

CAPÍTULO 7

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNA

7.1 Introducción

En el diseño de la columna se le dio mayor importancia a la funcionalidad de la misma que a la exactitud de las dimensiones que pudieran lograrse durante la construcción.

En este capítulo se presentarán las especificaciones requeridas de los elementos del lecho fluidizado, las razones para las mismas y cómo se realizó la construcción. Este proceso está limitado por la disponibilidad de las piezas y los materiales necesarios para su construcción en Puebla y como se verá más adelante, inclusive en la República Mexicana.

7.2 Diseño conceptual

Como establece el diseño mecánico, se debe tratar de utilizar el número mayor de partes estándar posibles para facilitar la construcción del mismo. Este principio básico ayudó a delimitar cómo debía ser construida la columna, rechazando la pailería y adoptando la utilización de tubos y bridas estándar. La figura 7.1 ilustra el diseño conceptual; en este bosquejo se puede ver que ya esta integrada una sujeción adecuada del distribuidor, un dispositivo de seguridad (la válvula de alivio), los condensadores para la medición de la diferencia de presión.

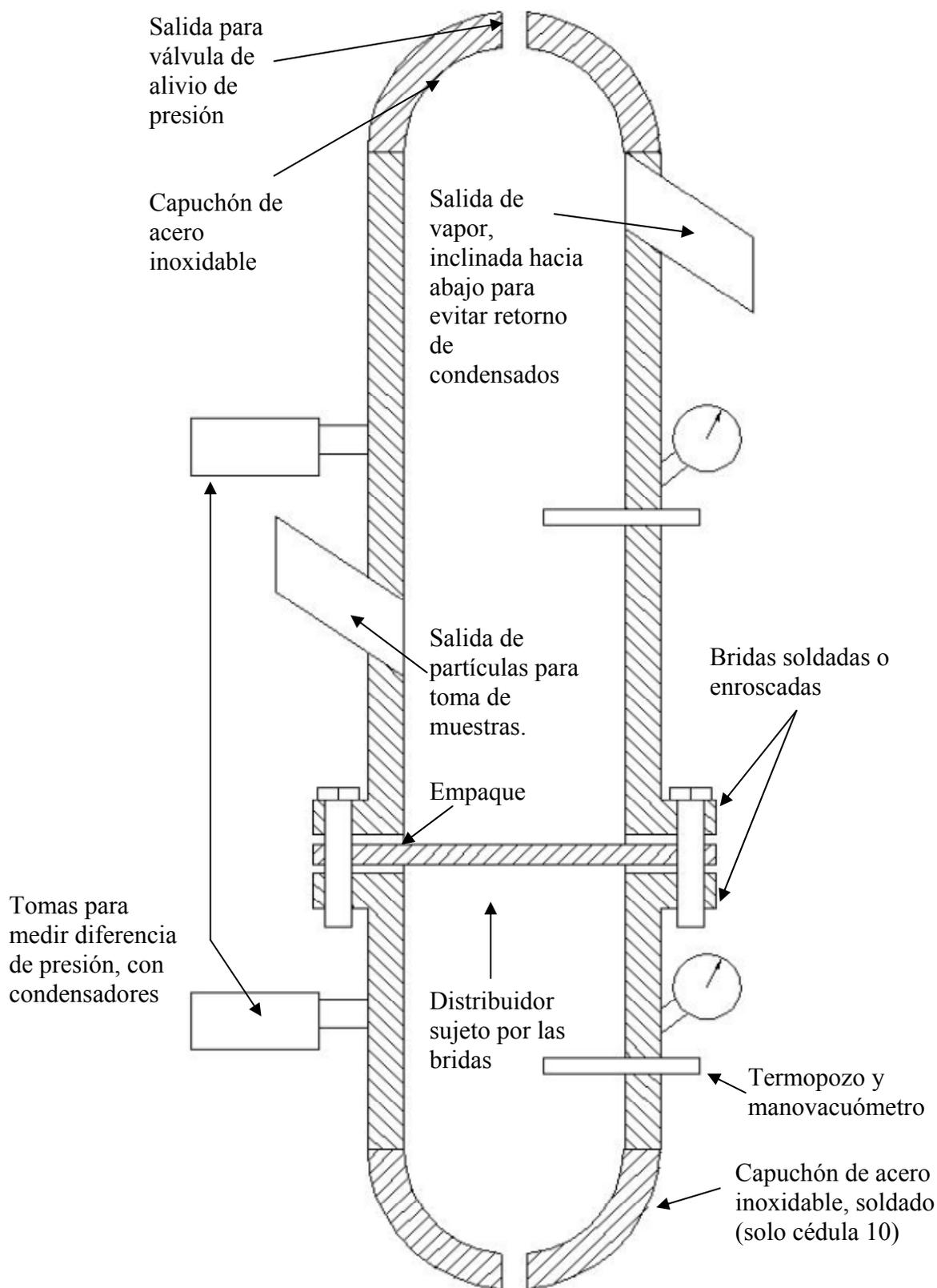


Figura 7.1 Diseño conceptual de la columna para vapor sobrecalentado

7.3 Elección de material

Durante el proceso de diseño se propusieron dos materiales con los cuales construir era posible construir la columna: acero inoxidable (AISI 304L) y aluminio (6061-T6). Una vez establecido el diseño conceptual se pudo discutir sobre cuál utilizar. En esta instancia no se tomaron en cuenta las resistencias mecánicas ya que la columna no operará a presiones elevadas.

Para poder tomar una decisión adecuada, era importante primero enmarcar las ventajas y las desventajas de usar un material sobre el otro. Esto se hace para ver si realmente es viable usar ambos materiales o descartar uno porque no satisfaga alguna propiedad enteramente. Las ventajas de utilizar aluminio contra acero inoxidable son las siguientes:

1. El sistema es más ligero. A volumen constante, el peso del equipo en aluminio es 3 veces menor (densidades de 2700 kg/m^3 y 8000 kg/m^3 [31]). Un peso menor puede traducirse en costos más bajos de material y en mayor facilidad de ensamble.
2. El sistema es más barato.
3. La distribución de temperatura es más uniforme debido a que la conductividad térmica del aluminio es 10 veces mayor a la del acero inoxidable ($166.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y $16.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, respectivamente [31]).
4. El maquinado del aluminio es mucho más fácil. De decidir por aluminio, en principio, las partes maquinadas serían las bridas y el distribuidor, en lo contrario, solo debería maquinarse el distribuidor.

Las desventajas de utilizar aluminio son las siguientes:

1. El aluminio tiene mayor dilatación térmica ($23.6 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ contra $17.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ [35]) lo cual impacta en el control dimensional. Este punto no parece ser importante ante lo mencionado en la sección 7.1, pero hay que tomar en cuenta que al utilizar piezas estándar (válvulas, nicles) se estará en contacto asimismo con otras piezas estándar que son de otros materiales.
2. No existen en el mercado bridas estándar de aluminio, por lo cual deberían ser maquinadas. Esto requeriría un tiempo extra de construcción.
3. El aluminio tiene menor resistencia a la corrosión [32, 33, 34] que el acero inoxidable y por lo tanto la vida del equipo será menor. En este punto se observó la resistencia a la corrosión en agua caliente y las recomendaciones en la utilización del vapor. El acero inoxidable seleccionado es recomendado como primera opción en todas las referencias.
4. La relación temperatura de trabajo / temperatura de fusión es mucho mayor para el aluminio que para el acero inoxidable lo cual implica que el material pueda tender a deformarse.

Con el diseño conceptual se realizó un presupuesto preliminar que fue el factor principal en la elección. El utilizar aluminio no brindaba un ahorro muy significativo con respecto al costo total estimado del proyecto, por lo cual se escogió el acero inoxidable 304L.

7.4 La columna

7.4.1 El cuerpo principal

La columna está dividida en 2 secciones principales, una superior y una inferior, que se unirían por bridas estándar [35]. Esto permite una sujeción firme del distribuidor, que es una de las mejoras que se pretenden lograr con el nuevo diseño. Para el cuerpo principal, se decidió por un tubo de 4 pulgadas cédula 10 que tiene 108.2 mm de diámetro interno [36]. Se escogió cédula 10 para aligerar el peso total de la columna, sabiendo de antemano que esta cédula (contra cédula 40) no permite uniones roscadas.

La sección inferior (*véase plano LF-01-01*) es donde entra el vapor y obtiene el perfil de flujo deseado hasta encontrarse con el distribuidor. Esta parte se diseñó de 400 mm de longitud (aproximadamente 4 veces el diámetro interno).

La sección superior (*véase plano LF-01-02*), de 700 mm de longitud, es donde ocurre la fluidización. Se puede observar que la parte más alta de esta sección también tiene una brida y no un capuchón soldado como en el caso de la parte inferior, en el acceso del vapor (y como se observa en el diseño conceptual). Esto se diseñó de esta manera para permitir que en el futuro pueda anexarse otra sección de la columna.

7.4.2 Medición de las propiedades termodinámicas en la columna

En la columna existen 2 presiones de interés: la presión absoluta de operación y la caída de presión en el lecho.

7.4.2.1 Presión y temperatura de trabajo

El lecho fluidizado está diseñado para operar tanto a presiones manométricas positivas (menores a 1 kg/cm^2) y de vacío (dependiendo de la capacidad de la bomba). Se debe resaltar que debido a que se trata de vapor sobrecalentado el monitoreo de las propiedades termodinámicas es muy importante para así saber si de verdad se trata de vapor seco o no.

Por lo anterior, se dispusieron 3 diferentes zonas para la lectura de la presión manométrica (o de vacío) y la temperatura. Una se encuentra antes del distribuidor y las otras 2 se encuentran aguas abajo.

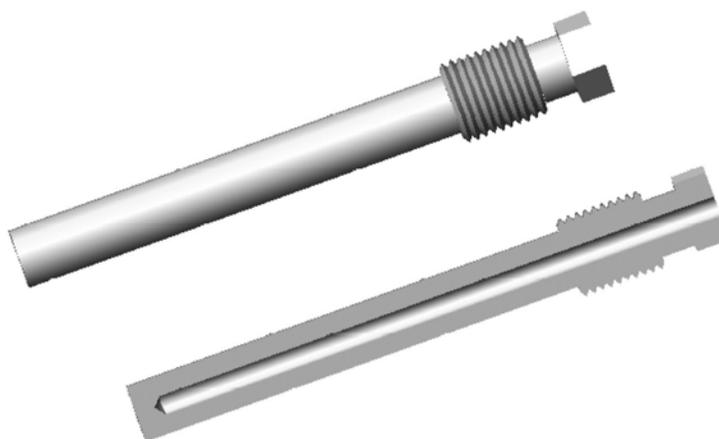


Figura 7.2 Termopozo para insertar termopar

La presión se mide con 3 manovacúómetros de 76 cmHg de vacío a 1 kg/cm². Para medir la temperatura se diseñaron termopozos (*véase plano LF-01-03*) adecuados para la aplicación, donde se insertan termopares tipo T.

Los termopares disponibles en la Universidad de las Américas no mostraron la precisión requerida en este estudio, teniendo errores de medición muy grandes. No fue posible encontrar similares en la Ciudad de Puebla, por lo cual se tuvieron que adquirir 3 termopares tipo J, con bulbo de 3/16 in. Con este tipo de termopares, no pudieron utilizarse los termopozos y se tuvieron que conectar de otra forma. La ventaja de los termopares adquiridos, es que ya contienen bulbo de acero inoxidable, por lo cual pueden exponerse directamente al vapor.

7.4.2.2 Diferencia de presión en el lecho

Uno de los parámetros más importantes a determinar en este estudio es la diferencia de presión en el lecho, que nos ayuda a construir las gráficas en las cuales se determina experimentalmente la velocidad mínima de fluidización.

Para obtener dicho parámetros se dispusieron dos tomas de presión: una, aguas arriba del distribuidor; y otra, aguas abajo. En cada toma se dispusieron 2 “condensadores” (*véase plano LF-01-04*) que proveen el líquido para los sellos de agua. Conectado a cada terminal está un manómetro en U de vidrio, que utiliza tetracloruro de carbono (CCl₄) teñido con yodo como fluido de medición.

Debido a que existe una diferencia de alturas geodésica debido a la geometría y posición de la columna, antes de comenzar la operación del lecho debe calibrarse este manómetro, llenando el nivel de agua requerido de los condensadores. Dicha diferencia inicial siempre es restada de cada diferencia de presión medida.

7.4.3 Visibilidad en la columna: las mirillas

Definitivamente uno de los retos más difíciles durante la construcción de la columna fue lograr que el proceso fuera visible. Poder observar el proceso es vital en un lecho fluidizado.

Tradicionalmente, en sistemas similares, la visibilidad se logra añadiendo mirillas que consisten en dos bridas que sujetan un cilindro de cristal, que es el que permite ver hacia adentro. Normalmente se construyen por pares (ver figura 7.3).

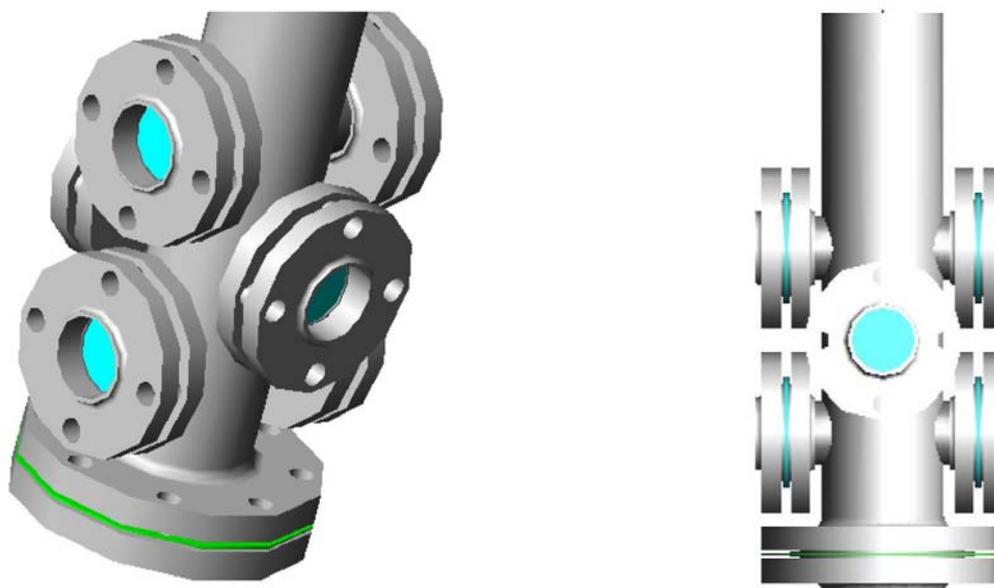


Figura 7.3 Mirillas tradicionales, por pares. Distribución tentativa en la columna.

Las mirillas descritas proveen una visión local debido a que no se encuentran directamente en el tubo principal, lo cual es una situación poco deseable en nuestro caso. Una posible solución sería agrandar el diámetro de la brida. Sin embargo, el hacer esto podría alterar significativamente el perfil de flujo y favorecer la condensación del vapor, lo que debe evitarse.

Por lo anterior, se decidió por un tipo de mirilla más “sencillo” consistiendo en dos arreglos separados de 12 perforaciones de 1 pulgada. Estas perforaciones estarían cubiertas por secciones cilíndricas transparentes. La figura 7.4 muestra a la izquierda el arreglo de perforaciones y a la derecha cómo estaría dispuesta dichas secciones transparentes, las que a partir de ahora serán referidas como mirillas.

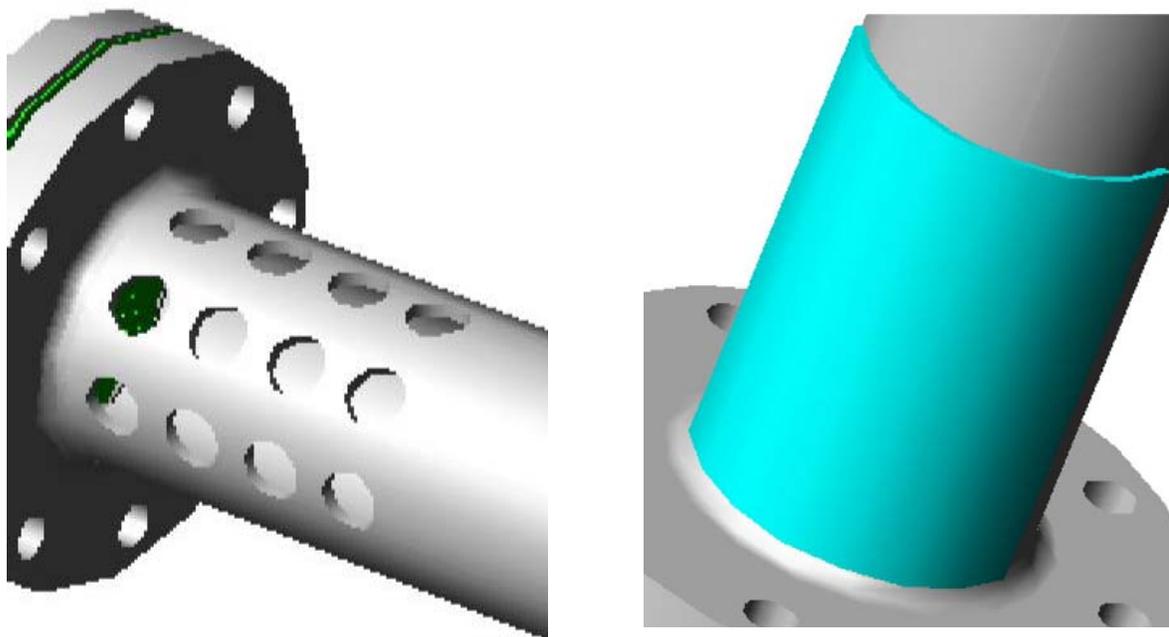


Figura 7.4 Diseño conceptual de las mirillas. Se puede ver como se realiza un arreglo de perforaciones al cuerpo de la columna y son protegidos por una película transparente.

No se realizaron las perforaciones en la columna hasta tener “en mano” las mirillas adecuadas, ya que debido a la disponibilidad del material o las dimensiones posibles se podría cambiar el diseño original de las perforaciones.

7.4.3.1 Material de las mirillas

Para las mirillas fueron pensados 3 materiales diferentes: vidrio borosilicato (material con el que fue construido la columna anterior), acrílico y ULTEM 1000®. A continuación se discutirán los problemas encontrados con cada uno de estos casos.

ULTEM 1000®: Este material es un polímero color ámbar, que resiste temperaturas de operación hasta 170°C. Se importó -por medio de Nylamid (en el Estado de México)- una placa de 12 x 12 in de $\frac{1}{4}$ in de espesor, de la que se obtendrían 4 mirillas. El tiempo de arribo del material fue de 1 mes y no se encontró en Puebla la tecnología necesaria para termoformarlo. La figura 7.5 muestra una placa de ULTEM 1000® sobre uno de los distribuidores construidos; aquí se puede observar la visibilidad que se logra.

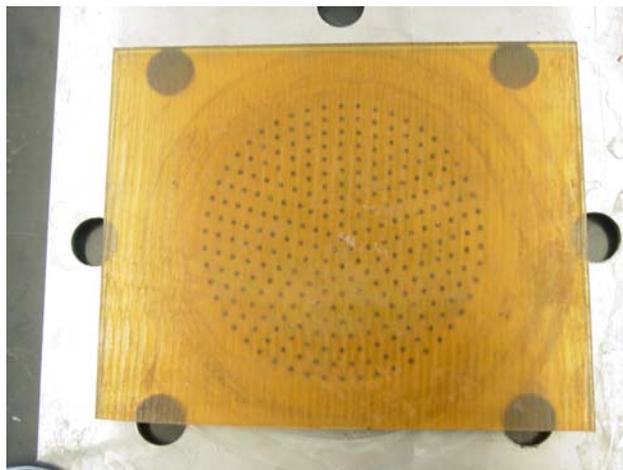


Figura 7.5 Placa de ULTEM 1000®

Acrílico: Las mirillas de acrílico se consiguieron fácilmente y tuvieron las especificaciones del diseño. El problema del acrílico es que no resiste altas temperaturas de operación, solamente de 70 a 80°C. Estas mirillas se construyeron para poder utilizar la columna con aire. Para el sello con la columna se construyeron 2 juntas de teflón en placa de 1/8 in (figura 7.6).

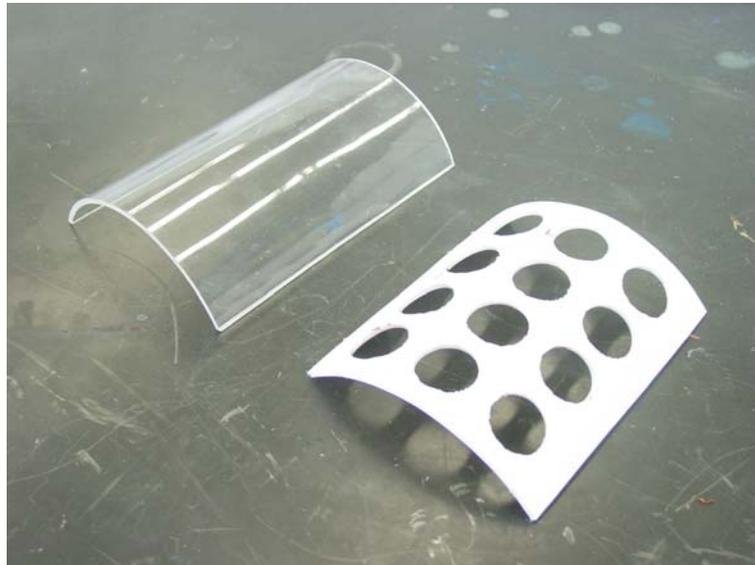


Figura 7.6 Mirilla de acrílico y su junta de teflón.

Vidrio Borosilicato: Esta opción era la menos deseable, ya una de las justificaciones de la nueva columna eran los problemas inherentes a la utilización del vidrio. Debido a que los dos materiales anteriores no satisficieron todas las especificaciones, se construyeron 2 mirillas de vidrio, con un alto costo. Las dimensiones obtenidas no fueron exactamente las de diseño (radio de curvatura menor a 2.25 in), por lo cual su instalación requirió el moldeo de una película de silicón rojo Permatex® (para altas temperaturas) para lograr el sello (figura 7.7). No se puede utilizar lámina de teflón ya que requiere un espesor variable.

Es posible que en algún momento futuro pueda conseguirse un material más conveniente para las mirillas, en aspectos de seguridad y durabilidad, como el PSU 1000® [31] o algún otro. Sus dimensiones ya están establecidas (*vease plano LF-01-05*).

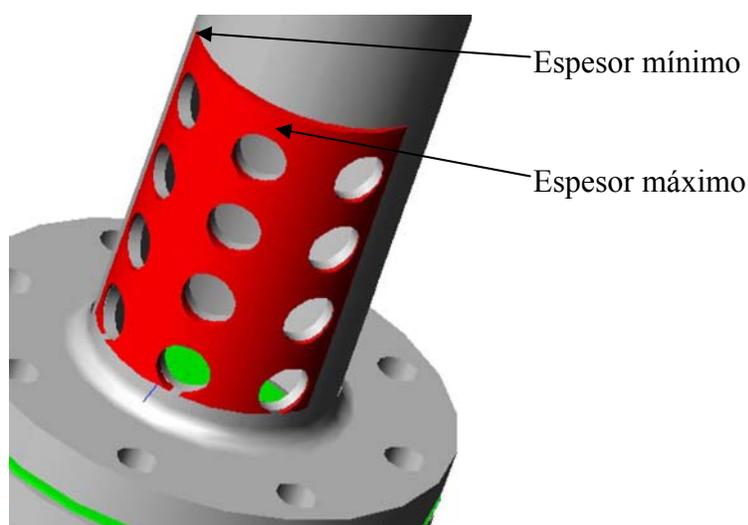


Figura 7.7 Junta de silicón moldeado para mirillas de vidrio borosilicato

7.4.5 Toma de muestras

La toma de muestras se realiza mediante una derivación del vacío hacia otro punto de la columna, más cercano al distribuidor. Existen 2 posibles puntos de succión, uno más elevado para cuando se fluidicen partículas que alcancen mayor altura.

Abriendo una válvula de bola se succiona la cantidad necesaria de material en el lecho que choca contra un filtro para vapor dispuesto para este objetivo que se deposita en un tubo de ensaye unido por un cople rápido. El material se remueve retirando el tubo de ensaye una vez cerrada la válvula (ver figura 7.8). En el estudio de la velocidad mínima de

fluidización no es necesaria la obtención de muestras con respecto al tiempo así que no es utilizado.



Figura 7.8 Toma de muestras

La creación de un cuerpo principal de la columna con un material resistente como es el acero inoxidable permite sujetar el filtro a la columna, por lo que el trayecto que recorren las partículas para ser extraídas es menor. Esto consiste una mejora importante respecto a la columna anterior.

7.4.6 Calentamiento eléctrico

Como se mencionó en el capítulo anterior, la columna de vidrio tiene una camisa externa por la cual se hace pasar aire caliente, para evitar la condensación dentro de la

columna. Al rechazar la pailería durante el diseño conceptual, se rechaza asimismo el construir una camisa externa, por lo cual se decidió remplazar el calentamiento por aire, con resistencias eléctricas.

7.4.6.1 Cálculo de las pérdidas de calor

Para el cálculo de las pérdidas de calor se considero un tubo de 1.1 m de largo, en el cual existe la resistencia de la convección interna, la conducción a lo largo del tubo y la convección en el lado exterior, como se muestra en la figura 7.9.

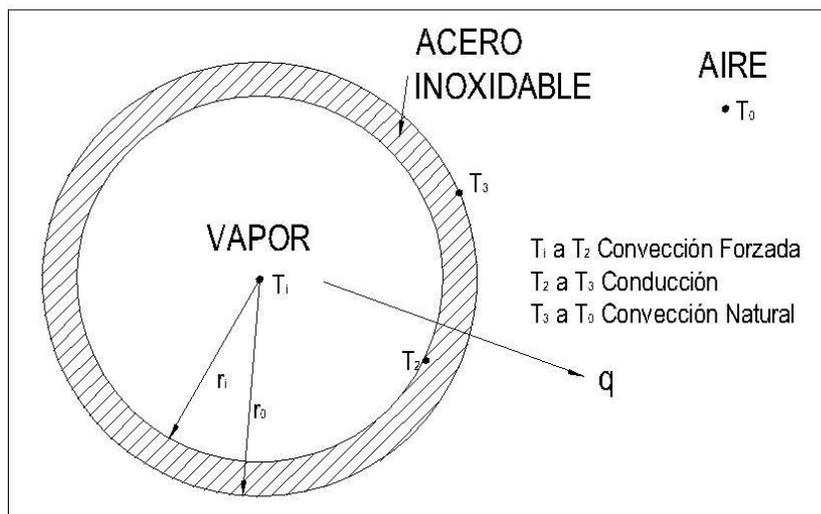


Figura 7.9 Resistencias a la transferencia de calor en un tubo. Sistema radial.

Para saber el calor que es emitido por este tubo, se utiliza la siguiente ecuación [37]:

$$q = \frac{2\pi L(T_v - T_0)}{\frac{1}{h_i r_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{k_{\text{INOX}}} + \frac{1}{h_o r_o}} \quad (7.1)$$

donde

T_v = Temperatura del Vapor, promedio

h_i = Resistencia a la convección, interna

h_o = Resistencia a la convección, externa.

T_0 = Temperatura Ambiente = 15°C

$L = 1.1$ m

$r_i = 4.26 \text{ in} / 2 = 2.13 \text{ in} = 0.0541$ m

$r_o = 4.5 \text{ in} / 2 = 2.25 \text{ in} = 0.05715$ m

$k_{\text{INOX}} = 166.9 \text{ W} / \text{m}\cdot\text{K}$

Para calcular q deben encontrarse los coeficientes de transferencia de calor.

Obtención de h_i

En primer caso hay que determinar el número de Reynolds (Re) dentro de la tubería, se sabe que coeficientes de transferencia de calor mayores se obtienen conforme Re es grande, así que siendo Re :

$$Re = \frac{VD}{v\mu} \quad (7.2)$$

donde

V = Velocidad lineal [m/s]

D = Diámetro de la tubería [m]

v = volumen específico [m^3/kg]

μ = viscosidad dinámica [$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$]

Como se trata de encontrar el valor de Re más alto posible, se toman en cuenta los casos más extremos:

$$V_{\max} = 10 \text{ m/s}$$

$$D = 0.1082 \text{ m}$$

$$V_{\min} = 1.694 \text{ m}^3/\text{kg} @ 100 \text{ kPa}, T = 99.63^\circ\text{C}$$

$$\mu_{\min} = 0.000011 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 @ 10 \text{ kPa}, T = 10^\circ\text{C}$$

con estos valores, el valor obtenido del número de Reynolds máximo es:

$$Re_{\max} = \frac{10 \text{ m/s} \cdot 0.1082 \text{ m}}{1.694 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot 0.000011 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2} = 53227 \quad (7.3)$$

para este valor de Re , el flujo es turbulento. Para este caso la relación que se utiliza es [37]:

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad (7.4)$$

donde

$n = 0.4$ si el fluido es calentado

$n = 0.3$ si el fluido es enfriado

Pr = número adimensional Prandtl

En nuestro caso el fluido es enfriado, así que sólo queda evaluar Prandtl. Para el vapor sobrecalentado a presión atmosférica a 400 K (126°C), $Pr = 1.04$ [37].

Con los valores discutidos, sustituyendo en la ecuación 7.4:

$$\text{Nu}_d = 0.023(53227)^{0.8} \cdot 1.04^{0.3} = 140.52 \quad (7.5)$$

Con el número adimensional Nusselt (Nu) se procede a obtener h_i con la siguiente relación [37]:

$$h_D = \frac{\text{Nu}_d k}{D} \quad (7.6)$$

Se evaluó k para las mismas condiciones que Pr , obteniendo un valor de $0.0261 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Sustituyendo los valores en la ecuación 7.6:

$$h_i = \frac{140.52 \cdot 0.0261 \text{ W/m}\cdot\text{K}}{0.1082 \text{ m}} = 33.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (7.7)$$

Este coeficiente corresponde al caso en el que la condensación dentro de la columna ya fue erradicada y se ha logrado un estado estable.

Obtención de h_0

Para una superficie vertical [37]:

$$\text{Nu}_f = C(\text{Gr}_f \text{Pr}_f)^m \quad (7.8)$$

donde

Gr = Número Adimensional Grashoff

C, m = Coeficientes

En el caso de esta convección, el fluido es aire, para obtener el número adimensional Grashoff se utiliza la siguiente relación [37]:

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (7.9)$$

donde

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$x^3 = \text{Longitud Característica} = L^3 = (1.1 \text{ m})^3 = 1.331 \text{ m}^3$$

T_w = Temperatura de la superficie

T_∞ = Temperatura ambiente = 15°C (288 K)

$$\nu @ 50^\circ\text{C} = 18.405 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Si } \beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \quad (7.10)$$

Si asumimos que $T_w = 90^\circ\text{C}$ (363 K), entonces es importante encontrar:

$$\rho @ 288 \text{ K} = 1.1614 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho @ 363 \text{ K} = 0.9950 \text{ kg/m}^3$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 7.10:

$$\beta = -\frac{1}{0.9950 \text{ kg/m}^3} \frac{1.1614 \text{ kg/m}^3 - 0.9950 \text{ kg/m}^3}{15^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}} = \frac{0.00223}{^\circ\text{C}} \quad (7.11)$$

Sustituyendo todos los valores en 7.9:

$$\text{Gr} = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.00223^\circ \text{C}^{-1} \cdot (90^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) (1.331 \text{ m}^3)}{(18.405 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} = 6.4468 \times 10^9 \quad (7.12)$$

Para poder sustituir en 7.8, necesitamos encontrar los valores de C, m y Pr [37]:

$$\text{Para } 10^9 < \text{Gr} < 10^{13}, C = 0.1 \text{ y } m = 1/3$$

$$\text{Pr} = 0.703 @ 50^\circ \text{C}$$

Sustituyendo los valores:

$$\text{Nu}_f = 0.1(6.4468 \times 10^9 \cdot 0.703)^{0.333} = 164.27 \quad (7.13)$$

Nuevamente transformamos el número Nusselt en coeficiente de transferencia de calor, con

la ecuación 7.6, sabiendo que la conductividad del aire a 50°C es $k = 0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$:

$$h_0 = \frac{164.27 \cdot 0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}}{1.1 \text{ m}} = 4.18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (7.14)$$

Ahora teniendo los valores, podemos sustituir en la ecuación 7.1, para obtener la tasa de calor emitida.

$$q = \frac{2\pi (1.1 \text{ m})(150^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C})}{\frac{1}{33.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.0541 \text{ m}} + \frac{\ln\left(\frac{0.05715 \text{ m}}{0.0541 \text{ m}}\right)}{16.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}} + \frac{1}{4.18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0.05715 \text{ m}}} = 193.06 \text{ W} \quad (7.15)$$

Esta es una cantidad relativamente baja.

Para decidir en la potencia eléctrica adecuada para el calentamiento eléctrico se tomó también en cuenta la experiencia obtenida en las pruebas realizadas en la columna de vidrio y en las pruebas preliminares realizadas con el lecho fluidizado. La implantación de las resistencias eléctricas fue el último proceso en la construcción.

Se decidió finalmente por instalar 2000 W de resistencias eléctricas, distribuidas a lo largo de toda la columna. Ya se mencionó que la tasa de calor calculada es muy baja. En experimentos preliminares con la columna de acero inoxidable, se detectó una gran cantidad de calor expedida, y es por esta experiencia que se decidió por más resistencias. En la potencia instalada, existe la posibilidad de reducirla en caso de que el calentamiento sea excesivo.

Una explicación para que q aumente serían las bridas y conexiones que tiene la columna, que podrían estar funcionando como aletas que cambian grandemente los coeficientes de transferencia de calor. Un estudio de elemento finito sería más apropiado para encontrar q .

7.5 El distribuidor de gas

7.5.1 Distribuidores contruidos

Para este dispositivo se construyeron dos distribuidores. Se construyeron en una placa de Acero Inoxidable 304L de 1/16 in de espesor, en el Centro de Maquinado Vertical

de la Universidad de las Américas, Puebla. El programa utilizado fue generado en FeatureCAM.

7.5.2 Descripción

El primer distribuidor (*véase plano LF-01-06a*), de 1.5 mm de espesor, cuenta con 294 barrenos de 1.59 mm de diámetro con una celda unitaria en forma de triángulo equilátero, de 6.0 mm de lado. Este diseño se imitó del distribuidor utilizado en el dispositivo existente para aire. La relación de área libre¹ es de $f = 0.0633$

El segundo distribuidor (*véase plano LF-01-06b*), de 1.5 mm de espesor, cuenta con 276 perforaciones de 1.59 mm de diámetro en un arreglo de estrella de 5 picos (separación radial de 5.2 mm). Este diseño se escogió debido a que homogeniza la actividad en la periferia del distribuidor. Fue evaluado para ver si la actividad a lo largo de todo el distribuidor era similar. La relación de área libre es de $f = 0.0594$.

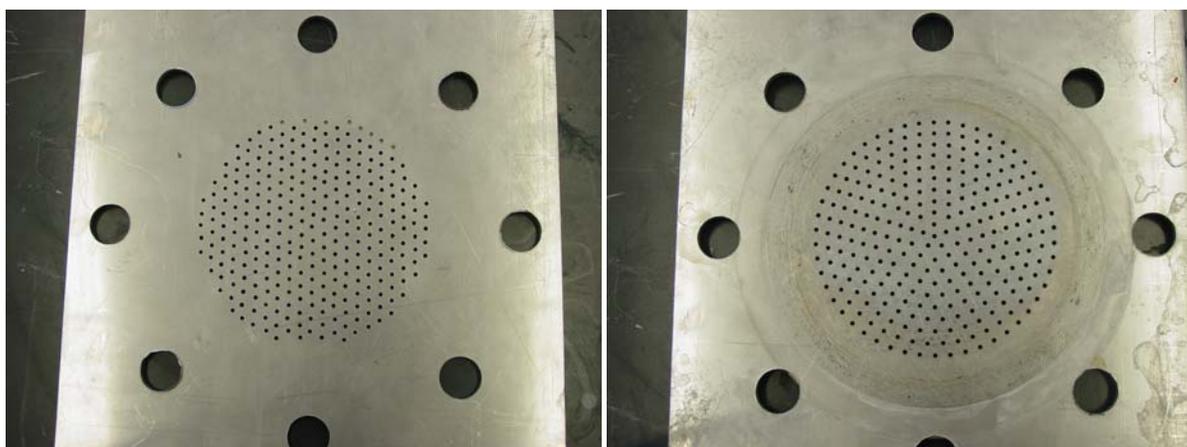


Figura 7.10 Distribuidor No. 1 y No. 2

¹ El área libre es la relación de la suma del área de los orificios y el área del ducto.

Ambos distribuidores se sujetan a las bridas que unen las dos secciones de la columna, logrando una sujeción firme y asimismo que esté centrado automáticamente. La figura 7.10 muestra los distribuidores construidos.

7.5.3 Revisión de los diseños

Usando la ecuación 3.31, el coeficiente de descarga $C_d = 0.814$. El número de orificios por unidad de área (N_{or}) del distribuidor uno es $31974/m^2$ y $30017/m^2$ en el dos.

Realizando los cálculos con la ecuación 3.30, se obtienen velocidades en los orificios para los distribuidores uno y dos de 15.8 m/s y 16.8 m/s respectivamente. Para estos cálculos se utilizó una velocidad de fluidización de 1 m/s .

Utilizando una densidad de 0.5 kg/m^3 se obtienen caídas de presión en los distribuidores de 91.4 Pa y 107 Pa respectivamente. Si se fluidizan generalmente 500 g de material, se obtiene una caída de presión en el lecho de 533 Pa . Se puede ver que el factor r_p se encuentra entre 0.18 y 0.2 . Es importante destacar que este factor irá aumentando conforme aumente la velocidad del gas en el lecho fluidizado.

Asimismo debe destacarse que el diseño de los distribuidores se limita a una aplicación y en el caso de los distribuidores para este trabajo serán utilizados en diferentes velocidades de fluidización con diferentes partículas y en diferentes condiciones, lo cual hace que la experiencia consista en el factor de más peso en el diseño.

Por último, utilizando las ecuaciones utilizadas hasta ahora, se puede crear una ecuación que predice la caída de presión en el distribuidor, en función de la velocidad de fluidización, el coeficiente de descarga, el diámetro de orificio y el número de orificios por unidad de área.

$$\Delta P_{\text{distribuidor}} = \frac{\rho_g}{2} \left(\frac{4u_0}{C_d \pi d_{\text{or}}^2 N_{\text{or}}} \right)^2 \quad (7.16)$$

Esta ecuación será de gran importancia en el análisis experimental de la velocidad mínima de fluidización.

7.6 Soporte de la columna

Debido a que la columna es de acero inoxidable, el peso es considerable y se debía diseñar un soporte lo suficientemente sólido. No se realizaron cálculos para el diseño del mismo y únicamente se tomó en cuenta la funcionalidad (*véase plano LF-02-01*).

Una de las mejoras que se pretendían lograr con el diseño del soporte era la accesibilidad para el trabajo en la columna. El soporte de la columna anterior tiene 4 pilares principales en arreglo cuadrangular que sostienen en el centro a la columna. Se decidió utilizar únicamente 2 pilares que por medio de dos vigas en cantilever soportaran a la columna. Para poder fijarla mejor, se diseñaron y construyeron 2 placas con el radio exterior de la columna (*véase plano LF-02-02*). Esto se puede apreciar en la figura 7.11.

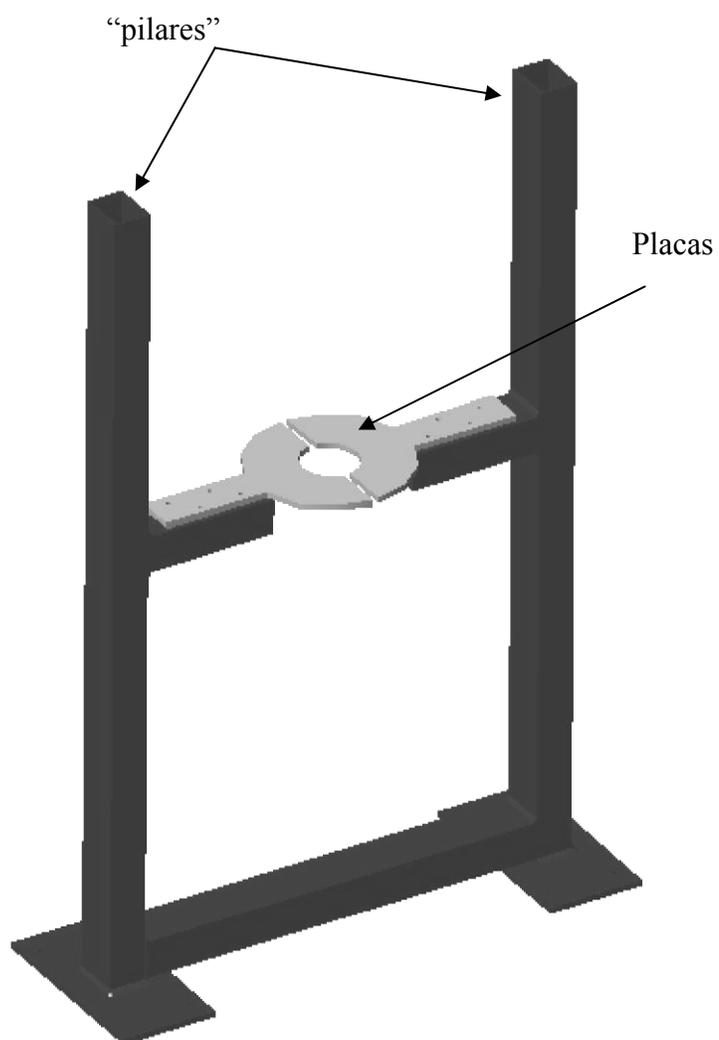


Figura 7.11 Ensamble de soporte

7.7 Bomba de vacío

Para lograr el vacío en la columna se utilizará la misma bomba descrita en el capítulo 6. Se añadieron las conexiones necesarias para lograr una derivación hacia la columna de vapor.

7.8 Suministro de aire caliente

Se creó una derivación del sistema de aire. Para este estudio solo es necesaria la utilización del aire para la extracción de partículas al final del experimento, ya que es una forma segura de hacerlo, en comparación con el vapor.

Se hizo también esta adaptación debido a que la columna diseñada puede también ser utilizada para fluidizar con aire.

7.9 Suministro de vapor sobrecalentado

7.9.1 Medición del flujo

Una de las modificaciones más importantes realizadas a este sistema fue la implementación de una placa de orificio para medir el flujo de vapor, que es un parámetro fundamental para la obtención de la velocidad de fluidización en la columna.

La placa de orificio instalada tiene un coeficiente de orificio $\beta = 0.65$, con tomas de brida (a 1 pulgada de la placa, cada una). La figura 7.12 muestra la placa de orificio instalada.

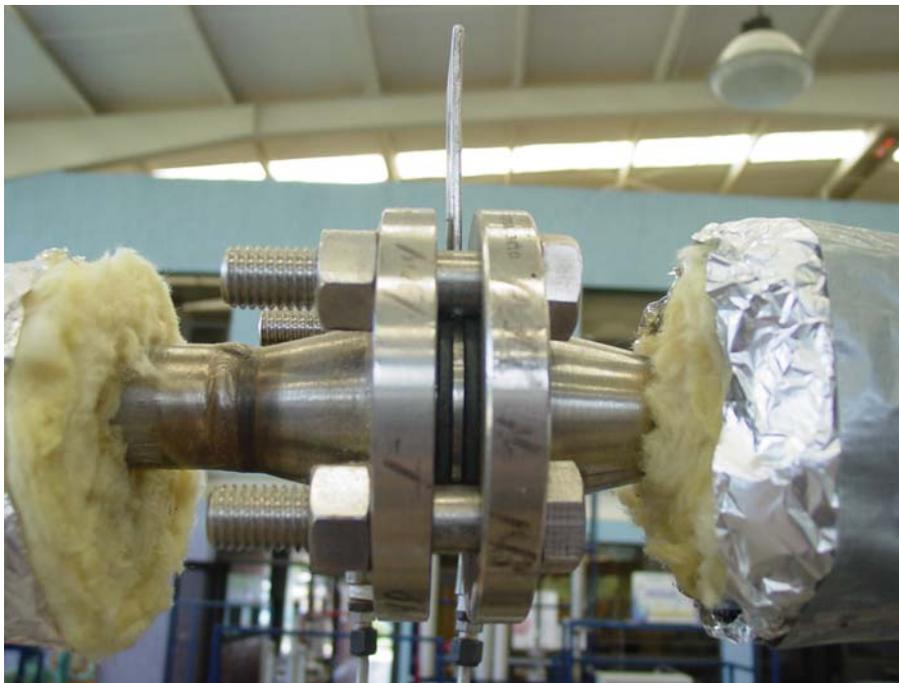


Figura 7.12 Instalación de la placa de orificio

7.9.1.1 Medición de la diferencia de presión en la placa de orificio

Para la medición de la diferencia de presión se utiliza un sistema similar al utilizado en el lecho fluidizado. Se conectaron a las tomas de brida de la placa de orificio 2 condensadores (*vease plano LF-03-01*) de mayor tamaño que los utilizados en la columna y cada terminal se conectó a dos manómetros en U. El primero, de 2 metros de longitud utilizando tetracloruro de carbono como fluido de medición (para tener mayor sensibilidad en la lectura). El segundo, de 60 cm de longitud utilizando mercurio como fluido de medición (menos sensibilidad pero mayor estabilidad). La siguiente figura muestra la toma de diferencia de presión (de brida) y los condensadores.



Figura 7.13 Tomas de brida y condensadores. Se muestra en el círculo las válvulas de bola que sirven para proteger a los manómetros de exceso de presión.

En la figura 7.13 puede observarse la existencia de una válvula de bola en cada toma. Esta válvula es para seguridad de los manómetros de vidrio: si en algún momento la presión en la placa llegara a ser muy alta (del orden de 5 kg/cm^2), la válvula debe cerrarse para impedir que los manómetros en U estén a esta presión.

7.9.1.2 Medición de las propiedades termodinámicas en la placa de orificio

Para poder determinar el flujo que pasa a través de la placa es vital conocer la densidad del vapor en la placa. Como ya se comentó la diferencia de presión en la placa es muy pequeña como para considerar un cambio importante en la densidad, así que sólo es necesario la medición de una presión y una temperatura.

En el sistema actual estas dos propiedades se antes de la placa: la presión (con un manómetro de 0 a 7 kg/cm²), 30 cm (10D) aguas arriba; y la temperatura, 60 cm (10D de lectura de presión). Esto es importante que ya que la placa requiere un perfil de flujo desarrollado y la medición de la temperatura (por medio de un termómetro bimetálico de 0 a 300°C dentro de un termopozo estándar) interfiere un poco.

7.9.1.3 Sistema de medición

Debido a que la columna requiere la medición de varias variables y que éstas no describen a simple vista o *a priori* nada del proceso, era importante crear una forma rápida para visualizar los datos. Para esto se necesito de algún sistema que sólo al ingresar la presión y temperatura de vapor se obtuviera la viscosidad dinámica y la densidad.

Para esto, se usó el complemento (ADD-in) de Excel [38] que utiliza las ecuaciones de la IAPWS de 1997, para vapor sobrecalentado [39, 40].

Para poder utilizar con confianza dicho complemento, se realizó una comparación entre los valores que se obtienen con las tablas termodinámicas, el programa CATT y el ADD-in. Como se puede ver en la tabla 7.1, la utilización del ADD-in es segura dentro del rango que se está utilizando.

Tabla 7.1 Comparación entre las tablas termodinámicas [41, 42] el programa CATT [43], y las ecuaciones utilizadas en el medidor de flujo, con respecto a la propiedad de volumen específico del vapor sobrecalentado.

		Literatura		Complemento	
P [kPa]	T [°C]	v [m ³ /kg]	Fuente	v [m ³ /kg]	Error, abs
6	36.16	23.739	[41]	23.735	0.004
6	80	27.132	[41]	27.134	0.002
6	120	30.219	[41]	30.222	0.003
10	45.81	14.674	[42]	14.671	0.003
10	50	14.869	[42]	14.868	0.001
10	100	17.196	[42]	17.197	0.001
20	60.06	7.649	[43]	7.648	0.001
20	80	8.117	[43]	8.118	0.001
20	100	8.585	[43]	8.586	0.001
35	72.69	4.526	[41]	4.525	0.001
35	80	4.625	[41]	4.625	0.000
35	120	5.163	[41]	5.164	0.001
50	81.33	3.24	[42]	3.24	0.000
50	100	3.418	[42]	3.419	0.001
60	85.94	2.732	[43]	2.732	0.000
60	100	2.844	[43]	2.845	0.001
60	120	3.003	[43]	3.003	0.000
70	89.95	2.365	[41]	2.365	0.000
70	100	2.434	[41]	2.435	0.001
70	120	2.571	[41]	2.571	0.000
80	93.5	2.087	[43]	2.087	0.000
80	100	2.127	[43]	2.127	0.000
80	120	2.247	[43]	2.247	0.000
100	99.63	1.694	[41]	1.694	0.000
100	100	1.696	[41]	1.696	0.000
100	120	1.793	[41]	1.793	0.000
Error Máximo					0.004
Error Promedio					0.00085

7.9.1.4 Descripción de las Partes

Para el ingreso y el cálculo de los datos se creó el archivo *formato.xls* que está estructurado en las siguientes partes:

- a) Tabla de ingreso de datos: Esta es una hoja de cálculo en la que se ingresan todos los datos que se requieren para los cálculos como las propiedades termodinámicas, las mediciones de los manómetros y la altura del lecho. La figura 7.14 muestra esta tabla. Esta tabla contiene unos campos en gris. En estas celdas aparecen cálculos de comprobación, que sirven para los manómetros.

CONDICIONES EXPERIMENTO								
Corrección A, Columna	6.1	32.60		Fecha:	1 de mayo de 2004			
Corrección B, Columna	59.1			Hora:	12.47			
Corrección A, Placa [Hg]	60.65	68.70		Partícula:	alvejón			
Corrección B, Placa [Hg]	60.75			ρ_p [kg/m ³]	1222.3			
Corrección A, Placa [CCl ₄]				ϵ_{fluo}	0.259			
Corrección B, Placa [CCl ₄]				Temperatura Promedio [°C]	152.75			
Presión Atmosférica (mmHg)	600			Presión Promedio [kPa]	79.99			
Masa Fluidizada [g]	1000							
L estático [cm]	12							
COLUMNA								
Excluyentes		Manómetro CCl ₄		V	T [°C]	L [cm]		
P _{man} [kg/cm ²]	P _{vac} [cmHg]	Alta [cmCCl ₄]	Baja [cmCCl ₄]					
1	0.00	0	22.8	44.4	33.60	151.9		
2	0.00	0	22.3	44.9	33.60	153.9		
3	0.00	0	21.1	46.1	33.60	154.4		
4	0.00	0	20.5	46.7	33.60	154.0		
5	0.00	0	19.8	47.4	33.60	153.9		
6	0.00	0	19.2	48.0	33.60	154		
7	0.00	0	19	48.2	33.60	153.6		
8	0.00	0	17.3	49.9	33.60	152.7		
9	0.00	0	15.4	51.8	33.60	150.9		
10	0.00	0	11.8	55.4	33.60	150.1		
11	0.00	0	9	50.2	33.60	150		
12								
13								
14								
15								
16								
17								
P L A C A								
T [°C]	Excluyentes		Manómetro CCl ₄		V	Manómetro Mercurio		
	P _{man} [kg/cm ²]	P _{vac} [cmHg]	Alta [cmCCl ₄]	Baja [cmCCl ₄]		A [cmHg]	B [cmHg]	V
150	0.35	0				72.2	65.8	69.00
150	0.32	0				71.9	65.5	68.70
159	0.20	0				71.6	65.0	68.70
150	0.24	0				71.1	66.3	68.70
156	0.22	0				70.9	66.5	68.70
158	0.2	0				70.7	66.7	68.70
168	0.18	0				70.6	66.8	68.70
166	0.15	0				70.2	67.2	68.70
144	0.12	0				69.8	67.6	68.70
144	0.09	0				69.4	68.0	68.70
144	0.05	0				69	68.4	68.70

Figura 7.14 Tabla de ingreso de datos

- b) Condiciones de Experimento: Esta parte contiene todos aquellos datos que en el cálculo de la velocidad de flujo son constantes, independientemente de las

propiedades termodinámicas. Las distancias de las tomas de presión a la escala del manómetro están incluidas. Esta zona se muestra en la figura 7.15

CONSTANTES			
ρ_{Hg} [kg/m ³]	13350	γ_{VAPOR} [1]	1.32
ρ_{CCl_4} [kg/m ³]	1604	$D_{\text{TUBERÍA}}$ [m]	0.0254
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ [kg/m ³]	1000	$A_{\text{TUBERÍA}}$ [m ²]	0.000506707
β_{PLACA}	0.65	D_{COLUMNA} [m]	0.1082
D_{GARGANTA} [m]	0.01651	A_{COLUMNA} [m ²]	0.009194845
A_{GARGANTA} [m ²]	0.000214		

ALTURAS	
$A_{\text{M. COLUMNA}}$	11
$B_{\text{M. COLUMNA}}$	45
$A_{\text{M. PLACA, Hg}}$	81
$B_{\text{M. PLACA, Hg}}$	81
$A_{\text{M. PLACA, CCl}_4}$	
$B_{\text{M. PLACA, CCl}_4}$	

CONDICIONES EXPERIMENTO	
Calibración de Manómetros	
Corrección $A_{\text{COL. CCl}_4}$	6.1
Corrección $B_{\text{COL. CCl}_4}$	59.1
Corrección $A_{\text{PLACA Hg}}$	68.65
Corrección $B_{\text{PLACA Hg}}$	68.75
Corrección $A_{\text{PLACA CCl}_4}$	0
Corrección $B_{\text{PLACA CCl}_4}$	0

Figura 7.15 Condiciones de experimento

- c) Cálculos en Columna: Esta sección contiene el ingreso y salida de todos los datos calculables sobre la columna, presión y temperatura de operación, densidad de vapor y diferencia de presión en la columna. La figura 7.16 muestra como está estructurada esta zona.
- d) Cálculos en Placa: Esta es la sección más compleja de la tabla. Contiene el ingreso y salida de todos los parámetros necesarios para el cálculo del flujo en la placa. La figura 7.17 muestra esta zona.

e) Resultados: En esta parte se obtiene la velocidad de fluidización para las mediciones, combinando los datos obtenidos en las dos zonas anteriores. La tabla obtiene 2 velocidades, una obtenida en la lectura del manómetro de tetracloruro de carbono y la segunda, del manómetro de mercurio. La figura 7.18 muestra cómo está estructurada esta zona. Debido a que el coeficiente de arrastre utilizado se obtiene con una relación que está en función de Reynolds y Reynolds depende del flujo y el flujo del coeficiente de arrastre es necesario realizar iteraciones. Esto se realiza automáticamente, pero es necesario activar esta posibilidad en Excel.

R E S U L T A D O S H g						
	$C_{Benedict}$	Y [1]	Q [m ³ /s]	Re _G	V [m/s]	ΔP_{Lecho} [Pa]
1	0.610	0.98	0.0210	64800	3.22	948
2	0.610	0.97	0.0213	63910	3.20	909
3	0.610	0.98	0.0207	59678	3.00	876
4	0.611	0.98	0.0193	53801	2.70	954
5	0.611	0.98	0.0186	51550	2.56	931
6	0.611	0.98	0.0180	48431	2.42	921
7	0.612	0.98	0.0178	46800	2.34	932
8	0.612	0.99	0.0161	41581	2.06	836
9	0.613	0.99	0.0140	37136	1.77	706
10	0.614	0.99	0.0116	29503	1.41	382
11	0.617	1.00	0.0081	19976	0.95	145
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Figura 7.18 Zona de resultados

Hay algunas consideraciones sobre el archivo de Excel:

- 1) La entrada de datos por el usuario *únicamente* se realiza en la tabla de ingreso de datos.

- 2) Existen 17 columnas que contienen las zonas de cálculo en columna, cálculos en placa de orificio y resultados. Estos consisten las mediciones de cada punto en una gráfica de velocidad de fluidización vs. ΔP . Es posible aumentar este número de puntos. Esto solo se utiliza al calcular diferentes velocidades de fluidización en un mismo experimento. En el caso del secado se creó un archivo especial para sola una medición, descrito en el Apéndice C.
- 3) Los campos en gris en la tabla de ingreso de datos sirven para el chequeo de la medición en los manómetros en U. Se obtienen mediante el promedio de medición en las dos terminales, por lógica este dato debe ser el mismo (cuando menos muy similar) a lo largo de todas las mediciones. Resulta muy útil en la medición *in situ* ya que es común confundir los dígitos de las cintas en las cuales se realiza la medición.
- 4) La diferencia de presión de la columna y la diferencia de presión del lecho no es el mismo dato, ya que se requiere restar a la diferencia de presión de la columna el valor de ΔP del distribuidor, obtenido de alguna función $\Delta P (v)$, que se mostrará en el siguiente capítulo.
- 5) El archivo de Excel no grafica automáticamente los 17 puntos. Debe calibrarse la ecuación del distribuidor que se está utilizando y realizar ciertas operaciones manuales.

7.9.2 Otras modificaciones

Otra modificación que se realizó es el cambio de posición de la válvula de estrangulamiento (figura 7.19). Se colocó antes del calentador -que se encuentra antes de la placa de orificio- para asegurar que vapor sobrecalentado esté pasando por el dispositivo de medición.



Figura 7.19 Válvula de estrangulamiento

Como ya se había mencionado, el sistema no tenía una válvula adecuada para controlar el flujo, por lo cual se instaló una válvula de globo, que son recomendadas para realizar esta función (figura 7.20).



Figura 7.20 Válvula de globo para control de flujo

7.10 Descripción visual de la columna

A continuación se mostrarán una serie de imágenes que mostrarán las diferentes partes descritas a lo largo de este capítulo.

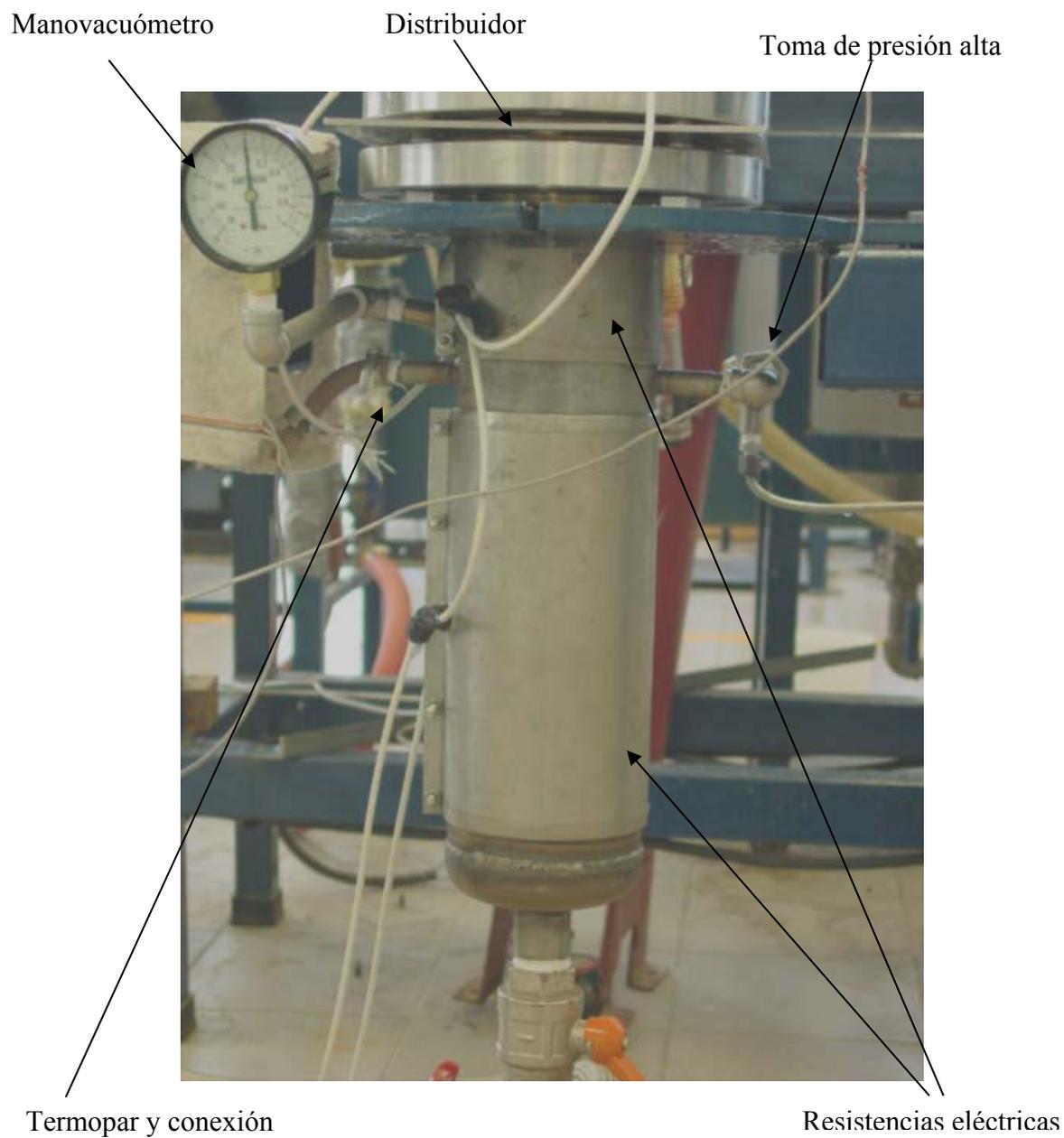
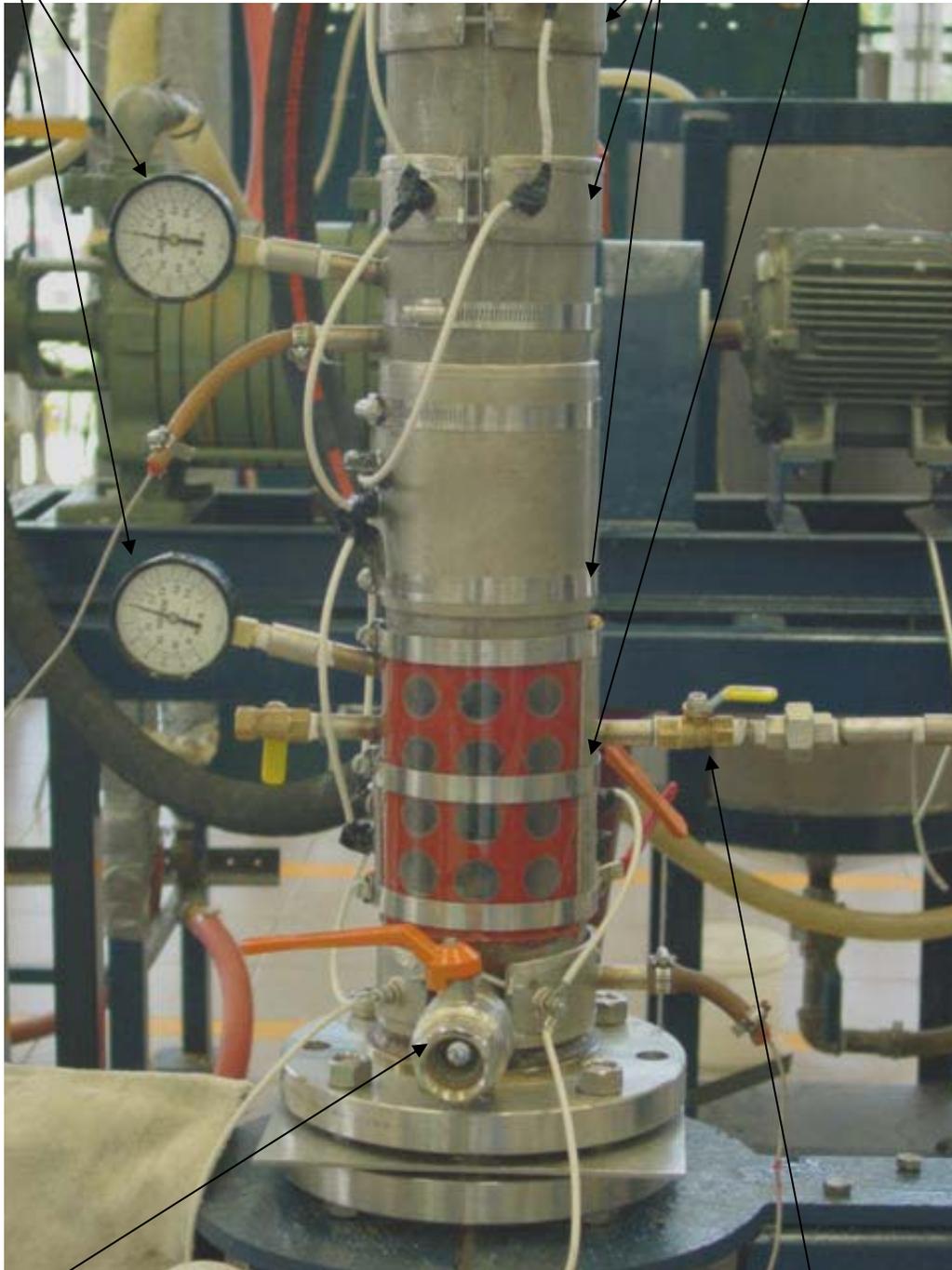


Figura 7.21 Sección inferior

Manovacuómetros

Resistencias

Mirilla y sello

Válvula para admisión de
partículas

Toma de presión alta

Figura 7.22 Sección Superior

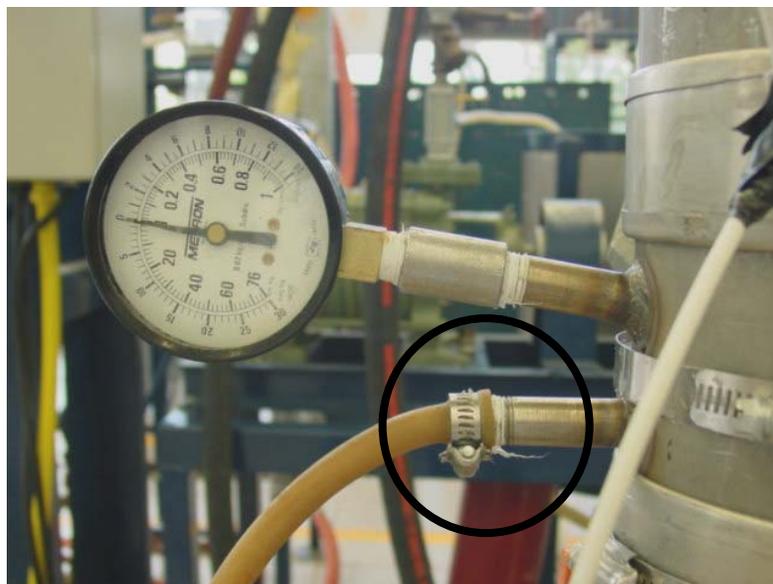


Figura 7.23 Conexión de termopares por medio de una manguera de hule flexible y abrazaderas.

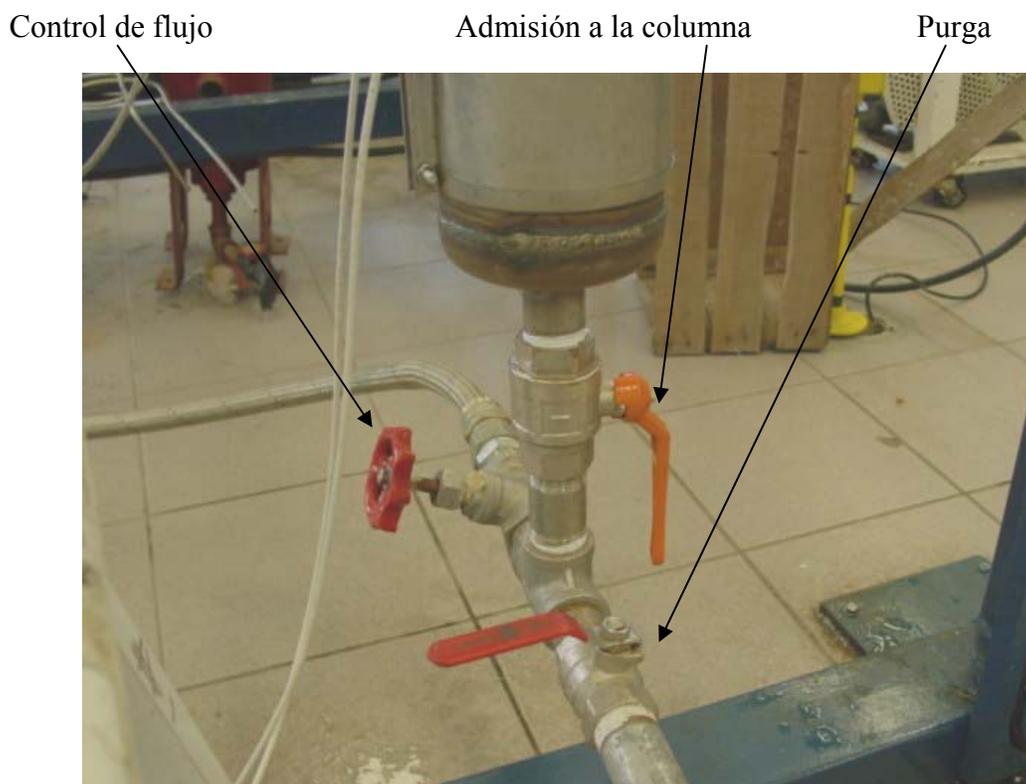


Figura 7.24 Válvulas de admisión de fluido a la columna y purga

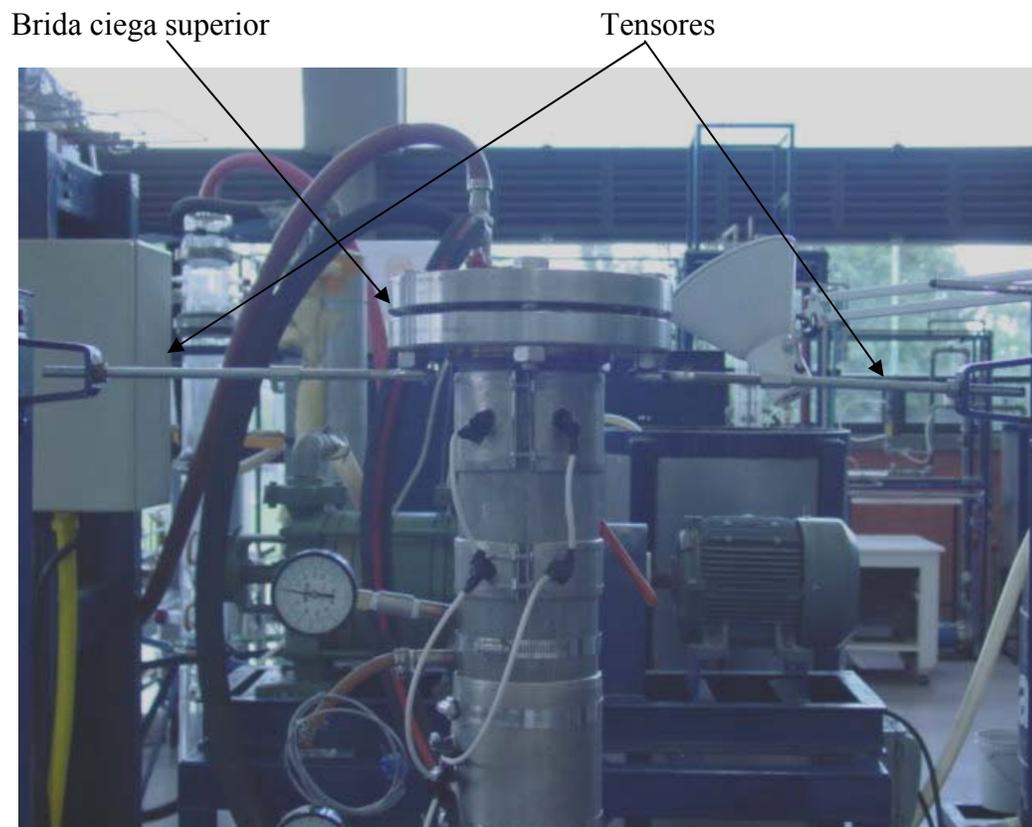


Figura 7.25 Brida ciega superior y tensores.

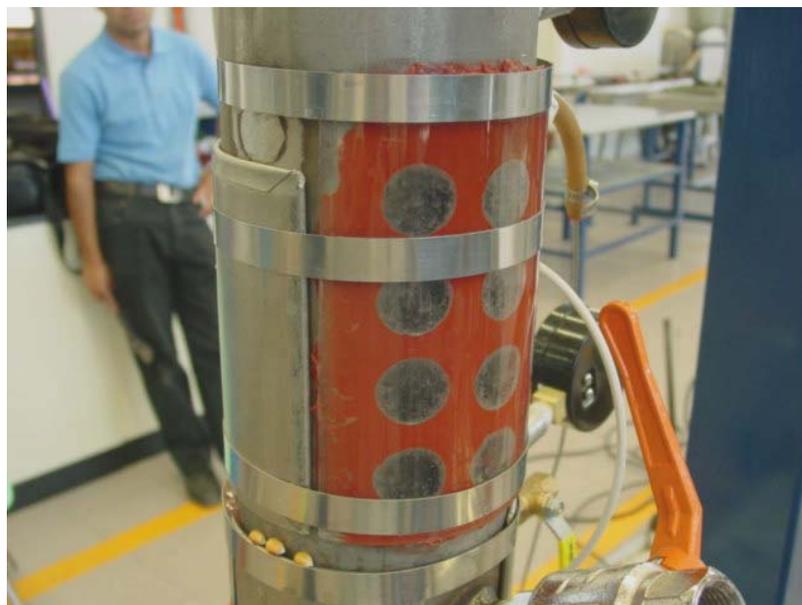


Figura 7.26 Mirilla posterior



Figura 7.27 Elementos de la parte posterior



Figura 7.28 Sistemas integrados: columna de fluidización de vidrio (a la izquierda) y columna de fluidización de acero inoxidable (a la derecha)

Después de una familiarización visual con los elementos, el lector está listo para consultar el manual de operación, que se encuentra en el apéndice C.