

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SUPERFICIE  
AMPLIADA EN UNA PLANTA DE DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO EN  
GUATEMALA**

IAN JACOBO LISKA PAIZ

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

2006



**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SUPERFICIE  
AMPLIADA EN UNA PLANTA DE DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO EN  
GUATEMALA**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

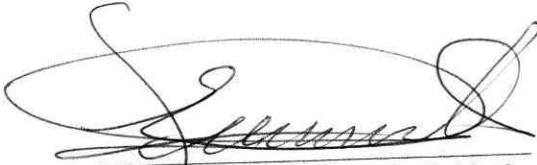
**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SUPERFICIE  
AMPLIADA EN UNA PLANTA DE DISOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO EN  
GUATEMALA**

Trabajo de graduación presentado por Ian Jacobo Liska Paiz  
para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

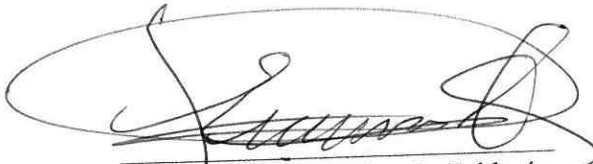
Guatemala  
2006

Asesor:

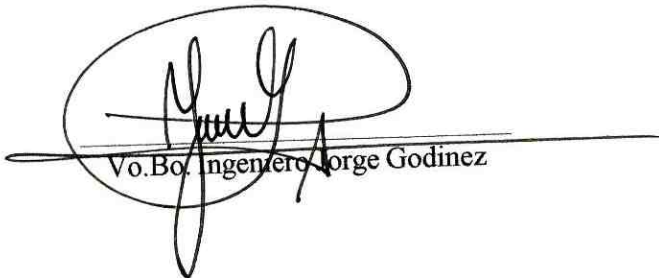


Vo. Bo. Ingeniero Eduardo Calderón

Terna:



Vo. Bo. Ingeniero Eduardo Calderón



Vo. Bo. Ingeniero Jorge Godínez



Vo. Bo. Ingeniero Edgar Maaz

## PREFACIO

Este trabajo pretende brindar al lector un ejemplo de cómo en algunos casos, las limitaciones y obstáculos que se presentan en la industria, pueden transformarse en aspectos positivos, y volverse ventajas que beneficien el funcionamiento de un proceso. La forma en que se enfrenta y soluciona un problema puede convertirse en una ventaja competitiva frente a empresas que se dedican a actividades similares.

El buen uso de la energía disponible juega un papel muy importante en la productividad de una empresa. El mal uso de los recursos, tanto energéticos como físicos, tiene un efecto negativo tanto al medio ambiente como a los costos de operación de una actividad productiva. Es importante reducir la cantidad de desechos y de ser posible integrar procesos a manera de aumentar la productividad de una organización.

En este trabajo se estudió a una pequeña empresa que se dedica a la disolución del ácido sulfúrico para la fabricación de baterías de carro. El proceso que se lleva a cabo actualmente en esa empresa es tardado ya que la energía liberada por el proceso no se aprovecha, por lo que se analizó la posibilidad de un intercambiador de calor que capture esta energía, que de otra manera sería desechada, y utilizarla en el subproceso de lavado de botellas.

Quisiera darle un profundo agradecimiento a mis padres, sin cuyo apoyo este trabajo no existiría, y a mi familia y amigos que me inspiran para seguir adelante. También quiero agradecer a todos los profesores de la Universidad que a través de los años me han dado las herramientas necesarias para hacer un análisis de este tipo.

## RESUMEN

En este trabajo se realizó el diseño de un intercambiador de superficie ampliada modificado para aprovechar la energía que se libera en el proceso de disolución del ácido sulfúrico concentrado. Para lograr diseñar dicho intercambiador, se determinaron las velocidades de flujo de masa de ácido sulfúrico concentrado al 99.99 % de 14.7 g/s, y de agua de 27.3 g/s, necesarios para obtener una velocidad de flujo de masa de 42 g/s (2.0 L/min) de una solución de ácido sulfúrico al 35 %. Luego se fijó la velocidad del flujo de masa de agua de enfriamiento, cuya temperatura a la salida debe ser de 65 °C destinado al lavado de botellas que fue de 16.51 g/s (1 L/min), con esta modificación al proceso se logra ahorrar desde 1,458.00 quetzales anuales en la factura de gas, con lo que la inversión necesaria para realizar todas las modificaciones del proceso se recuperan a la segunda semana del tercer mes de operación del intercambiador de calor de superficie ampliada.

Se determinó que el coeficiente de transferencia de calor por convección para el caudal de agua de enfriamiento fue de  $9,872.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . En el estado estable los resultados obtenidos muestran que la longitud del conducto en la estructura de cobre (de 0.004 m de diámetro) del intercambiador de calor debe ser de 1.75 metros aproximadamente para calentar el caudal de agua de lavado (1 L/min) de 23 °C a 65 °C.

## ABSTRACT

In this document the design of a heat exchanger of extended surface was made to take advantage of the energy that is released in the dilution process of concentrated Sulfuric Acid. To achieve this design, the speed of the mass flows which take part in the process had to be determined, the concentrated Sulfuric Acid (99.99 %) at a speed of 14.7 g/s, the water mass flow for the dilution at a speed of 27.3 g/s, needed to obtain a speed of mass flow of 42 g/s (2.0 L/min) of a solution of diluted Sulfuric Acid (35 %). Then the speed of mass flow of the cooling water was determined, being 16.51 g/s, which exits the heat exchanger at a temperature of 65 °C. With the implementation of this heat exchanger savings from 1,515 Quetzales can be attained annually in propane gas consumption, and the investment required to make all the necessary modifications to the process is recovered in the first week of the third month of operation of the heat exchanger.

It was determined that the convection coefficient for the flow of cooling water was 9,872.1 W/m<sup>2</sup> K. And that in the thermal equilibrium state the results show that the conduct inside the copper structure (of 0.004 m diameter) of the heat exchanger has to be 1.75 m long in order to heat the cooling water flow from 23 °C to 65 °C.

# ÍNDICE

PREFACIO.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE DIAGRAMAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES .....	2
A. Propiedades químicas del Ácido Sulfúrico.....	2
1. Entalpía vrs. concentración de soluciones de Ácido Sulfúrico.....	3
2. Proceso de disolución del Ácido Sulfúrico.....	3
B. Intercambio de calor	
1. Intercambio de calor por conducción.....	4
2. Intercambio de calor por convección.....	5
3. Intercambio de calor en aletas.....	10
a. Eficiencia de las aletas.....	11
C. Procesos tipo-lote y procesos continuos.....	11
III. JUSTIFICACIÓN .....	13
IV. OBJETIVOS .....	14
A. Objetivo general .....	14
B. Objetivos específicos.....	14
V. PROBLEMA A RESOLVER .....	15
VI. METODOLOGÍA.....	16
VII. RESULTADOS .....	17
VIII. DISCUSIÓN .....	20
IX. CONCLUSIONES.....	23
X. RECOMENDACIÓN.....	24
XI. BIBLIOGRAFÍA .....	25

XII. APÉNDICE.....	26
Apéndice A: Cálculos de muestra.....	27
Apéndice B: Estudio de factibilidad económico.....	31
Apéndice C: Diagrama de flujo.....	33
Apéndice D: Diagramas de equipo.....	34
Apéndice E: Propiedades del agua contra temperatura .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1; Densidades de soluciones acuosas de Ácido Sulfúrico .....	2
Tabla No. 2; Calor específico de de soluciones acuosas de Ácido Sulfúrico.....	2

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama No.1; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto desde arriba.....	17
Diagrama No.2; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto desde enfrente.....	18
Diagrama No.3; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto en tercera dimensión.....	18
Diagrama No.4; Diagrama de flujo del proceso de disolución .....	33
Diagrama No.5; Diagramas del equipo de los procesos de disolución.....	34

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica No.1; Densidad del agua contra temperatura .....	35
Gráfica No.2; Viscosidad del agua contra temperatura .....	35
Gráfica No.3; Calor específico del agua contra temperatura.....	36
Gráfica No.4; Conductancia del agua contra temperatura.....	36

# I. INTRODUCCIÓN

En una planta de fabricación de Ácido Sulfúrico para baterías, en la etapa de disolución del Ácido Sulfúrico concentrado, se libera energía térmica debido al cambio de entalpía que ocurre. Esta energía que se libera puede ser un problema si no se hace la disolución con la debida precaución. Al observar el proceso de disolución del ácido en dicha planta, se observó que la energía que se libera en el proceso, limita la velocidad a la que se lleva a cabo dicha etapa. En cambio si esta disolución se realiza en un intercambiador de superficie ampliada, esta energía liberada se vuelve ventajosa debido a que la situación que anteriormente era limitante, ahora permite el aprovechamiento de la energía térmica liberada por una violenta disolución de Ácido Sulfúrico. Esta energía térmica se utilizará para el calentamiento de una solución de lavado, lo que hará que el proceso de disolución de Ácido Sulfúrico sea más rápido y se lleve a cabo, de manera más eficiente.

En este trabajo, se diseñó un intercambiador de calor de superficie ampliada modificado hecho de plomo y cobre, en donde se propone se lleve a cabo la disolución del ácido sulfúrico concentrado, y el calor liberado, será utilizado para el calentamiento de una solución destinada al lavado de botellas. Para lograr esto se calcularon las condiciones en las que se debe llevar a cabo la disolución. También se realizaron pruebas a nivel de laboratorio para comprobar los cálculos teóricos realizados a las condiciones deseadas. Finalmente, se llevó a cabo un estudio económico en el cual se determinaron las ventajas que la implementación de este intercambiador de calor presenta, además de propiciar un proceso mas seguro para los operarios que trabajan en la planta.

## II. ANTECEDENTES

### A. Propiedades del ácido sulfúrico

El Ácido Sulfúrico concentrado es un líquido incoloro, inodoro, denso y viscoso. Este ácido es soluble en todas las proporciones en agua, libera una gran cantidad de calor en el proceso de disolución. Es un ácido fuerte y corrosivo. Posee un punto de ebullición alto. Es un agente oxidante suave. Concentrado y en caliente disuelve al cobre.

Peso molecular: 98.08 g/mol

Apariencia: líquido incoloro viscoso.

Gravedad específica: 1.834

Punto de fusión: 10.49 °C

Punto de ebullición: 340 °C

Solubilidad en agua fría y caliente: Soluble a todas proporciones.

Tabla No. 1; Densidades en gramos por mililitro de soluciones acuosas de Ácido Sulfúrico:

% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20 °C	60 °C	80 °C
20	1.1394	1.1153	1.1021
35	1.2599	1.2311	1.2169
50	1.3951	1.3644	1.3494
85	1.7786	1.7364	1.7161
95	1.8337	1.7944	
100	1.8305	1.7922	

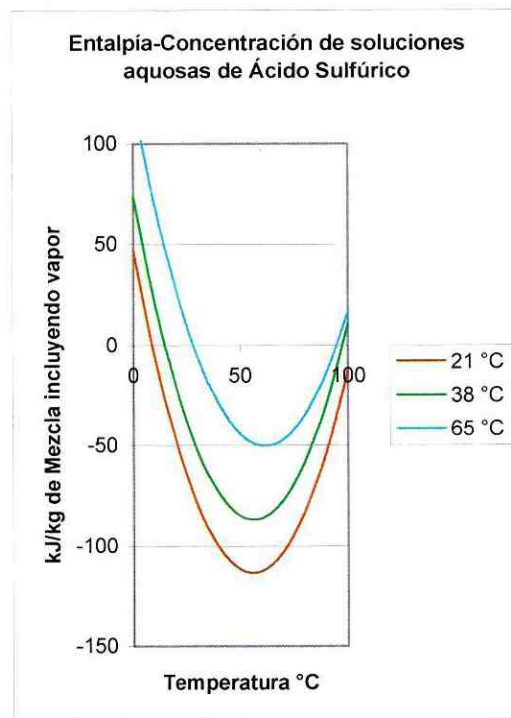
Tabla No. 2; Calor específico de soluciones acuosas de ácido sulfúrico:

% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C <sub>p</sub> a 20 °C cal/g °C	C <sub>p</sub> a 20 °C J/kg °C
5.16	0,9549	3995,23
22.27	0,8275	3462,20
30.34	0,7647	3199,45
35.25	0,7238	3028,33
52.13	0,5801	2427,10
81.33	0,4481	1874,82
91.81	0,3787	1584,45
100	0,3352	1402,45

(Perry y Green, 1997, p 2-185).

1. Entalpía contra concentración de soluciones de Ácido Sulfúrico. Al llevar a cabo la disolución de Ácido Sulfúrico concentrado la solución resultante cambia de entalpía, por lo que se libera o consume energía dependiendo si se concentra o diluye el ácido. Como se puede ver en la figura presentada a continuación, la entalpía de las soluciones acuosas de ácido sulfúrico de distintas concentraciones varía de la siguiente manera:

Figura 1; Entalpía contra concentración de soluciones de Ácido Sulfúrico.



(Perry y Green, 1997, p 2-303).

2. Proceso de disolución. Una solución se forma cuando una sustancia se esparce de forma uniforme en otra. Son mezclas homogéneas formadas por dos o más especies químicas que no reaccionan entre sí, cuyos componentes se encuentran en proporción que varía entre ciertos límites. Toda disolución está formada por una fase dispersa llamada soluto y un medio dispersante llamado disolvente. Una disolución puede estar formada por uno o más soluto y uno o más disolventes. En el caso de la disolución del Ácido Sulfúrico se está trabajando con soluciones binarias, es decir, que está formada solamente por un soluto y un disolvente. Cualquiera de las varias fuerzas intermoleculares pueden interactuar entre las partículas de soluto y de disolvente en una solución. Las soluciones se hacen cuando las fuerzas de

atracción entre el soluto y el disolvente son de magnitudes semejantes a la las fuerzas que existen entre las partículas de soluto mismas o entre las partículas de disolvente mismas.

Los cambios de energía globales en el proceso de formación de una solución tienen tres componentes, los cuales se representan de la siguiente manera:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad (\text{Ecuación 1})$$

El componente  $\Delta H_1$  es la energía que se requiere para romper las fuerzas de atracción del soluto, este proceso es endotérmico (lo que significa que se requiere energía y que el cambio de entalpía es mayor que cero  $\Delta H_1 > 0$ ). El componente  $\Delta H_2$  es la energía necesaria para romper las fuerzas de atracción del disolvente, este proceso también requiere energía (por lo que su cambio de entalpía también es mayor que cero  $\Delta H_2 > 0$ ). Y el tercer componente surge de las interacciones de atracción entre el soluto y el disolvente, y da lugar a un proceso exotérmico (donde el cambio de entalpía es mayor que cero  $\Delta H_3 < 0$ ).

La formación de una solución puede liberar o necesitar energía. Depende del cambio de entalpía, la formación de una solución puede ser exotérmica o endotérmica. El cambio de entalpía de un proceso puede darnos información acerca del grado de facilidad con el que un proceso puede llevarse a cabo. Los procesos exotérmicos por lo general ocurren espontáneamente. Sin embargo si un proceso es demasiado endotérmico, éste será muy difícil llevar a cabo, si el proceso analizado es el de solvatación, no se podrá formar una solución fácilmente. La interacción entre el disolvente y el soluto debe ser lo suficientemente fuerte como para que la solución se forme espontáneamente (Brown, 1998, p 195).

## B. Intercambio de calor

Cuando se ponen en contacto cuerpos que poseen diferentes temperaturas, se forma un flujo de energía del cuerpo de mayor temperatura al cuerpo que posee una temperatura menor. Esta transferencia de energía se comporta de manera diferente en las distintas fases de la materia. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida, y gaseosa están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida las moléculas están muy cerca unas de otras dando a esta fase su característica rigidez. En la fase líquida la energía térmica adicional es suficiente para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase de gas la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación de los átomos, por lo que en un espacio cerrado la energía térmica adicional genera presión. Los mecanismos en la que se transfiere calor son distintos en cada fase, y son conocidas como conducción, convección y radiación. (Kern, 2001, p 13).

1. Intercambio de calor por conducción. La conducción es el proceso mediante el cual se transfiere calor a través de un sólido. En este tipo de proceso, el calor se transfiere por un complejo mecanismo a nivel atómico en el cual la energía de los átomos se transfiere mediante choques elásticos e inelásticos desde regiones con mayor temperatura hacia regiones que presentan una temperatura menor. La razón a la que se transfiere calor es proporcional a la diferencia de temperaturas por el área a través de la

cual se transfiere el calor. Si la temperatura del material permanece constante se dice que prevalecen las condiciones de régimen estable o estacionario.

La conducción de calor también se presenta en los líquidos y gases, pero es muy raro que este mecanismo de transporte sea predominante en estos fluidos. Esto se debe a que una vez que se establece flujo de calor entre el fluido, aunque no se aplique una fuerza externa, se generan gradientes de densidad y se ponen en movimiento corrientes convectivas, lo que hace que el mecanismo de transferencia de calor predominante sea la convección.

2. Intercambio de calor por convección. En la industria hay muchas aplicaciones de intercambio de calor en las que el calor se transfiere entre fluidos en los que el intercambio de calor no lleva consigo un cambio de fase. Esto es fundamentalmente importante en los procesos de recuperación de calor, como por ejemplo, cuando el flujo caliente de salida de un reactor exotérmico se utiliza para precalentar la alimentación fría que ingresa al reactor. Otros ejemplos importantes se pueden ver en operaciones como en la transferencia de calor desde una corriente de gas caliente hasta agua de enfriamiento, y el enfriamiento de una corriente de líquido caliente por medio de un flujo de aire. En estos casos las dos corrientes están separadas por medio de una pared metálica, superficie en la cual se lleva a cabo la transferencia de calor. Dicha superficie puede estar formada por tubos, o conductos de distintas formas de sección transversal constante, ya sean láminas planas, o aparatos como máquinas de potencia avanzada o formas especialmente diseñadas para conseguir una superficie máxima de transferencia de calor con un volumen reducido. Generalmente, la transferencia de calor fluido-fluido se lleva a cabo en equipos que operan en estado estacionario.

En el proceso de enfriar o calentar un fluido, este puede ser un flujo laminar, turbulento o estar en el intervalo de transición entre el flujo laminar y turbulento. Además, es posible que el fluido se mueva por convección natural o forzada. Algunas veces se puede presenciar más de un tipo de flujo en la misma corriente, por ejemplo, en el flujo laminar a bajas velocidades puede existir convección natural superpuesta sobre el flujo laminar forzado (McCabe, 2002, p 364).

A bajas velocidades los fluidos son propensos a moverse sin mezcla lateral y las capas adyacentes se desplazan unas sobre otras, así como lo hacen hojas de papel unas sobre otras. No hay presencia de corrientes transversales ni de remolinos. Este tipo de régimen se llama flujo laminar. A velocidades mayores empieza a haber turbulencia y se forman remolinos que dan lugar a una mezcla lateral.

Se sabe que un fluido puede circular a través de un conducto de dos formas distintas. A bajas velocidades de flujo, la caída de presión en el fluido se aumenta de manera directa con la velocidad del fluido. Sin embargo a altas velocidades dicha caída de presión se incrementa aproximadamente al cuadrado de la velocidad. La diferencia entre los dos tipos de flujo fue demostrada por Osborne-Reynolds, reportado en 1883. Esta demostración se llevó a cabo a través de un experimento en el que se sumergió un tubo horizontal de vidrio en un tanque de vidrio lleno de agua. Reynolds encontró que a bajas velocidades de fluido, un filamento de agua coloreada fluía íntacto a lo largo de la corriente principal sin que ocurriera un mezclado transversal. El comportamiento de la banda de color mostraba claramente que el agua estaba fluyendo en líneas rectas paralelas y que el flujo era laminar. Cuando se aumentaba la velocidad de flujo, se alcanzaba una cierta velocidad para la cual el hilo de color se ondulaba y desaparecía gradualmente a través de toda la sección transversal de la corriente. Esto logró demostrar que a cierta velocidad el agua deja de fluir de manera laminar, y que a velocidades elevadas, se da lugar a corrientes transversales y remolinos. Este tipo de movimiento es un flujo turbulento (McCabe 2002, p 55).

Reynolds estudió las condiciones bajo las cuales un tipo de flujo cambia a otro y encontró que la velocidad crítica, a la que el flujo laminar cambia a flujo turbulento, depende de cuatro variables que son: El diámetro del tubo, la viscosidad, densidad, y velocidad lineal promedio del líquido. Además encontró que estos cuatro factores se pueden combinar formando un grupo adimensional y que el cambio en el tipo de flujo ocurre para un valor definido del mismo. Este grupo de las variables es:

$$\text{Re} = \frac{D \times \bar{V} \times \rho}{\mu} = \frac{D \times \bar{V}}{\nu}$$

donde D = diámetro del tubo

$\bar{V}$  = velocidad promedio del líquido

$\mu$  = viscosidad del líquido

$\nu$  = viscosidad cinemática del líquido

$\rho$  = densidad del líquido

La transición del flujo laminar a uno turbulento puede ocurrir para un amplio intervalo de números de Reynolds. En una tubería, el flujo es siempre laminar a número de Reynolds inferiores a 2100, pero este flujo puede persistir hasta números de Reynolds mayores a 24000 si no hay perturbaciones en la entrada. Cualquier perturbación en este punto y el flujo rápidamente se vuelve turbulento. Bajo condiciones normales, el flujo en una tubería es turbulento a números de Reynolds superiores a aproximadamente 4000. Y se considera la región entre los números de Reynolds 2100 y 4000 como una región de transición, donde el tipo de flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de las condiciones a la entrada del tubo y de la distancia a dicha entrada (McCabe 2002, p 56).

Uno caso importante en la transferencia de calor es el flujo de calor hacia una corriente de fluido que fluye con flujo turbulento por conducto o tubo. Debido a que la velocidad de transferencia de calor es mayor para un flujo turbulento que para un flujo laminar, la mayoría de los equipos operan en el intervalo de turbulencia. (McCabe 2002, p 375).

Estimación de la temperatura de la pared  $T_w$ ;

Para evaluar la viscosidad del fluido en la pared, se necesita encontrar la temperatura  $T_w$ . La estimación de ésta se puede llevar a cabo mediante la aproximación de las resistencias individuales, la caída total de temperatura se puede dividir en dos caídas individuales de temperatura, y así aproximar el valor de la temperatura de la pared.

$$\Delta T_i = \frac{1/h_i}{1/h_i + \left(\frac{x}{k}\right)\left(\frac{D_o}{D_L}\right)} \times \Delta T$$

Donde  $x$  = Espesor de la pared

$k$  = conductividad térmica

$D_o$  = Diámetro Interior

$D_L$  = Diámetro medio logarítmico

$h_i$  = coeficiente de transferencia de calor por convección

Para luego encontrar la temperatura de pared:

$$T_w = T + \Delta T_i$$

Una ecuación empírica válida para tubos largos con entradas de bordes afilados es la ecuación de Dittus-Boelter:

$$\bar{h}_i = \frac{k}{D} (0.023) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^n$$

Donde  $n$  es 0.4 cuando el fluido está caliente y 0.3 cuando el fluido está frío.

$\text{Re}$  = Número de Reynolds

$\text{Pr}$  = Número de Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{C_p \times \mu}{k}$$

Donde  $C_p$  = Calor específico de la sustancia

$k$  = conductividad de la sustancia

$\mu$  = viscosidad del líquido

Generalmente, la dirección del flujo del fluido es paralela a la superficie de calentamiento, en este caso no existe una separación de la capa límite, otras veces la dirección de flujo puede ser perpendicular o formar un ángulo con respecto a la superficie de calentamiento, y cuyo caso ocurre la separación de la capa límite.

A velocidades de operación normal, el calor que se genera debido a la fricción del fluido es despreciable en comparación con el que se transfiere entre los fluidos. En la mayor parte de los casos, la fricción por calentamiento se puede considerar despreciable. Pero cuando se trabaja con fluidos de viscosidad elevada, es importante tomar en cuenta ese calor que se genera por fricción. A velocidades muy elevadas, el calentamiento por fricción se vuelve un tema de importancia en términos de control.

Las condiciones de flujo a la entrada de un tubo son distintas de las que existen a la salida, el campo de la velocidad y el campo de temperatura asociada a él, dependen de la distancia desde la entrada del tubo. Algunas veces, el flujo circula sin calentarse ni enfriarse a través de una longitud preliminar de una tubería, de forma que se establece el campo de velocidad totalmente desarrollado antes de que se transfiera calor al fluido, y el campo de temperatura se crea en el interior de un campo de velocidad ya desarrollado (McCabe, 2002, p 364).

En la transferencia de calor las propiedades del fluido, como por ejemplo la viscosidad, conductividad térmica, calor específico y densidad, son aspectos que afectan de manera directa como el calor será transferido. Todas estas propiedades, especialmente la viscosidad, cambian al haber cambios de temperatura. Debido a que en una corriente que experimenta transferencia de calor hay un campo de temperatura en el que esta magnitud cambia de un punto a otro, existe una dificultad en cuanto a elegir la temperatura a la cual deben evaluarse las propiedades del fluido. Cuando existen pequeñas diferencias de temperatura entre el fluido y la pared, y para fluidos cuya viscosidad no cambia apreciablemente con la temperatura, el problema no es grande. Pero en el caso de fluidos muy viscosos, como en el caso de ciertos aceites pesados, o cuando la diferencia de temperatura entre la pared del tubo y la del fluido es grande, existen grandes variaciones de las propiedades del fluido en el interior de la corriente, entonces resulta difícil calcular la velocidad de transferencia de calor (McCabe, 2002, p 364).

Cuando se da la transferencia de calor en fluidos sin cambio de fase, es necesario hacer una corrección para el calentamiento o enfriamiento del fluido con el que se trabaja. Cuando un líquido se calienta, como es el caso que se estudia en este trabajo de graduación, la viscosidad más baja, cerca de la pared hace que el perfil de velocidad sea más parecido al de flujo pistón, con un gradiente muy brusco cerca de la pared y muy suave cerca del centro. Esto da lugar a una mayor velocidad de transferencia de calor. Cuando se enfría un líquido, el gradiente de velocidad en la pared disminuye, dando lugar a una menor velocidad de

transferencia de calor. Por lo que por medio de un factor de corrección adimensional empírico, se toma en cuenta la diferencia entre calentamiento y enfriamiento.

$$\Phi = \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

**Capa Límite Térmica:** En una placa o lámina plana inmersa en una corriente de flujo que circula en flujo estacionario y orientado paralelamente a la lámina. La corriente que se acerca a la lámina lo hace con una velocidad y temperatura determinadas y considérese que la lámina se mantiene a temperatura constante. En esta situación se forma una capa límite, dentro de la cual la velocidad cambia desde cero hasta llegar a la velocidad del flujo normal. Esta capa recibe el nombre de capa límite hidrodinámica. El calor que se transfiere desde la lámina hasta el fluido cambia la temperatura del fluido cerca de la superficie de la lámina y se crea un gradiente de temperatura. Este gradiente de temperatura limita a una capa cercana a la pared, y dentro de esta capa la temperatura varía desde la temperatura de la placa hasta la del fluido en el límite exterior. Esta capa es conocida como capa límite térmica. Esta capa es más delgada que la capa hidrodinámica, en la que la velocidad es la que varía desde cero, para el fluido junto a la lámina, hasta llegar a la velocidad del fluido (McCabe, 2002, p 365).

**Transferencia de calor por convección forzada en un flujo laminar:** En un flujo laminar la transferencia de calor que se da se debe a la conducción, debido a que no se desarrollan remolinos que lleven calor a la superficie isotérmica. Cuando el fluido se acerca a la superficie de calentamiento, es posible que tenga ya una capa límite hidrodinámica total o parcialmente desarrollada. Un caso sencillo de flujo, donde la velocidad se supone constante en toda la sección transversal y a cualquier longitud del tubo recibe el nombre de flujo pistón o émbolo. Independientemente de las condiciones del flujo, la superficie de calentamiento puede ser isotérmica, el flujo de calor puede ser igual en todos los puntos de la superficie de calentamiento, en cuyo caso la temperatura promedio del fluido varía linealmente con la longitud del tubo.

Al considerar el flujo de calor desde la lámina plana, y asumiendo que las propiedades del fluido, como densidad, conductividad  $k$ , calor específico  $C_p$ , y viscosidad, no cambian con la temperatura. Se llega a:

$$\left( \frac{dT}{dy} \right)_w = \frac{0.332(T_w - T_\infty)}{\sqrt[3]{1 - (x_o/x)^{3/4}}} \sqrt[3]{\frac{c_p \mu}{k}} \sqrt{\frac{u_o \rho}{\mu x}}$$

Donde  $(dT/dy)_w$  es el gradiente de temperatura en la pared, que está dado por:

$$h_x = \frac{k}{T_w - T_\infty} \left( \frac{dT}{dy} \right)_w$$

Cuando las condiciones del flujo cambian, y este deja de ser un flujo laminar y pasa a ser un flujo turbulento, esto sucede con números de Reynolds superiores a 2100, la transferencia de calor se da a una velocidad mayor para el flujo turbulento que para el flujo laminar, por esta razón la mayoría de equipos de transferencia de calor operan en el intervalo de turbulencia. Los primeros estudios sobre este caso estaban basados en correlaciones empíricas por prueba de datos. Hasta la fecha, las ecuaciones obtenidas de esta forma se utilizan mucho en el diseño (McCabe, 2002, p 367).

3. Intercambio de calor en aletas. Cuando un sólido con un área de sección transversal pequeña sobresale de un cuerpo grande hacia un fluido a diferente temperatura funciona como una aleta. Esta aleta suministra una superficie extra en donde se puede llevar a cabo el intercambio de calor. Las superficies extendidas tienen una importante aplicación en la industria como aletas fijas en paredes del equipo de transferencia de calor para incrementar la razón de calentamiento o enfriamiento. Las aletas se usan para incrementar la razón de transferencia de calor de una pared.

Selección y diseño de aletas: Para entender como funcionan las aletas, se puede considerar la superficie expuesta a un fluido con la temperatura  $T_{\infty}$  que circula sobre ella. Si la pared está en contacto con el fluido y la temperatura de su superficie es constante, la razón de transferencia de calor por unidad de área de la pared plana está controlada en por el coeficiente de transferencia de calor. El coeficiente en la pared del plano se incrementa al incrementarse la velocidad del fluido, aunque esto también produce una mayor caída de presión y requiere una mayor fuerza de bombeo. Por estas razones, en muchos casos es preferible aumentar la razón de transferencia de calor de la pared por medio de aletas que se extienden desde la pared misma hacia el fluido, y así el área de contacto entre la superficie sólida y el fluido aumenta. Si la aleta se hace de un material con elevada conductividad térmica, el gradiente de temperatura a lo largo de la aleta, de la base a la punta, será pequeño y las características de transferencia de calor de la pared serán mejores. (Krieth, 2001, p 95).

a. Eficiencia de las aletas. Ya que existen en el mercado aletas con una gran variedad de formas, se seleccionan en base a su desempeño térmico y costo. Para escoger una aleta de forma adecuada es importante tomar en cuenta la relación entre el costo, el espacio disponible, y la caída en la presión del fluido que transfiere calor, además las características de transferencia de calor de la superficie extendida. Si se ve desde un punto de vista de desempeño térmico, la forma y longitud más deseables se examinan por medio de un análisis de la eficiencia de la aleta (Krieth, 2001, p 101).

$$\eta_f = \frac{\text{Transferencia de calor real por aleta}}{\text{Calor que se hubiera transferido si toda la aleta estuviera a la temperatura base}}$$

La eficiencia de una aleta rectangular sin pérdidas de calor en los extremos también se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$\eta_f = \frac{\tanh(nL)}{nL}$$

donde n se define como:

$$n = \sqrt{\frac{2h}{kt}}$$

donde:  $\bar{h}$  es el coeficiente de convección, k la conductividad térmica, t el espesor de la aleta, y L la longitud de la aleta (Pitts, 1991, p 38).

### C. Procesos tipo lote y procesos continuos

Los sistemas de producción están estructurados a través de un conjunto de actividades y procesos relacionados, necesarios para obtener bienes y servicios de un valor añadido para satisfacer las necesidades del cliente, con el empleo de los medios adecuados y la utilización de los métodos más eficientes. En las empresas, ya sean de servicio o de manufactura, estos sistemas representan las configuraciones productivas adoptadas en torno al proceso de transformación de los insumos en producto terminado para satisfacer las necesidades, requerimientos y expectativas de los clientes, de la forma más competitiva posible.

Cada sistema de producción se caracteriza esencialmente por su proceso productivo, que conlleva un conjunto de implicaciones para la empresa, en cuanto al comportamiento apropiado de las diferentes dimensiones de fabricación. De acuerdo a este enfoque se ha encontrado que existen alrededor de ocho configuraciones productivas definidas en las que se encuentran la configuración tipo lotes y configuración continua.

La configuración por lotes se distingue por un aumento de la repetitividad en la fabricación de productos. Este tipo de fabricación es útil cuando el producto representa unos pocos meses de requerimientos de los clientes. En este caso se requieren más operaciones, y éstas son más especializadas, por lo que es difícil que un mismo operario pueda dominarlas todas con una eficiencia aceptable. En tal sentido, el trabajo se divide en diferentes etapas tecnológicas, en las cuales los lotes sufren distintas operaciones. Así la instalación se suele dividir en secciones en las que se agrupan los equipos con funciones similares. El flujo material es desconectado aunque regular, variable de un pedido a otro, aunque existen pautas de flujo para familias de productos y para grandes lotes. Es uno de los sistemas más utilizados. Y funciona bien en entornos donde existen variaciones en las necesidades de los clientes.

La configuración de flujo continuo se caracteriza por ser más automatizada, generalmente más intensivo en capital y menos flexible. Cada máquina y equipo están diseñados para realizar siempre la misma

operación y preparados para aceptar de forma automática el trabajo suministrado por la máquina precedente. Está diseñado para fabricar un producto o una familia limitada de productos en volúmenes muy elevados. El diseño del producto es muy estable, a menudo es un producto genérico. El flujo material es continuo sincronizado, integrado a través de toda la instalación como si fuera un gran proceso tecnológico. Este rígido sistema, se basa en un proceso muy automatizado y especializado en la obtención de un producto estándar, donde la homogeneidad es total y absoluta, funcionando continuamente con mínima intervención del personal de línea (Chase, 2000, p 57).

### III. JUSTIFICACIÓN

En la industria actual es necesario mejorar procesos, utilizar los insumos y energía de manera que se vuelvan una ventaja competitiva en un mundo cada vez más globalizado, en donde una pequeña modificación al proceso puede hacer una gran diferencia.

En la etapa de disolución del ácido sulfúrico en una planta que trabaja con este ácido, en Guatemala, la energía liberada se convierte en un paso limitante, debido a que la disolución se tiene que llevar a cabo lentamente, de tal forma que no se eleve la temperatura demasiado, ya que este es un proceso exotérmico. Si se lleva a cabo dicha disolución en un intercambiador de superficie ampliada, esta situación se ve favorecida debido a que el paso que anteriormente era limitante, ahora permite el aprovechamiento de la energía térmica liberada por una violenta disolución de ácido sulfúrico, que se utilizará para el calentamiento de una solución de lavado, lo que hará que el proceso de disolución de ácido sulfúrico sea más rápido.

Actualmente, en la planta en cuestión, este proceso se lleva a cabo por lotes. Además se dosifica lentamente el ácido sulfúrico concentrado a un tanque de agua, donde se ajusta la densidad de la solución hasta llegar a la concentración deseada. Con la implementación del intercambiador de calor de superficie ampliada no sólo se utilizará la energía liberada por este proceso, sino que el mismo pasará de ser tipo lote a ser un proceso continuo. Y se logra controlar el proceso de manera más automatizada, con lo que se vuelve un proceso más seguro para el personal de la planta.

## IV. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

Diseñar un Intercambiador de Calor de superficie ampliada modificado con el fin de captar la energía del proceso de disolución de Ácido Sulfúrico concentrado (99 %) para el uso de baterías (35 %) con el fin de calentar una solución destinada al lavado de botellas.

### B. Objetivos específicos:

1. Calcular la transferencia de calor y eficiencia en las aletas.
2. Calcular los coeficientes locales de transferencia de calor por convección y conducción así como el coeficiente global de transferencia de calor.
3. Calcular los flujos mínimos de operación para lograr el calentamiento de la solución de lavado de 23 °C (temperatura ambiente) a 65 °C.
4. Calcular el área de transferencia de calor del intercambiador de superficie ampliada requerida para la captación de la energía liberada en el proceso de disolución del Ácido Sulfúrico concentrado.
5. Hacer pruebas a nivel de laboratorio para comprobar los resultados de los cálculos teóricos realizados.
6. Estudio económico de factibilidad.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

En la etapa de disolución del Ácido Sulfúrico en una planta que trabaja con este ácido, en Guatemala, la energía liberada por este proceso se convierte en un paso limitante, debido a que la disolución se tiene que llevar a cabo lentamente, de tal forma que no se eleve la temperatura demasiado, ya que este es un proceso exotérmico. Actualmente, el cambio de entalpía que conlleva el proceso de disolución solamente se ha visto bajo una luz que refleja sus aspectos negativos. Esto se debe a que la energía liberada no es aprovechada de ninguna manera en algún proceso secundario, y en lugar de presentarse como ventaja, esta energía térmica es descartada al ambiente, sin considerarlo como pérdida de recursos.

## VI. METODOLOGÍA

- Estudio del proceso de la disolución del Ácido Sulfúrico y entalpías de las soluciones
- Determinación del diseño apropiado del intercambiador de calor de superficie ampliada, y cálculo de la eficiencia de las aletas del intercambiador de superficie ampliada.
- Análisis del intercambio de calor por convección y conducción
- Intercambio de calor por convección de la solución de Ácido Sulfúrico al plomo
- Intercambio de calor por conducción del plomo al cobre, e intercambio de calor por convección del cobre a la solución de lavado
- Determinación de flujos de agua y Ácido Sulfúrico concentrado
- Elaboración de un diagrama de flujo del sistema
- Desarrollo de un balance de Masa y Energía
- Cálculo de los coeficientes individuales y el coeficiente global de transferencia de calor
- Diseño del intercambiador de calor de superficie ampliada
- Estudio económico para la determinación de la rentabilidad del intercambiador de calor de superficie ampliada

## VII. RESULTADOS

Tabla No. 3; Resultados generales

Eficiencia de la aleta	8.99 %
Resistencia térmica	0.0000661437 k/W
El Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección	9,872.09 W/m <sup>2</sup> K
Flujo volumétrico de ácido sulfúrico concentrado	7.99 mL/s
Flujo volumétrico de agua para la disolución	27.3 mL/s
Flujo volumétrico de agua de enfriamiento	16.66 mL/s
El área de transferencia de calor	219.44 cm <sup>2</sup>
Inversión necesaria	330 quetzales
Ahorro en quetzales desde	1,458.00 quetzales anuales
Tiempo de recuperación de la inversión	52 días de operación

Diagrama No. 1; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto desde arriba.

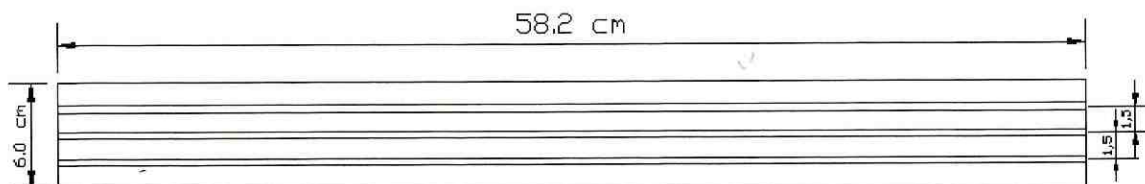


Diagrama No. 2; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto desde enfrente.

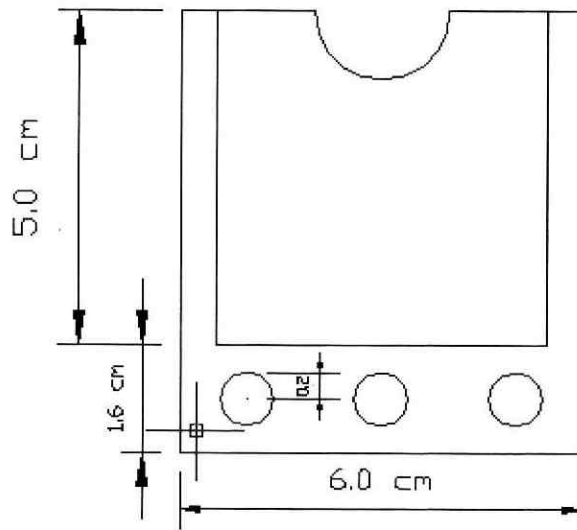
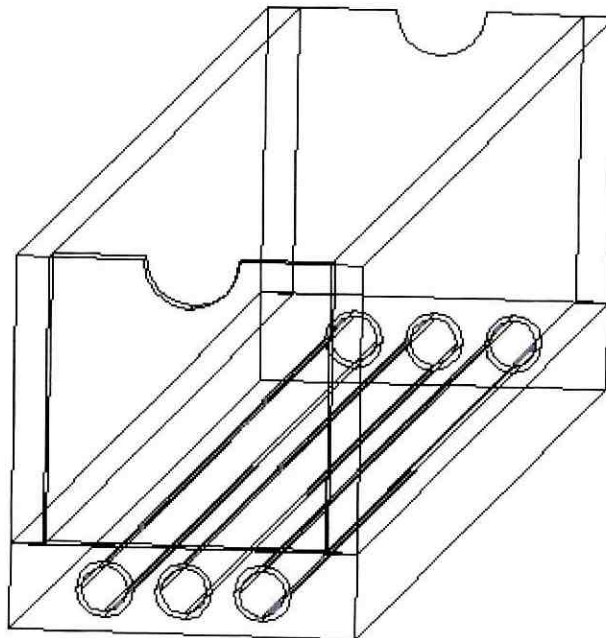
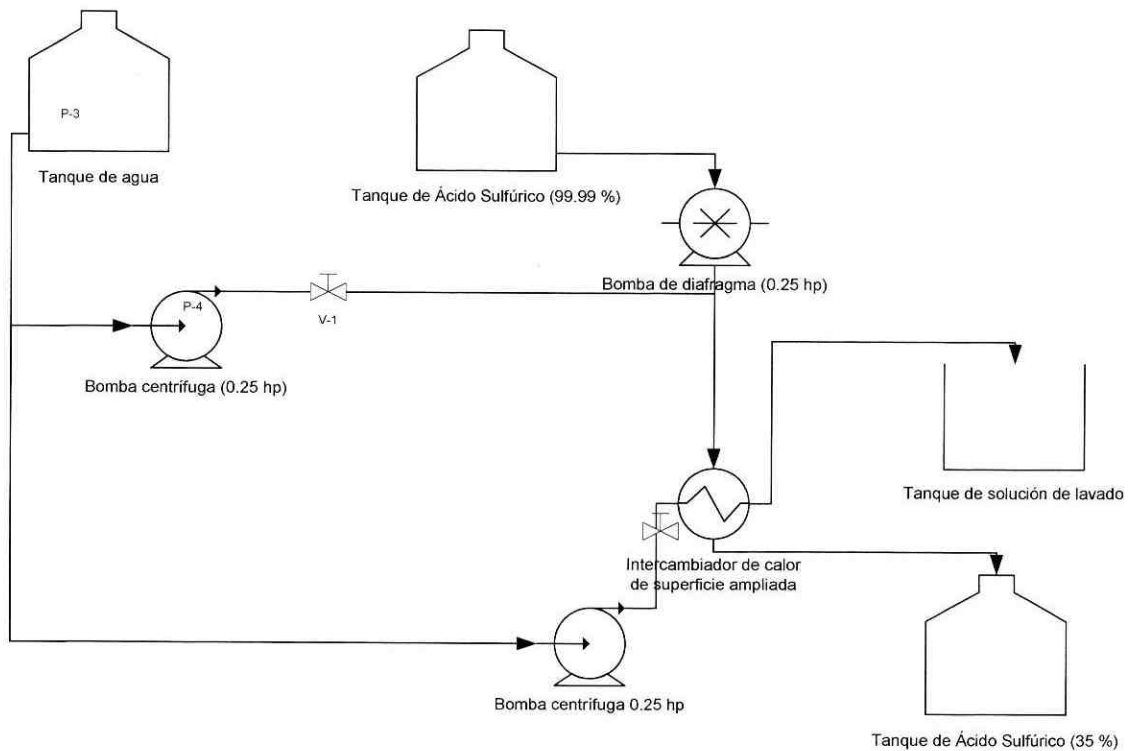


Diagrama No. 3; Intercambiador de calor de superficie ampliada visto en tercera dimensión.



Proceso luego de la implementación del intercambiador de calor:



## XIII. DISCUSIÓN

En este trabajo se realizaron los cálculos para el diseño de un intercambiador de calor de superficie ampliada para aprovechar la energía del proceso de disolución del ácido sulfúrico en una pequeña empresa en Guatemala. En dicha empresa la energía proveniente de la disolución del Ácido Sulfúrico no es aprovechada. Estudiando las actividades que se llevaban a cabo en la organización, se observó la posibilidad de aprovechar dicha energía en un proceso secundario que se realiza en las instalaciones, que es la remoción de etiquetas y lavado de botellas. Para este proceso, es necesario calentar agua a una temperatura entre 60-65 °C, y luego hacer una solución de lavado para remover etiquetas y lavar las botellas. Por lo que la energía térmica liberada debido al cambio de entalpía en el proceso de disolución de ácido sulfúrico concentrado puede volverse una ventaja para la planta.

Luego de analizar la situación, se observó que por medio de la implementación de un intercambiador de calor de superficie ampliada se puede pasar de un proceso de tipo lote, a un proceso continuo sin una inversión de dinero elevada. Además el equipo necesario para adaptar el intercambiador ya está disponible, tanto tanques como bombas y tubería de acero inoxidable, solamente es necesario realizar la instalación, fabricar el intercambiador de calor, y calibrar los flujos de agua y ácido deseados. Con lo que se podrá aprovechar la energía liberada y utilizarla para calentar el agua para la solución de lavado. Con esto no solo se logra ahorrar tiempo en el proceso de disolución, dinero en el calentamiento del agua para la preparación de la solución de lavado, sino que también se puede controlar el proceso de una forma más segura.

Por medio de la figura 1 (Entalpía contra concentración de soluciones de Ácido Sulfúrico, pagina No.3) del Manual del ingeniero químico de Perry se determinó que el cambio de entalpía del Ácido Sulfúrico concentrado (al 99.99 %) a una solución de ácido sulfúrico al 35 %, libera 191.89 kJ/kg de mezcla (-82.5 Btu/lb de mezcla). Esta energía es capaz de elevar la temperatura de la solución de ácido sulfúrico a una temperatura de 86 °C aproximadamente. Si este proceso de disolución se lleva a cabo dentro de un intercambiador de calor de cobre recubierto por una capa de plomo (una estructura metálica en forma de canal, con conductos de 4mm de diámetro, ver diagrama 1, 2, y 3 en la sección de resultados), luego de un tiempo, la estructura de metal llegará a estabilizar su temperatura a 86 °C, luego de lo cual se dejará fluir agua a través de los conductos de la estructura de cobre a una velocidad de 16.51 g/s (1 L/ min).

Se eligió el plomo como el metal que estará en contacto con el ácido sulfúrico debido a que la solución de ácido que se está haciendo está destinada para la fabricación de baterías de automóvil. Dichas baterías utilizan el plomo en su funcionamiento por lo que la presencia de dicho metal en la solución de ácido no va a afectar el funcionamiento de la batería de manera negativa. Y se utilizó el cobre como el metal que estará

en contacto con el plomo debido a que conduce muy bien el calor. Ya que el plomo tiene una conductividad térmica baja, se hizo que la capa de plomo sea lo más pequeña posible, se consideró de 1 mm de grosor para los cálculos, y el resto de la estructura de cobre.

En cuanto al agua de enfriamiento, se fijó el flujo del agua de tal manera que el número de Reynolds del flujo fuera mayor a 4000, ya que de esta manera se mantiene un flujo turbulento en donde la transferencia de calor por convección se ve favorecida ya que los remolinos del flujo turbulento hacen que se distribuya el calor de manera más eficiente. Además se calculó que toda la energía liberada podía, a lo sumo, calentar un flujo de 43.73 g/s sin considerar pérdida de energía alguna. Y como mínimo de 7.53 g/s, ya que un valor menor podría dar lugar a un flujo laminar lo que haría la transferencia de calor más lenta. Por lo que se escogió para el análisis económico un flujo de agua de enfriamiento de 16.5 g/s, ya que es un flujo turbulento y a la vez realista ya que se consideran pérdidas de calor a los alrededores. De lo contrario, si se escogen valores muy cercanos al flujo máximo de agua de enfriamiento, sería muy difícil que dicho flujo lograra alcanzar la temperatura deseada.

Cuando se lleva a cabo la transferencia de calor las propiedades del fluido, como la viscosidad, conductividad térmica, calor específico y densidad, son aspectos que afectan como será transferido el calor. Todas estas propiedades cambian al haber cambios de temperatura. Debido a que en una corriente que experimenta transferencia de calor hay un campo de temperatura en el que esta magnitud cambia de un punto a otro, existe una dificultad en cuanto a elegir la temperatura a la cual deben evaluarse las propiedades del fluido. Por esta razón se calcularon las propiedades del fluido a la temperatura media y luego se le aplicó dicho factor de corrección debido al calentamiento, logrando así considerar los cambios en las propiedades del fluido debido al calentamiento que se efectúa. Cuando el líquido se calienta la viscosidad más baja cerca de la pared hace que el perfil de velocidad tenga un gradiente muy brusco cerca de la pared y muy suave cerca del centro, lo que da lugar a una mayor velocidad de transferencia de calor.

Luego se calculó la temperatura de pared del sistema, con lo que se obtuvo el área de contacto necesaria para elevar la temperatura del agua a 65 °C, y se determinó que el conducto de 4 mm de diámetro debe ser de 175 cm de largo aproximadamente para que esto se logre. Este sistema debe estar aislado de sus alrededores lo más posible para no perder calor sino que transferir lo más posible al agua de enfriamiento.

Como se mencionó anteriormente, luego de alcanzar el estado estable, se deja pasar el flujo de agua de enfriamiento a través del intercambiador de calor, permitiendo un flujo de calor estable a la temperatura de pared constante. Por seguridad se realizaron los cálculos a una temperatura de la estructura de plomo y cobre de 84 °C, y para el calentamiento del agua a 67 °C, para asegurar que el flujo de agua llegue al menos a 65 °C. Y se sabe que hay suficiente energía para calentar este flujo ya que se conoce el flujo máximo que se puede calentar.

Este intercambiador de calor se debió considerar como uno de superficie ampliada debido a que el flujo de la solución de Ácido Sulfúrico al 35% pasa a través de un canal rectangular de cobre con un recubrimiento de plomo de 1 mm de espesor. Ambas “paredes” del canal proveen de una superficie extra donde se lleva a cabo la transferencia de calor. Esta superficie extra ayuda a que el calentamiento del plomo y del cobre a 84 °C ocurra un 8.99 % más velozmente. El intercambiador de calor de cobre recubierto de plomo debe tener dentro de sí, un conducto de 4 mm de diámetro y 1.75 m de largo para que se caliente la solución de enfriamiento a las condiciones deseadas. Esta longitud se dividió en tres secciones iguales de 58.2 cm de longitud, donde el agua tiene que salir y volver a entrar, esto se realizó debido a que con un solo tubo de 175 cm de longitud el intercambiador sería muy largo haciéndolo impráctico. Además, el flujo no sería tan turbulento, mientras que al hacer que el flujo tenga que virar violentamente se generan perturbaciones que harían que el flujo sea aún más turbulento, lo que hará que la transferencia de calor se lleve a cabo de manera más eficiente.

Luego se realizó un análisis económico con base al ahorro que se tendría al usar esta energía del proceso de disolución del Ácido Sulfúrico para calentar el agua para el proceso secundario de lavado de botellas. Con la velocidad de los flujos de operación del agua de disolución, Ácido Sulfúrico concentrado, y con el flujo de agua de enfriamiento establecidos, se pudo determinar que se ahorra 1,458.00 quetzales anuales en el consumo de gas propano aproximadamente, sin embargo, este estimado puede llegar a lo sumo ser de 4,752.00 quetzales anuales si se utiliza toda la energía del proceso de disolución en el calentamiento de agua para la solución de lavado. Además debido a que el proceso dejó de ser uno de tipo lote a uno de tipo continuo, se puede controlar de forma más automatizada, eliminando situaciones de alto riesgo para los operarios que laboran en dicha planta.

El proceso sin el intercambiador de calor utiliza una bomba de centrífuga y una bomba de diafragma, pero se recomienda con la implementación del intercambiador de calor una bomba centrífuga adicional de 0.186 kW (1/4 hp) para el flujo del agua de enfriamiento que atraviesa el intercambiador de calor. Considerando que el sistema requiere una inversión en una bomba centrífuga de 0.186 kW (0.25 hp), y la fabricación del intercambiador de calor, la inversión requerida es recuperada a los 54 días (la tercer semana del segundo mes) de operación del intercambiador de calor. El proceso con la implementación del intercambio de calor es más eficiente en consumo de tiempo, por lo que se tendrá personal disponible para otras actividades productivas, que tendrá consecuencias positivas en la eficiencia general de la empresa. Este análisis consideró que los precios del gas se mantienen estables a lo largo del año. Es importante resaltar que el buen uso de la energía cada vez impacta más fuertemente la eficiencia de las empresas ya que cada vez es un recurso de mayor demanda, por lo que su precio será es más elevado, y por lo tanto el ahorro en energía calculado será cada vez mayor conforme aumente el precio del gas.

## IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que a las condiciones de operación del intercambiador de calor de superficie ampliada el coeficiente de transferencia de calor por convección es de  $9872.09 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .
2. Se determinó que la resistencia térmica del intercambiador es de  $0.0000661437 \text{ k/W}$ .
3. Se determinó que la aleta del intercambiador de calor de superficie ampliada hace que el sistema se caliente un  $8.99 \%$  más velozmente.
4. Se concluyó que el conducto de cobre de  $4 \text{ mm}$  de diámetro en el intercambiador de calor debe tener una longitud de  $1.75 \text{ m}$ .
5. La implementación del intercambiador de calor en el proceso de disolución de Ácido Sulfúrico proporciona un ahorro energético equivalente a  $1,458.00$  quetzales anuales en energía.
6. La inversión realizada en las modificaciones del proceso se recupera a la tercer semana del segundo mes de operación del intercambiador de calor.
7. La implementación del intercambiador de calor y las modificaciones propuestas al proceso de disolución de Ácido Sulfúrico proporcionan un aumento en la seguridad de los operarios que trabajan en la planta.

## X. RECOMENDACIÓN

Se recomienda tener dos cilindros de gas almacenados en caso el proceso secundario de lavado de botellas requiera más energía de la que el proceso de disolución provee para el calentamiento de la solución de lavado. Ya que estos procesos son independientes, las necesidades energéticas del proceso de lavado pueden ser mayores a la energía liberada por el proceso de disolución del Ácido Sulfúrico, por lo que se recomienda tener dos cilindros de gas en caso esta situación se presente.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Brown, Theodore, H. Lemey, B. Bursten. 1998. *QUIMICA La ciencia central*. 7ª Edición. McGraw-Hill. México. 870 págs.
- Cengel, Yanus. 2003. *Heat transfer, A practical aproach*. 2ª Edición. Estados Unidos. Editorial McGraw Hill. 370 págs.
- Chase, Robert. Aquilano, N. Jacobs, F. 2000. *Administración de producción y operaciones*. 8ª edición. McGraw-Hill. Colombia. 278 págs.
- Colman. James. 1997. *Heat transfer*. Estados Unidos. Editorial McGraw-Hill. 327 págs.
- DeWitt, David; F. Incropera. 2002. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5a Edición. Estados Unidos de América. 407 págs.
- Kern, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. 2001. McGraw-Hill. México. 628 págs.
- Kreith, Frank; M. Bohn, 2001. *Principios de transferencia de calor*. 6ª Edición. México. Editorial Thompson. 650 págs.
- Lindon, Thomas. 1999. *Heat transfer, Profesional version*. 2ª Edición. Estados Unidos de América. Capstone Publishing Corporation. 358 págs.
- McCabe, William; J. Smith y P. Harriot. 2002. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 6ª Edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México. 1,199 págs.
- Rohsenow, Warren; J. Hartnett. 1973. *Manual de transferencia de calor*. Editorial Mc Graw-Hill. Estados Unidos. 368 págs.
- Perry, Robert. D. Green. 1997. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 7ª Ed. McGraw Hill Estados Unidos. 3,550 págs.
- Pitts, Donald. L. Sissom 1991. *1000 Solved problems in Heat Transfer*. McGraw-Hill. Estados Unidos. 372 págs.
- Serway, Reymond. J. Beichner. 2002. *FISICA, para ciencias e ingeniería*. 5ª Ed. McGraw Hill. México. 705 págs.
- Williams, Janna. 1986. *Engineering heat transfer*. Estados Unidos. Editorial PWS. 312 págs.

## XII. APÉNDICE

## APÉNDICE A: Cálculo de Muestra

1. Cálculo de la cantidad de agua necesaria para disolver 100 gramos de Ácido Sulfúrico concentrado (99.99 % masa/masa) a una solución acuosa de Ácido Sulfúrico al 35 % (masa/masa).

$$0.35 = \frac{100 \text{ g } H_2SO_4}{100 \text{ g } H_2SO + X \text{ g } H_2O}$$

Donde X= 185.71gramos de agua

2. Cálculo de la velocidad de flujo de masa de salida deseado de 33.33 mL/s (2.0 L/min) de la solución de Ácido Sulfúrico al 35 %.

Al 35 %, una solución de Ácido Sulfúrico tiene una densidad de 1.260 g/mL, por lo que se quiere que el flujo de masa de salida sea de:

$$\frac{2 \text{ L}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \times \frac{1.26 \text{ g}}{1 \text{ mL}} = \frac{2520 \text{ g}}{\text{min}} = 42.0 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

3. Cálculo de la velocidad de los flujos de masa de agua y Ácido Sulfúrico concentrado necesarios para obtener la velocidad del flujo de masa de Ácido Sulfúrico al 35 %:

Se calculó que por cada 100 gramos de Ácido Sulfúrico concentrado se necesitan 185.71 gramos de agua por lo que la relación queda que por cada gramo de ácido se necesitan 1.8571 gramos de agua, por lo que:

$$X \text{ g de Ácido Sulfúrico} + 1.857 X \text{ g de agua} = 2520 \text{ g de solución}$$

Donde X= 882.01 gramos de Ácido Sulfúrico concentrado

Y la cantidad de agua necesaria es: (1.8571)(882.01)=1637.98 gramos de agua

Por lo que finalmente se obtiene:

Velocidad de flujos de masa de la forma:

Ácido Sulfúrico concentrado + agua = Solución de Ácido Sulfúrico al 35%

$$14.7 \frac{g}{s} + 27.3 \frac{g}{s} = 42.0 \frac{g}{s}$$

Por medio de las densidades de cada flujo volumétrico se obtiene la velocidad de flujos de volumen:

$$7.989 \frac{mL}{s} + 27.3 \frac{mL}{s} = 33.33 \frac{mL}{s}$$

4. Cálculo del flujo de energía liberado por el cambio de entalpía debido a la disolución del Ácido Sulfúrico (según figura 2-30 de Perry):

$$\Delta H = \frac{-82.5 \text{ Btu}}{\text{lb de mezcla}} \times \frac{1.055 \text{ kJ}}{1 \text{ Btu}} \times \frac{2.2046 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = -191.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{2.52 \text{ kg}}{\text{min}} \times \frac{-191.88 \text{ kJ}}{\text{kg}} = \frac{-483.54 \text{ kJ}}{\text{min}} = 8.06 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

5. Cálculo de la temperatura final que alcanzará el flujo de la solución de Ácido Sulfúrico al 35% (con un  $C_p=3.03819 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ) 2.52 kg de solución se podrá calentar a:

$$482.58 \text{ kJ} = 2.52 \text{ kg} \times \frac{3.03819 \text{ kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (X - 23^\circ\text{C})$$

Donde  $X= 86.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ , que es la temperatura final de la solución.

6. Cálculo para la estimación de la temperatura de pared del intercambiador de calor:

$$\Delta T_i = \frac{1/9872.09}{1/9872.09 + \left(\frac{0.016}{15118.59^{-1}}\right)\left(\frac{0.004}{0.0016}\right)} \times (84 - 23) = 58.75$$

$$T_w = (23 + 58.75) \text{ } ^\circ\text{C} = 81.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8. Cálculo del factor de corrección adimensional debido al calentamiento:

El flujo de agua entra a 23 °C y saldrá a 67 °C, y la temperatura de la superficie del tubo de cobre será de 81.75 °C, para calcular las propiedades del fluido se tomó la temperatura media y luego se le aplicó el factor de corrección:

$$\Phi = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = \left(\frac{599.32}{325.07}\right)^{0.14} = 1.089$$

9. Cálculo del número de Reynolds para el flujo de agua de enfriamiento:

$$\text{Re} = \frac{D \times \bar{V} \times \rho}{\mu} = \frac{(0.004 \text{ m}) \times (1.33 \text{ m/s}) \times (990.389 \text{ kg/m}^3)}{0.00059933 \text{ N s/m}^2} = 8766.76$$

10. Cálculo del número de Prandtl para el flujo de agua de enfriamiento:

$$\text{Pr} = \frac{C_p \times \mu}{k} = \frac{(4175.795 \text{ J/kg K}) \times (0.00059933 \text{ N s/m}^2)}{0.6405 \text{ W/m K}} = 3.907$$

11. Cálculo del coeficiente de convección para el flujo de agua de enfriamiento. Por medio de la ecuación de Dittus-Boelter se calcula el coeficiente de convección del flujo de agua de enfriamiento de la siguiente forma:

$$\bar{h}_\infty = \frac{k}{D} (0.023) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \Phi = \frac{0.6529379 \text{ W/m K}}{0.004 \text{ m}} (0.023)(8766)^{0.8} (3.907)^{0.4} (1.089)$$

$$\bar{h}_\infty = 9,872.09 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

12. Cálculo para encontrar el calor necesario para elevar la temperatura del flujo de agua de enfriamiento a la temperatura deseada.

$$q = mC_p\Delta T = (0.011479 \text{ kg/s}) \times (4181.65 \text{ J/kg K}) \times (67 - 23)^\circ \text{C} = 2112.18 \text{ W}$$

13. Cálculo para encontrar la longitud del tubo de cobre de 4 mm de diámetro necesario para el intercambio de calor necesario:

$$q_{\text{conv}} = PL(\Delta T)$$

$$L_{\text{min}} = \frac{q_{\text{conv}}}{\bar{h}_\infty \pi D (T_s - T_b)_{\text{max}}} = \frac{2112.18 \text{ W}}{(9872 \text{ W/m}^2 \text{ K}) \times (0.004 \text{ m} \times \pi) \times (84^\circ \text{C} - 67^\circ \text{C})} = 1.75 \text{ m}$$

14. Cálculo de la eficiencia de la aleta presente en el diseño del intercambiador de calor:

$\bar{h}$  = el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio

k = conductancia térmica

t = espesor de la aleta

$$n = \sqrt{\frac{2 \times \bar{h}}{k \times t}} = \sqrt{\frac{2 \times 7337.03 \text{ W/m}^2 \text{ K}}{0.653 \text{ W/m K} \times 0.0055 \text{ m}}} = 2021.43 \text{ m}^{-1}$$

y

$$\eta_f = \frac{\tanh(n \times L)}{n \times L} = \frac{\tanh(2021.43 \text{ m}^{-1} \times 0.0055 \text{ m})}{2021.43 \text{ m}^{-1} \times 0.0055 \text{ m}} = 0.0899$$

Lo que aumenta la velocidad de calentamiento del sistema en un 8.99 % aproximadamente.

## APÉNDICE B: Análisis económico.

Con un calor de combustión promedio del gas Propano de:

$$509 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \times \frac{1000 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} \times \frac{1 \text{ J}}{0.23901 \text{ cal}} \times \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} \times \frac{1 \text{ mol}}{44 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 48,400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Y una producción media anual (de los últimos 3 años) = 113.56 m<sup>3</sup> de Ácido Sulfúrico al 35 %, se liberan:

$$30000 \frac{\text{gal}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{264.17 \text{ gal}} \times \frac{1260 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{191.88 \text{ kJ}}{1 \text{ kg}} = 27,456,047.2 \frac{\text{kJ}}{\text{año}}$$

Lo que significa que si se lograra aprovechar toda la energía sin pérdida alguna, se podría ahorrar en gas hasta 4,752.4 quetzales anuales:

$$27,456,047.2 \frac{\text{kJ}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ kg}}{48400 \text{ kJ}} \times \frac{8.377 \text{ Q}}{1 \text{ kg}} = 4752.4 \frac{\text{Quetzales}}{\text{año}}$$

Pero debido a que siempre hay pérdidas al ambiente, y debido al flujo de agua de enfriamiento deseado es de 1L/min. :

$$143089.67 \frac{\text{kg Acido (35\%)}}{\text{año}} \times \frac{990.389 \text{ kg H}_2\text{O}}{2520 \text{ kg Acido (35\%)}} = 56,235.89 \text{ kg H}_2\text{O}$$

La cantidad de calor necesario para calentar esa cantidad de agua de 23 a 67 °C es de:

$$q = mC_p\Delta T$$

$$Q = 56,235.89 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{4.17589 \text{ kJ}}{\text{kg K}} \times (67 - 23)^\circ \text{C} = 10332500,08 \text{ kJ}$$

Que requiere que se quemen 213.5 kg de gas Propano, lo que se calculó de la siguiente manera:  $q = m\Delta H_c$

$$m = \frac{10332500,08 \text{ kJ}}{48400 \text{ kJ/kg}} = 213.48 \text{ kg de Propano}$$

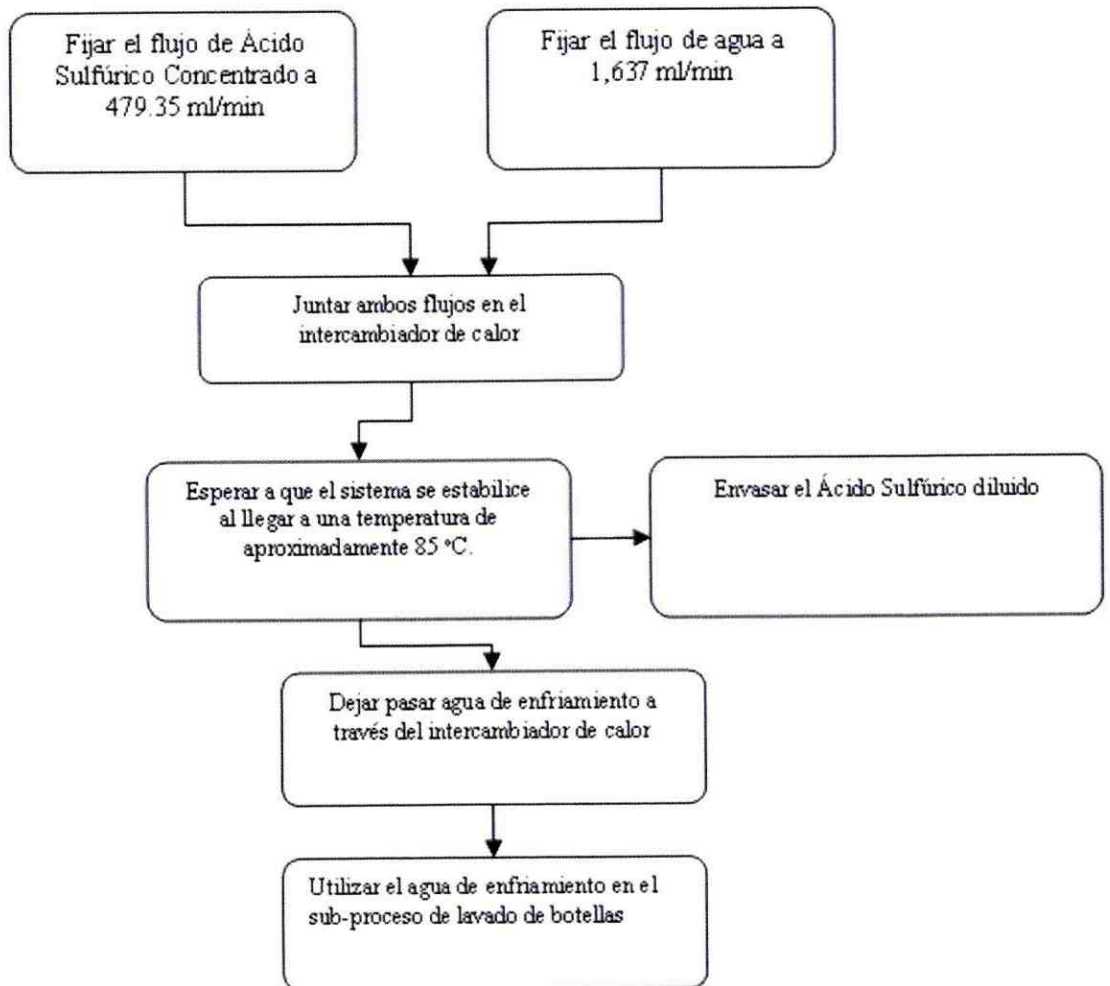
A un precio de 8.38Q/kg de gas, se ahorraría:

$$213.48 \text{ kg de Propano} \times 8.38 \frac{\text{Quetzales}}{\text{kg de Propano}} = 1788.45 \text{ Quetzales}$$

Para hacer el intercambiador de calor se necesitará 1.72 kg de cobre, a un precio de Q 56.21 el kilogramo se necesitará 96.9 quetzales, y un mínimo de plomo que ya se tiene en la empresa debido a que este metal se usa en la fabricación de baterías, que es a lo que se dedica esta empresa. Para ensamblar el sistema, se necesita una bomba centrífuga de 0.186 kW (0.25 hp) de potencia, con un costo de alrededor de Q 220.00. Esta inversión se pagará a la tercera semana del segundo mes de operación del intercambiador de calor, considerando que habrá un ahorro mensual de Q121.54 en ahorro de consumo de gas Propano.

## APÉNDICE C:

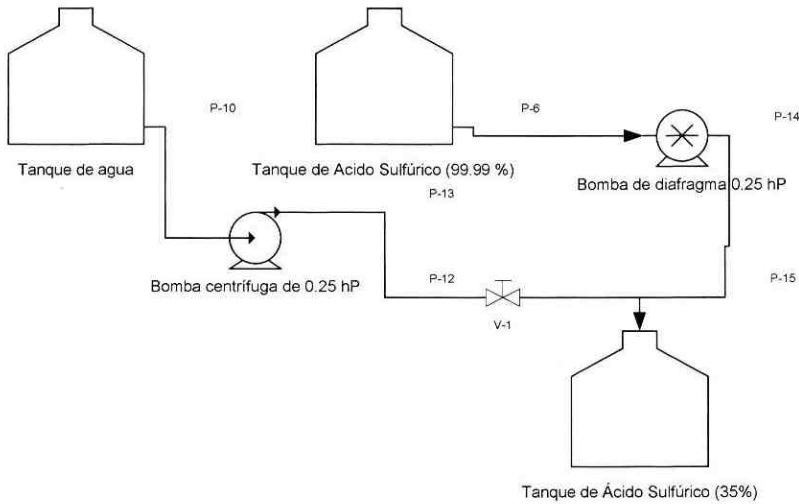
Diagrama No. 4: Diagrama de flujo del proceso de disolución con la implementación del intercambiador de calor propuesto.



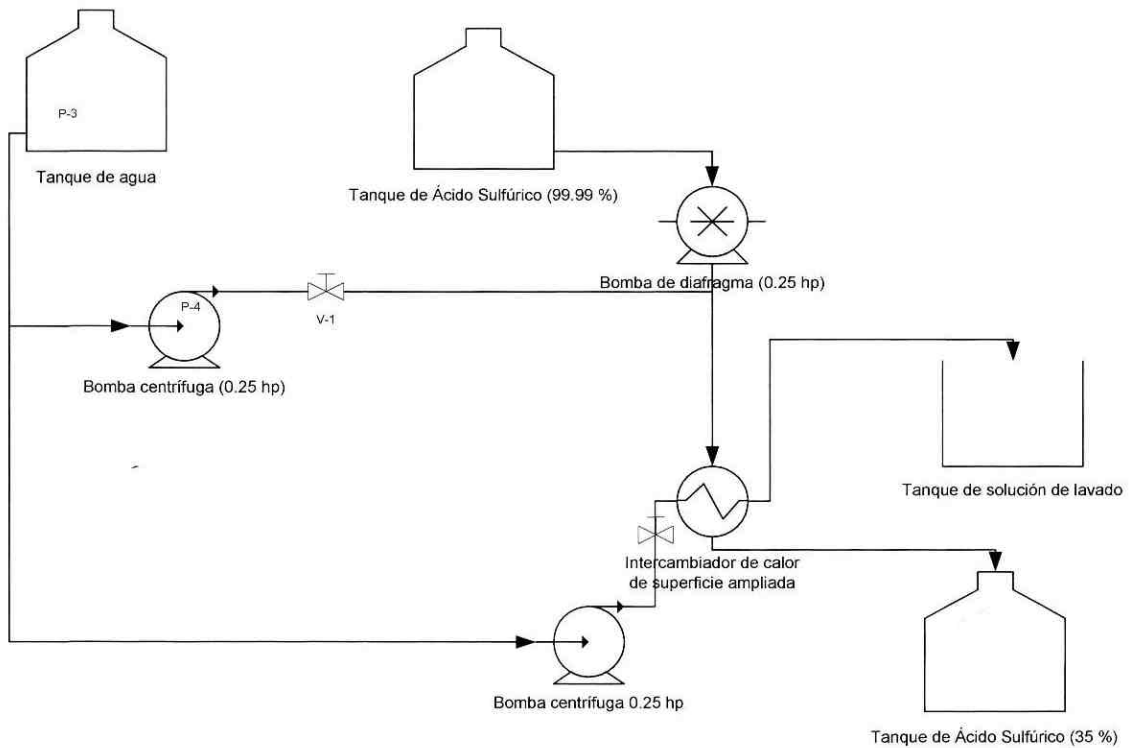
## APÉNDICE D:

Diagrama No. 5: Diagramas de equipo de los procesos de disolución.

Proceso sin la implementación del intercambiador de calor:

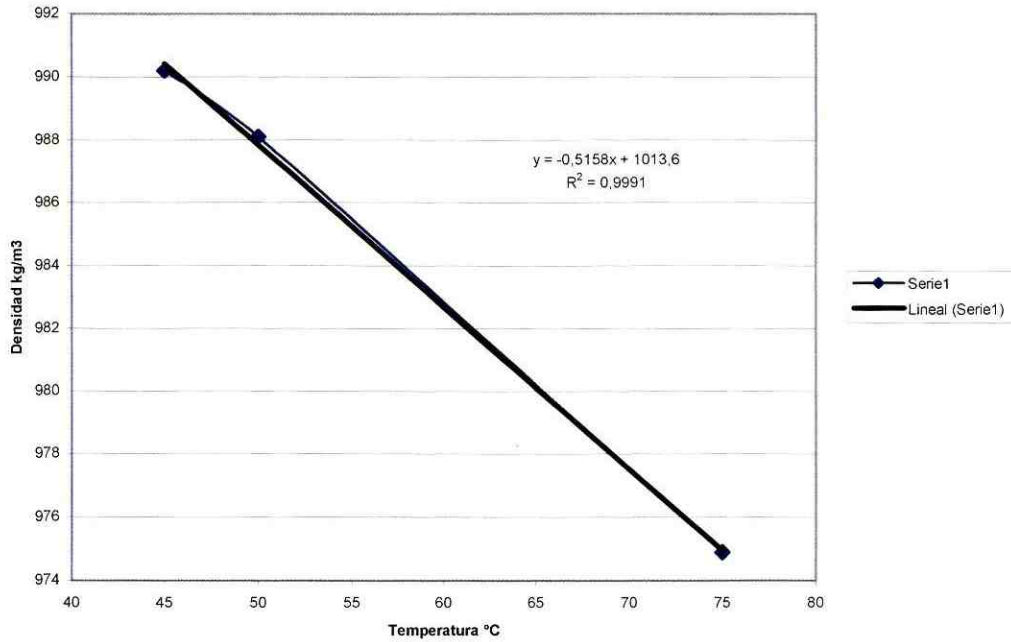


Proceso luego de la implementación del intercambiador de calor:

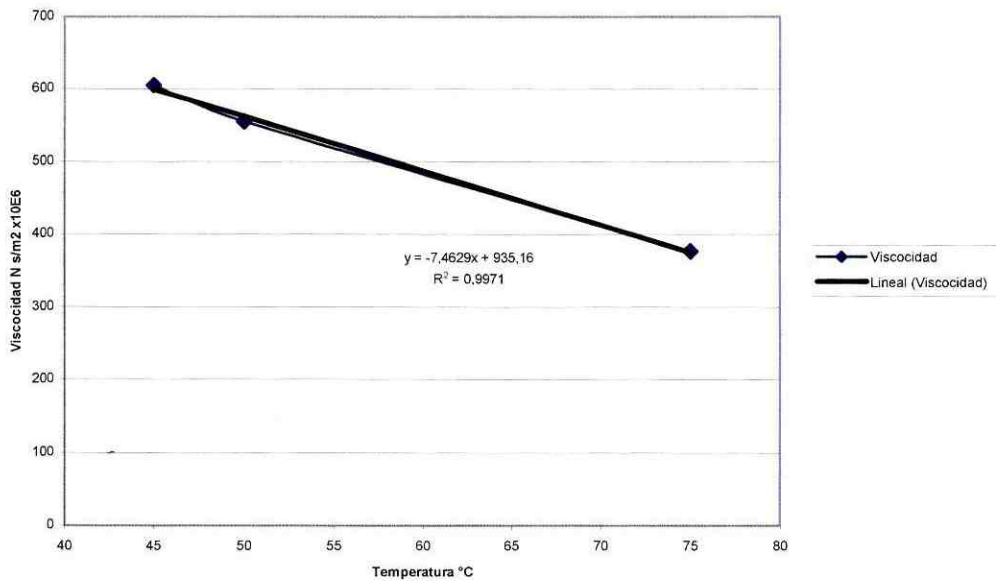


## APÉNDICE E: Propiedades del agua contra temperatura.

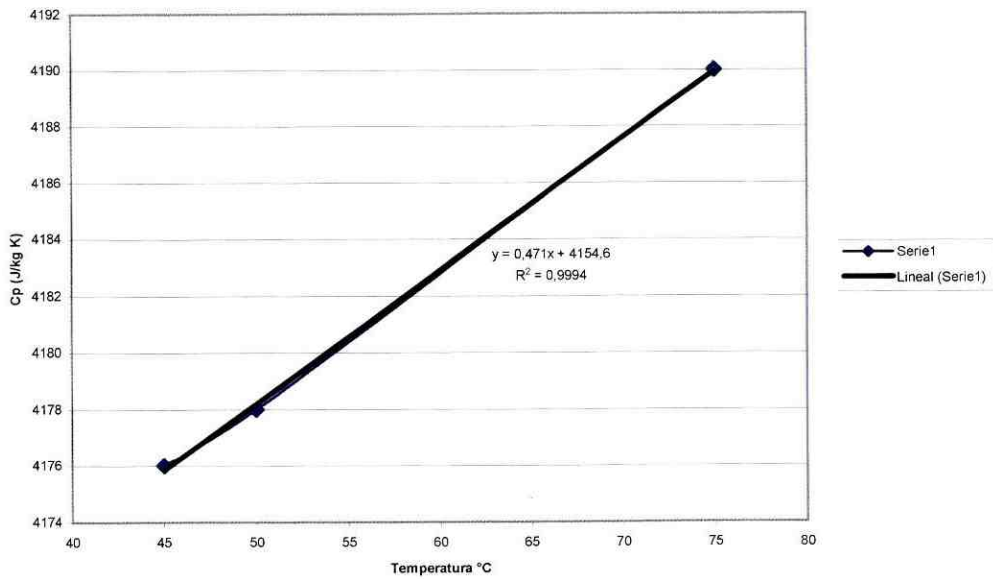
Gráfica No. 1; Densidad del agua contra temperatura



Gráfica No. 2; Viscosidad del agua contra temperatura



Gráfica No. 3; Calor específico del agua contra temperatura



Gráfica No. 4; Conductancia térmica del agua contra temperatura

