.

Aunque se sabe que la posibilidad de tener una fuga semejante en la cual se evapora la totalidad del líquido en el recipiente es pequeña, vale la pena de estudiar más a fondo la seguridad de la planta para saber cuales son los puntos débiles de la instalación. Este estudio se puede hacer con el análisis de riesgo basado en las tabla HAZOP. Dentro del ámbito amplio de análisis de riesgo, el análisis HAZOP es un método aplicado con frecuencia. HAZOP es la abreviación de "hazards and operability" lo que significa "peligro y operabilidad".

El análisis HAZOP no es la única posibilidad de un análisis de riesgo estandarizado; hay otras metodologías para la identificación del riesgo, por ejemplo: identificación de peligros (HAZID), índices de peligrosidad (DOW, MOND), árboles de fallos o análisis funcional de operabilidad (AFO).

En el análisis HAZOP se identifica los riesgos mediante el análisis de peligros y operabilidad. Esto tiene su base en la idea de que la probabilidad de tener problemas en la planta aumenta cuando las condiciones de operación están fuera de la banda normal. Según palabras clave se averiguan las posibles situaciones de desviaciones en el proceso. Para aplicar el análisis HAZOP se necesita diagramas de las conexiones y la instrumentación de la planta tal como descripciones de interacciones y del proceso de operación normal. Las palabras clave contemplan los estados posibles de un parámetro del proceso; por ejemplo para un caudal se contempla las posibilidades que no haya ningún caudal, menos caudal o más caudal.

El análisis realizado mediante las tabla HAZOP enseña que existen varias posibilidades de escape de vapores. El escape de vapores (inflamables) es el incidente más grave posible porque puede resultar en una explosión afectando el medio ambiente de la planta. Por lo tanto es muy importante tener precauciones aparte de tener una instalación técnica que detecta los posibles errores. Estas precauciones son por ejemplo la de prohibición de fumar en el laboratorio donde se encuentran las instalaciones y ventilar bien el laboratorio. En el caso presentado, los vapores que podrían salir de la columna no pueden llegar al punto de inflamación, porque la cantidad de líquido inflamable es tan pequeña que vaporizada en todo el volumen de aire del laboratorio no se concentra suficientemente para alcanzar el punto de inflamación. Pero tampoco se puede negar totalmente una posible inflamación por concentraciones locales altas. Los instrumentos de la columna deben ser especiales para zonas inflamables del tipo antideflagrante.

Pala- bra guía	Variable	Desviación	Posibles causas	Posibles consecuencias	Comentarios y correcciones
No	caudal de refrigerante	Falta de caudal de refrigerante	1. Caída de presión en la red del agua. 2. Operario cierra válvula principal.	Aumento de la temperatura en el condensador de la columna y aumento de la temperatura del destilado. Consecuencia: -fuga de vapor por el condensador al medio ambiente en caso de trabajar a presión atmosférica; -llenado de la trampa de vacío por condensación de los vapores condensables, después entrada de condensables a la bomba de vacío	La falta de refrigerante en el condensador es un de los efectos más graves en el funcionamiento de la columna, porque tiene como consecuencia el escape de vapor (posiblemente inflamable) al medio ambiente lo que puede causar un incendio. Otro efecto del escape es, cuando se trabaja bajo vacío, el aumento de la presión instantánea en la columna cuando ya no hay suficiente condensación en la trampa de vacío. Así se ofrecen dos posibilidades de vigilancia: primero del caudal del agua (obviamente lo más importante) y segundo de la presión en la columna.
Más	caudal de refrigerante	Aumento de caudal de refrigeración	3. Apertura de la válvula de regulación por una falla en la regulación del caudal	Disminución de la temperatura del destilado con menor efecto a la concentración del mismo. Disminución del caudal de destilado por tener más condensación (y menos evaporación, que representa finalmente el destilado) en el último plato.	En el caso de una planta de destilación en operación continua se debería incorporar la medida de la temperatura del destilado en la regulación del caudal de refrigerante según el concepto de detectar posibles desviaciones de esa temperatura; esto no sirve para la destilación discontinua, porque la temperatura del destilado sigue cambiando durante la destilación debido al cambio de la concentración. Para la operación discontinua se puede poner una alarma, cuando el caudal sobrepasa un cierto nivel o bien se cambia.

Palabra guía	Variable	Desviación	Posibles causas	Posibles consecuencias	Comentarios y correcciones
Parte de	caudal de refrigerante	Disminución de caudal de refriger.	4. Cierre de la válvula de regulación por una falla en la regulación del caudal	Aumento de temperatura del destilado.	Consecuencias posibles como en 1.
Más	temperatura en la columna	cambio de composiciones	5. Entrada de aire a la columna a través de un agujero	Cuando las condiciones de trabajo (temperatura, presión) hacen que el estado del líquido esté encima del punto de inflamación, cualquier chispa, etc. puede causar un incendio dentro de la columna si se está trabajando con líquidos inflamables.	Sistema de alarma que contempla el cambio de las temperaturas en la columna. Si este cambio (la derivada de la temperatura con el tiempo) es demasiado grande se inicia una alarma. Esto se puede realizar en sistemas de control de procesos con un canal virtual que calcula continuamente la derivada de la temperatura.
Más	Peso de depósito	Llenado del depósito de la balanza	6. Destrucción del recipiente de vidrio del condensador por sobre presión	Llenado de la columna y del depósito con agua de refrigeración. Posible destrucción de otras partes en el interior de la columna.	El sistema de refrigeración tiene que ser instalado así, que la válvula esté "delante" del condensador, para que no esté toda la presión de la red en el condensador. Las mangueras que pasan de la válvula principal hacia al condensador y de allí al desagüe tienen que estar protegidas para que no se doblen (por ejemplo por pisar una manguera en el suelo).
Más	presión absoluta	Subida de presión y caída de vacío	7. Entrada de aire a la columna a través de un agujero	Las mismas como en 5.	Consecuencias iguales a 5.

Menos	presión absoluta	Más vacío	8. Mal funcionamiento de la regulación de vacío	La evaporación en la columna aumenta, porque la temperatura de ebullición de la mezcla se baja. El condensador puede quedar sobrecargado y no condensar todo el vapor que sube al condensador. Esto resulta en una trampa de vacío sobrecargada con las mismas consecuencias como en 1. y 2.	El sistema de control de la presión absoluta de la columna tiene que llevar una alarma para el momento de paso al límite inferior de la presión. Debería también detectar un gradiente de presión más alto que un gradiente máximo establecido.
-------	------------------	-----------	---	--	---

## 2.4. Símbolos

<i>Letra</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>
$c_p$	calor específico	kJ/kmol K
$C_f$	constante de inundación	m/s
$d$	diámetro	m
$F$	factor-F (carga de vapor)	$m / s\sqrt{\text{kg} / \text{m}^3}$
$\dot{G}$	caudal de vapor	kmol/s
$k$	coeficiente de transmisión de calor	W/ m <sup>2</sup> K
$L$	longitud total de tubo	m
$\dot{L}$	caudal de líquido	kmol/s
$\dot{M}_L$	caudal de masa del condensado	kg/s
$Q$	energía, calor	kJ
$w$	velocidad de vapor	m/s
$w_f$	velocidad de vapor límite	m/s

### Símbolos griegos

<i>Letra</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>
$\alpha$	coeficiente de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> K
$\delta$	espesor	mm
$\lambda$	conductividad de calor	W/m
$\eta$	viscosidad dinámica	kg/ms
$\rho$	densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	tensión superficial	N/m
$\vartheta$	temperatura	C

### Subíndices

---

E	entrada
ext	exterior
i	numero de componente (de 1 hasta M)
int	interior
j	numero de plato (de 1 hasta N+1 [calderín])