

# **INTRODUCCIÓN**

## **Antecedentes**

Los procesos de absorción/desorción física son unas de las operaciones de separación más importantes a nivel global dada su versatilidad y aplicabilidad. Universidades alrededor del mundo, dedican esfuerzos para que sus estudiantes profundicen sus conocimientos en el área a través de la práctica con estas torres en los laboratorios de operaciones unitarias.

Dadas las aplicaciones de estas torres a nivel industrial, como ser en refinería, tratamiento de aguas residuales y recuperación de reactivos, se tiene que los países que dedican mayores esfuerzos en generar mayor conocimiento en investigación y en la formación académica son las universidades de Estados Unidos, Rusia, China, Japón, India, Venezuela, Arabia Saudita, Corea del Sur, España y Singapur (Roca, 2017).

A nivel latinoamericano, lideran en el manejo y experimentación a nivel laboratorio de estos equipos las universidades más importantes de la región, como ser, las que se encuentran en países de mayor desarrollo como México, Argentina, Chile, Venezuela, Brasil y Colombia (Statista, 2023).

Sin embargo, también se tiene que universidades de otros países latinoamericanos que cuentan con un desarrollo similar al de Bolivia también cuenta con estos equipos en los laboratorios de sus universidades más grandes, como ser la Universidad del Valle de Guatemala (De la Cruz, 2018).

A nivel nacional, se vive una situación similar a los últimos países citados, puesto que de los laboratorios de operaciones unitarias entre las universidades del país que cuentan con este equipo, están por ejemplo la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (Morales, 2020).

A escala departamental, la situación es que ninguna universidad cuenta con una torre de absorción/desorción para impartir la práctica necesaria a los estudiantes, por lo que la construcción de este equipo colocará a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho como puntera en el estudio académico e investigación aplicada en las

operaciones físicas de separación en todo Tarija, además de ponerla en el mapa a nivel nacional para posibles investigaciones conjuntas interdepartamentales.

### **Justificación**

#### **Justificación Económica**

Una torre de absorción/desorción es un equipo fundamental en los laboratorios de operaciones unitarias. Este equipo es costoso si se compra desde el exterior, por lo que la construcción como estudiante y posterior aportación al LOU de la UAJMS, supone que el capital que podría haberse destinado a la adquisición del equipo, se puede usar en la reparación de equipos viejos o en adquirir otros equipos modernos.

#### **Justificación Académica**

Se podrá reforzar el aprendizaje de los estudiantes en las materias de “Balance de Materia”, “Fenómenos de Transporte 2” y de “Ingeniería de las Operaciones Físicas 2”, entre otras en la Carrera de Ingeniería Química, poniendo en práctica los conocimientos teóricos impartidos.

#### **Justificación Técnica**

El equipo podrá usarse para futuras investigaciones de la carrera de Ingeniería Química y otras carreras afines que puedan necesitarlo. También, este equipo, podrá usarse para futuros proyectos de grado bajo distintos enfoques dada la versatilidad de esta operación unitaria, tales como: desorción de contaminantes de aguas residuales, desorción de un contaminante en un aceite o crudo y el tratamiento de las emisiones de gases en un horno u otro equipo en el caso de usarse para absorción. Además, se incorporará un sistema de control donde se verificará el correcto funcionamiento de la torre y que las condiciones de operación sean las adecuadas.

#### **Justificación Ambiental**

En este caso, se trató una solución diluida de alcohol en agua, dicho contaminante es típico en las aguas residuales de gran parte de las industrias a nivel mundial, además

que la corriente gaseosa posee alcohol fácilmente condensable de alta pureza, lo cual puede derivar en la optimización de procesos de obtención de etanol.

### **Justificación Personal**

El equipo se diseñó con la finalidad de obtener mi graduación de la Carrera como Ingeniero Químico junto con la satisfacción personal de haber trabajado en un proyecto sobre una de mis temáticas favoritas aprendidas a lo largo de mis años de estudio como fue el diseño de equipos. Así mismo, las operaciones unitarias de absorción y desorción llamaron bastante mi atención al estudiarla a detalle en el intercambio en Uruguay mientras estudiaba en la Universidad de la República (UDELAR).

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Diseñar, construir y poner en marcha una torre de absorción/desorción rellena para el LOU.

#### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar las corrientes de alimentación (solución acuosa y aire) de la torre.
- Caracterizar la corriente líquida resultante.
- Diseñar y construir la torre de relleno en tamaño real.
- Experimentar el comportamiento del sistema gas-líquido en la torre de absorción/desorción a escala mediante la aplicación de un diseño factorial.
- Determinar el punto óptimo de operación e inferir el valor de variables necesarias para el diseño.
- Determinar rendimientos y costos.
- Analizar y discutir los resultados.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Absorción**

En este proceso, una corriente gaseosa enriquecida de soluto, entra en contacto con una corriente líquida que carece o que cuenta con una baja concentración del soluto que se desee separar. Las torres de absorción se pueden clasificar según aspectos tales como (Treybal, 1980):

-Cantidad de componentes que se transfieren de la fase gaseosa, donde puede trabajarse de forma selectiva (eligiendo un solvente que sea compatible con un solo componente) y en sistemas multicomponentes (eligiendo un solvente que sea compatible con dos o más componentes) (Treybal, 1980).

-Tipos de absorción, donde se tienen dos grupos, la absorción física y la absorción con reacción química. La primera es causada por el gradiente de concentraciones entre ambas fases respecto a la curva de equilibrio, la cual actúa como fuerza impulsora en la transferencia de masa. En la segunda, se tiene que el solvente líquido elegido reacciona con el componente que se extrae, lo cual incrementa la fuerza impulsora del proceso, además de mejorar el coeficiente de transferencia (Treybal, 1980).

### **1.2. Desorción**

La operación de desorción, también llamada eliminación, arrastre o “stripping” es la inversa a la absorción gaseosa. En esta operación, una corriente líquida enriquecida, entra en contacto con una corriente gaseosa que carece o que cuenta con baja concentración de la sustancia que se desee separar (Wankat, 2008).

Existen dos tipos de desorción: la desorción física y la desorción con reacción química, en la primera se consigue la transferencia del soluto de la fase líquida a la gaseosa gracias al gradiente de concentraciones respecto a las condiciones de equilibrio, lo cual actúa como su fuerza impulsora a medida que atraviesa la torre, mientras que en la desorción con reacción, se tiene que el soluto reacciona en la corriente gaseosa enriquecida, con lo cual se mantiene una concentración baja de salida, esta última acción favorece el incremento de la fuerza impulsora (McCabe et al, 2003).

La desorción física de alcohol en una corriente acuosa posee aplicaciones tales como el tratamiento de aguas residuales de destilerías, además de la recuperación de alcohol de alta pureza en la corriente gaseosa de salida al añadir un proceso de condensación.

### 1.3. Difusión molecular

Se trata del movimiento de las moléculas de una sustancia a través de otra u otras por medio de estimulaciones físicas como la temperatura o un gradiente de concentración de la sustancia que se difunde.

Dicho gradiente provoca el traslado de la sustancia en una o varias direcciones de forma tal que la concentración sea la misma en todo el sistema, esto se conoce como equilibrio químico, puesto que el potencial químico de todas las moléculas será la misma en el estado final (Treybal, 1980).

La velocidad en la que se realiza la transferencia de masa en una dirección puede cuantificarse de forma apropiada con la primera ley de Fick (McCabe, 2003):

$$J_A = -D_v \frac{dc_A}{db}$$

Donde:

$J_A$  = flux molar del componente A (kg mol/(m<sup>2</sup> \* h)).

$D_v$  = difusividad volumétrica (m<sup>2</sup>/h).

$c_A$  =concentración (kg mol/m<sup>3</sup>).

$b$  = distancia en dirección de la difusión (m).

En un proceso de desorción, el área de interés es la de contacto entre fases.

### 1.4. Teorías de transferencia de masa

Dado que en la mayoría de situaciones en las que la transferencia de masa tiene cabida en un proceso industrial, son necesarias altas velocidades de transferencia por unidad de área, por lo que se busca trabajar en el régimen turbulento (McCabe, 2003).

En dicho régimen se presenta gran complicación en la deducción de ecuaciones y en la determinación de parámetros necesarios para realizar los cálculos basándose en la ley de Fick y la Teoría cinética de gases (McCabe, 2003).

Es así, que ecuaciones del tipo que usan un coeficiente de transferencia de masa  $k$  (análogo a la ecuación de Newton para la transferencia de calor por convección) resultan de gran utilidad en el diseño de equipos en ingeniería. Dicha ecuación puede usarse tanto para fases líquidas como gaseosas en las formas (McCabe, 2003):

$$k_x = \frac{J_A}{x_{Ai} - x_A} \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h}))$$

$$k_y = \frac{J_A}{y_{Ai} - y_A} \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h}))$$

En estas ecuaciones se expresan las concentraciones en fracciones molares tanto en fase líquida y gaseosa, respectivamente.

A lo largo de la historia se fueron proponiendo diversas teorías que describen diferentes fenómenos de transferencia de masa como la Teoría de penetración, de la capa límite, de película, de renovación de la superficie, de estiramiento superficial y de la doble película (McCabe, 2003).

Esta última es la de interés para los procesos de absorción/desorción. Se basa en que en estos procesos de separación se debe difundir el soluto desde una de la fase líquida o gaseosa a la otra (McCabe, 2003).

Esta teoría propone la existencia de equilibrio en la interfase, una resistencia a la transferencia de masa en ambas fases en serie que pueden sumarse y expresarse en forma de una resistencia global de transferencia. Para los cálculos en torres de desorción se usa la inversa de dicha resistencia global (McCabe, 2003).

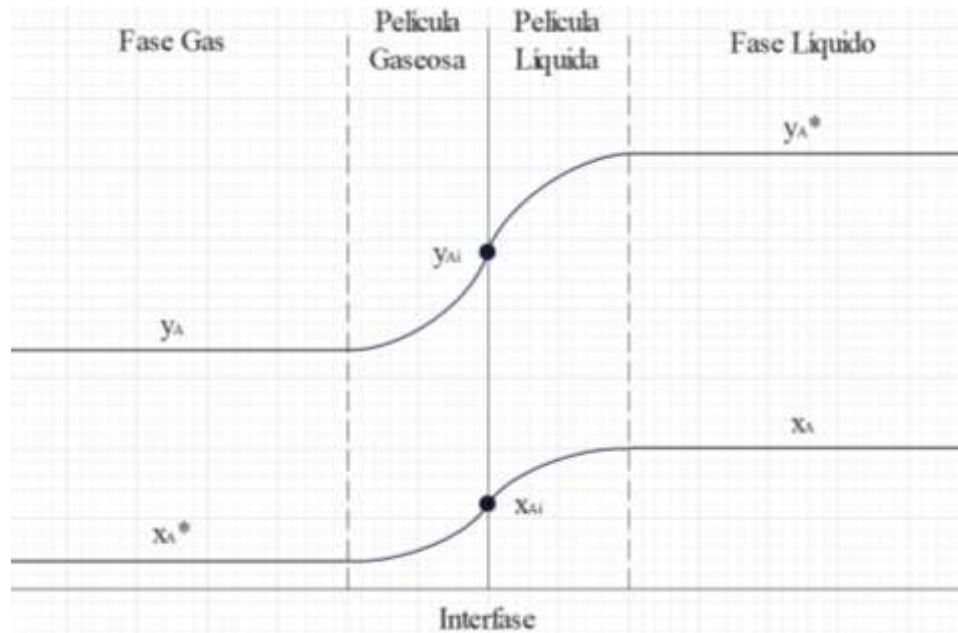
Esta teoría tiene la complicación de que, debido a la discontinuidad en la superficie de contacto, las concentraciones expresadas en fracciones molares varían bastante entre una fase y otra, pudiendo darse el caso en la desorción, de que a fracción molar de soluto en la fase gaseosa sea mucho mayor que en la fase líquida o viceversa. Para que



la desorción tenga lugar, la concentración de soluto debe disminuir en la fase líquida y aumentar en la fase gaseosa (McCabe, 2003).

Un ejemplo se muestra en la gráfica:

**Figura 1-1.** Gradiente de concentraciones cerca de la superficie de contacto



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

De acuerdo con la teoría y siguiendo la imagen anterior, se puede expresar la velocidad de transferencia de masa, suponiendo estado estacionario en ambas fases con las ecuaciones (McCabe, 2003):

$$r = k_x(x_A - x_{Ai}) \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$$

$$r = k_y(y_{Ai} - y_A) \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$$

Dada la dificultad para la medición de la concentración en fracciones molares en la interfase, se suele definir una ecuación de velocidad de transferencia con un coeficiente global, la velocidad de transferencia está también en función de la concentración de la fase gaseosa como si estuviera en equilibrio con la fase líquida a concentración  $x_A$  (McCabe, 2003):

$$r = K_y(y_A^* - y_A) \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$$

En base a las ecuaciones previas y reacomodando términos, se llega a la ecuación para el coeficiente global de resistencia a la transferencia de masa entre fases:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{m}{k_x} + \frac{1}{k_y} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{h}/\text{kg mol})$$

Siendo  $m$  la pendiente de la curva de equilibrio líquido-vapor.

Esta ecuación expresa y cuantifica la resistencia a la transferencia de masa en la fase líquida y gaseosa, siendo su suma el coeficiente global (McCabe, 2003).

### **1.5. Torres empacadas**

Una torre empacada no es más que un tanque cilíndrico, donde se coloca relleno en su interior. Dicho relleno cumple la función de incrementar el área de transferencia y el contacto íntimo entre las fases líquida y gaseosa. Dicho relleno está sostenido por una criba (Wankat, 2008).

La torre posee una entrada para la corriente líquida en la parte superior y un dispositivo para su dispersión como un atomizador o un plato distribuidor, la entrada para la corriente gaseosa se encuentra en la parte inferior para los sistemas que operan en contracorriente y un dispositivo para su dispersión al igual que en la corriente líquida (McCabe, 2003).

Dicho caso es el más habitual puesto que se aprovecha al máximo la fuerza impulsora entre ambas fases. Lo que le ocurre a la fase líquida a medida que cae por la torre, es que se distribuye en forma de gotas repartidas homogéneamente (caso ideal), estas gotas entran en contacto íntimo con la corriente ascendente de gas en la superficie mejorada dotada por el relleno, la corriente gaseosa pura o diluida desorbe el soluto contenido en la corriente líquida y lo lleva hacia la corriente de salida de gas (McCabe, 2003).

Un aspecto importante del material del que está hecha la torre, es que debe ser resistente a la corrosión e inerte a los compuestos con los que se trabaja (Wankat, 2008). También se deben considerar otros aspectos como poseer resistencia mecánica sin tener un gran

peso, un espesor suficiente que asegure la durabilidad del equipo y contar con un aislamiento térmico adecuado en caso de ser necesario.

### **1.6. Características del relleno de la torre**

Entre las propiedades deseadas en el relleno, se tiene que debe brindar la mejor área para la transferencia posible, por lo que se busca que tenga alta porosidad, debe ser inerte a los compuestos con los que se trabaja, debe poseer gran fracción de espacio vacío para minimizar las pérdidas de carga, bajo costo y no ser frágil para su manejo e instalación. Estos rellenos suelen ser metálicos, cerámicos y plásticos (Wankat, 2008).

El relleno puede acomodarse de forma aleatoria o de forma estructurada. Un efecto indeseado es la canalización de la corriente líquida a medida que atraviesa la torre debido a una mala distribución del relleno o que el relleno sea demasiado grande. De acuerdo a la experiencia, se recomienda que el diámetro del relleno tenga una proporción menor a 1 a 8 respecto al diámetro de la torre (Wankat, 2008).

### **1.7. Elección de la corriente gaseosa**

La corriente del gas desorbente debe cumplir con una serie de requisitos:

- Debe ser inerte e insoluble con el solvente de la mezcla líquida.
- Debe ser compatible y soluble con el soluto que se desea separar.
- Debe ser un gas barato y del que se tenga disponibilidad.

Para sistemas donde la fase líquida está compuesta por etanol y agua, la corriente de gas más usada y que se adecua de excelente manera es el aire puro (Treybal, 1980).

### **1.8. Características de compuestos presentes en la operación de desorción**

#### **1.8.1. Alcohol etílico 96 % ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ )**

Se trata de una solución acuosa con una concentración del 96 % de etanol en porcentaje volumen-volumen, esta mezcla se encuentra en su punto azeotrópico por lo que actúa como una sustancia pura.

Posee un peso molecular de 46.07 g/mol, una densidad de 0.79 g/mol a 20 °C, un punto de ebullición de 78 °C a presión de 1.013 hPa, su punto de inflamación es de 12 °C y es completamente miscible con el agua (Carl Roth International, 2022).

Es un líquido incoloro con temperatura de autoinflamación de 455 °C, por lo que tanto en su forma líquida como gaseosa son inflamables y puede provocar irritación ocular grave con su exposición (Carl Roth International, 2022).

**Figura 1-2.** Pictograma del etanol



**Fuente:** Carl Roth International (2020).

### 1.8.2. Amoniaco en solución estándar 4N

Se trata de una solución acuosa con una concentración de 4 Eq/L de amoníaco, este material es estable a condiciones ambientales normales y en condiciones previsibles de temperatura y presión durante su almacenamiento y presión (Carl Roth International, 2021).

Se presenta como un líquido incoloro cuyo punto de ebullición normal se encuentra a 100 °C, posee un pH de 10 (medido a unos 20 °C para una solución de densidad igual a 80 g/L) y es completamente miscible con el agua (Carl Roth International, 2021).

Es capaz de provocar quemaduras graves en la piel, lesiones oculares graves e irritación de las vías respiratorias, además de ser nocivo para organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos. (Carl Roth International, 2021).

**Figura 1- 3.** Pictograma de solución de amoníaco 4N



**Fuente:** Carl Roth International (2021).

### 1.8.3. Ácido sulfhídrico

Se trata de un gas incoloro de aroma fuerte a huevos podridos que es altamente inflamable y explosivo en el aire, pudiendo darse la ignición por una descarga de electricidad estática (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011).

Se suele presentar en mezclas de hidrocarburos “agrios”, lo cual genera lluvia ácida en caso de la combustión de hidrocarburos sin tratamiento de “endulzamiento”. En condiciones normales posee un punto de fusión de  $-85.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un punto de ebullición de  $-60.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011).

Su solubilidad en agua es de 3980 mg/L y es altamente tóxico, pudiendo dañar el sistema nervioso central, inflamación del sistema respiratorio y de la piel, enrojecimiento, dolor y quemaduras, además de provocar tos, vértigo, dificultad respiratoria, náuseas y pérdida de conocimiento y es dañino para sistemas acuáticos ecológicos (Messer Ibérica de Gases S.A., 2023).

**Figura 1-4.** Pictograma de ácido sulfhídrico



**Fuente:** Messer Ibérica de Gases S.A. (2023).

### 1.8.4. Acetona

También se le nombra como 2-propanona, se presenta como un líquido incoloro inflamable de olor levemente dulce o afrutado. En condiciones normales tiene un punto de fusión de  $-94.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un punto de ebullición de  $56.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Carl Roth International, 2023).

Posee un pH de entre 5 y 6 (medido a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en solución acuosa de densidad igual a 395 g/L) y es completamente miscible con el agua. Tanto en su forma líquida como

gaseosa suele ser muy inflamable, puede provocar irritación ocular grave y también somnolencia o vértigo (Carl Roth International, 2023).

**Figura 1-5.** Pictograma de acetona



**Fuente:** (Carl Roth International, 2023).

### 1.8.5. Aire comprimido

Se trata de una mezcla gaseosa compuesta en un 21 % de Oxígeno, 78 % de Nitrógeno, 0.9 % de Argón y el resto por otros gases. Posee un peso molecular de 29 g/mol. Es incoloro e inodoro. A una atmosfera de presión, tiene una temperatura de ebullición de  $-194.48\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una temperatura de fusión de  $-216.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Su solubilidad en fracciones volumen con el agua es de 0.0292 (Infra de Honduras, 2020).

No posee inflamabilidad, no es peligroso para la salud y es químicamente estable a menos que las temperaturas superen los  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  puesto que se presenta la formación de óxidos de nitrógeno (Infra de Honduras, 2020).

**Figura 1-6.** Pictograma del aire

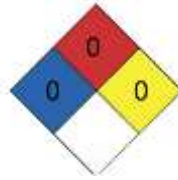


**Fuente:** Infra de Honduras (2020).

### 1.8.6. Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Con un peso molecular de 18 g/mol. A una atmosfera de presión, tiene un punto de fusión de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una temperatura de ebullición de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es el solvente por excelencia para sustancias polares. Es incoloro e inodoro. No posee inflamabilidad, no es peligroso para la salud. Reacciona fuertemente con metales alcalinos, carburo y metales alcalinotérreos (Carl Roth International, 2022).

**Figura 1-7.** Pictograma del agua destilada



**Fuente:** Mol Labs-Quimiométrico (2015).

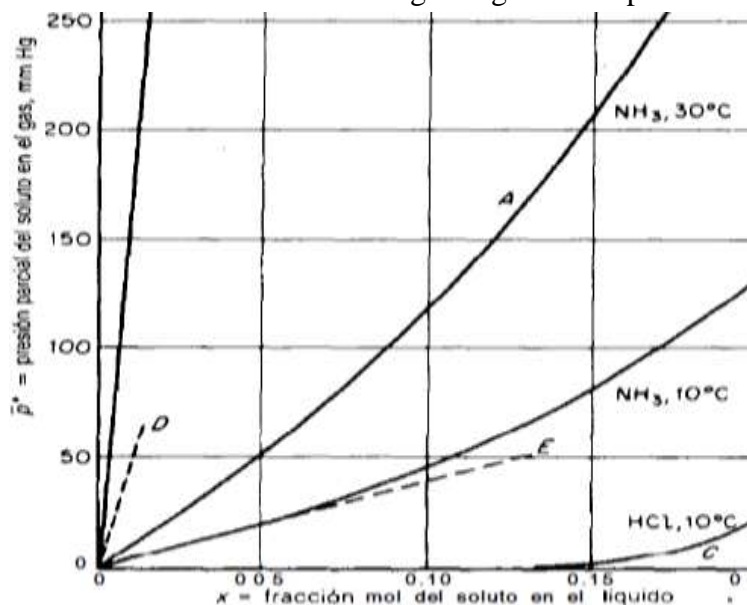
### 1.9. Condiciones óptimas de operación

Para obtener una mejor transferencia de materia de la fase líquida a la gaseosa se deben considerar aspectos tales como:

-Se debe trabajar a bajas presiones y altas temperaturas, esto para disminuir la solubilidad del soluto en el agua y se transfiera al gas con más facilidad, economizando la cantidad de aire necesario y minimizando las dimensiones del equipo que se necesitarían (Treybal, 1980).

Esto se cumple en la mayoría de casos, por ejemplo, se muestra el caso del amoníaco en solución acuosa, donde se puede apreciar que solubilidad del soluto en el agua disminuye acorde a lo esperado (Treybal, 1980):

**Figura 1-8.** Solubilidad de amoníaco en agua según la temperatura



**Fuente:** Treybal (1980).

### **1.10. Caída de presión y velocidad de inundación**

Para la cuantificación de la pérdida de carga en la torre, los cálculos se basan en la corriente gaseosa. Para empezar, el fluido tendrá una pérdida de carga debido a la fricción con las paredes de la columna y con el relleno, de aquí la importancia de que la fracción hueca sea elevada (Treybal, 1980).

Luego, al descender la corriente líquida, se tendrá que al ocupar un volumen importante de la torre, interfiere con el flujo de la corriente gaseosa. Por su parte, la corriente líquida también sufre pérdidas de carga por fricción con el material de la torre y porque el fluido gaseoso interfiere en su trayectoria (Treybal, 1980).

Fijando ya sea la velocidad másica gaseosa como la líquida e incrementando la otra, se tendrá mayor pérdida de carga, esto coincide con la disminución de espacio disponible para el flujo. Un aumento excesivo de la velocidad másica de al menos uno de los flujos da lugar a la inundación de la torre, esto ocurre cuando el flujo de la corriente líquida interfiere excesivamente con la gaseosa (McCabe, 2003).

En caso de que la culpable sea una excesiva corriente gaseosa, la inundación se provoca debido a que dicha corriente llega a impedir el descenso de la corriente líquida, llegando a “estancar” la torre (McCabe, 2003).

En el caso de que la culpable sea una excesiva corriente líquida, la inundación se provoca debido a que dicha corriente impide el flujo normal de la corriente gaseosa, llegando a “ahogar” la torre (McCabe, 2003).

Este fenómeno pone un límite natural a la velocidad de corriente gaseosa que puede entrar en la torre, ya que mientras esta sea mayor, se obtendrá una mayor transferencia del soluto desde la fase líquida, por lo que sería de gran utilidad que la corriente gaseosa sea mucho más grande que la líquida si no existiese dicha restricción (Treybal, 1980).

### **1.11. Curva de equilibrio**

Esta curva indica la máxima transferencia de masa que se podría alcanzar en una torre de desorción infinita, esto debido a que, alcanzado el equilibrio, se tiene una fuerza impulsora nula (Treybal, 1980).



En el caso de soluciones ideales, se puede determinar esta curva mediante la ley de Raoult (Treybal, 1980):

$$P_A = P_{\text{disolvente}}^{\circ} x_A$$

Donde:

$P_A$  = Presión de vapor del disolvente en la solución (Pa).

$P_{\text{disolvente}}^{\circ}$  = Presión de vapor del disolvente puro (Pa).

$x_A$  = Fracción molar del componente A en la fase líquida.

También, para concentraciones bajas de soluto, es posible aplicar la ley de Henry. Esta ley se basa en un reacomodo de la ley de Raoult y tiene la forma (Treybal, 1980):

$$y_A = m x_A$$

Donde:

$y_A$  = Fracción molar del componente A en la fase gaseosa.

$x_A$  = Fracción molar del componente A en la fase líquida.

$m$  = Constante de la ley de Henry.

En el caso de un sistema etanol-agua, la ley de Henry posee un rango limitado de aplicación, siendo útil para sistemas diluidos.

Cuando se trabaja con sistemas concentrados, se puede considerar que el valor de  $m$  es una función de la concentración al tener la presión y la temperatura fijas. Esta curva puede obtenerse mediante simulación con modelos de soluciones no ideales o ya sea experimentalmente (Treybal, 1980).

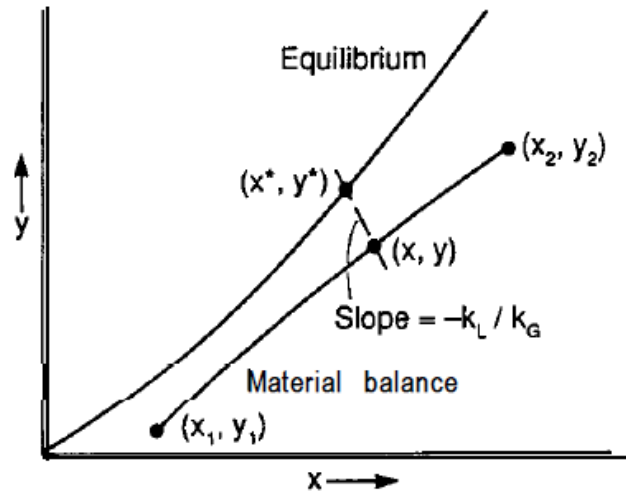
### **1.12. Curva de operación**

Se basa en el balance de materia del sistema y puede usarse ya sea para una torre de platos o empacada.

Esta varía si el sistema opera a contracorriente o en co-corriente, sin embargo, los primeros los de mayor interés ya que se aprovecha mejor la fuerza impulsora a lo largo

de la torre, dicha fuerza impulsora se trata de la diferencia de concentraciones en el sistema respecto a las de la curva de equilibrio (Treybal, 1980).

**Figura 1-9.** Curva de operación y de equilibrio en una torre de desorción



Fuente: Walas et al., (2012).

### 1.12.1. Balance de materia en una torre con flujo a contracorriente

Para un sistema compuesto por aire, agua y soluto concentrado en estado estacionario, llega a ser de gran interés el expresar los flujos molares de las corrientes gaseosa y líquida en términos de moles aire y agua respectivamente, puesto que son cantidades que no variarán a lo largo de la torre. Consecuentemente se obtienen relaciones molares para las corrientes de disolventes en las fases líquida y gaseosa  $L_S/G_S$  (Treybal, 1980).

Esto se traduce en que la curva de operación será una línea recta, sin embargo, para la concordancia de unidades se deben definir nuevas unidades de concentración, las cuales están dadas por (Treybal, 1980):

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A}$$

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A}$$

También se definen las corrientes de entrada de los solventes gaseoso y líquido de la forma (McCabe, 2003):

$$L_s = L(1 - x_A) \left( \frac{\text{mol}}{\text{tiempo} * \text{área}} \right)$$

$$G_s = G(1 - y_A) \left( \frac{\text{mol}}{\text{tiempo} * \text{área}} \right)$$

Se asigna el número 1 para las corrientes en el fondo de la torre y 2 para las corrientes en la parte superior de la torre.

El balance de materia toma como base al soluto A:

Entra = Sale

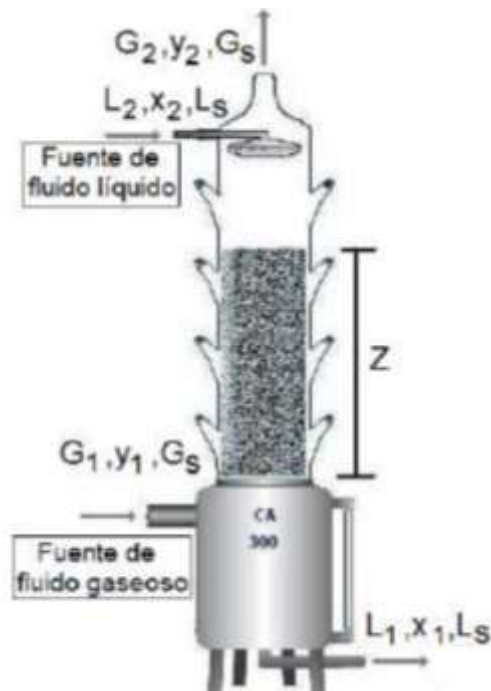
$$L_s * X_2 + G_s * Y_1 = L_s * X_1 + G_s * Y_2$$

$$G_s(Y_2 - Y_1) = L_s(X_2 - X_1)$$

Despejando las variables Y:

$$Y_2 - Y_1 = \frac{L_s}{G_s} * (X_2 - X_1)$$

**Figura 1-10.** Diagrama de una torre de absorción/desorción



**Fuente:** Barrios et al. (2011, agosto).

Para que las curvas de equilibrio y de operación tengan concordancia, se deben expresar las concentraciones de A en las mismas unidades, por lo que puede cambiarse las unidades de la curva de equilibrio o las de la curva de operación.

### **1.13. Relación $L_s/G_s$**

Esta relación es la pendiente de la curva de operación. Se tiene que se alcanza la máxima transferencia de soluto desde la fase líquida hacia la gaseosa cuando la curva de operación interseca con la curva de equilibrio (Treybal, 1980).

Esto se traduce en una pendiente máxima que involucra en el caso de una corriente líquida fija, un flujo molar mínimo de gas para que tenga lugar esta transferencia máxima (Treybal, 1980).

Desde un punto de vista económico, alcanzar dicho punto sería lo mejor pues se invertiría en bombas económicas de menor potencia (Treybal, 1980).

Sin embargo, se debe recordar que para alcanzar dicho punto, la fuerza impulsora disminuye hasta ser nula, lo cual se traduce en que la altura de la torre debería ser infinita, lo cual es imposible y además, la construcción de una torre de gran altura para la desorción extra de un poco más de soluto no llega a ser rentable (Treybal, 1980).

## **1.14. Dimensionamiento de la torre**

### **1.14.1. Área transversal**

Siendo que el sistema es una estructura cilíndrica, se basa en el diámetro de la misma. Esta se determina principalmente tomando como base evitar la inundación, sin embargo, bajas velocidades disminuyen el área de contacto entre fases.

Es por ello, que se debe escoger una velocidad tal que asegure una operación segura pero que no suponga la necesidad de un equipo de gran tamaño (McCabe, 2003):

$$A_t = \frac{Q_G}{V_{\text{inundación}}} \quad (\text{m}^2)$$

Como normalmente se tiene fijado el flujo de la fase líquida, esta ecuación se basa en el caudal y velocidad de la corriente gaseosa.

### 1.14.2. Coeficiente de resistencia para desorción

Dado que en la desorción la finalidad es que la concentración de soluto disminuya en la fase líquida, además, considerando que experimentalmente, para el sistema etanol-agua, la medición de la concentración se realiza de forma simple mediante alcoholimetría, se define un coeficiente de transferencia de masa global en base a una concentración y la velocidad de transferencia se pone en función de una concentración en la fase líquida como si estuviera en equilibrio con la fase gaseosa a concentración y (McCabe, 2003):

$$r = K_x a (x_A^* - x_A) \quad (\text{kg mol}/(\text{m}^3 * \text{h}))$$

En base a las ecuaciones de transferencia en las fases líquida y gaseosa, además, reacomodando términos, se llega a la ecuación para el coeficiente global de resistencia a la transferencia de masa entre fases (McCabe, 2003):

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{1}{m k_y a} \quad (\text{m}^3 * \text{h}/\text{kg mol})$$

Siendo:

$$a = \frac{A_{\text{contacto}}}{V} \quad (\text{m}^2/\text{m}^3)$$

### 1.14.3. Cálculo de la altura de la torre

Para realizar este cálculo, se hace un balance diferencial de materia. Se usa un volumen diferencial  $A_t dZ$  siendo  $Z$  la altura de la torre y una variación diferencial del soluto transferido  $A$  (McCabe, 2003):

$$dN_A = d(Lx_A)$$

$$dN_A = x_A dL + L dx_A$$

Para un sistema donde únicamente se transfiere la sustancia  $A$  (McCabe, 2003):

$$dN_A = dL$$

Entonces:

$$dN_A = \frac{Ldx_A}{1 - x_A}$$

En el caso de trabajar en un sistema concentrado, se debe corregir la ecuación del coeficiente global de resistencia a la transferencia, aumentado un factor de diferencia de concentración logarítmica (McCabe, 2003):

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{(1 - y_A)_L}{m k_y a}$$

Siendo la variación diferencial de moles A transferidos a la fase líquida proporcional a la velocidad de transferencia y al volumen diferencial de la torre, se obtiene la ecuación (McCabe, 2003):

$$\frac{Ldx}{1 - x_A} = K_x a (x_A^* - x_A) A_t dZ$$

Reacomodando:

$$dZ = \frac{Ldx}{K_x a (x_A^* - x_A) (1 - x_A) A_t}$$

Esta ecuación también puede expresarse de forma simplificada como:

$$dZ = Kdx$$

Esta ecuación determina la altura total de la torre por medio de integración gráfica, para lo cual se deben establecer intervalos pequeños de  $x$  en donde se calculan cada uno de los términos (McCabe, 2003).

### **1.15. Simulación de equilibrio Líquido-Vapor mediante simulación en el programa Aspen Hysys V10**

Se trata de uno de los programas más usados por ingenieros químicos en cuanto a simulación de procesos, esto debido a su inmensa base de datos y capacidad de predicción en sus cálculos. En su base de datos cuenta con una gran variedad de

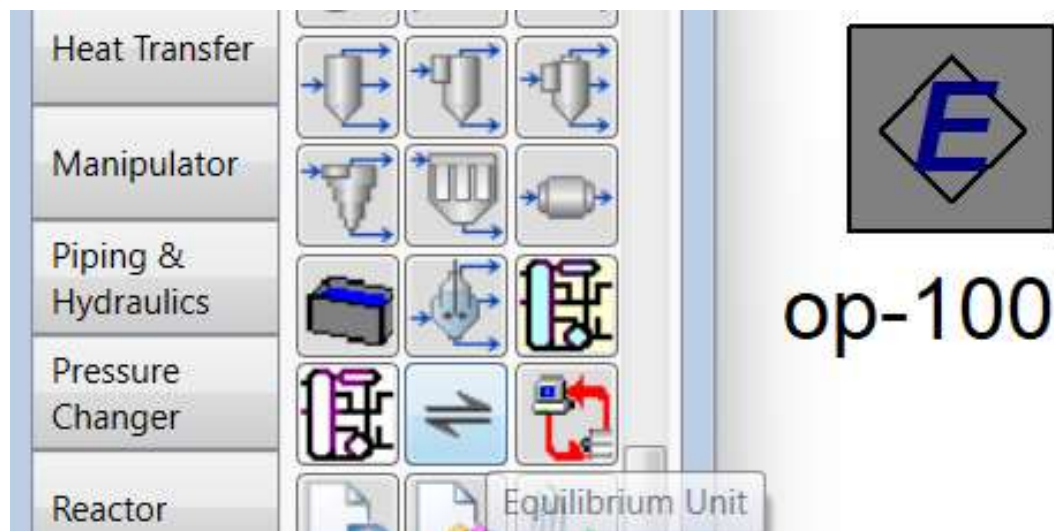
modelos termodinámicos, algunos de los cuales son especializados en sistemas de vapor, en hidrocarburos, sistemas como el de etanol-agua y otros son generales.

El programa es capaz de considerar las interacciones intermoleculares e intramoleculares, esto es útil para sistemas polares como el de etanol-agua, también predice con poco error la desviación del comportamiento ideal y aplicando coeficientes de fugacidad (Iglesias, 2013).

De acuerdo a recomendaciones bibliográficas, para un sistema diluido de etanol-agua se recomiendan los modelos UNIQUAC y Wilson (Iglesias, 2013).

Para acceder a los cálculos de la curva de equilibrio x-y, se deben cargar etanol y agua en la lista de componentes, se escoge un paquete de fluidos y en la pestaña de simulación se usa un “Equilibrium Unit” disponible en la barra de herramientas:

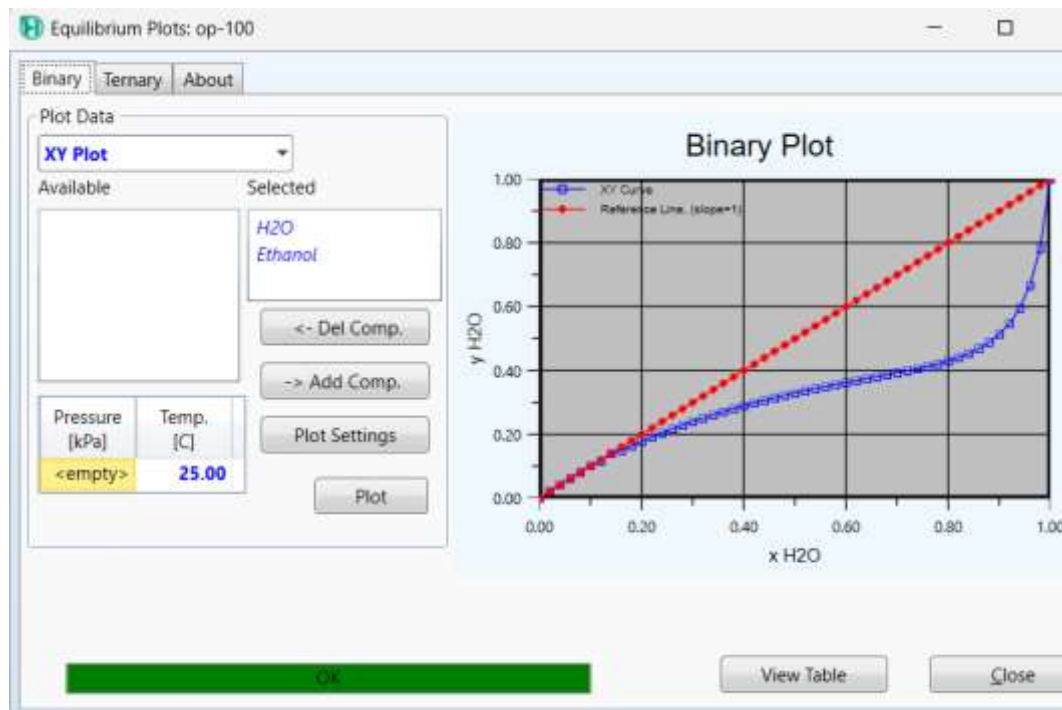
**Figura 1-11.** “Equilibrium Unit” disponible en Aspen Hysys V10



**Fuente:** Elaboración propia (2023).

Se especifican las sustancias de las que se desea conocer las composiciones de equilibrio Líquido-Vapor y las condiciones de presión o temperatura del sistema:

**Figura 1-12.** Ejemplo de gráficas obtenidas por simulación en Aspen Hysys V10



**Fuente:** Elaboración propia (2023).

### 1.16. Medición de variables mediante Arduino

En los últimos años viene creciendo la tendencia del uso de placas y sensores Arduino para la elaboración de proyectos de estudiantes escolares y universitarios, dada su versatilidad y accesibilidad.

De acuerdo a los fundadores de la plataforma, se tienen las siguientes definiciones:

“Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada” (Banzi et al.).

“Arduino detecta el entorno al recibir entradas de muchos sensores y afecta su entorno controlando luces, motores y otros actuadores” (Banzi et al.) el cual es procesado por la placa Arduino y se transforma en información útil mediante programación en el software de Arduino, el cual es de libre acceso y cuenta con una librería virtual.

Los sensores Arduino usados en el proyecto de grado son:

-(00602) Sensor de fluidos 1,2 MPa ID=3/4 inch FS300A para medición de caudal de líquidos.



-(00084) DHT11 Módulo Sensor de Temperatura y Humedad para medición de temperatura de la corriente gaseosa.

**Fotografía 1-1.** Sensores Arduino FS300A (izquierda) y DHT11 (derecha)



**Fuente: Elaboración Propia (2023).**

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## **2.1. Selección de soluto sometido a desorción**

Entre los posibles solutos que pueden someterse a procesos de desorción están el etanol, amoniaco, acetona y ácido sulfhídrico. Para la selección del soluto apropiado en el proyecto se evaluaron los siguientes parámetros:

### **2.1.1. Accesibilidad**

En el proyecto se entendió como la combinación de los siguientes factores:

- Disponibilidad del insumo en el departamento de Tarija o en regiones cercanas, de forma que el tiempo necesario para su transporte no suponga un obstáculo.
- Facilidad legal de obtener el insumo, esto debido a que materiales como el amoniaco es tratado como una sustancia controlada en el país, por lo que debe tramitarse un permiso para acceder a sustancias de esta naturaleza.
- Costo, es el precio en el que el insumo se vende en el departamento de Tarija, incluyendo costos de transporte.

Con estas características, se tiene que tanto la acetona, amoniaco y ácido sulfhídrico son sustancias controladas, requieren de trámites para su adquisición, los cuales pueden llegar a durar hasta 3 meses. Por otro lado, se tiene que no existe ningún tipo de restricción en la compra de etanol 96 % en tiendas autorizadas.

La producción de amoniaco en el país se realiza en el complejo petroquímico de Bulo-Bulo en Cochabamba, por lo que las alternativas para adquirir el producto están en comprar el insumo en el departamento de Cochabamba, mediante algún asesor legal o intermediario que facilite su compra o su adquisición en territorio argentino donde se requeriría de un posterior trámite para su ingreso a Bolivia.

Con ello, se tuvo que el insumo más favorable es el etanol, seguido de la acetona, el amoniaco y el ácido sulfhídrico respectivamente.

### **2.1.2. Medición**

Se evaluó la disponibilidad de equipos necesarios para el procedimiento de medición de la concentración del soluto en mezcla acuosa, y también, de laboratorios certificados

que realicen los ensayos pertinentes en el departamento de Tarija y regiones cercanas, y también los precios que tienen los ensayos o la obtención de equipos y materiales de medición.

Bajo esta definición, se tiene que el Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo (CEANID) en el departamento de Tarija, realiza ensayos que miden la cantidad de amoníaco y etanol en mezclas acuosas, mientras que para la determinación de ácido sulfhídrico, se pueden realizar ensayos de titulación; por otro lado, ensayos para insumos como la acetona se realizan en el departamento de Santa Cruz o La Paz.

La medición de amoníaco se realiza mediante la generación de una curva de calibración y posterior medición con pHmetro (lo cual requiere extensos ensayos) o mediante titulación con fenolftaleína y un ácido de concentración estandarizada (esto implicaría uso de más sustancias controladas como el ácido clorhídrico o sulfúrico y el indicador usado en el ensayo).

Mientras tanto, para la medición de etanol, se dispone de un alcoholímetro de Gay-Lussac de medición directa, con la condicionante de que la medición debe realizarse a 20 °C.

Posteriormente, se tuvo que el insumo más favorable es el etanol, seguido del amoníaco y el ácido sulfhídrico, y finalmente, la acetona.

### **2.1.3. Relevancia industrial**

En este parámetro se tomó en cuenta la aplicabilidad del proceso de desorción del soluto en la industria y su relevancia real, esto para que el ensayo realizado no carezca de falta de importancia, con ello, se tiene que el endulzamiento de hidrocarburos es uno de los procesos más relevantes en la industria mundial, al igual que la desorción de amoníaco en procesos de síntesis y purificación de este importante recurso, cuyo caso es similar al de la acetona, pero con menos impacto en la industria mundial. Finalmente, la desorción de etanol se utiliza en procesos de síntesis de bioetanol, siendo el caso que dicha industria es relativamente nueva y viene en auge.

Por lo tanto, el caso de desorción más importante es el del ácido sulfhídrico, seguido del amoníaco, acetona y etanol.

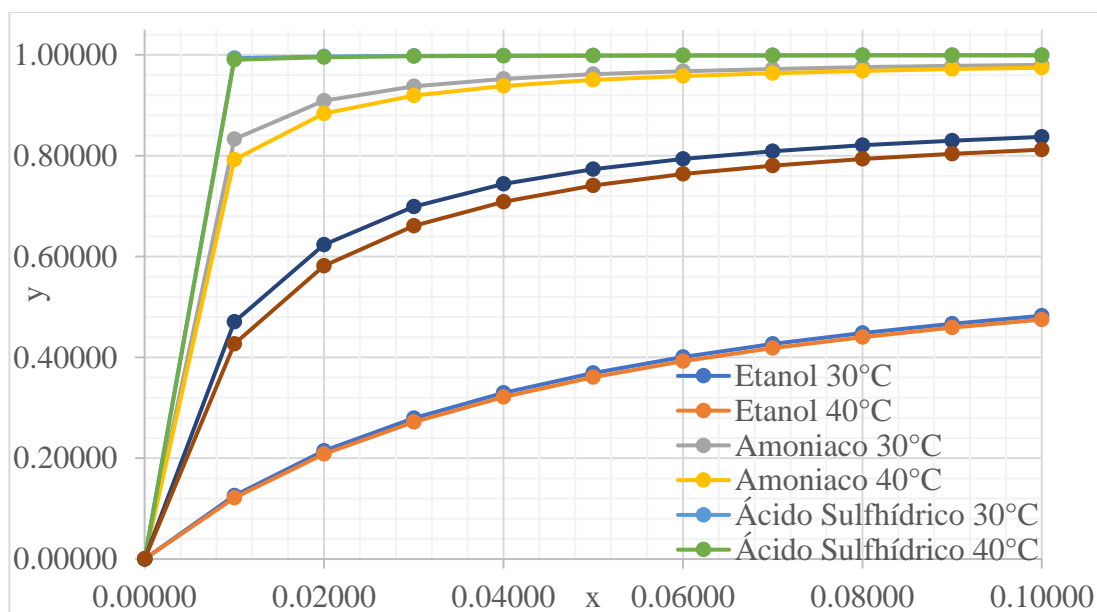
#### 2.1.4. Solubilidad de soluto en los solventes líquido y gaseoso y volatilidad

Se evaluó la solubilidad de los diferentes solutos en los solventes seleccionados para la operación de la torre: agua y aire.

Para ello, se basó en la información recopilada en la sección 1.8 del capítulo anterior (Características de compuestos presentes en la operación de desorción) y en construcción de curvas de equilibrio con ayuda del programa aspen Hysys V10 el cual se trabajó con el modelo termodinámico UNIQUAC, especificando un modelo de vapor Virial.

Se tuvo que todos los solutos propuestos son completamente solubles en agua a excepción del ácido sulfhídrico; por otro lado, para la evaluación de solubilidad en aire a partir de las curvas de equilibrio, se recopiló los resultados de las simulaciones en una hoja Excel para todos los solutos propuestos en agua para temperaturas de 30 °C y 40 °C.

**Figura 2-1.** Curvas de equilibrio de solutos propuestos



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar que el ácido sulfhídrico es el soluto más volátil y alcanza una fracción molar gaseosa de 0.995 para una solución con fracción molar líquida de 0.02; le sigue el amoníaco que también es sumamente volátil y soluble en aire, luego se tiene a la acetona la cual muestra una solubilidad en aire y volatilidad intermedia respecto a los solutos previos y el etanol, finalmente, se tuvo que el etanol es la sustancia menos volátil y soluble en aire, lo cual supone una menor capacidad a la desorción. También se puede verificar que no existen cambios muy grandes en las curvas de equilibrio ante cambios de temperatura.

#### **2.1.5. Compatibilidad química y corrosividad de los solutos con tuberías comerciales y costos**

Para este último parámetro, se evaluó la corrosión y compatibilidad química de los solutos propuestos con los materiales más comunes en el mercado de tuberías y accesorios en Tarija como lo son el acero galvanizado y el PVC.

Las soluciones acuosas con ácido sulfhídrico y amoníaco son sumamente corrosivas, por lo cual ninguna de las tuberías comerciales en la ciudad de Tarija serían capaces de soportar su circulación, esto haría necesaria la compra de tuberías de aleaciones especiales además de revestimientos que prolonguen el tiempo de vida útil y el uso de protecciones catódicas como un ánodo de sacrificio.

Por otro lado, las soluciones acuosas de acetona no son tan corrosivas para el acero galvanizado pero son químicamente incompatibles con las tuberías de PVC. Por tanto, se tiene que las soluciones acuosas de alcohol no son corrosivas ante las tuberías de acero galvanizado ni de PVC y son químicamente compatibles.

En este último aspecto, también se considera el precio de las tuberías y accesorios necesarios, siendo el caso de que las tuberías y accesorios de PVC son los más económicos, seguidos del acero galvanizado y finalmente, las de aleaciones especiales.

### **2.2. Matriz comparativa**

Se trabaja con un rango de calificaciones del 1 al 10, siendo la tabla resultante la siguiente:

**Tabla 2-1.** Matriz comparativa de solutos de desorción

Parámetros	Peso Asignado	Etanol	Amoniaco	Ácido sulfhídrico	Acetona
Accesibilidad	0.2	10	6	5	8
Medición	0.1	10	9	9	7
Relevancia industrial	0.1	6	10	10	9
Solubilidad en solventes y volatilidad	0.3	7	10	10	9
Compatibilidad química y corrosividad de los solutos con tuberías comerciales	0.2	10	3	3	7
Costos de material de tuberías y accesorios	0.1	10	7	7	7
$\Sigma$	1	8.7	7.4	7.2	8

**Fuente:** Elaboración propia (2023).

Se tiene que el etanol es el insumo más favorable para el proyecto.

### 2.3. Caracterización de la materia prima

#### 2.3.1. Caracterización de la solución alcohólica de alimentación

Se partió de bidones plásticos de etanol al 96 % V/V de marca AlcoSur y se vertieron cinco litros en el tanque de alimentación del equipo, luego, se diluyó con agua hasta alcanzar una concentración aproximada del 16 % V/V, lo cual se controló mediante un alcoholímetro de Gay-Lussac en una probeta. La mezcla resultante fue incolora, presentando espuma leve mientras se mezcla y con un fuerte aroma a alcohol.

Para la conversión de %V/V a fracción molar, se partió de la definición de expresar la concentración en unidades %V/V:

$$\%V/V = \frac{V_{\text{Etanol}}}{V_{\text{total}}} = \frac{m_{\text{Etanol}}/\rho_{\text{Etanol}}}{m_{\text{total}}/\rho_{\text{total}}}$$

Despejando  $m_{\text{Etanol}}$ :

$$m_{\text{Etanol}} = \frac{\rho_{\text{Etanol}}}{\rho_{\text{total}}} * \frac{m_{\text{total}}}{100} * \%V/V$$

Tomando una base de cálculo de  $m_{\text{total}} = 100\text{g}$  se simplifica a:

$$m_{\text{Etanol}} = \frac{\rho_{\text{Etanol}}}{\rho_{\text{total}}} * \%V/V \text{ (Ec. 1)}$$

A partir de un balance de materia en el fluido de alimentación, se tiene la ecuación:

$$m_{\text{Agua}} = 100\text{g} - m_{\text{Etanol}} \text{ (Ec. 2)}$$

Finalmente, la expresión para concentración en fracciones molares en el sistema etanol-agua es:

$$x_{\text{Etanol}} = \frac{m_{\text{Etanol}}/M_{\text{Etanol}}}{m_{\text{Etanol}}/M_{\text{Etanol}} + m_{\text{Agua}}/M_{\text{Agua}}}$$

$$x_{\text{Etanol}} = \frac{m_{\text{Etanol}}/46}{m_{\text{Etanol}}/46 + m_{\text{Agua}}/18} \text{ (Ec. 3)}$$

Estas mismas ecuaciones fueron aplicables para la caracterización del producto obtenido, se tuvo que la densidad de etanol se encuentra estandarizada en tablas de propiedades físicas en función de la temperatura y la presión, mientras que la densidad total de la mezcla pudo determinarse mediante densimetría simple. Por otro lado, mediante el sensor FS300A se midió el caudal de la corriente líquida que ingresó a la torre por la parte superior de ésta.

Se dispuso de los materiales y equipos necesarios para la medición de las variables, los insumos utilizados fueron:

-Alcoholímetro de Gay-Lussac 0-100 %.



- Termómetro digital.
- Probeta de vidrio de 250 mL.
- Probeta de vidrio de 10 mL.
- Balanza analítica digital.
- Caudalímetro FS300A.

Para determinar el flujo molar de líquido que ingresa en la torre a partir del caudal se usó la siguiente ecuación:

$$L = \frac{Q_L \rho_{total}}{x_{Etanol} * M_{Etanol} + x_{Agua} * M_{Agua}} \quad (\text{mol/min}) \quad (\text{Ec. 4})$$

### 2.3.2. Caracterización de la corriente de aire

Para la caracterización de la corriente de aire impulsada por un soplador, se dispuso de instrumentos de medición de las propiedades más importantes para determinar el flujo molar:

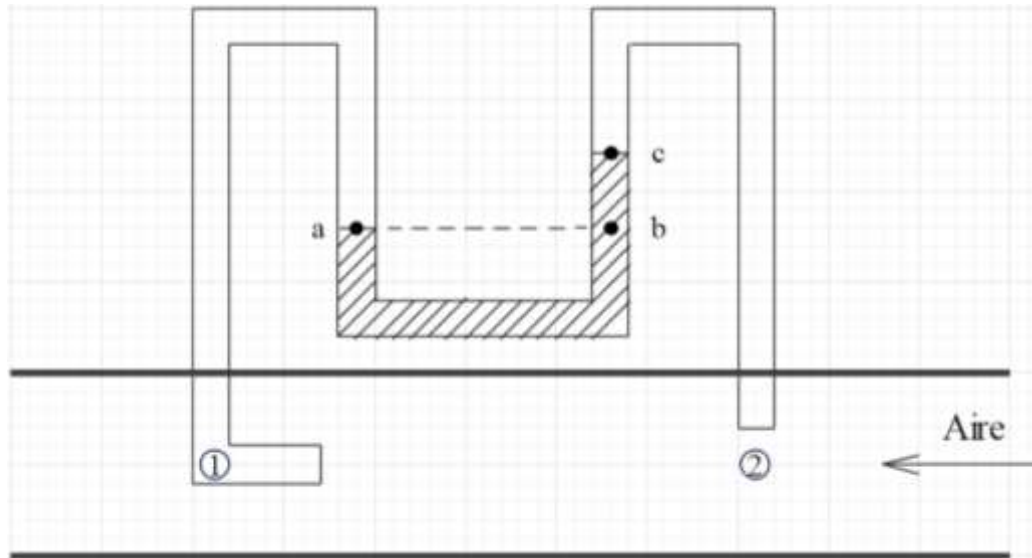
- Termómetro DHT11.
- Tubo Pitot.
- Manómetro.

Pudiéndose regular el flujo de aire mediante una válvula de bola en el sistema de alimentación, y al ingresar aire puro del ambiente, se asumió que la concentración de etanol en la corriente de alimentación es nula, además, dadas las condiciones de operación (presión y temperatura próximas a las ambientales), se pudo emplear la ecuación de estado de los gases ideales sin que se presente un error significativo.

Para determinar el flujo molar, se realizó un balance de energía mecánica en la sección correspondiente al tubo Pitot:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_{Aire} v_1^2 + \rho_{Aire} g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_{Aire} v_2^2 + \rho_{Aire} g h_2$$

**Figura 2-2.** Esquema de tubo Pitot



**Fuente: Elaboración propia (2023).**

Los puntos 1 y 2 se encuentran en la misma altura, por lo que se simplifican los términos correspondientes al cambio de la energía potencial, además, se presenta estancamiento en el punto 1, por lo que se supone que la velocidad es nula en dicho punto. Con ello, se simplifica el balance a:

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_{\text{Aire}} v_2^2$$

Reacomodando:

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{Aire}} v_2^2 = P_1 - P_2 \quad (\text{Ec. 5})$$

En la sección correspondiente al manómetro del instrumento, se tiene que la relación entre las presiones en los puntos 1 y 2 a partir de principios hidrostáticos es:

$$P_a = P_b \rightarrow P_1 = P_2 + \rho_{\text{Agua}} g (h_c - h_a) \rightarrow P_1 - P_2 = \rho_{\text{Agua}} g \Delta h \quad (\text{Ec. 6})$$

Reemplazando la ecuación 5 en la 6 se tiene:

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{Aire}} v_2^2 = \rho_{\text{Agua}} g \Delta h$$

Despejando la variable de velocidad:

$$v_2 = \left( \frac{2\rho_{\text{Agua}}g\Delta h}{\rho_{\text{Aire}}} \right)^{0.5} \text{ (m/s) (Ec. 7)}$$

Por otro lado, la densidad de un gas cuyo comportamiento se asemeja al ideal se determina mediante la ecuación:

$$\rho_G = \frac{PM}{RT_G} \text{ (kg/m}^3\text{) (Ec. 8)}$$

Para determinar el flujo molar de aire que ingresa a la torre, se parte de su definición en tuberías:

$$G = \frac{\rho_G v A}{M} \text{ (mol/s) (Ec. 9)}$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 8 y reacomodando:

$$G = A \left( \frac{2\rho_{\text{agua}}g\Delta hP}{MRT_G} \right)^{0.5} \text{ (mol/s) (Ec. 10)}$$

#### **2.4. Descripción del proceso de investigación**

Para lograr los objetivos planteados, se diseñó y construyó un prototipo de la torre para una operación de desorción de etanol, el cual operó como un proceso continuo sin recirculación a partir de las recomendaciones bibliográficas planteadas en el capítulo anterior para la selección de material adecuado de la torre y su relleno, una vez elegidos los solventes y soluto a desorber como también las recomendaciones por parte del tribunal examinador Ing. Fabricio Campero Verdún para seleccionar una proporción adecuada de las dimensiones de la torre piloto para las pruebas en el diseño factorial.

Por otra parte, la construcción de la estructura de soporte se realizó bajo la orientación de un especialista junto a su participación en la construcción de la misma; también, se establecieron las variables para el diseño factorial en base a aquellos parámetros que son controlables en el sistema para determinar la variable respuesta.

#### **2.5. Descripción del proceso de diseño y construcción del prototipo**

Para el diseño y construcción del prototipo, se pusieron a consideración aspectos como:

- Tamaño disponible de tubos de vidrios resistentes en el mercado.
- Tamaños estándar de tuberías de PVC en instalaciones domésticas de agua.
- Tamaño disponible del relleno que se usó, en este caso, esferas de vidrio.
- Dimensiones referenciales de este equipo en otros trabajos o disponibles en ventas por internet, también las dimensiones de la columna de destilación disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.
- Recomendaciones de docentes de la carrera, tribunal y asesores.

Es a partir de estos parámetros que se tomó la decisión de un sistema basado en dos módulos con sistema de acople con roscas, que sea totalmente desarmable con la finalidad de facilitar su mantenimiento, transporte y dejar abierta la posibilidad para modificaciones en futuros casos de investigación.

Se tiene que dicho modelo modular es el más utilizado en equipos de laboratorio de este tipo, siendo que en promedio cada módulo tiene una altura de entre 20 y 30 cm y un diámetro aproximado de 4”.

Por otro lado, las esferas de vidrio más pequeñas disponibles cuentan con un diámetro promedio de 1.127 cm; los tamaños más comerciales para tuberías de PVC en la ciudad de Tarija son de 1/2”, 3/4”, 1”, 2”, 4” y 6” y los tubos de vidrio disponibles por la empresa nacional “Glasscobol” ubicada en la ciudad de Cochabamba, poseen dimensiones de 20 cm de altura, 105 mm de diámetro interno y 120mm de diámetro externo (aproximadamente las mismas dimensiones que una tubería de 4” Sch 40), también se consideró el tamaño más pequeño para duchas disponibles, siendo éstas un poco menor al de 4”.

Un último aspecto que se consideró para las dimensiones de las tuberías de alimentación de las corrientes líquida y gaseosa, son los sensores Arduino de los que se dispone y el tubo Pitot más pequeño que se puede construir.

Para el caso del sensor de caudal de líquido, se tiene que el sensor elegido, es el de mayor dureza y calidad disponible pero que solo se presenta así en el modelo de 3/4", mientras que la herramienta de las que se disponía fue, la tarraja manual, que es de tamaño 1/2". Por lo que se encontró más fácil adquirir un codo con cambio de diámetro y una reducción de 3/4" a 1/2".

En cuanto al sensor de temperatura DHT11, se tiene que en la posición recomendada para mediciones correctas abarca un espacio de 1.45 cm x 3.2 cm a lo cual también se debe agregar mayor espacio para no obstruir el flujo de la corriente gaseosa. Los diámetros de tuberías que cumplen con estas características son las de 2" o superior.

También se tiene que las tuberías y codos más pequeños del mercado, son capaces de entrar cómodamente en tuberías de 2" o superior sin obstruir el flujo de aire, permitiendo la correcta construcción de un tubo Pitot.

### **2.5.1. Construcción de estructura de soporte y elementos de seguridad**

Un elemento esencial en una torre de absorción/desorción rellena es la estructura de soporte la cual brinda la estabilidad y seguridad en la operación de la misma. Siendo conocido que se trabajaría principalmente con un sistema modular a base piezas de PVC y vidrio, que se consultó a un ingeniero civil sobre el material y forma de estructura recomendada.

Para la estimación, se construyeron cuatro módulos de relleno con accesorios de PVC de 4", también se hizo una prueba hidráulica para el difusor de líquido más pequeño disponible para estimar la altura necesaria entre el tanque de alimentación y el difusor para disponer de la energía mecánica suficiente para su correcto funcionamiento. Finalmente, también se consideró la altura de un balde estándar para la recolección del flujo líquido en su salida.

Luego de los ensayos realizados, se determinó que la altura total de la estructura necesaria es de 2.62 m y debe contar con la capacidad de soportar el tanque de alimentación. Para cumplir con las funciones adecuadas estructurales, se utilizaron tubos de acero rectangulares de 20mm x 30 mm y un espesor de 1.8 mm.

Se agregó un sistema de barras de seguridad que mantiene la forma vertical de la torre, además de contar con cierta tolerancia para maniobrar cómodamente con el sistema de acople de roscas.

Para ello, se emplearon barras de acero inoxidable de 0.55 cm de diámetro, a los que se les soldaron topes en un extremo con arandelas y tuercas, y en el otro extremo se soldaron trozos de tornillos sin fin de 0.78 cm de diámetro para que cada barra de seguridad se asegure a la estructura con tuercas mariposa.

Con estos precedentes, se opta por el siguiente dimensionamiento de la torre piloto:

**Tabla 2-2.** Dimensiones y especificaciones de la torre piloto

Diámetro interno promedio real de los tubos de vidrio	10.395 cm
Altura de vidrio con relleno por modulo	20 cm
Altura total de relleno	0.40 m
Accesorios utilizados para uniones entre módulos, zona superior e inferior de la torre	4" Sch 40
Diámetro del sistema de alimentación y salida de corriente gaseosa y accesorios	2" Sch 40
Diámetro del sistema de alimentación y salida de corriente líquida y accesorios	1/2" Sch 40
Diámetro de esferas de vidrio	1.127 cm
Diámetro de sensor Arduino para caudal de líquido y accesorios	3/4" Sch 40

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

Cabe mencionar que la mayor dificultad se encontró para un sistema de acople y hermetización entre los tubos de vidrio y los adaptadores de tubería macho de 4".

Luego de múltiples pruebas y ensayos, se encontró que la mejor opción fue realizarlo con abundante silicona multipropósito y se añadió una válvula antirretorno antes del ingreso de la corriente líquida en la parte superior, para evitar que la corriente de aire pueda llegar a alterar la materia prima en el tanque de alimentación.

Finalmente, para la instalación eléctrica del sistema con sensores y placa Arduino, se tomó como referencia trabajos con estos mismos sensores de la comunidad Arduino en internet y se siguieron normas de seguridad básicas, como la colocación de la placa en una caja de seguridad, recubriendo los cables con tubos corrugados y sellando apropiadamente la instalación de cada sensor para carecer de pérdidas.

## **2.6. Descripción del funcionamiento y puesta en marcha de la torre piloto**

### **2.6.1. Sistema de válvulas**

La torre piloto cuenta con un total de seis válvulas para el correcto control de las corrientes líquida y gaseosa. La parte del flujo de aire, cuenta con una válvula de bola de 2" en la tubería de alimentación, estando lo más próxima posible a los instrumentos de medición como el manómetro y el tubo Pitot; y una válvula de bola de 1/2" en el conducto de salida, donde se puede agregar un sistema de filtración con carbón activado para gases nocivos.

La válvula de bola de 2" es la que genera cambios más grandes para el flujo de aire, y se complementa con la válvula de bola de 1/2" que permite afinar con mayor precisión la cantidad de aire que ingresa.

Para la corriente líquida se tienen cuatro válvulas de 1/2", tres en las tuberías de alimentación (dos de bola y una de retención) y una en las de salida (de bola). El sistema de alimentación cuenta con una válvula de bola de seguridad a la salida del tanque de alimentación, la cual permite dismantelar dicho tanque para su reabastecimiento, mantenimiento o cambios en las propiedades de la materia prima de líquido.

La segunda válvula de bola permite un control más preciso del caudal con el que opera la torre, el cual se verifica con el sensor FS300A. La tercera válvula es la de retención,

la cual impide la posibilidad de que una corriente gaseosa muy grande sea capaz de invertir el flujo de corriente líquida.

Finalmente, la válvula de bola del sistema de salida de corriente líquida permite la posibilidad de la operación batch de la torre con una simple maniobra.

### **2.6.2. Sistema de control de la torre**

La torre posee un sistema elemental para la medición de las variables de operación de la torre, que se puede dividir en dos: control mediante sensores Arduino y control manual mediante instrumentos de medición tradicionales.

Dentro del primer grupo están las variables como la temperatura de entrada de la corriente gaseosa y el caudal de ingreso de la corriente líquida, los cuales necesitan cargar sus respectivos códigos en el programa Arduino en el ordenador. Siendo la variable que puede regular el caudal con ayuda de las válvulas citadas en la sección anterior.

Por otro lado, en el segundo grupo se tiene el control de variables como la temperatura de la corriente líquida tanto a la entrada como a la salida mediante el uso de un termómetro digital; para la corriente gaseosa se controla la presión de entrada con un manómetro analógico y su velocidad mediante el tubo Pitot.

La experiencia de las múltiples etapas de la investigación permitió conocer que con un sistema de compresión en estado estacionario, mantiene una temperatura prácticamente constante y la presión dentro del sistema de alimentación es muy próxima a la barométrica.

Dado que se puede considerar tanto la presión como la temperatura constantes en el sistema de alimentación de aire, se tiene que la variable que queda por controlar es la velocidad del fluido, la cual se mide con la diferencia de las alturas de columna de agua en el tubo Pitot sobre papel milimetrado.



### 2.6.3. Puesta en marcha

Para el proceso de desorción, se enciende primero el compresor y se ajustan las válvulas para dicha corriente hasta alcanzar la cantidad de flujo deseado, luego se abren las válvulas de salida de líquido y de seguridad debajo del tanque de alimentación, se ajusta el caudal con la segunda válvula de bola hasta que la medición con el sensor coincida con el caudal que se desea operar.

Finalmente, se tiene que para el correcto funcionamiento de la torre debe esperarse a que se encuentre en estado estacionario que es fácilmente verificable tanto con la estabilidad de las variables medidas con los sensores Arduino como con la observación del comportamiento de los fluidos dentro de la torre con los tubos de vidrio, donde se presenta un burbujeo uniforme en los módulos superiores de la torre.

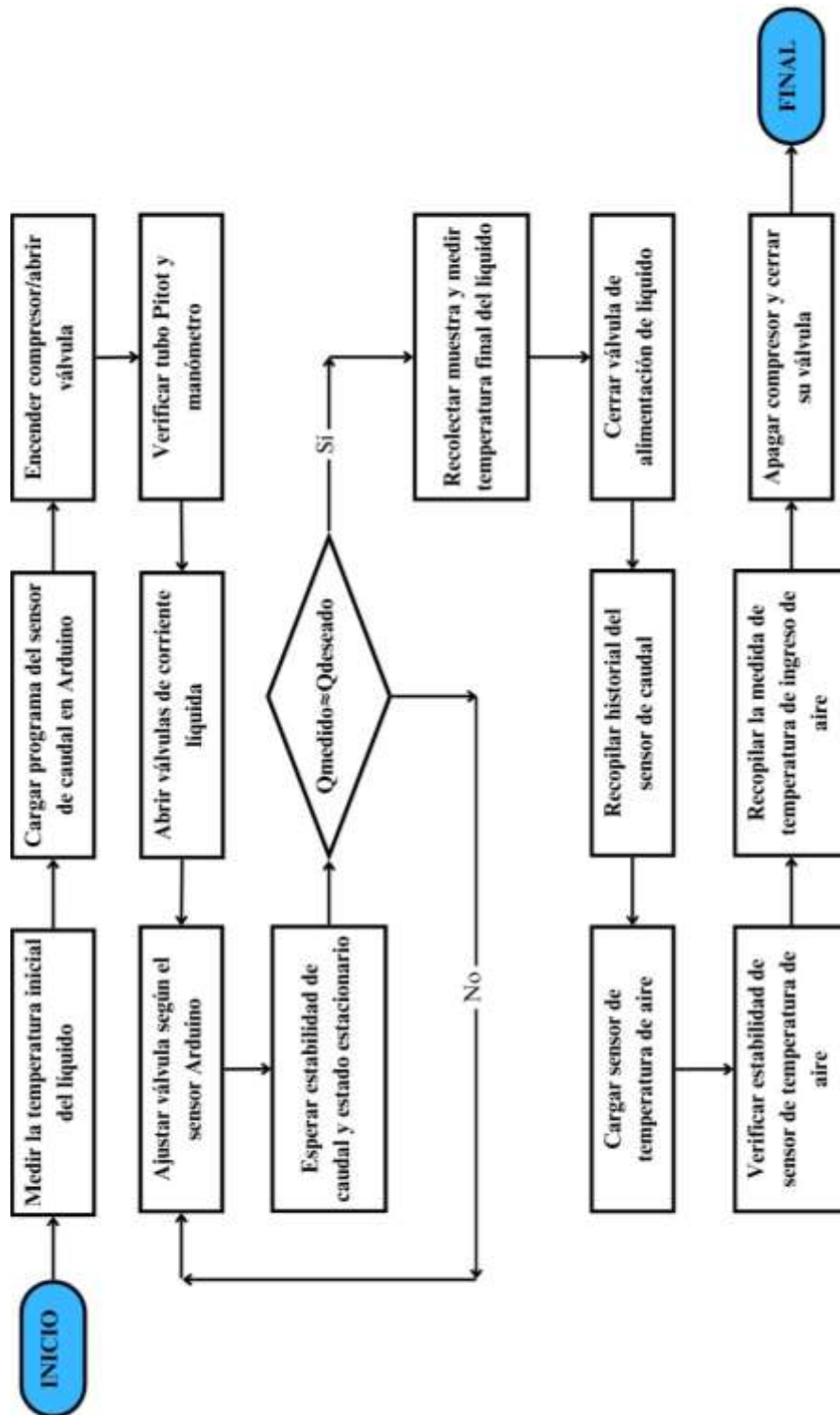
#### **Fotografía 2-1.** Puesta en marcha de la torre de desorción



**Fuente:** Elaboración propia (2023).

Es con todos estos precedentes que se plantea el siguiente algoritmo para la operación y puesta en marcha de la torre:

Figura 2-3. Algoritmo de operación y puesta en marcha de la torre para desorción



Fuente: Elaboración propia (2024).

## 2.7. Descripción del plan de muestreo

La correcta recolección de muestras que sean representativas a la hora de operar la torre se realizó una vez ésta haya alcanzado el estado estacionario, por lo tanto, el muestreo debe considerar el algoritmo previo.

Para el caso de la medición de concentración de alcohol, se tiene que los instrumentos de medición utilizados se encuentran calibrados a una temperatura de 20 °C, por lo que resulta crucial mantener las muestras una vez recolectadas a esta temperatura.

Con la finalidad de facilitar el muestreo, se tiene que la válvula de bola de salida de la corriente de líquido es de la forma típica de un grifo, por lo que el flujo podrá verterse en un balde hasta alcanzar el estado estacionario, para luego recolectar las muestras en botellas limpias con tapa de un litro para evitar pérdidas por evaporación.

Una vez juntadas todas las muestras en las botellas, se mandan a refrigeración por al menos un par de horas, luego se calienta hasta los 20 °C y se realizan las mediciones de concentración de alcohol en % V/V y de densidad.

Los resultados experimentales se registran en una hoja Excel con las fórmulas cargadas para determinar la concentración de las muestras en fracción molar, analizar promedios obtenidos y anomalías que puedan presentarse que requieran una repetición de la prueba.

Con la finalidad de cometer la menor cantidad de errores posibles a la hora de la medición de la concentración de alcohol, se realizaron 3 mediciones por cada muestra de producto y de materia prima recolectada, donde las mediciones se realizaron rápidamente para evitar que la muestra se caliente demasiado.

En caso de sobrecalentarse la muestra durante la medición, ésta debe volverse a refrigerar por un periodo breve de tiempo. También se tomaron las precauciones y recomendaciones de prácticas de laboratorio, como la de enjuagar la probeta de medición con una porción de la muestra y luego desechar por al menos 3 veces para evitar errores por contaminación con muestras previas analizadas.

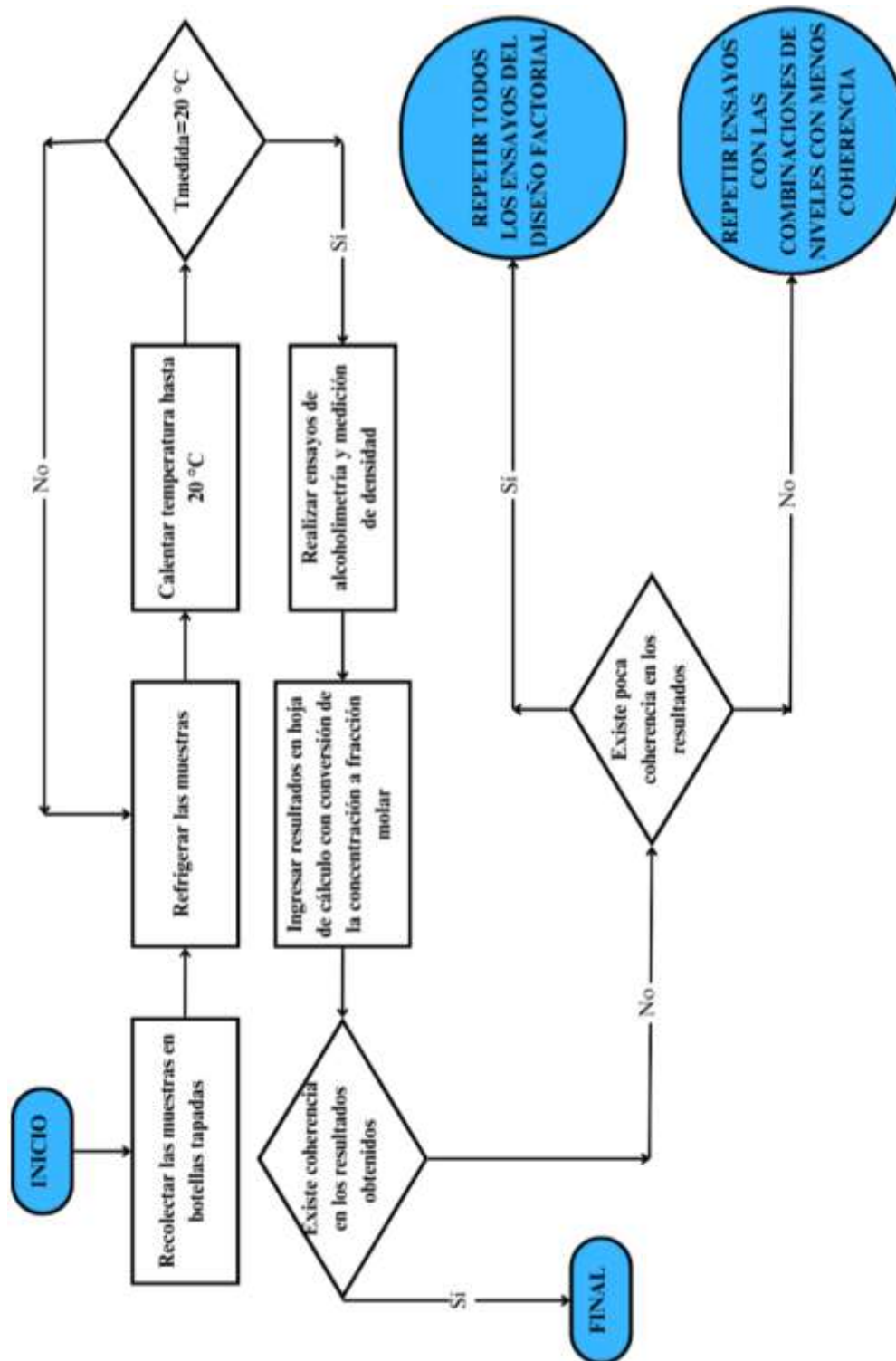
**Fotografía 2-2.** Recolección de muestras y ensayo de alcoholimetría



**Fuente:** Elaboración propia (2023).

Con todos estos precedentes, se plantea el siguiente algoritmo para el plan de muestreo y determinación de concentración de las muestras:

Figura 2-4. Algoritmo para el plan de muestreo



Fuente: Elaboración propia (2024).

## 2.8. Diseño factorial

El diseño factorial realizado contó con tres finalidades:

- Estudiar el efecto de cada uno de los factores y su interacción de forma eficiente con un sólido respaldo estadístico (Gutiérrez y de la Vara, 2008).
- Encontrar la combinación de niveles de los factores que desencadenen en el punto de máximo rendimiento de la torre de desorción.
- Inferir el valor de la constante de transferencia de masa en el proceso de la torre piloto para realizar el diseño de la torre de tamaño final.

Dada la complejidad de trabajar con todas las variables presentes en una torre de desorción, se ve por conveniente el fijar la mayoría de éstas, dejando flexibilidad en aquellas variables en las que se cuente mayor control y posibilidad de medición:

### 2.8.1. Variables independientes

Es conveniente el uso de variables, como ser:

- Temperatura de entrada de la corriente líquida ( $T_L$ ), la cual estará vinculada con el sistema de acondicionamiento.
- La relación  $L_s/G_s$  mediante el cambio en el caudal de la corriente de entrada de líquido ( $L_s$ ), esto se mide mediante el sensor FS300A y conociendo la concentración en fracción molar de la materia prima. Para su variación, se usó la válvula de bola instalada.

Por otro lado, no se vio conveniente la variación de la corriente gaseosa debido a que no se dispone de mucha maniobrabilidad en la medición de la velocidad de entrada en el tubo Pitot.

### 2.8.2. Variables dependientes

Dada la variabilidad en la preparación de la materia prima, se vio por conveniente que la variable dependiente sea el porcentaje de remoción de alcohol, el cual es conocido

una vez se realizaron los ensayos de alcoholimetría y densimetría de la materia prima y el producto obtenido en el proceso.

### 2.8.3. Tabla de tratamientos del diseño factorial

Al tratarse de un diseño factorial con dos variables independientes, se tomaron dos niveles para cada una de las variables, por lo cual, se tratará de un diseño del tipo  $2^2$ .

**Tabla 2-3.** Tratamiento del diseño factorial

Número de tratamiento	Nivel de relación $L_s/G_s$	Nivel de temperatura de entrada de corriente líquida $T_L$
1	+	-
2	-	-
3	+	+
4	-	+

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Los valores de la relación  $L_s/G_s$  y la temperatura de entrada de la corriente líquida  $T_L$  en cada uno de los niveles en promedio se fijaron en:

**Tabla 2-4.** Valores promedio de cada nivel en el diseño factorial

Número de tratamiento	Relación $L_s/G_s$	Temperatura de entrada de corriente líquida $T_L$ (°C)
1	6.452	30.9
2	3.666	30.9
3	6.452	39.2
4	3.666	39.2

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Cada tratamiento contó con tres réplicas, haciendo un total de 12 ensayos. Esta cantidad de réplicas permitió el correcto tratamiento estadístico de los resultados obtenidos y la certeza de los resultados obtenidos en la variable respuesta son representativos del proceso de desorción.

**Fotografía 2-3.** Construcción de módulo con relleno de esferas de vidrio



**Fuente:** Elaboración propia (2024).



**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Resultados obtenidos en el diseño factorial**

#### **3.1.1. Resultados cualitativos**

En el estudio realizado, se pudo observar como primera señal de cambio en el producto obtenido respecto a la materia prima, una atenuación en el aroma, siendo esto un indicador cualitativo del porcentaje de alcohol desorbido en la corriente líquida en todos los casos. No pudiéndose distinguir una gran diferencia entre cada muestra de los productos obtenidos es que los ensayos de alcoholimetría y densimetría se volvieron tan importantes.

#### **3.1.2. Mediciones de caudal de corriente líquida**

Una de las características más importantes de los sensores que trabajan con la placa y software Arduino, es que el operador posee la posibilidad de establecer el intervalo de medición en unidades de milisegundos.

Para el caso presente, para la medición de caudal en la corriente líquida se tomó la recomendación de distintos foros de la comunidad de otros usuarios de Arduino que es la de tomar un intervalo de 2500 milisegundos.

El sensor FS300A basa su funcionamiento en el efecto Hall, por lo que en su interior cuenta con un imán en el eje de rotación del molinete y un sistema integrado que es capaz de procesar las pulsaciones eléctricas generadas al pasar un fluido por su interior.

La medición se empezó una vez la torre haya alcanzado el estado estacionario y se tomó el registro de un historial de al menos 19 mediciones para cada réplica.

Para su correcta puesta en marcha, se debió cargar un código en el software Arduino que sea capaz de trabajar con un contador de pulsaciones que junto a un factor propio al diámetro del sensor es capaz de medir caudal de forma directa en unidades litro por minuto.

Habiendo seguido la misma numeración para cada combinación de niveles en el diseño factorial mostrado en el capítulo anterior, y agregando el número de réplica correspondiente en cada prueba, se recopilaron los siguientes historiales:

**Tabla 3-1.** Historial de mediciones de caudal de la corriente líquida en el diseño factorial 1

		<b>Prueba</b>					
		<b>1.1.</b>	<b>1.2.</b>	<b>1.3.</b>	<b>2.1.</b>	<b>2.2.</b>	<b>2.3.</b>
<b><math>Q_L</math> (L/min)</b>		1.891	1.964	1.745	1.091	1.091	0.873
		1.964	1.818	1.673	1.164	1.091	0.873
		1.891	1.818	1.745	1.091	1.164	0.873
		1.891	1.891	1.745	1.164	1.091	0.873
		1.891	1.964	1.745	1.164	1.018	0.873
		1.891	1.964	1.673	1.091	1.091	0.873
		1.891	1.818	1.673	1.164	1.091	0.873
		1.891	1.891	1.745	1.091	1.091	0.873
		1.818	1.891	1.673	1.091	1.091	0.800
		1.891	1.818	1.673	1.091	1.018	0.945
		1.818	1.818	1.673	1.164	1.091	0.800
		1.891	1.818	1.673	1.091	1.091	0.873
		1.818	1.818	1.673	1.091	1.091	0.800
		1.818	1.818	1.673	1.091	1.018	0.873
		1.818	1.818	1.673	1.091	1.091	0.800
		1.818	1.818	1.673	1.091	1.018	0.800
		1.818	1.818	1.673	1.091	1.091	0.873
		1.891	1.818	1.673	1.091	1.018	0.873
		1.818	1.745	1.600	1.091	1.018	0.800
<b><math>\bar{Q}_L</math> (L/min)</b>		<b>1.864</b>	<b>1.849</b>	<b>1.688</b>	<b>1.110</b>	<b>1.072</b>	<b>0.854</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 3-2.** Historial de mediciones de caudal de la corriente líquida en el diseño factorial 2

	Prueba					
	3.1.	3.2.	3.3.	4.1.	4.2.	4.3.
$Q_L$ (L/min)	1.891	1.745	1.891	1.091	1.018	1.164
	1.818	1.745	1.818	1.018	0.945	1.164
	1.818	1.745	1.818	0.873	0.945	1.091
	1.818	1.673	1.745	0.873	0.945	1.164
	1.818	1.673	1.891	1.018	0.945	1.164
	1.745	1.745	1.818	0.945	0.945	1.091
	1.818	1.745	1.818	1.018	1.018	1.164
	1.818	1.745	1.818	0.945	0.945	1.091
	1.818	1.745	1.818	0.945	1.018	1.164
	1.818	1.745	1.745	0.945	0.945	1.091
	1.745	1.673	1.818	0.945	0.945	1.164
	1.745	1.745	1.818	0.945	0.945	1.091
	1.818	1.745	1.745	0.945	0.945	1.164
	1.745	1.673	1.818	0.945	1.018	1.091
	1.745	1.745	1.818	0.945	0.945	1.091
	1.745	1.673	1.818	0.945	0.945	1.091
	1.745	1.673	1.745	0.945	0.945	1.164
	1.818	1.745	1.818	0.945	1.018	1.091
	1.745	1.673	1.745	0.945	0.945	1.164
$\bar{Q}_L$ (L/min)	<b>1.791</b>	<b>1.718</b>	<b>1.806</b>	<b>0.957</b>	<b>0.964</b>	<b>1.129</b>

Fuente: Elaboración propia (2024).

### 3.1.3. Mediciones de corriente molar gaseosa

Para la determinación de la corriente molar gaseosa, se empleó la ecuación 10 planteada en el capítulo previo:

$$G = A \left( \frac{2\rho_{\text{agua}}g\Delta hP}{MRT_G} \right)^{0.5}$$

Los valores de las constantes presentes en la ecuación, se asumieron como  $9.8 \text{ m/s}^2$  para la aceleración gravitacional,  $0.029 \text{ kg/mol}$  para el peso molecular del aire,  $8.314 \text{ J/(mol * K)}$  para la constante de los gases ideales y  $1000 \text{ kg/m}^3$  para la densidad del agua.

En el tubo Pitot se emplearon columnas de agua para medir la diferencia de presión entre dos puntos próximos del sistema de alimentación a través de la diferencia de altura entre éstas, la cual se midió como  $0.5 \text{ mm}$ , es decir  $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ , por otro lado, el área de la tubería de 2" se extrae de tablas de tuberías estandarizadas, siendo de la siguiente manera:

$$A = 0.0233 \text{ ft}^2 * \left( \frac{0.3048 \text{ m}}{1 \text{ ft}} \right)^2 = 0.002165 \text{ m}^2$$

La determinación de la presión absoluta del gas se desglosó en mediciones y cálculos de la presión barométrica y la presión manométrica, siendo la relación entre éstas:

$$P = P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{bar}}$$

Para determinar la presión manométrica del aire, se realizaron ensayos junto al tribunal examinador Ing. Fabricio Campero Verdún, en los que se utilizó una serie de manómetros de distintos rangos de medición. Ninguno de los instrumentos fue capaz de medir una presión de operación al ser ésta demasiado baja, por lo que se procedió a utilizar un tubo en "U" lleno de agua, donde la diferencia de altura promedio entre las columnas de agua fue de  $24.1 \text{ cm}$ . Por lo tanto, el valor promedio de la presión manométrica fue de:

$$P_{\text{man}} = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9.8 \text{ m/s}^2 * 0.241 \text{ m} = 2357.88 \text{ Pa}$$

La temperatura del gas es medida con el sensor DHT11 y la presión barométrica es estimada a partir de la ley de distribución barométrica, la cual también es función de la temperatura, la altura sobre el nivel de mar de la ubicación y la presión a nivel de mar, siendo que la última se encuentra estandarizada como 101325 Pa.

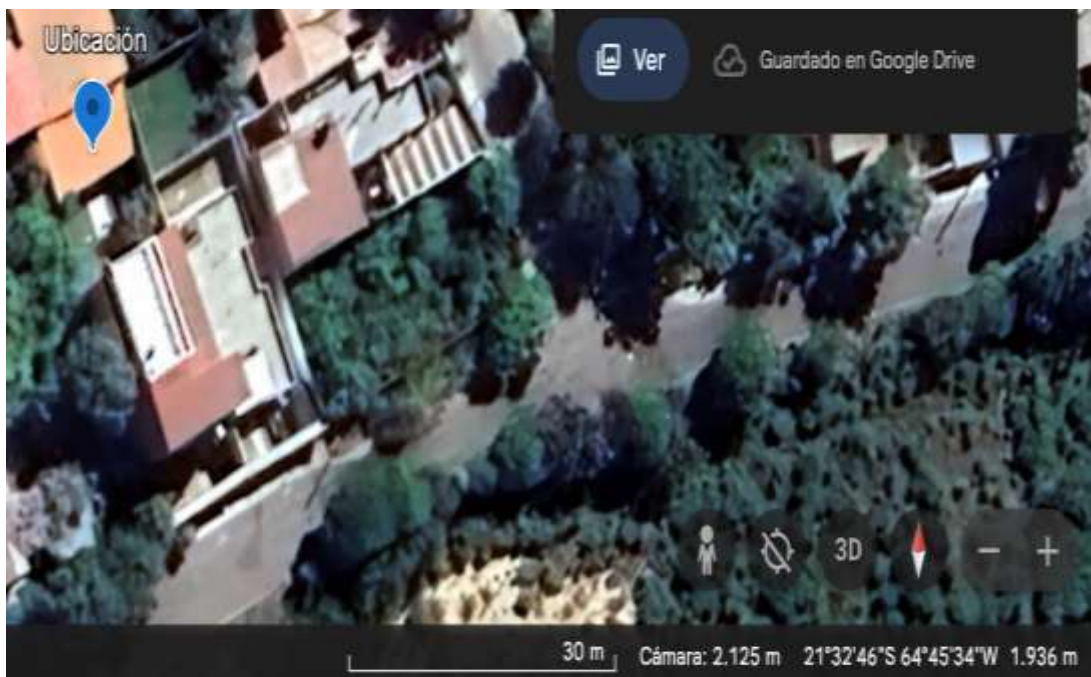
Para determinar la altura de la ubicación en la que se realizaron los ensayos, se empleó la herramienta online “Google Earth”, en la cual se especifica la ubicación de las pruebas y gracias a su base de datos disponible, se pueden observar tantas imágenes satelitales, coordenadas y la altitud del lugar.

A partir de esta información es que se trabajó con la ley de distribución barométrica, siendo la única variable que se midió con ayuda de los sensores disponibles la temperatura (Castellan, 1987):

$$P_{\text{bar}} = P_0 * e^{-Mgz/(RT_G)} \quad (\text{Pa})$$

Las imágenes satelitales muestran que la altura sobre el nivel de mar, donde se realizaron las pruebas, es de 1936 m.

**Figura 3-1.** Altura sobre el nivel del mar a la que se realizaron los ensayos



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Las ecuaciones presentadas se cargaron en una hoja de cálculo en Excel. En todos los casos, la temperatura del aire provino del compresor:

**Tabla 3-3.** Flujo molar de aire en el diseño factorial

<b>Tratamiento</b>	<b>T<sub>G</sub> (°C)</b>	<b>P (Pa)</b>	<b>G (mol/min)</b>
1.1.	28.5	83667.4	13.792
1.2.	28.5	83667.4	13.792
1.3.	28.5	83667.4	13.792
2.1.	20.6	83187.6	13.936
2.2.	20.6	83187.6	13.936
2.3.	28.5	83667.4	13.792
3.1.	24.5	83427.3	13.864
3.2.	24.8	83445.5	13.859
3.3.	24.8	83445.5	13.859
4.1.	24.1	83403.0	13.872
4.2.	24.1	83403.0	13.872
4.3.	24.1	83403.0	13.872

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

#### **3.1.4. Mediciones de la corriente molar líquida**

El flujo molar líquido se determinó a partir de la ecuación 4 del capítulo anterior, para ello se trabajó con el caudal promedio medido en cada tratamiento, y los resultados de los ensayos de alcoholimetría y densimetría para las materias primas. Esta simplificación fue posible gracias a que se operó la torre como un sistema diluido.

$$L = \frac{Q_L \rho_{\text{total}}}{x_{\text{Etanol}} * M_{\text{Etanol}} + x_{\text{Agua}} * M_{\text{Agua}}}$$

**Tabla 3-4.** Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría 1

Prueba	m Total (g)	Densidad (g/mL)	% V/V	m Etanol (g)	m Agua (g)	Xa	Xa Promedio
MP1	9.744	0.9744	16.5	13.3775	86.6225	0.0570	0.0571
	9.729	0.9729	16.5	13.3981	86.6019	0.0571	
	9.716	0.9716	16.5	13.4160	86.5840	0.0572	
1.1.	9.709	0.9709	16	13.0188	86.9812	0.0553	0.0552
	9.727	0.9727	16	12.9948	87.0052	0.0552	
	9.739	0.9739	16	12.9787	87.0213	0.0551	
1.2.	9.727	0.9727	16	12.9948	87.0052	0.0552	0.0553
	9.719	0.9719	16	13.0055	86.9945	0.0553	
	9.711	0.9711	16	13.0162	86.9838	0.0553	
1.3.	9.733	0.9733	16	12.9867	87.0133	0.0552	0.0552
	9.738	0.9738	16	12.9801	87.0199	0.0551	
	9.725	0.9725	16	12.9974	87.0026	0.0552	
MP2	9.750	0.9750	16	12.9641	87.0359	0.0551	0.0551
	9.749	0.9749	16	12.9654	87.0346	0.0551	
	9.756	0.9756	16	12.9561	87.0439	0.0550	
2.1	9.761	0.9761	15.5	12.5448	87.4552	0.0531	0.0531
	9.757	0.9757	15.5	12.5500	87.4500	0.0532	
	9.765	0.9765	15.5	12.5397	87.4603	0.0531	
2.2	9.753	0.9753	15.5	12.5551	87.4449	0.0532	0.0532
	9.744	0.9744	15.5	12.5667	87.4333	0.0532	
	9.763	0.9763	15.5	12.5423	87.4577	0.0531	
MP3	9.730	0.9730	15	12.1788	87.8212	0.0515	0.0514
	9.746	0.9746	15	12.1588	87.8412	0.0514	
	9.739	0.9739	15	12.1676	87.8324	0.0514	
2.3	9.727	0.9727	14.5	11.7765	88.2235	0.0496	0.0496
	9.738	0.9738	14.5	11.7632	88.2368	0.0496	
	9.754	0.9754	14.5	11.7439	88.2561	0.0495	

**Fuente:** Elaboración propia (2024).



**Tabla 3-5.** Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría 2

Prueba	m Total (g)	Densidad (g/mL)	%V/V	m Etanol (g)	m Agua (g)	Xa	Xa Promedio
MP4	9.824	0.9824	15	12.0623	87.9377	0.0509	0.0513
	9.733	0.9733	15	12.1751	87.8249	0.0515	
	9.743	0.9743	15	12.1626	87.8374	0.0514	
3.1	9.783	0.9783	14	11.3053	88.6947	0.0475	0.0475
	9.778	0.9778	14	11.3111	88.6889	0.0475	
	9.776	0.9776	14	11.3134	88.6866	0.0475	
3.2	9.762	0.9762	14	11.3296	88.6704	0.0476	0.0476
	9.765	0.9765	14	11.3262	88.6738	0.0476	
	9.760	0.9760	14	11.3320	88.6680	0.0476	
3.3	9.735	0.9735	14	11.3611	88.6389	0.0478	0.0477
	9.758	0.9758	14	11.3343	88.6657	0.0476	
	9.763	0.9763	14	11.3285	88.6715	0.0476	
MP5	9.751	0.9751	14	11.3424	88.6576	0.0477	0.0477
	9.746	0.9746	14	11.3482	88.6518	0.0477	
	9.741	0.9741	14	11.3541	88.6459	0.0477	
4.1	9.775	0.9775	13.5	10.9105	89.0895	0.0457	0.0458
	9.755	0.9755	13.5	10.9329	89.0671	0.0458	
	9.747	0.9747	13.5	10.9418	89.0582	0.0459	
4.2	9.770	0.9770	13.5	10.9161	89.0839	0.0458	0.0458
	9.770	0.9770	13.5	10.9161	89.0839	0.0458	
	9.765	0.9765	13.5	10.9217	89.0783	0.0458	
4.3	9.768	0.9768	13.5	10.9183	89.0817	0.0458	0.0458
	9.768	0.9768	13.5	10.9183	89.0817	0.0458	
	9.762	0.9762	13.5	10.9250	89.0750	0.0458	
	9.706	0.9706	19.5	15.8716	84.1284	0.0687	

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

Se trabajó con las fracciones molares promedio de cada tratamiento para remplazarlo en la ecuación 4, por lo que el valor del flujo molar líquido en cada tratamiento fue:

**Tabla 3-6.** Flujo molar de solución alcohólica en el diseño factorial

<b>Tratamiento</b>	<b>Q<sub>L</sub> (L/min)</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Xa Promedio</b>	<b>L (mol/min)</b>
1.1.	1.864	0.9730	0.0571	92.545
1.2.	1.849	0.9730	0.0571	91.782
1.3.	1.688	0.9730	0.0571	83.807
2.1.	1.110	0.9752	0.0551	55.401
2.2.	1.072	0.9752	0.0551	53.484
2.3.	0.854	0.9738	0.0514	42.768
3.1.	1.791	0.9767	0.0513	90.007
3.2.	1.718	0.9767	0.0513	86.357
3.3.	1.806	0.9767	0.0513	90.779
4.1.	0.957	0.9746	0.0477	48.218
4.2.	0.964	0.9746	0.0477	48.600
4.3.	1.129	0.9746	0.0477	56.928

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### **3.1.5. Relación L/G y gradiente de temperaturas obtenidos en el diseño factorial**

Una vez medidos los flujos molares de las corrientes líquida y gaseosa, fue posible determinar la relación L/G a la que opera la torre. En el caso de un sistema diluido, se trata de la pendiente de la curva de operación. Por otro lado, el gradiente de temperaturas permitió construir la curva de equilibrio.

**Tabla 3-7.** Relación L/G y gradiente de temperaturas en el diseño factorial

<b>Tratamiento</b>	<b>T<sub>L1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>L2</sub> (°C)</b>	<b>L (mol/min)</b>	<b>G (mol/min)</b>	<b>L/G</b>
1.1.	30.8	26.2	92.545	13.792	6.710
1.2.	31.1	27.2	91.782	13.792	6.655
1.3.	30.4	27.2	83.807	13.792	6.077
2.1.	31.6	23.4	55.401	13.936	3.975
2.2.	31.2	25.2	53.484	13.936	3.838
2.3.	30.3	26.8	42.768	13.792	3.101
3.1.	40.2	27.1	90.007	13.864	6.492
3.2.	39.0	30.3	86.357	13.859	6.231
3.3.	38.0	31.1	90.779	13.859	6.550
4.1.	40.6	30.1	48.218	13.872	3.476
4.2.	39.4	30.2	48.600	13.872	3.504
4.3.	38.1	30.0	56.928	13.872	4.104

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.1.6. Variable respuesta observada

A partir de los ensayos realizados, se pudo determinar el porcentaje de alcohol desorbido en cada tratamiento, lo cual se recopiló en la siguiente tabla:

**Tabla 3-8.** Variable respuesta observada

<b>Prueba</b>	<b>L/G</b>	<b>T<sub>L1</sub> (°C)</b>	<b>%Desorción</b>
1.1.	6.710	30.8	3.240
1.2.	6.655	31.1	3.175
1.3.	6.077	30.4	3.316
2.1.	3.975	31.6	3.484
2.2.	3.838	31.2	3.401
2.3.	3.101	30.3	3.605
3.1.	6.492	40.2	7.288
3.2.	6.231	39.0	7.118
3.3.	6.550	38.0	7.012
4.1.	3.476	40.6	3.963
4.2.	3.504	39.4	4.062
4.3.	4.104	38.1	4.037

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

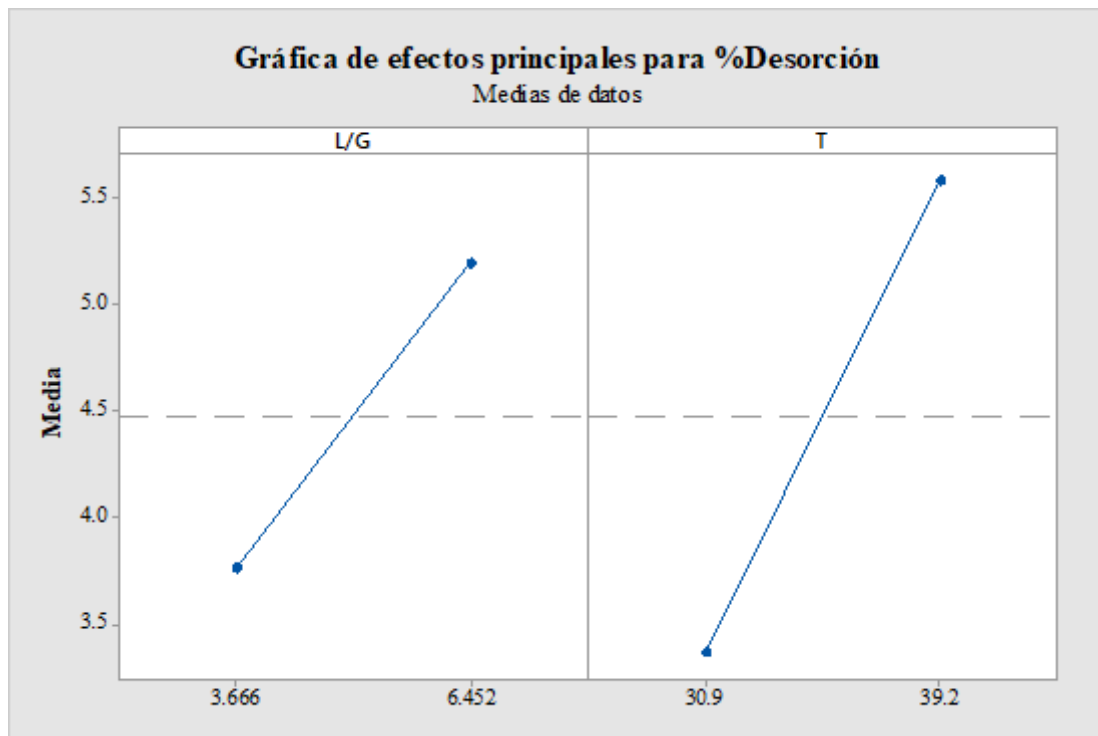
### 3.2. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se trabajó con el promedio de cada nivel de las variables independientes presentado en la tabla 2-4 y los resultados de porcentaje de alcohol desorbido promedio de cada tratamiento.

#### 3.2.1. Efectos principales y efecto de interacción

Se realizó el análisis gráfico de efectos mediante el uso del programa Minitab especializado en estadística. La gráfica de efectos principales obtenida fue:

**Figura 3-2.** Gráfica de efectos principales

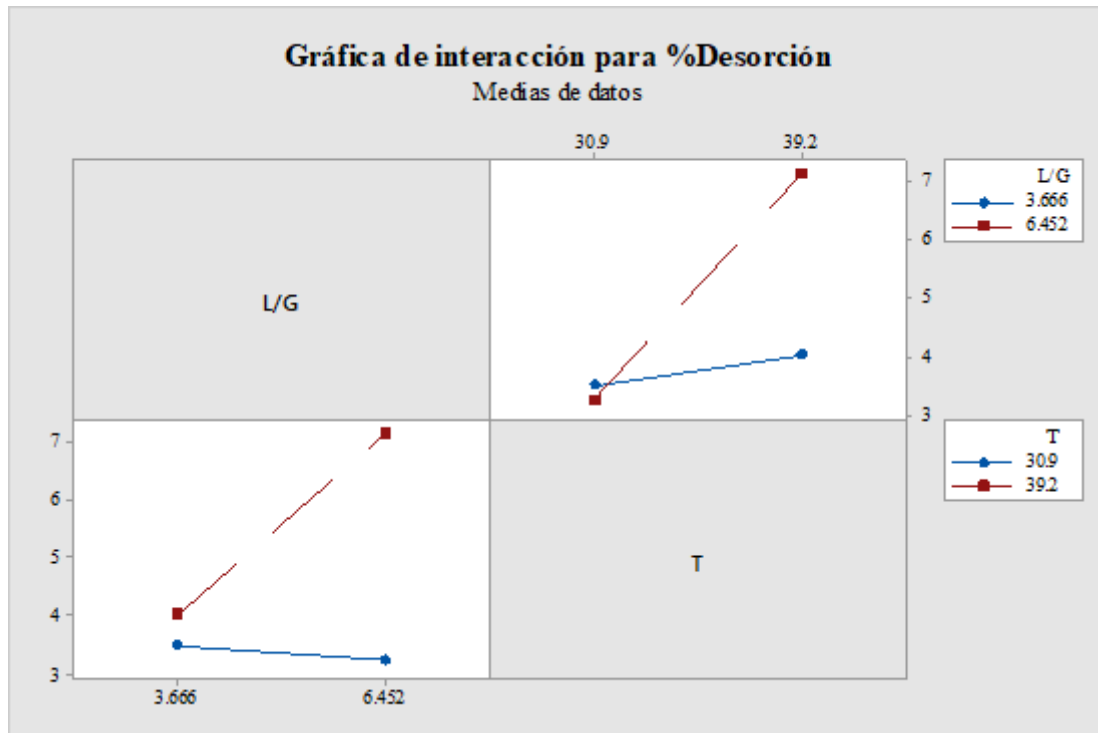


**Fuente:** Elaboración propia (2024).

A partir del gráfico obtenido, se pudo determinar que ambas variables poseen un efecto positivo sobre la variable respuesta, también se puede apreciar, mediante su simple comparación, que el efecto de la temperatura inicial de la corriente líquida es ligeramente mayor al de la relación L/G.

Por otro lado, la gráfica de interacción obtenida fue:

**Figura 3-3.** Gráfica de interacción



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

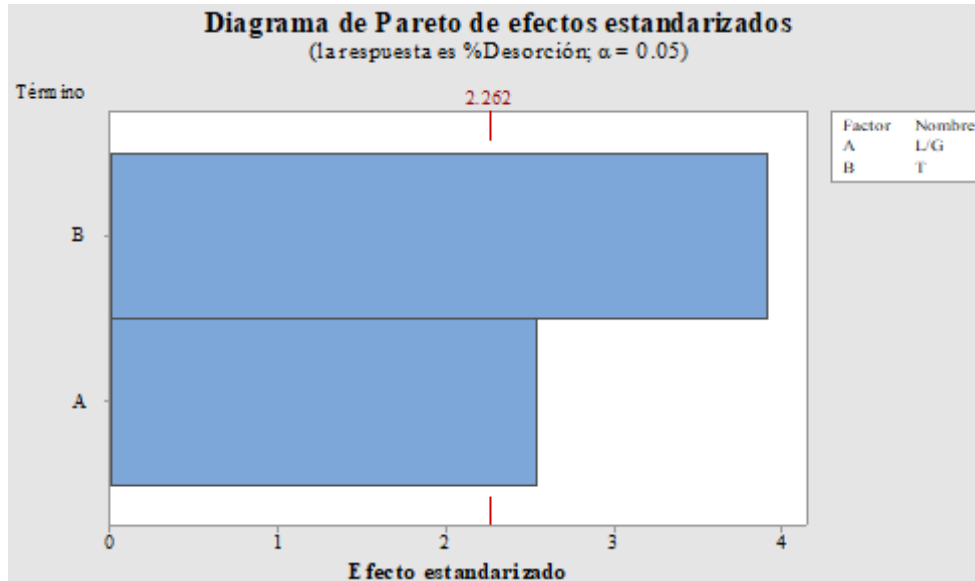
Se determinó la existencia de una interacción marcada entre las variables independientes; en la gráfica superior se puede apreciar que el efecto de interacción es positivo en ambos niveles de relación L/G al incrementar la temperatura, siendo este efecto mucho más pronunciado en el nivel alto de la relación L/G.

Por otro lado, la gráfica inferior muestra que el efecto de interacción es negativo al mantener el nivel bajo de temperatura donde el porcentaje de desorción disminuye levemente al aumentar la relación L/G y es positivo en el nivel alto de temperatura de forma muy pronunciada. Es decir, el efecto de la relación L/G sobre el porcentaje de desorción depende del nivel en el que se encuentre la temperatura.

Sin embargo, cabe resaltar que dicha interacción apareció debido a que solo se trabajaron con dos variables independientes, además, que agregar un término de interacción carece de validez en un modelo físico real en procesos de desorción y encubre el efecto real de cada variable.

Finalmente se comparan los pesos de los efectos principales sobre la variable respuesta mediante una gráfica de Pareto. A partir de la gráfica obtenida, se observa que la temperatura inicial de la corriente líquida es la variable que más influye en la desorción, seguida de la temperatura.

**Figura 3-4.** Gráfica de Pareto de efectos principales y de interacción



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.2.2. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza para un intervalo de confianza de 95 % en la herramienta Minitab obtenidos fueron:

**Tabla 3-9.** Resultados del análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	20.8091	10.4046	10.89	0.004
Lineal	2	20.8091	10.4046	10.89	0.004
T	1	14.6501	14.6501	15.33	0.004
L/G	1	6.1590	6.1590	6.44	0.032
Error	9	8.6012	0.9557		
Falta de ajuste	1	8.5261	8.5261	908.47	0
Error puro	8	0.0751	0.0094		
Total	11	29.4103			

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Los resultados obtenidos en la columna “valor-p” confirman que las variables independientes poseen efectos sobre la variable respuesta, esto al ser menores al nivel de significación de 5 %; se da mayor respaldo al diagrama de Pareto obtenido al analizar la columna “Valor F”, siendo la variable de mayor peso la temperatura, seguida de la temperatura inicial de la corriente líquida.

Finalmente, la magnitud del error puro, respecto al total, es bastante pequeña. Esto se traduce en el que el modelo generado es capaz de explicar de muy buena manera los resultados observados y que las desviaciones que pueden presentarse son causadas por la ausencia de un término de interacción, la cual se verifica en la columna “Falta de ajuste”.

### 3.2.3. Análisis del modelo

Con la finalidad de evitar errores en los cálculos en los que puedan presentarse valores negativos de temperatura en la escala de grados Celsius, se transforman los valores obtenidos a la escala de temperatura absoluta en unidades Kelvin.

El modelo generado con la herramienta Minitab del tipo lineal con un 5 % de nivel de significación obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 3-10.** Coeficientes del modelo lineal

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante	-80.2	21.0	-3.82	0.004	
T	0.2662	0.0680	3.92	0.004	1.00
L/G	0.514	0.203	2.54	0.032	1.00

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

A partir de los resultados de la columna “Valor p”, se puede inferir que los valores obtenidos en la columna “Coef” para el ajuste a un modelo lineal pueden ser aceptados.

La ecuación de la regresión obtenida escrita de forma explícita es:

$$\% \text{Desorción} = -80.2 + 0.2662(T) + 0.514(L/G)$$

Finalmente, se analiza la calidad del ajuste de la regresión mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson y el coeficiente de determinación obtenidos de la regresión:

**Tabla 3-11.** Calidad del ajuste en regresión

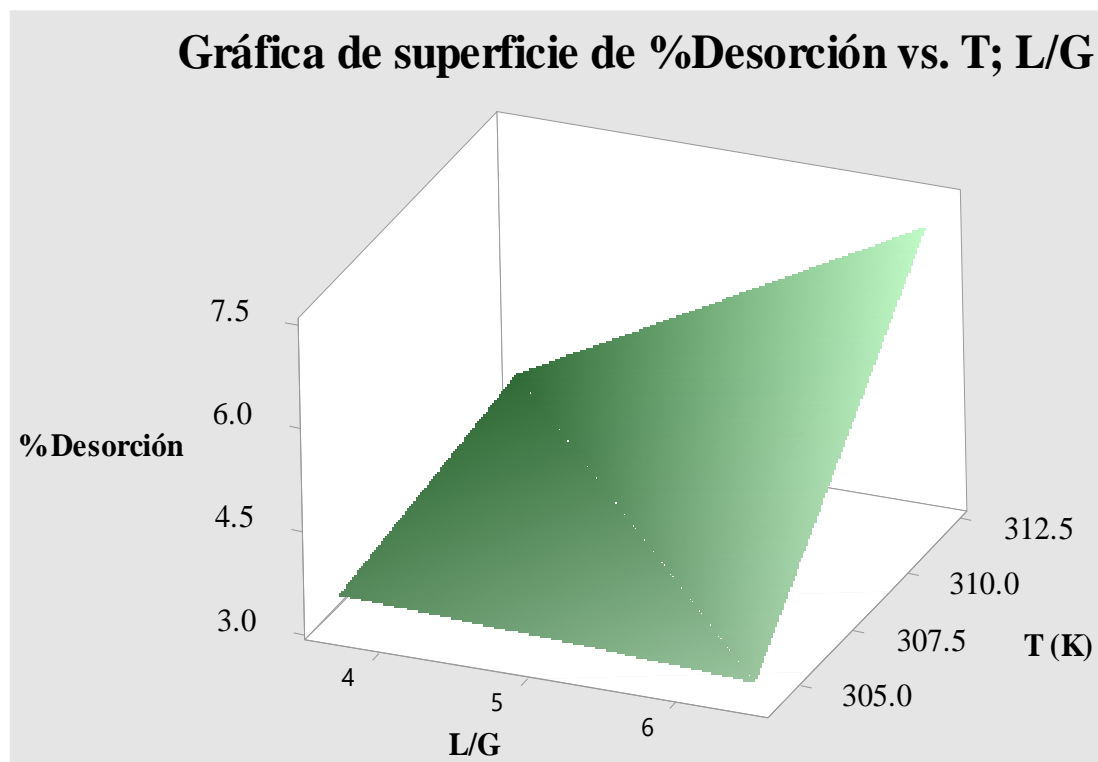
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred.)
0.977592	70.75 %	64.26 %	48.01 %

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

Estos resultados indican que el ajuste a una regresión lineal es aceptable para un sistema complejo como lo es la torre de desorción, por lo que el modelo es capaz de predecir satisfactoriamente los efectos de las variables independientes sobre la variable respuesta.

Las gráficas de superficie y de contorno que se obtienen con el modelo lineal son:

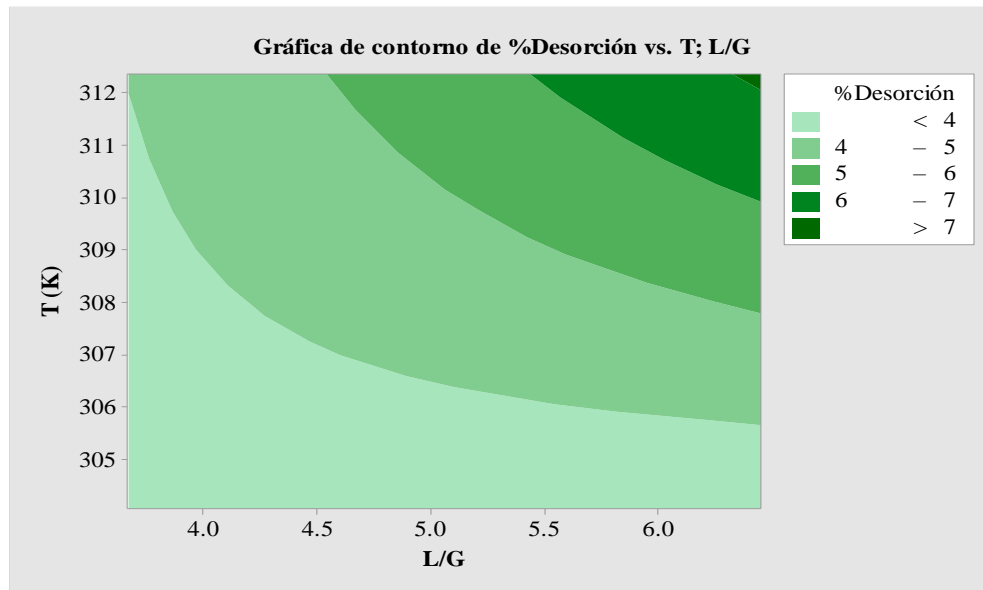
**Figura 3-5.** Gráfica de superficie del modelo de desorción



**Fuente: Elaboración propia (2024).**



**Figura 3-6.** Gráfica de contorno del modelo de desorción

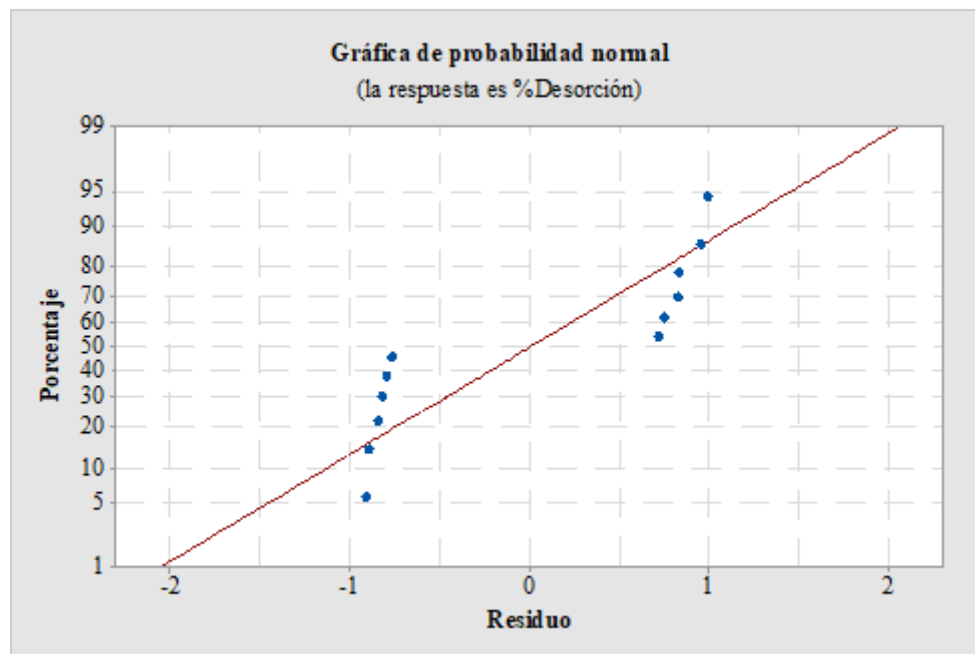


**Fuente:** Elaboración propia (2024).

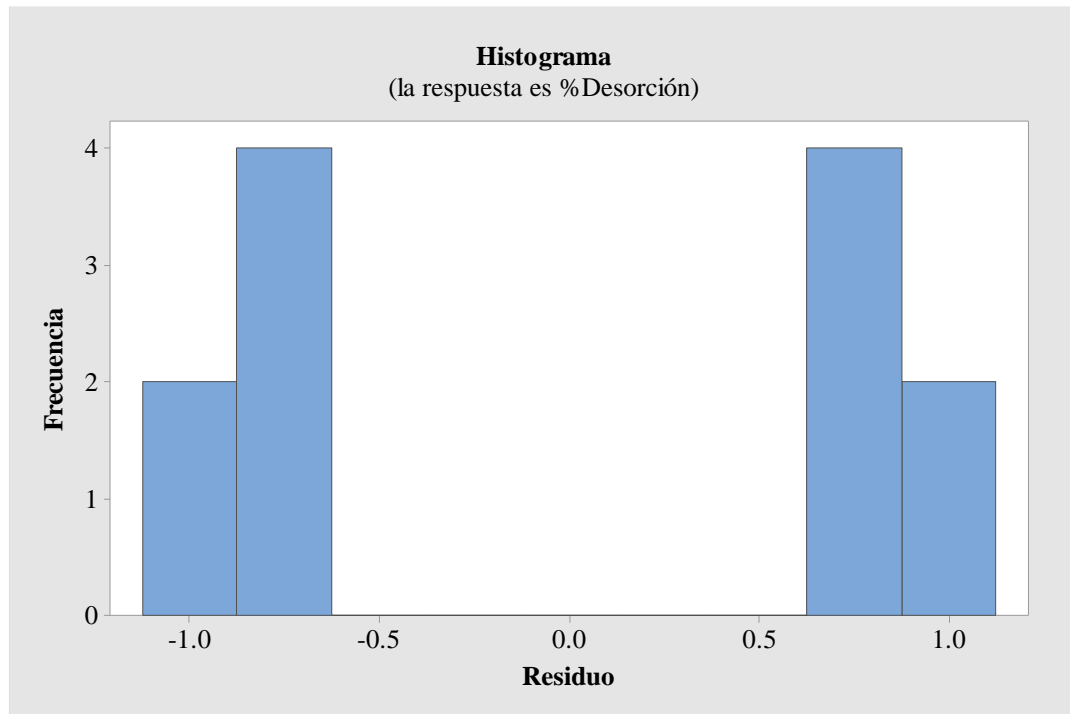
### 3.2.4. Análisis de residuos

El análisis de residuos se realizó mediante las gráficas siguiente:

**Figura 3-7.** Gráfica normal de residuos para %Desorción



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 3-8.** Histograma de residuos

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

A partir de las gráficas obtenidas, se pudo apreciar que la distribución de residuos se asemeja a los extremos de la curva de probabilidad normal tanto en el histograma como en la gráfica normal de residuos y en ambas se muestra simetría.

El espacio en blanco presentado entre los grupos de residuos fue causado por la eliminación del término de interacción entre las variables independientes; los residuos de dicho espacio podrían encontrarse mediante la ampliación del número de réplicas.

### 3.3. Diseño de la torre de desorción rellena

#### 3.3.1. Construcción de la curva de operación

La construcción de la curva de operación se realizó seleccionando el punto óptimo de operación, el cual corresponde al tratamiento en los cuales ambas variables independientes se encuentran en su nivel alto. Se tomaron los promedios de la relación L/G de las tres réplicas y de las fracciones molares correspondientes a su materia prima (MP4) y del producto obtenido. Dichas condiciones se ordenan en la siguiente tabla:

**Tabla 3-12.** Condiciones promedio del punto óptimo de operación

$y_1$	$x_2$	$x_1$	L/G
0	0.0513	0.0476	6.424

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

A partir de los resultados obtenidos y el balance de materia correspondiente, se calculó la fracción molar de alcohol en la corriente de salida gaseosa:

$$y_2 - y_1 = \frac{L}{G}(x_2 - x_1)$$

$$y_2 = 6.424 * (0.0513 - 0.0476) = 0.0238$$

### 3.3.2. Construcción de la curva de equilibrio

Dado que se opera en un sistema diluido y con un cambio no muy grande de temperatura, según McCabe, et al. se puede tomar la simplificación de asumir perfiles lineales de fracción molar y temperatura.

A partir de ello, se construyeron los perfiles lineales de concentración y temperatura tomando como mínimo cinco puntos dentro de la torre a los cuales se relacionó con la correspondiente fracción molar en fase gaseosa en equilibrio con ayuda del programa Aspen Hysys V10, el cual se trabajó con el modelo termodinámico UNIQUAC, especificando un modelo de vapor Virial y se interpoló para cada punto:

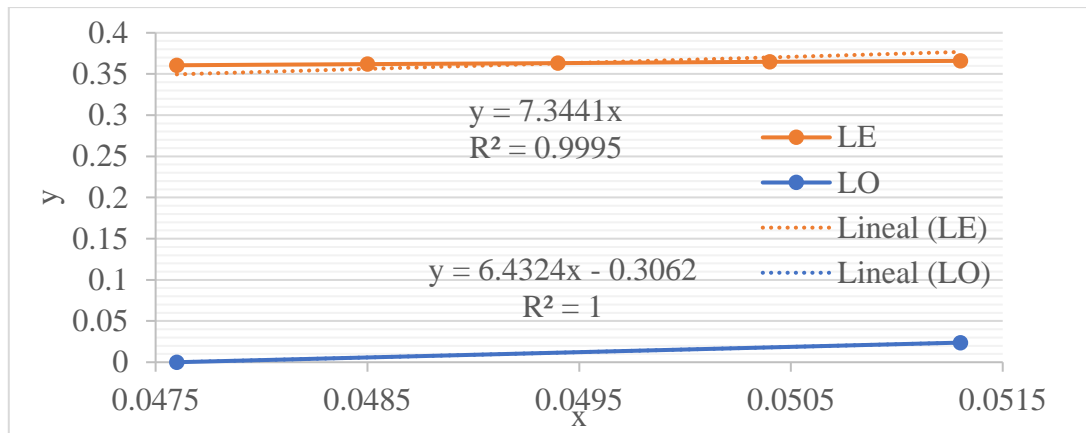
**Tabla 3-13.** Puntos para la curva de equilibrio

$x$	T (°C)	$y_E$
0.0513	39.1	0.3659
0.0504	36.7	0.3648
0.0494	34.3	0.3632
0.0485	31.9	0.3620
0.0476	29.5	0.3606

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

Una vez conocidos los valores “x” vs. “y” de las curvas de operación y de equilibrio, se grafican juntas, adaptando la curva de equilibrio para una recta con ordenada en el origen:

**Figura 3-9.** Curva de operación y curva de equilibrio



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.3.3. Determinación de los coeficientes de transferencia de masa

#### 3.3.3.1. Coeficiente global de transferencia de masa referido al líquido

Dado que en la torre piloto se conocen sus dimensiones, flujos molares, gradientes de concentración y las curvas de operación y equilibrio, además de tratarse un sistema en régimen diluido, se pudo emplear como ecuación de diseño el balance de masa diferencial planteado por McCabe et al.:

$$Z = \frac{L/S}{K_x a} * \frac{(x_o - x_f)}{\Delta x_{ML}}$$

Donde:

Z = Altura total de la torre.

L = Flujo molar de la corriente líquida.

$K_x a$  = Coeficiente global de transferencia de masa con referencia al líquido.

$x_o$  = Fracción molar de alcohol en corriente líquida en el tope de la torre.

$x_f$  = Fracción molar de alcohol en corriente líquida en el fondo de la torre.

$\Delta x_{ML}$  = Diferencia de fracción molar media logarítmica.

Como primer paso, se proyectan los valores de “y” conocidos en la curva de operación sobre la curva de equilibrio y se determinan los valores de “x” en la curva de equilibrio:

$$y^* = 7.3441x^*$$

Para:  $y=0$

$$x^* = 0/7.3441 = 0$$

Para:  $y=0.0239$

$$x^* = 0.0238/7.3441 = 0.0032$$

Luego, se calcula  $\Delta x_{ML}$  a partir de las proyecciones calculadas y los valores de x en la curva de operación:

$$\Delta x_{ML} = \frac{(0.0513 - 0.0032) - (0.0476 - 0)}{\ln\left(\frac{0.0513 - 0.0032}{0.0476 - 0}\right)} = 0.0478$$

Finalmente, se reordena la ecuación de diseño y se reemplazan todas las variables conocidas:

$$K_{xa} = \frac{L}{S * Z} * \frac{(x_o - x_f)}{\Delta x_{ML}}$$

$$K_{xa} = \frac{89.047 \text{ mol/min}}{\frac{\pi}{4} * (0.10395 \text{ m})^2 * 0.4 \text{ m}} * \frac{(0.0513 - 0.0476)}{0.0478} = 2030.850 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}$$

### 3.3.3.2. Coeficiente global de transferencia de masa referido al gas

Se determinó de forma análoga al coeficiente global de transferencia de masa referido al líquido, en este caso se trabaja con las proyecciones en el eje y en la curva de equilibrio para los valores conocidos de x en la curva de operación.

Para:  $x=0.0476$

$$y^* = 7.3441 * 0.0476 = 0.3496$$

Para:  $x=0.0513$

$$y^* = 7.3441 * 0.0513 = 0.3768$$

Luego, se calcula  $\Delta y_{ML}$

$$\Delta y_{ML} = \frac{(0.3768 - 0.0238) - (0.3496 - 0)}{\ln\left(\frac{0.3768 - 0.0238}{0.3496 - 0}\right)} = 0.3513$$

Finalmente, se reemplaza en la ecuación de diseño análoga:

$$K_{ya} = \frac{13.861 \text{ mol/min}}{\frac{\pi}{4} * (0.10395 \text{ m})^2 * 0.4 \text{ m}} * \frac{(0.0238 - 0)}{0.3513} = 276.627 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}$$

### 3.3.3.3. Coeficientes individuales y resistencias a la transferencia de masa

Dado que el ajuste de la curva de equilibrio es del tipo lineal con ordenada en el origen y conociendo los valores de los coeficientes globales de transferencia, fue posible estimar mediante aproximación los valores de los coeficientes individuales de transferencia de masa con ayuda de la herramienta “Solver” dentro del programa “Excel”.

Dicha herramienta trabajó con el método GRG Nonlinear, donde se buscó minimizar la diferencia entre los valores estimados de la suma de las resistencias de transferencia de masa y la resistencia global para cada corriente.

Los resultados obtenidos fueron:

**Tabla 3-14.** Coeficientes individuales de transferencia y resistencias a la transferencia de masa

$k_x a \left( \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3} \right)$	2852.280
$k_y a \left( \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3} \right)$	961.394
$m/k_x a \left( \frac{\text{min} * \text{m}^3}{\text{mol}} \right)$	0.00257
$1/k_y a \left( \frac{\text{min} * \text{m}^3}{\text{mol}} \right)$	0.001040

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Las resistencias a la transferencia de masa obtenidas, indican que la película líquida es la que controla la velocidad de la transferencia de masa. Esto coincide con el hecho de que cuando el nivel de la temperatura inicial de la corriente líquida es el alto, se obtuvo mayor desorción al incrementar el nivel de la relación L/G.

### 3.3.5. Velocidad de inundación

La velocidad de inundación fue medida de forma dificultosa debido a la poca sensibilidad del tubo Pitot como instrumento de medición, sin embargo, se pudo observar un cambio marcado ante cambios en las diferencias de columna de agua en el orden de 0.5 mm.

Se tuvo que para una diferencia de alturas de columnas de agua de 0.5 mm, la torre era capaz de operar con total normalidad, mientras que para una diferencia de 1 mm, la corriente líquida era incapaz de descender, e incluso parte del líquido llegaba a ser expulsado por la tubería de salida de la corriente gaseosa.

$$V_{\text{inundación}} = \frac{Q_G}{A_t}$$

Para determinar el caudal de gas de operación y el de inundación, se usó el promedio de todas las mediciones de las corrientes gaseosas, dado que se mantienen prácticamente constantes en todos los casos. Para convertir el flujo molar en caudal, se aplica la ecuación de estado de los gases ideales:

$$Q_G = \frac{GRT_G}{P}$$

El área de la torre se determinó a partir del diámetro promedio de los tubos de vidrio, el cual es de 10.395 cm:

$$A_t = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (0.10395 \text{ m})^2 = 0.008486 \text{ m}^2$$

Siendo que todas las variables ya fueron cargadas en la hoja Excel en la ecuación, se obtuvo que el caudal promedio de gas fue:

**Tabla 3-15.** Caudal promedio de la corriente gaseosa

Tratamiento	$Q_G$ (m <sup>3</sup> /min)	G inundación (mol/L)	Q inundación (m <sup>3</sup> /min)
1.1.	0.413	19.5047	0.585
1.2.	0.413	19.5047	0.585
1.3.	0.413	19.5047	0.585
2.1.	0.409	19.7085	0.579
2.2.	0.409	19.7085	0.579
2.3.	0.413	19.5047	0.585
3.1.	0.411	19.6072	0.582
3.2.	0.411	19.5994	0.582
3.3.	0.411	19.5994	0.582
4.1.	0.411	19.6175	0.581
4.2.	0.411	19.6175	0.581
4.3.	0.411	19.6175	0.581
$\overline{Q_G}$ (m <sup>3</sup> /min)	<b>0.412</b>	<b>19.591</b>	<b>0.582</b>

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

Por lo tanto, la velocidad de operación promedio de la torre:

$$V_{\text{operación}} = \frac{0.412 \text{ m}^3/\text{min}}{0.008486 \text{ m}^2} = 48.55 \text{ m/min}$$

Mientras que la velocidad de operación promedio fue de:

$$V_{\text{inundación}} = \frac{0.582 \text{ m}^3/\text{min}}{0.008486 \text{ m}^2} = 68.58 \text{ m/min}$$

$$\%V = \frac{48.55 \text{ m/min}}{68.58 \text{ m/min}} * 100 = 70.79 \%$$

Por lo tanto, se estuvo operando dentro de un margen seguro de velocidad respecto a la velocidad de inundación.

### 3.3.6. Cálculo de altura de torre real

Para el diseño de la torre de tamaño final, se mantuvo el diámetro, dada la capacidad de crecimiento modular que posee. Para el diseño final se cambió la concentración de alcohol de la materia prima, haciéndola más concentrada, se buscó mayor porcentaje



de desorción y se asumió que el coeficiente global de transferencia de masa referida a la corriente líquida no sufre alteraciones al igual que la curva de equilibrio y que se sigue operando en régimen diluido.

La torre se diseñó en base al punto óptimo de operación del diseño factorial, fijando los siguientes parámetros:

$$x_2 = 0.0767$$

$$\% \text{Desorción} = 10 \%$$

Por lo cual la concentración de alcohol a la salida de la corriente de diseño fue de:

$$x_1 = 0.0767 * (1 - 0.1) = 0.0690$$

Según la nueva curva de operación, la concentración de alcohol en la corriente de salida gaseosa debería ser:

$$y_2 = 6.424 * (0.0767 - 0.0690) = 0.0495$$

Como primer paso se calculan las proyecciones de y conocidos en la curva de operación sobre los valores de x sobre la curva de equilibrio:

$$y^* = 7.3441x^*$$

Para:  $y=0$

$$x^* = 0/7.3441 = 0$$

Para:  $y=0.0495$

$$x^* = 0.0495/7.3441 = 0.0067$$

Luego, se calcula  $\Delta x_{ML}$  a partir de las proyecciones calculadas y los valores de x en la curva de operación:

$$\Delta x_{ML} = \frac{(0.0767 - 0.0067) - (0.069 - 0)}{\ln\left(\frac{0.0767 - 0.0067}{0.069 - 0}\right)} = 0.0695$$

Finalmente, se reemplazan los resultados obtenidos y valores conocidos para determinar la altura de torre necesaria para la desorción:

$$Z = \frac{L}{S * K_{xa}} * \frac{(x_2 - x_1)}{\Delta x_{ML}} = \frac{89.047 \frac{\text{mol}}{\text{min}}}{0.008486 \text{ m}^2 * 2030.850 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}} * \frac{(0.0767 - 0.069)}{0.0695}$$

$$Z = 0.572 \text{ m}$$

Dadas las dimensiones en las que se construyen los módulos, se redondea la altura de la torre real a unos 0.6 m, con lo cual se esperó que se alcance una desorción ligeramente mayor al 10 %.

### 3.4. Resultados observados en la torre de tamaño final

Los ensayos de la torre de tamaño real se realizaron de la misma forma en que se realizaron los ensayos del diseño factorial, manteniendo un número de tres réplicas:

**Tabla 3-16.** Historial de caudal de la corriente líquida en ensayos finales

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>
<b>Q<sub>L</sub> (L/min)</b>	1.891	1.891	1.818
	1.891	1.891	1.891
	1.891	1.891	1.818
	1.818	1.818	1.818
	1.818	1.964	1.891
	1.818	1.891	1.818
	1.818	1.818	1.818
	1.745	1.891	1.818
	1.818	1.891	1.745
	1.818	1.891	1.818
	1.745	1.891	1.818
	1.745	1.891	1.818
	1.818	1.891	1.745
	1.745	1.818	1.818
	1.745	1.891	1.818
	1.745	1.818	1.818
	1.818	1.818	1.745
	1.745	1.891	1.818
	1.745	1.818	1.745
	1.745	1.818	1.818
1.745	1.818	1.745	
<b>Q<sub>L</sub> (L/min)</b>	<b>1.794</b>	<b>1.867</b>	<b>1.808</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 3-17.** Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría finales

Prueba	mt (g)	Densidad (g/mL)	%V/V	m Etanol (g)	m Agua (g)	Xa	Xa Promedio
MPF	9.681	0.9681	21.5	17.5447	82.4553	0.0769	0.0767
	9.716	0.9716	21.5	17.4815	82.5185	0.0766	
	9.695	0.9695	21.5	17.5193	82.4807	0.0767	
P1	9.672	0.9672	19.5	15.9274	84.0726	0.0690	0.0690
	9.663	0.9663	19.5	15.9423	84.0577	0.0691	
	9.686	0.9686	19.5	15.9044	84.0956	0.0689	
P2	9.694	0.9694	19.5	15.8913	84.1087	0.0688	0.0688
	9.707	0.9707	19.5	15.8700	84.1300	0.0687	
	9.697	0.9697	19.5	15.8864	84.1136	0.0688	
P3	9.692	0.9692	19.5	15.8946	84.1054	0.0689	0.0688
	9.695	0.9695	19.5	15.8896	84.1104	0.0688	
	9.706	0.9706	19.5	15.8716	84.1284	0.0687	

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

**Tabla 3-18.** Variables observadas en los ensayos finales

Medición	P1	P2	P3	Promedio
$Q_L$ (L/min)	1.794	1.867	1.808	1.823
$T_{L1}$ (°C)	39.1	39.1	38.5	38.9
$T_{L2}$ (°C)	30.2	29.6	30.8	30.2
$T_G$ (°C)	26.2	26.2	26.7	26.4
L (mol/min)	86.330	89.843	86.999	87.724
G (mol/min)	13.833	13.833	13.824	13.830
L/G	6.241	6.495	6.293	6.343
%Desorción	10.055	10.319	10.302	10.225

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar una gran similitud entre el porcentaje de desorción observado y el de diseño pese al ligero cambio en la altura real de la torre. Esto es indicador de que las suposiciones y simplificaciones en los cálculos del diseño de la torre son válidas y no generan mucho error.

### 3.5. Cálculo de error en el diseño y correcciones del modelo

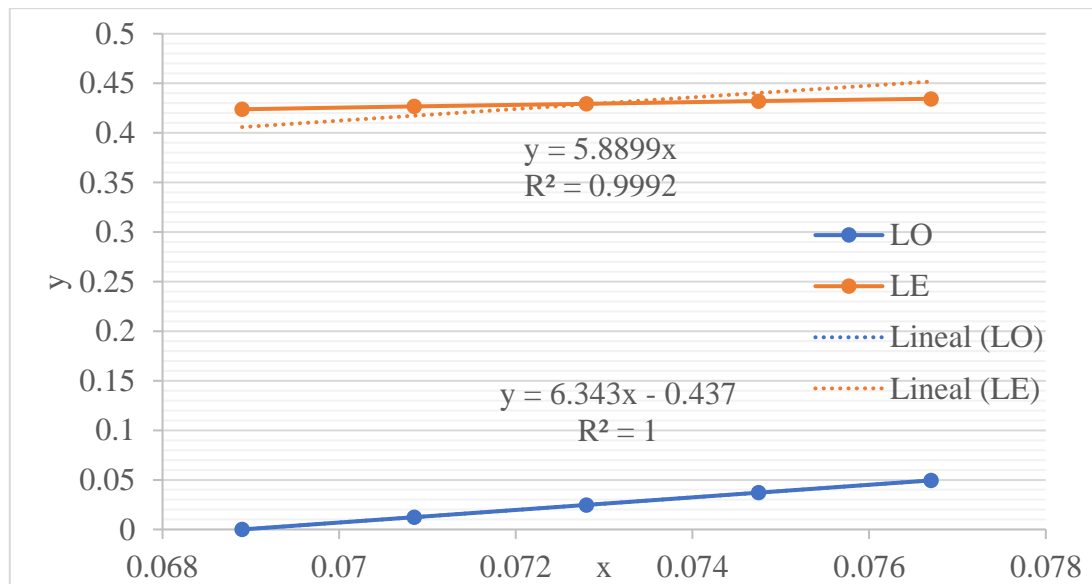
Para determinar el error del modelo obtenido para el diseño de la torre, se compara la altura real utilizada con la altura que debería ser necesaria una vez conocidos los perfiles de concentración en la torre real, y trabajando con la curva de equilibrio y relación L/G reales. Para la construcción de las curvas de operación y de equilibrio, se trabajó de igual forma que en el diseño factorial:

**Tabla 3-19.** Valores x vs. y para las curvas de operación y de equilibrio reales

Parámetros		LO	LE
T	x	y	y
38.9	0.0767	0	0.4344
36.7	0.0748	0.0124	0.4321
34.6	0.0728	0.0247	0.4293
32.4	0.0709	0.0371	0.4267
30.2	0.0689	0.0495	0.4238

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 3-10.** Curvas de operación y de equilibrio en ensayos finales



**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Debido al cambio de pendiente en la curva de equilibrio, el coeficiente global de transferencia también sufrió un cambio, sin embargo, se asumió que los coeficientes

individuales de transferencia no lo hicieron debido a la poca diferencia entre la medición real de la relación L/G y la planteada para el diseño.

Para esta labor, se empleó la ecuación de resistencias de transferencia de masa con el coeficiente global de transferencia referida a la corriente líquida:

$$\frac{1}{K_{xa}} = \frac{1}{k_{xa}} + \frac{1}{mk_{ya}} = \frac{1}{2852.280 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}} + \frac{1}{5.8899 * 961.394 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}}$$

$$\frac{1}{K_{xa}} = 5.272 \times 10^{-4} \frac{\text{min} * \text{m}^3}{\text{mol}} \rightarrow K_{xa} = 1896.813 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}$$

Luego, este resultado se comparó con el que se obtiene de la ecuación de diseño, ahora que se conoce la altura final de la torre y los perfiles reales de concentración.

Como primer paso, se proyectan los valores de “y” conocidos en la curva de operación sobre la curva de equilibrio y se determinan los valores de “x” en la curva de equilibrio:

$$y^* = 5.8899x^*$$

Para:  $y=0$

$$x^* = 0/5.8899 = 0$$

Para:  $y=0.0495$

$$x^* = 0.0495/5.8899 = 0.0084$$

Luego, se calcula  $\Delta x_{ML}$  a partir de las proyecciones calculadas y los valores de x en la curva de operación:

$$\Delta x_{ML} = \frac{(0.0767 - 0.0084) - (0.0689 - 0)}{\ln\left(\frac{0.0767 - 0.0084}{0.0689 - 0}\right)} = 0.0686$$

Finalmente, se reordena la ecuación de diseño y se reemplazan todas las variables conocidas:

$$K_{xa} = \frac{L}{S * Z} * \frac{x_2 - x_1}{\Delta x_{ML}}$$

$$K_{xa} = \frac{87.724 \text{ mol/min}}{0.008486 \text{ m}^2 * 0.6 \text{ m}} * \frac{(0.0767 - 0.0689)}{0.0686} = 1959.001 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}$$

Por lo tanto, la diferencia o error entre el coeficiente global de transferencia real y el modelado luego del reajuste es de:

$$\%Error = \frac{1959.001 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3} - 1894.813 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}}{1959.001 \frac{\text{mol}}{\text{min} * \text{m}^3}} * 100 = 3.174 \%$$

### 3.6. Análisis económico

El análisis económico se subdivide en 6 presupuestos que sirvieron para la construcción de aspectos específicos de la torre de desorción rellena en las etapas de armado de prototipos hasta llegar al diseño definitivo, en los cuales se distinguen: presupuesto para ítems que forman el cuerpo y relleno de la torre, servicios solicitados, ítems que forman la estructura de soporte, insumos para la construcción y operación de la torre, ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida, y finalmente, ítems para el sistema de control, sensores e instrumentos.

**Tabla 3-20.** Servicios solicitados

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Envío de tubos de vidrio	Transporte	25	3	75
Plastificado de papel milimetrado	Servicio	15	2	30
Honorarios de tornero	Servicio	100	1	100
Mano de obra	Servicio	5400	1	5400
<b>Subtotal</b>				<b>5605</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 3-21.** Ítems para el sistema de control, sensores e instrumentos

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Placa Arduino UNO	Pieza	75	1	75
Sensor de fluido FS300A	Instrumento	50	1	50
Sensor de Temperatura y Humedad DHT11	Instrumento	13	1	13
Manómetro digital	Instrumento	200	1	200
Manómetro analógico	Instrumento	60	1	60
Caja térmica eléctrica	Pieza	60	1	60
Termómetro digital	Instrumento	180	1	180
Cable de impresora	Pieza	50	2	100
Papel milimetrado	Pieza	1	2	2
Abrazadera	Pieza	7	4	28
Manguera transparente	Metro	5	1.5	7.5
Acople para el manómetro de 1/2"	Pieza	35	1	35
Conector espiga 1/2" macho para manguera	Pieza	8	4	32
Tubería de PVC para instalación eléctrica	Metro	2.5	4	10
Codo de PVC para instalación eléctrica	Pieza	1.5	2	3
Cable	Metro	1	15	15
Tubo corrugado	Metro	2	5	10
Cable para placa Arduino	Pieza	2	10	20
<b>Subtotal</b>				<b>900.5</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 3-22.** Insumos para la construcción y operación de la torre

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Cuchillas para estilete	Paquete de 10 unidades	5	1	5
Carbón activado granulado	Kilogramo	50	1	50
Alcohol 96 %	Litro	10	100	1000
Cinta teflón	Cajas de 12 unidades	15	2	30
Cinta aislante	Paquete de 10 unidades	70	1	70
Broca de 2 mm	Pieza	7	1	7
Porta silicona	Pieza	15	1	15
Silicona Sika multiuso transparente	Pieza	25	10	250
Pegamento epóxico bicomponente Sika	Pieza	200	1	200
Poxipol	Pieza	20	2	40
Lata de pintura verde en spray	Pieza	14	2	28
Lata de pintura negra en spray	Pieza	14	4	56
Lata de pintura blanca en spray	Pieza	14	1	14
Lata de pintura amarilla anticorrosiva en spray	Pieza	20	2	40
Precintos plásticos de 200x3.5mm	Bolsa	25	1	25
Precintos plásticos de 100x2.5 mm	Bolsa	15	1	15
Espátulas	Set de 6 unidades	50	1	50
Lata de pintura amarilla	Pieza	35	1	35
Lata de pintura negra	Pieza	35	1	35
Cemento para PVC	Pieza	15	1	15
Thinner	Litro	16	5	80
Gasolina	Litro	3.74	13.369	50
<b>Subtotal</b>				<b>2110</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).



**Tabla 3-23.** Ítems que forman el cuerpo y relleno de la torre

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Canicas	Caja	550	1	550
Ducha eléctrica	Pieza	60	2	120
Tubos de vidrio	Pieza	300	10	3000
Placa de acero inoxidable 304	Pieza	200	1	200
Tee de PVC de 4"	Pieza	195	2	390
Reducción 4"x3"	Pieza	57	3	171
Reducción 3"x2"	Pieza	25	3	75
Reducción 2"x1"	Pieza	10	3	30
Reducción 1"x1/2"	Pieza	3	4	12
Adaptador macho de 4" de PVC	Pieza	10	58	580
Niple de PVC de 4"	Pieza	42	3	126
Cupla de PVC de 4"	Pieza	43	3	129
Tapón de PVC de 4"	Pieza	46	2	92
<b>Subtotal</b>				<b>5475</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Tabla 3.24.** Ítems que forman la estructura de soporte

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Tuercas mariposa	Pieza	3	10	30
Tubos de acero inoxidable 30x20 mm	Pieza	80	12	960
Barras de acero de 7.8 mm	Pieza	25	1	25
Tornillo sinfín	Pieza	25	2	50
<b>Subtotal</b>				<b>1065</b>

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

**Tabla 3-25.** Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 1

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Manguera tejida 1/2"	Metro	10	3	30
Soplador	Pieza	300	1	300
Tubo de PVC de 2"	Metro	16	4	64
Válvula de paso de PVC de 1/2"	Pieza	14	1	14
Tee de PVC de 1/2"	Pieza	10	2.5	25
Codo de PVC de 1/2"	Pieza	5	1.5	7.5
Unión universal de PVC de 1/2"	Pieza	4	5	20
Tee de PVC de 2"	Pieza	20	3	60
<b>Subtotal</b>				<b>520.5</b>

**Fuente: Elaboración propia (2024).**

**Tabla 3-26.** Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 2

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Reducción 2"x1/2" de PVC	Pieza	10	3	30
Tubería de PVC de 1/2"	Metro	6	3	18
Adaptador macho de 2" de PVC	Pieza	10	6	60
Niples de PVC de 1/2"	Pieza	12	1.5	18
Cuplas de PVC de 1/2"	Pieza	12	1.5	18
Válvula de paso de PVC de 2"	Pieza	55	1	55
Reducción de PVC de 3/4"x1/2"	Pieza	2	1	2
Grifo metálico 1/2"	Pieza	27	1	27
Válvula de retención de 1/2"	Pieza	40	2	80
Cupla de PVC de 2"	Pieza	15	1	15
Codo reductor de PVC de 3/4"x1/2"	Pieza	2	1	2
Válvula de bola metálica 1/2"	Pieza	30	2	60
Unión universal de PVC de 2"	Pieza	30	1	30
Niple de PVC de 2"	Pieza	10	1	10
Bridas de PVC de 1/2"	Pieza	10	2	20
Tacho de plástico de 30 L	Pieza	55	1	55
<b>Subtotal</b>				<b>500</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Finalmente, se armó el presupuesto global:

**Tabla 3-27.** Presupuesto global

<b>Apartado</b>	<b>Subtotal (Bs.)</b>
Servicios solicitados	5605
Ítems para el sistema de control, sensores e instrumentos	900.5
Insumos para la construcción y operación de la torre	2110
Ítems que forman el cuerpo y relleno de la torre	5475
Ítems que forman la estructura de soporte	1065
Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 1	520.5
Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 2	500
<b>Total</b>	<b>16176</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.6.1. Presupuesto de costos de mantenimiento de la torre

Dado que el equipo operará en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias en la UAJMS, se vio necesario plantear un presupuesto para el mantenimiento de la torre estimativo con el fin de preservar la integridad del equipo.

Dicho presupuesto prevé el reemplazo de las piezas más susceptibles a dañarse con el tiempo y que sean más fáciles de instalar. El presupuesto planteado está pensado para un lapso de 5 años, donde se debe verificar el estado de las piezas presentadas a continuación:

**Tabla 3-28.** Costos estimados de mantenimiento

Ítem	Unidad	Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
Envío de tubos de vidrio	Transporte	25	2	50
Honorarios de tornero	Servicio	100	2	200
Plastificado de papel milimetrado	Servicio	15	2	30
Placa Arduino UNO	Pieza	75	1	75
Sensor de fluido FS300A	Instrumento	50	1	50
Sensor de Temperatura y Humedad DHT11	Instrumento	13	1	13
Papel milimetrado	Pieza	1	2	2
Abrazadera	Pieza	7	4	28
Manguera transparente	Metro	5	3	15
Cable de impresora	Pieza	50	1	50
Cable	Metro	1	15	15
Tubo corrugado	Metro	2	5	10
Cable para placa Arduino	Pieza	2	10	20
Cinta teflón	Cajas de 12 unidades	15	2	30
Lata de pintura verde en spray	Pieza	14	2	28
Lata de pintura negra en spray	Pieza	14	4	56
Lata de pintura blanca en spray	Pieza	14	1	14
Lata de pintura amarilla anticorrosiva en spray	Pieza	20	2	40
Canicas	Caja	100	1	100
Tubos de vidrio	Pieza	300	2	600
<b>Total</b>				<b>1426</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

### 3.6.2. Comparación de precios con trabajos similares

Para contar con una comparación de precios del proyecto presente, se investigó trabajos similares en diferentes universidades. La tesis de grado más parecida encontrada fue “Diseño y construcción de una torre de absorción para el análisis de SO<sub>2</sub> en gases de combustión” (Bósquez y Yumi, 2011) de la escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Ecuador.

En dicho proyecto, los autores construyeron una torre de 1.31 m de alto, 0.3 m de diámetro, una altura de relleno de 0.87 m y un presupuesto final de 2187 US\$, el cual sería convertido a bolivianos según el cambio oficial promedio a la fecha de la publicación del presente trabajo:

$$16176 \text{ Bs.} \left( \frac{1 \text{ US\$}}{6.96 \text{ Bs.}} \right) = 2324.14 \text{ US\$}$$

Se debe tomar en cuenta la devaluación de la moneda, y que en el proyecto de referencia no se empleó una gran cantidad de vidrio que es más susceptible a romperse, pero sí acero inoxidable AISI 304. También se puede apreciar que no existe una gran diferencia entre ambos costos totales.

**CAPÍTULO IV:**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4.1. Conclusiones

-Se caracterizó la materia prima empleada en cada prueba mediante ensayos meticulosos de alcoholimetría y densimetría; para el diseño factorial, se presentó el problema de que al calentar la mezcla, parte del alcohol era evaporado, por lo cual se trató de mantener entre una concentración molar del 4.77 % al 5.71 %. No se vio necesario caracterizar el aire que ingresó al equipo, debido a que fue aire comprimido extraído del ambiente. Por otro lado, el ensayo con el tamaño real de la torre se realizó en base a que el propósito de realizar un prototipo es poder escalar tanto el equipo como los procesos que se desarrollarán en él, por lo cual se aumentó la concentración molar de la materia prima en los ensayos finales a 7.67 %, previendo que el aumento planteado no sea demasiado exagerado al no poseer una ecuación para los coeficientes de transferencia de masa para diferentes flujos de las corrientes gaseosa y líquida.

-Se caracterizó la corriente líquida resultante en cada prueba mediante ensayos de alcoholimetría y densimetría, para el diseño factorial se vieron concentraciones molares de salida variadas de entre 4.58 % y 5.53 %. Por otro lado, en los ensayos con la torre de tamaño final, se observó una concentración molar de salida del 6.89 %, lo cual se traduce en una desorción del 10.225 %.

-Se construyó la torre escala exitosamente con un sistema modular que almacena el relleno (esferas de vidrio de 1.127 cm de diámetro) con acoples en base a roscas, esto permitiendo operar con distintas alturas en trabajos futuros; cada módulo posee una altura de relleno de 20 cm y un diámetro de 10.395 cm, siendo que para la torre piloto se usaron dos módulos. También se construyeron elementos externos importantes como los sistemas de alimentación y salida de gases y líquidos, un sistema de soporte que asegure la estabilidad del equipo y un sistema control con instrumentos de medición y sensores Arduino.

-Se diseñó y construyó la torre de tamaño real en base a los resultados de un balance diferencial de masa que indicaron que para una desorción del 10 % en una torre con el diámetro definido en 10.395 cm, se necesitarían 57.2 cm. Con fines prácticos se vio



por conveniente redondear la altura necesaria a 60 cm, lo cual se traduce en la construcción de un módulo extra.

-Se experimentó el comportamiento de la corriente de aire y solución alcohólica que ingresaron en la torre mediante un diseño factorial del tipo  $2^2$ , donde se tomaron como variables independientes la relación L/G (niveles: 6.452 y 3.666) y la temperatura a la que ingresa la corriente líquida (niveles: 30.9 °C y 39.2 °C), también se tomó como variable dependiente el porcentaje de alcohol desorbido. Siendo la forma de alcanzar cada nivel el calentamiento del líquido antes del proceso y la regulación del caudal de líquido mediante válvulas. Se determinó que la velocidad de inundación de la torre con el relleno usado es de 70.59 m/min y se operó en el margen de seguridad recomendado del 70 % de ésta, es decir, a 49.96 m/min.

-Se determinó el punto óptimo de la torre en el tratamiento que combina el nivel alto de la temperatura a la que ingresa el líquido y el nivel alto de la relación L/G donde se consigue una desorción del 7.139 %. En base a esta información y los resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría, se pudo obtener las curvas de equilibrio y de operación de la torre, las cuales permitieron determinar los coeficientes de transferencia de masa globales e individuales; el posterior análisis de dichos coeficientes indicó que la fase que ofrece mayor resistencia a la transferencia de masa es la líquida, por lo que trabajó el diseño en base al coeficiente global de transferencia de masa referida a la fase líquida, siendo el valor de esta:  $K_x a = 2030.850 \text{ mol}/(\text{min} * \text{m}^3)$ .

-Hubo un rendimiento prácticamente perfecto entre los resultados observados y el modelo ajustado planteado, siendo el error cometido del 3.174 %. El presupuesto empleado durante el desarrollo del equipo final fue de 16176 Bs (2324.14 US\$), que comparado con otro proyecto similar desarrollado en Ecuador en la gestión 2011 que tuvo un costo total de 2187 US\$, indica que los recursos monetarios fueron empleados adecuadamente.

-Se analizó y discutió los resultados observados, donde se puede apreciar que estos son muy próximos a los estimados pese a los cambios a los perfiles de concentración y temperatura en los ensayos finales, lo cual demuestra robustez en el modelo planteado.

## 4.2. Recomendaciones

-Se recomienda a futuros tesisistas que participen en proyectos similares, esto debido al dinamismo que existe en éstos, aplicando diferentes aspectos ingenieriles que son aprendidos a lo largo de la carrera, desde las materias más básicas hasta las cursadas en su final.

-Es importante el incentivo a este tipo de proyectos por parte de docentes y autoridades de la Universidad, dado que, dependiendo del tema escogido y tamaño final planteado, el presupuesto necesario puede llegar a ser una limitante; sin embargo, esto enriquece las instalaciones de la Universidad, además que los estudiantes realizan estos equipos a un precio menor del habitual y refuerzan sus conocimientos adquiridos.

-Se aconseja el constante uso del equipo en la Universidad con fines tanto investigativos como educativos, aprovechando que a nivel Bolivia casi ninguna otra universidad cuenta con este equipo.

-Es importante que futuros tesisistas continúen el trabajo mediante la optimización del equipo, ya sea adquiriendo un relleno de mejor calidad o construyendo otros equipos que completen un proceso más elaborado de absorción/desorción.

-Se debe leer minuciosamente el manual de operador previo al uso del equipo, esto con la finalidad de evitar cualquier tipo de accidente como el rompimiento violento de las piezas de vidrio al operar a una presión manométrica mayor a 0.5 bar.

-Se aconseja reemplazar las piezas de vidrio por tuberías de PVC de 4", en caso de que se deba operar a presiones mayores a 0.5 bar.

-Se recomienda al LOU, adquirir un banco de manómetros de diferentes rangos de medición, para facilitar la medición de presión de la corriente gaseosa que ingresa en la torre.