



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica*

Trabajo de Diploma
en opción al título de
Ingeniero Mecánico

*Título: Evaluación del sistema de enfriamiento del licor
amoniacal en la Unidad Básica de Producción Lixiviación y
Lavado de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.*

*Autor: Roberto Vazquez Castillo.
Tutor: Dr. C. Enrique Torres Tamayo.*

*"Año 54 de la Revolución"
Curso: 2011- 2012
Moa - Holguín*



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, **Roberto Vazquez Castillo**, autor de este trabajo de diploma, declaro, en acuerdo con el tutor **Dr. C. Enrique Torres Tamayo**, la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que dispongan de su uso cuando estime conveniente.

Roberto Vazquez Castillo

Dr. C. Enrique Torres Tamayo



PENSAMIENTO

“El estudio no es una obligación, sino una oportunidad para adentrarse en el maravilloso y bello mundo del saber.” Albert Einstein

“El principio de la sabiduría es el temor de Jehová; los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza”.
Proverbios 1: 7



AGRADECIMIENTOS

Alguien dijo: el esfuerzo es la clave del éxito, frase que encierra todo un desafío, sinónimo de entrega total y el hecho de sobreponerse a las difíciles circunstancias y momentos de pruebas.

Con toda la fuerza de mi corazón exalto y glorifico el nombre de mi Dios Rey de Reyes y Señor de Señores. Por permitirme lograr este éxito, por darme fuerza de su fuerza para llegar a la meta.

A mi tutor el Dr. C. Enrique Torres Tamayo, por su ayuda incondicional y por su atención para efectuar este trabajo, porque dieron tiempo de su tiempo para que este momento llegara; a los Ing. Yonnis Guilarte Domínguez, Tomás Navarro López y Reynaldo Espinosa por sus incontables ayudas y orientaciones en los aspectos teóricos y prácticos propio de la instalación y de la UBP Lixiviación y Lavado.

A los profesores que integran el departamento de mecánica y en especial a aquellos que contribuyeron de forma desinteresada a mi formación como ingeniero mecánico.

En gran manera agradezco a mi esposa, a su hermana y a sus padres por sus incontables intercesiones a mi favor y sus consejos que tanto agradezco.

A mis compañeros de estudio por la amistad mostrada durante estos seis años, a los compañeros de trabajo y hermanos de la fe: Yanet, Meyquel, Octavio, Roxana, Guienadis, Marilyn, Eyllin, Yoandris, Ángel, Viguera, Oniel, Chicho, Roberto, José Antonio, Esperanza.

A todos muchas gracias



DEDICATORIA

En el mundo tendremos aflicción, momentos oscuros y de tinieblas, en ocasiones se atraviesan valles de sombra de muerte pero la buena noticia es que siempre existe alguien que no mira las caídas sino las veces que somos capaces de levantarnos y transformar esas caídas en plataformas para subir a un nivel más alto. Dedico este triunfo a:

A mi madre Radys Castillo García a mi padre Edilberto Vazquez García a mis hermanos Yanieskis, Grenchi y José Ángel. A mis tías Amparo y Rodys que son las madres que tengo hoy, a mi maravillosa esposa y a mis futuros hijos para que les sirva de ejemplo. Tengo la plena certidumbre que todos ellos están muy orgullosos y hoy comparten mi regocijo.

A mis amigos y a todos los que en su momento me brindaron su ayuda.

A todos les dedico esta victoria



RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó una evaluación al proceso de enfriamiento de licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara". Una vez analizados los aspectos teóricos concernientes a intercambiadores de calor de placas y establecido el estado del arte, se expuso el procedimiento de cálculo verificativo de los intercambiadores y la aplicación del método temporal que permitió realizar con efectividad la evaluación del proceso y mostrar el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor, el factor de incrustaciones y la eficiencia térmica. Se determinó la zona de óptima operación de los equipos y con ello la adecuada estimación del coeficiente global de transferencia de calor, lo que trae consigo un mejor aprovechamiento del tiempo de operación de cada equipo, favorece los trabajos de mantenimiento y se reducen pérdidas económicas.



ABSTRACT

In the present work, an evaluation was carried out regarding the cooling process of the ammoniacal liquor in the UBP Leaching-Washing of “Ernesto Che Guevara” plant. Once the theoretical aspects related to heat exchanger’s plates were analyzed and the art status was established, the corroborative calculation procedure of the exchangers was exposed, as well as the use of the temporary method, which allow the proper execution of process evaluation and show the performance of heat transfer global coefficient, the inlaid factor and the termic efficiency. The optimum area for equipment operation was determined and also the appropriate estimation of the global coefficient of heat transfer. All this brings about better use of the operation cycle of each equipment, favours the maintenance works and reduces the economic losses.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Trabajos precedentes	5
1.3. Flujo Tecnológico de la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”	10
1.4. Importancia y clasificación general de los intercambiadores de calor en la UBP Lixiviación y Lavado.....	11
1.6. Peculiaridades de los intercambiadores de calor de placas y propiedades físico mecánica del licor amoniacal.....	18
1.7. Conclusiones del capítulo	19
CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL LICOR AMONIACAL	20
2.1. Introducción	20
2.3. Procedimiento para determinar el coeficiente global de transferencia de calor	22
2.4. Método para el cálculo verificativo del área de transferencia de calor.....	25
2.5. Método de la diferencia de temperatura media logarítmica	26
2.6. Cálculo hidráulico del intercambiador de calor	28
2.7. Pérdida de carga en el intercambiador de calor	29
2.8. Método para el cálculo experimental	31
2.9. Instalación experimental para la evaluación del proceso de enfriamiento del licor amoniacal.....	32
2.10. Diseño experimental	35
2.11 Procedimiento para el procesamiento estadístico de los resultados	36
2.12 Conclusiones del capítulo.....	37
CAPÍTULO 3: VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL	38
3.1. Introducción	38
3.2 Análisis de los resultados para la selección del equipo	38
3.3. Valoración económica.....	48



3.4 Impacto medioambiental.....	53
3.5 Conclusiones del capítulo	55
CONCLUSIONES GENERALES	56
RECOMENDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

El Níquel es uno de los minerales que más se comercializa en todo el mundo debido a la amplia gama de utilización que posee y a sus importantes propiedades físicas y mecánicas que lo diferencian de otros minerales. En nuestro país, existe una de las reservas más importante. La industria niquelífera está compuesta por tres fábricas que producen níquel más cobalto con calidad comercial, dos de ellas se encargan de realizar el proceso mediante la lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido y una tercera, utiliza la tecnología de lixiviación ácida teniendo como disolvente al ácido sulfúrico. Una de las fábricas que utiliza tecnología amoniacal es la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara” donde se encuentra la instalación objeto de estudio, ésta se encuentra ubicada a 5 km aproximadamente de la ciudad de Moa en la provincia de Holguín. Se construyó entre los años 1973 - 1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la antigua Unión Soviética, diseñada con capacidad para producir 30 000 toneladas de Ni + Co, anualmente.

El proceso productivo comienza con la extracción, a cielo abierto, de la materia prima mineral la cual se somete a diversos procesos metalúrgicos que incluye el secado térmico, molienda del mineral, reducción en hornos de soleras múltiples, lixiviación y lavado con tecnología carbonato amoniacal, recuperación de amoniaco, calcinación y sinter del mineral.

La Unidad Básica de Producción (UBP) Lixiviación y Lavado tiene la función de lixiviar el mineral reducido, procedente de la UBP Hornos de Reducción, el mismo es descargado a través de los enfriadores rotatorios en el área de contacto, donde se mezcla en las canales de contacto con licor frío procedente de los intercambiadores de calor de placas. De esta manera se forma una pulpa que llega por gravedad a los tanques de agitación mecánica. En esta área existen tres series de contacto de donde se trasiega la pulpa hacia la primera serie de turboaeradores donde comienza la lixiviación del níquel y el cobalto del mineral reducido, este proceso de decantación en contracorriente ocurre en tres etapas de lixiviación y cinco de lavado incluyendo la absorción de gases el proceso de enfriamiento de licor, el envío de



licor producto y la cola del proceso a la UBP Recuperación de Amoniacal para dar continuidad al proceso.

Para realizar el proceso de enfriamiento del licor amoniacal es necesario utilizar equipos de intercambio térmico, este proceso es de gran importancia para laborar con la mayor eficiencia y productividad en esta UBP. Disponer de equipos óptimos no solo en función de su análisis térmico y del rendimiento económico de la instalación, sino también, en función de otros factores, como el aprovechamiento energético del sistema y de materias primas necesarias para cumplir una determinada función, según los parámetros técnicos del fabricante y que estén funcionando en óptimas condiciones de trabajo, es vital para alcanzar altos niveles de producción.

Los intercambiadores de calor en las mayorías de las plantas productoras de energía realizan procesos de intercambio de calor, entre sustancias con diferentes estados de agregación. El intercambiador mismo es un sistema físico que permite transferir calor entre dos fluidos separados por una pared sólida. El calor se transfiere sin que se produzca la mezcla de los fluidos. Son tan importantes y ampliamente utilizados en la industria, que su diseño ha experimentado un gran desarrollo, existiendo en la actualidad normas ideadas y adoptadas que especifican con detalles los materiales, métodos de construcción, técnica de diseño y sus dimensiones.

El sistema de enfriamiento del licor amoniacal está compuesto por una batería de intercambiadores de calor de placas, que a la vez está compuesta por 6 intercambiadores, los cuales son de gran importancia en el desarrollo del proceso productivo, ya que son los encargados de disminuir la temperatura del licor amoniacal que se utiliza en las canales de contacto.

Los principales **problemas no resueltos** relacionados con el sistema de enfriamiento del licor amoniacal son los siguientes:

- Empleo de un fluido incrustante (licor amoniacal) que provoca incrustaciones en las superficies de intercambio térmico y la pérdida de eficiencia en función del tiempo de trabajo de la instalación.
- Incremento de los gastos de mantenimiento y de gastos debido a la ejecución de las tareas de limpieza de incrustaciones provocadas por el licor amoniacal.



A partir de los aspectos antes mencionados se declara como **problema** a resolver: Uso de fluido incrustante (licor amoniacal) que disminuye el intercambio térmico y la **eficiencia** del proceso de enfriamiento del licor amoniacal; así como su influencia en el proceso productivo.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

El proceso de enfriamiento en la batería de enfriadores de licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”.

Y su **campo de acción** es:

Los procesos de transferencia de calor asociados a equipos de intercambio térmico.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

Disminuyendo el factor de incrustaciones es posible aumentar el coeficiente global de transferencia de calor, proporcionando un aumento de los coeficientes de transferencia de calor por convección del licor amoniacal y del agua de enfriamiento, obteniéndose elevados índices de eficiencia que mejoran el proceso de intercambio térmico.

Objetivo general

Evaluar el sistema de enfriamiento del licor amoniacal en la batería de intercambiadores de calor de placas presentes en la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”.

Objetivos específicos

- Establecer un procedimiento de cálculo con vista a evaluar el proceso de enfriamiento del licor amoniacal con el uso de intercambiadores de calor de placas en la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”.
- Determinar los Coeficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el proceso de enfriamiento del licor amoniacal.



Tareas de Investigación

- Establecimiento del marco teórico que sustenta la investigación a través del análisis de los trabajos precedentes y los principales fundamentos teóricos asociados al objeto de estudio.
- Evaluación del proceso de enfriamiento del licor amoniacal con el uso de la batería de intercambiadores de calor de placas.
- Determinación de los coeficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en la batería de intercambiadores de calor de placas durante el proceso de enfriamiento del licor amoniacal.
- Valoración económica del proceso, así como, las afectaciones medioambientales asociadas al mismo.



CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Debido a la gran importancia que han adquirido los intercambiadores de calor de placas en los procesos de intercambio de calor en las instalaciones industriales de la actualidad, los investigadores se han visto en la necesidad de perfeccionar dichos procesos y tecnologías. Estos equipos presentan una fiabilidad considerablemente mayor que otros intercambiadores de calor que antes se usaban y que hoy prácticamente están perdiendo su utilidad.

En el presente trabajo se realiza una descripción del flujo tecnológico de la UBP Lixiviación y Lavado incluyendo también la batería de intercambiadores de calor, y los elementos que componen dichos intercambiadores.

Objetivo del capítulo

Establecer los fundamentos teóricos necesarios para la evaluación del proceso de enfriamiento del licor amoniacal, a partir de la sistematización de los conocimientos científico-técnicos establecidos en los trabajos precedentes.

1.2. Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos; la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, a la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, a los trabajos concernientes al tema de balance energético de los intercambiadores de calor en algunos procesos de la industria desde el punto de vista científico-técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

Desde el punto de vista de la teoría mecánica moderna referente al calor, enunciada alrededor de 1840, existen diversos apuntes sobre el mismo y a la vez se han elaborado y publicado una serie de libros y artículos debido a la gran necesidad de llevar a cabo la modernización de diversos equipos intercambiadores de calor.

Respecto al primer elemento, resulta interesante la revisión de Mijeev et al (1956), donde se examinan las tesis fundamentales de la teoría de la similitud y su aplicación en el estudio de los procesos de transferencia de calor. Su objetivo central es



exponer los principales fenómenos de termotransferencia en la forma más simple y comprensible.

Por su parte Faires (1991), presenta los principios básicos termodinámicos con aplicaciones de gran importancia en la ingeniería mecánica, un punto considerable que se trata es el calor como fuente de energía el cual interviene en los procesos de transferencia, y también se insertan estudios en el campo de tuberías de gas, propulsión a chorro, compresores y refrigeración, pero su enfoque está basado en las principales teorías referentes al calor y a los principios fundamentales de la termodinámica.

Herrera et al (1985), enfoca su trabajo teniendo en cuenta el programa de la asignatura “Equipos de Transferencia de Calor”, en el cual se expresan los fundamentos teóricos necesarios para el cálculo y comprobación de equipos recuperativos de mezcla de acción continua y periódica, regeneradores y de estaciones evaporadoras, donde el calor como fuente de energía es un factor predominante para posteriores estudios referentes a la transferencia de calor, a través de los distintos métodos que éste presenta.

Fernández (1994), plantea las leyes termodinámicas empleadas en el análisis de los procesos térmicos y los conceptos fundamentales empleados en el estudio de éstos. Se detalla con claridad la metodología empleada en la solución de problemas prácticos; un importante aporte de este trabajo es que se describe otra forma de analizar térmicamente los procesos industriales a partir de la inserción del concepto de exergía, el cual es aplicado para realizar el balance exergético de varios equipos industriales entre los que se encuentra la turbina de gas, las bombas y los generadores de vapor.

Los métodos tradicionales para la selección de equipos de intercambio térmico se encuentran en la literatura (Isachenko et al, 1979; Kasatkin, 1985; Kern, 1999; Perry, 1999). En la selección de un intercambiador de calor es necesario tener en cuenta diferentes factores que dependen de las condiciones concretas en que trabajará el equipo y las características de los fluidos a usar, es por ello que se necesitan resultados experimentales que difieren de los reportados en los textos, aunque es



posible el uso de los procedimientos y las expresiones de balance de energía y masa que no se modifican en el análisis de las instalaciones.

Los coeficientes de transferencia de calor, obtenidos de forma experimental, para diferentes aplicaciones se exponen en la literatura consultada (Raju, 1987; Zahid, 2003; Picón, 2004; James, 2005; Abril, 2008; González, 2008; Góngora, 2009). Los autores resumen las técnicas experimentales usadas para obtener los coeficientes y su dependencia de diferentes números adimensionales: Nusselt, Reynolds y Prandtl. En todos los casos los resultados son aplicables a las condiciones específicas en que se desarrollaron los experimentos, por lo que en escenarios diferentes es necesario comprobaciones experimentales que permitan determinar la aplicabilidad de los resultados.

El uso de métodos computacionales para la simulación de intercambiadores de calor ha sido ampliamente usado en la literatura consultada, ello permite simular el comportamiento en diferentes condiciones de operación sin la necesidad de experimentos adicionales que incrementa los costos de las investigaciones. Los aportes fundamentales de los trabajos consultados (Cabral, 2004; Moraga, 2004; Sundén, 2006; Anderson, 2007; Andrés, 2009) están encaminados a lograr mayor precisión y rapidez en la selección de los equipos de intercambio térmico, además de usar herramientas computacionales que permiten la simulación tridimensional de diferentes procesos de transferencia de calor. Las limitantes de las investigaciones anteriores están dadas en que solo es posible su aplicación para las condiciones descritas por los investigadores. Cuando se usan otros fluidos, como es el caso del licor amoniacal, es necesario realizar experimentos previos que permitan precisión en las expresiones de cálculo empleadas.

Importantes son los aportes realizados por Incropera et al (2003), muy en especial el análisis de los modos de transferencia de calor presente en estos intercambiadores de calor. Es un compendio bastante amplio en el campo de los fenómenos de transferencia de calor donde los autores estudian con profundidad las leyes físicas y termodinámicas que rigen el proceso de generación de vapor y establecen con claridad los métodos científicos para su estudio.



La selección adecuada de los equipos de intercambio térmico es importante para la reducción de: los consumos energéticos, los costos de las instalaciones, gastos de mantenimiento y máximo aprovechamiento de la energía disponible en el sistema.

Una parte esencial de cualquier análisis de un intercambiador de calor es la determinación del coeficiente global de transferencia de calor, este coeficiente se define en términos de la resistencia térmica total para la transferencia de calor entre dos fluidos, ello incluye las resistencias por convección y conducción para superficies planas o cilíndricas (Incropera, 2003).

En intercambiadores de placas es importante destacar el trabajo desarrollado por Varona (2007). El autor realiza un análisis de la influencia de las incrustaciones, provocadas por la deposición de sales de calcio y magnesio en la pérdida de capacidad de un equipo enfriador de mosto en una fábrica de cerveza. Efectúa un análisis comparativo de las resistencias por incrustaciones del equipo antes y después de la limpieza y su incidencia en el costo de fabricación de la cerveza.

Los estudios más importantes realizados a los intercambiadores de calor que operan en la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara” se analizan a continuación:

Knowles (2001), analiza la influencia de la transferencia de calor en los enfriadores de mineral, el cual estuvo enmarcado a la determinación de la metodología de cálculo para la transferencia de calor en estos intercambiadores.

Laborit (2001), realizó un cálculo verificativo del intercambiador de calor de placas donde se realizan los cálculos correspondientes a los enfriadores de placa y de tubos y corazas pertenecientes a la UBP Recuperación de Amoniaco de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”, mostrando de ese modo los fundamentos teóricos necesarios para el cálculo y comprobación de estos equipos recuperativos y de mezcla de acción continua, así como el cálculo hidráulico.

Es de destacar por su importancia, el trabajo realizado por Girón (2004), donde se realizan los cálculos de los intercambiadores de calor de placas en el proceso de lixiviación de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”, en el mismo se emplean las metodologías de cálculos para diferentes tipos de intercambiadores por varios métodos, centrándose más en los intercambiadores de calor de placas.



Betancourt (2005), presenta un software para el cálculo y la selección de intercambiadores de calor, que tiene como objetivo ejecutar el cálculo para seleccionar intercambiadores de calor de haz de tubos y coraza e intercambiadores de placas, tomando como base el procedimiento de cálculo y selección de los mismos, criterios expuestos por Isachenco (1984).

Es meritorio destacar los estudios relacionados con los procesos de intercambio térmico, desarrollados en diferentes instalaciones por Charchaval (2010) y Vega (2011) quienes proponen un nuevo método de aprovechamiento del calor proveniente de aguas residuales con el uso de intercambiadores de calor de placas.

En el trabajo realizado por Fernández (2011), se puede observar la exposición del cálculo verificativo realizado a la batería de intercambiadores de calor de placas en la UBP Lixiviación y Lavado del mineral, donde se puede apreciar la forma en que aumenta el factor de incrustaciones en los intercambiadores y la forma en que aumenta la temperatura a medida que transcurre el tiempo de operación después de efectuada una limpieza. Sin embargo solo se verificaron estos aspectos en un tiempo relativamente pequeño.

El análisis de los trabajos precedentes se determinó que existe suficiente literatura relacionada con la temática en estudio. Las metodologías expuestas permiten obtener los parámetros fundamentales de los intercambiadores de placas y la evaluación de los indicadores de eficiencia de los mismos.

1.2.1 Resumen del análisis de los trabajos precedentes:

- En los trabajos anteriores es insuficiente el tratamiento que se da a la temática relacionada con la influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia de la instalación.
- En los estudios anteriores se utilizaron sustancias que sus propiedades difieren de las propiedades del licor amoniacal, excepto el trabajo realizado por Fernández (2011), sin embargo este análisis se realizó en un periodo de tiempo relativamente pequeño.



1.3. Flujo Tecnológico de la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”

En la UBP Lixiviación y Lavado, se le da continuidad al proceso productivo de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara” según la tecnología Carbonato amoniacal. El mineral reducido, procedente de la UBP Hornos de Reducción, es descargado a través de los enfriadores rotatorios en el área de contacto, con una temperatura menor de 260°C , donde se mezcla en las canales de contacto con licor frío procedente de los intercambiadores de calor de placas, a temperatura de 25°C a 33°C . De esta manera se forma una pulpa con relación líquido sólido de 6,3/1, y temperatura $\leq 40^{\circ}\text{C}$ llegando por gravedad a los tanques de agitación mecánica donde se alcanza una densidad de (1130 a 1140) g/L. En esta área existen tres series de contacto, cada serie está compuesta por dos canales de contacto, dos tanques de agitación mecánica de 70 m^3 de capacidad y cuatro bombas centrífugas que son las encargadas de trasegar la pulpa obtenida en las canales de contacto hacia la primera serie de turboaeradores donde comienza la lixiviación del níquel y el cobalto del mineral reducido, utilizando como sustancia disolvente una solución de hidróxido y carbonato de amonio y como agente extraente el oxígeno, este proceso de lixiviación es un proceso de decantación a contracorriente. En la descarga de los últimos turboaeradores de cada miniserie que componen la serie, existen electroimanes para magnetizar las partículas de hierro y así formar flóculos para aumentar la velocidad de sedimentación. La pulpa de primera etapa de lixiviación es descargada en un sedimentador que corresponde a esta primera etapa, este proceso se realiza a través de cajas de transferencias, distribuidores y bombas centrífugas. En los sedimentadores ocurre la separación parcial del licor y el sólido, donde el licor es la sustancia de reboso y la pulpa es la sustancia que se sedimenta. En esta primera etapa de lixiviación, el licor, es bombeado a los tanques colectores para ser utilizado como licor de recirculación y ser enfriado posteriormente y la otra parte es bombeada a la UBP Recuperación de Amoniaco como licor producto para destilarlo y dar continuidad al proceso. Los sólidos que se sedimentan son bombeados a un distribuidor que lo ramifica en partes iguales a otros sedimentadores donde solo



ocurre separación de fase ya que la pulpa no recibe floculación magnética ni inyección de aire, esto es segunda etapa. El reboso de estos sedimentadores es bombeado completamente a los tanques colectores donde se une con la parte que quedó de la primera etapa de lixiviación. La totalidad del licor de los tanques colectores es sometida al proceso de enfriamiento y luego ser utilizada como licor de recirculación en las canales de contacto. La pulpa que alimenta los sedimentadores de lavado recibe floculación magnética para aumentar la velocidad de sedimentación, el reboso se bombea para diluir la pulpa que alimenta a los turboaeradores y la pulpa de fondo se bombea de una etapa de lavado a la etapa siguiente, hasta la quinta y última etapa. En la quinta y última etapa de lavado se obtiene la cola del proceso, esta cola empobrecida se almacena en los tanques de cola para enviarla a la UBP Recuperación de Amoniac para ser destilada con el objetivo de recuperar los gases de amoniaco contenidos en ella. Del reboso de cada etapa de sedimentación de lavado se forma fundamentalmente licor débil y fuerte para introducirlo en los diferentes sedimentadores de lavado para diluir pulpa de fondo, es decir, el reboso de cada sedimentador de lavado se bombea al sedimentador de la etapa anterior para diluir la pulpa de fondo que se introdujo de el sedimentador correspondiente y de esta forma se concreta un proceso en contracorriente donde la pulpa va hacia el final del proceso transformándose en cola y el reboso va hacia el inicio del proceso. Ver anexo 3

Para recuperar el amoniaco que llega al estado de vapor durante el proceso existe un sistema de absorción, en el que se recuperan los gases empleándose un proceso en contracorriente, donde el agua y los gases son los componentes de este sistema.

1.4. Importancia y clasificación general de los intercambiadores de calor en la UBP Lixiviación y Lavado

Esta área de intercambiadores está formada por una batería compuesta por 6 intercambiadores de placas 5 de ellos poseen 495 placas de acero inoxidable y el restante está compuesto por 393 placas de titanio. Tienen como objetivo garantizar el enfriamiento del licor amoniacal procedente del reboso de los sedimentadores de segunda etapa y el restante de la primera etapa de lixiviación. El licor producto ingresa a cada intercambiador de forma separada y es bombeado por un grupo de 4



bombas que tienen la capacidad de vencer las resistencias locales de cada intercambiador y las resistencias que ofrecen las líneas de tuberías. La sustancia que se utiliza como medio refrigerante es el agua tratada procedente de las torres de enfriamiento perteneciente a la Unidad Básica de Servicio (UBS) Termoeléctrica, el agua es bombeada por bombas de elevada potencia, capaces de mantener un necesario y elevado caudal venciendo las resistencias que ofrece la línea y llegando a la batería de enfriadores un flujo volumétrico de más de 2200 m³/h. Esta función de enfriamiento del licor amoniacal es de vital importancia ya que evita que se incremente la tensión de vapor de amoníaco por encima de los valores establecidos y que aumente la solubilidad del magnesio (Mg), factor muy negativo en el proceso de lixiviación del níquel ya que éste se precipita en los equipos y líneas de tuberías, creando costras endurecidas que traen trastornos en el proceso. Al ser enfriado el licor amoniacal se garantiza que la unidad opere balanceada térmicamente.

1.4.1 Clasificación de los enfriadores

El intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor de manera eficiente de un fluido a otro, estando separados éstos por una barrera sólida o encontrándose en contacto. Según la forma de trabajo para conseguir transferir calor, se tendrá la siguiente clasificación:

- **Regeneradores:** los dos fluidos pasan alternativamente a través de la misma superficie, primero lo hace el fluido caliente y seguidamente el frío, tratando que se produzca la menor mezcla física entre las dos corrientes.
- **Mezcladores o de contacto directo:** dispositivos en los cuales las corrientes (fría y caliente) fluyen hacia una cámara abierta donde se produce una mezcla física completa, obteniéndose una sola corriente.
- **Recuperadores:** son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí. Las corrientes fluidas involucradas están separadas entre sí por una pared termoconductora por la cual se transmitirá el calor del medio caliente al medio frío. La transferencia de calor será por convección y conducción.

1.4 Según el flujo de los fluidos los intercambiadores de calor se clasifican en:

- Flujo paralelo: ambos fluidos se desplazan en el mismo sentido, siendo éste poco utilizable.
- Flujo contracorriente: el sentido de circulación de un fluido es el contrario al del otro. Son los que se utilizan normalmente. La transferencia de calor en este intercambiador es más efectiva que la del anterior.

1.5. Funcionamiento, composición y tipos de intercambiadores de calor

Los fluidos frío y caliente se introducen por los orificios de conexión y circulan por los canales que se forman entre placas; de manera alternativa. Un fluido es conducido por los canales impares mientras que el otro es conducido por los canales pares. Los dos fluidos se encuentran separados por una delgada placa a través de la cual se produce la transferencia de calor sin mezclarse. Generalmente, aunque existen múltiples configuraciones, el flujo de ambos fluidos se hace en contracorriente (figura1.1).

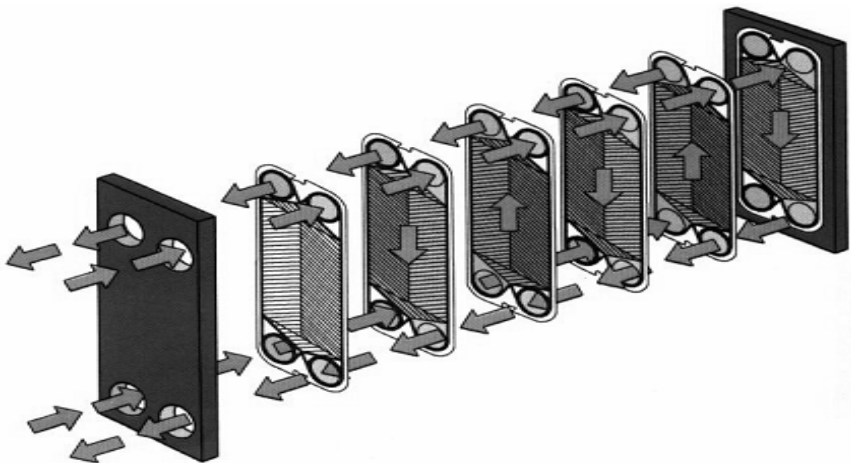


Figura 1.1 Flujo contracorriente de los intercambiadores de calor; (Izquierdo, 2002)

1.5 Bastidor

Tiene la misión de mantener la pila de placas unidas, proporcionando un buen sellado y formando una estructura rígida mediante una serie de barras horizontales que soportan las placas (figura 1.2). Sus componentes son de acero al carbono, con excepción de aquellos que, con las conexiones de entrada y salida, tienen contacto

con los fluidos. En las esquinas del bastidor se encuentran las conexiones para permitir la entrada y salida de los fluidos. El sellado se hace por medio de juntas fabricadas de elastómeros, que se seleccionan de acuerdo con el tipo de servicio, para que sean compatibles con el fluido utilizado, y que se colocan en el borde de las placas rodeando completamente las bocas de los extremos, de manera que el flujo se pueda distribuir de lado a lado de la placa.

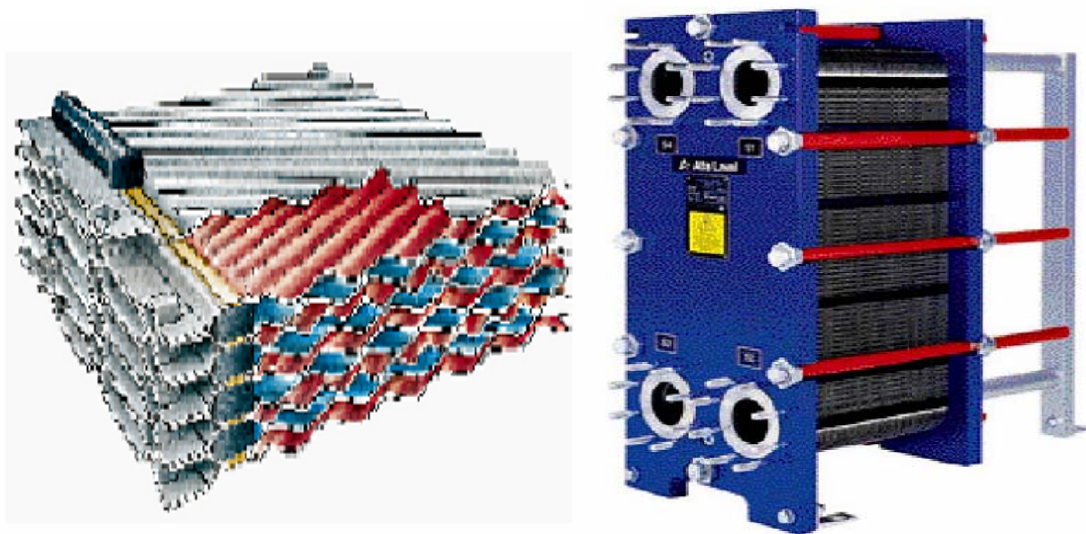


Figura 1. 2 Bastidor de los intercambiadores de placas; (Izquierdo, 2002)

1.5 Placas

Las placas de transferencia de calor se fabrican prensando láminas delgadas de gran variedad de aleaciones y metales, resistentes a la corrosión. El más usado es el acero inoxidable aunque en función de los fluidos a tratar y de sus propiedades pueden ser más adecuados unos metales (o aleaciones) que otros. El espesor de las placas está comprendido entre 0,6 mm y 1 mm. Con el objetivo de aumentar la superficie de transferencia de calor, las placas presentan un relieve corrugado o acanaladuras que ayudan a inducir un alto nivel de turbulencia para velocidades medias relativamente bajas (0,25 m/s a 1 m/s). Este aumento de la superficie varía mucho en función de la forma de las corrugaciones. Gracias a la corrugación de las placas y el aumento de la turbulencia se consigue una mejor transferencia del calor (coeficientes de transmisión mucho mayores que en el caso de tubo y coraza).

Existen varias formas para las corrugaciones, pero pueden diferenciarse dos grandes grupos: tipo “intermating” y tipo “chevron” (figura 1.3). Las corrugaciones de una placa apoyan en distintos puntos con las corrugaciones de la placa adyacente de tal manera que se provee de rigidez al conjunto sin restringir el flujo.

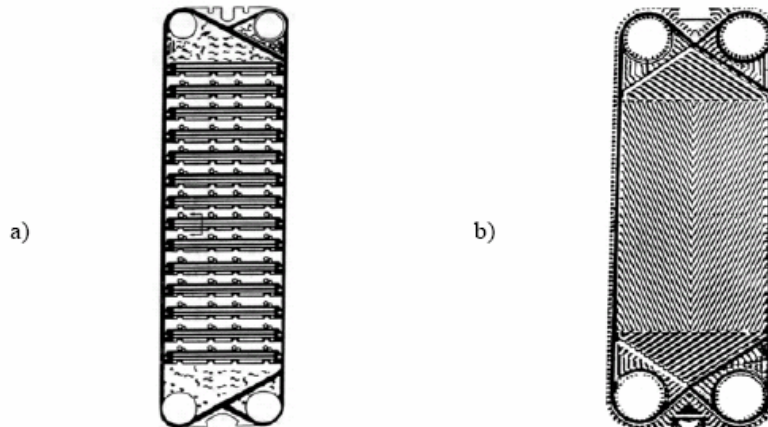


Figura 1. 3 Formas para las corrugaciones de las placas; (Izquierdo, 2002)

a) corrugaciones tipo “Intermating.”

b) corrugaciones tipo “Chevron.”

Existen varios tipos de intercambiadores de placas que se pueden clasificar de varias formas, (figura 1.4).

Atendiendo a la forma de unión de las placas:

- **Mediante juntas (1):** Corresponde al tipo de intercambiador descrito en la figura anterior. Las placas se unen ejerciendo presión entre ellas mediante las barras del bastidor e interponiendo entre ellas, juntas que garantizan la estanqueidad. Se desmonta fácilmente liberando las barras de unión, con lo que las operaciones de mantenimiento y limpieza se pueden efectuar rápidamente.
- **Soldado (2):** Las placas se unen por medio de soldaduras de manera que no se necesitan juntas para garantizar la estanqueidad. La ventaja principal de este tipo de intercambiador es que pueden utilizarse en aplicaciones donde la presión es un obstáculo para las juntas. Pueden trabajar hasta presiones de unos 30-32 bares. Por el contrario, presentan el inconveniente principal de que no pueden ser desmontados para su limpieza. Además ante un cambio en las necesidades del proceso no es posible modificar el número de placas.

- **Semisoldado (3):** Los intercambiadores semisoldados combinan la flexibilidad y servicio de los intercambiadores de junta con la seguridad contra rotura de los soldados. Este tipo de intercambiadores consisten en un número par de placas en los que se alternan los canales soldados con los tradicionales canales delimitados por juntas. Uno de los fluidos circula por los canales soldados mientras que el otro lo hace por el sellado con las juntas. De esta manera tenemos que los canales soldados permiten una mayor presión en su interior mientras que los de junta destacan por su facilidad de desmontaje, mantenimiento y limpieza.



Figura 1.4 Tipos de intercambiadores de placas; (Izquierdo, 2002).

1.5 Atendiendo al número de pasos

- Un paso.
- Varios pasos (por lo general dos): pueden ser de dos pasos para cada fluido o tan solo de un paso para uno de ellos y dos para el otro.
- Los que funcionan en contracorriente son de un paso. En el caso de dos pasos, por uno de ellos los fluidos trabajan en contracorriente, mientras que el segundo paso los fluidos circulan en paralelo, figura 1.5.

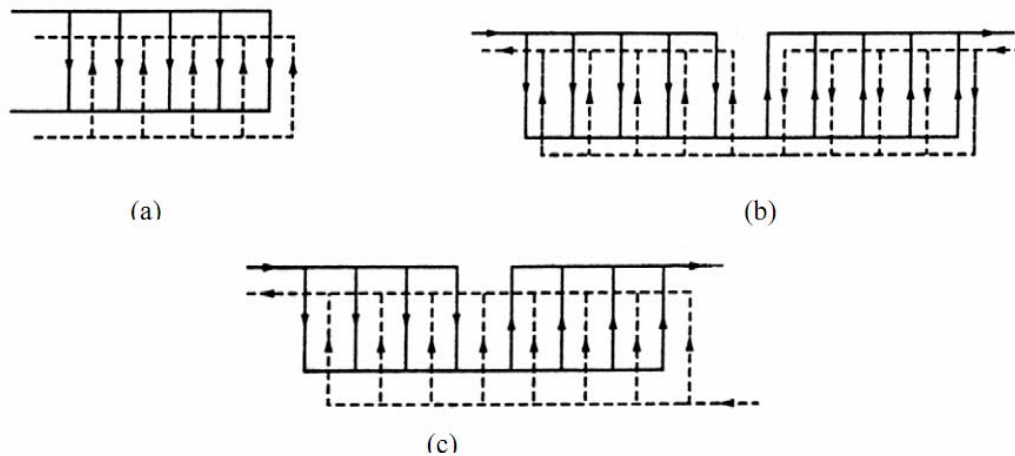


Figura 1.5 (a) Un paso contracorriente; (b) Dos pasos-dos pasos contracorriente; c) Un paso-dos pasos (el primero contracorriente y el segundo paralelo; (Izquierdo, 2002).

Atendiendo al número de circuitos de refrigerante:

- Simple: tenemos tan solo un circuito por el que circula el refrigerante.
- Doble: el refrigerante se distribuye a través de dos circuitos que son independientes. Los beneficios respecto a usar dos unidades en paralelo o en serie son la simplicidad y mejor control de la temperatura del fluido de trabajo y el menor coste de tuberías y conexiones, figura 1.6.

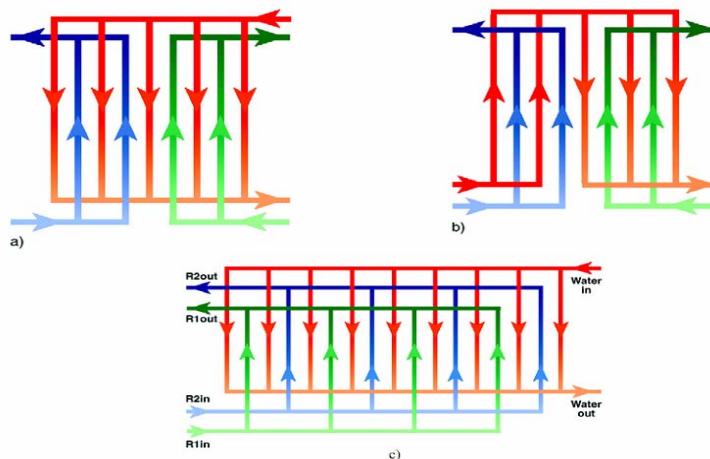


Figura 1.6 Ejemplos de intercambiadores con doble circuito de refrigerante; (Izquierdo, 2002).



1.6. Peculiaridades de los intercambiadores de calor de placas y propiedades físico mecánica del licor amoniacal

Ventajas

- Fácil desmontaje. Las operaciones de mantenimiento y limpieza se efectúan de manera más fácil y rápida. Todas las superficies se pueden limpiar fácilmente ya sea por métodos manuales o químicos, se reducen los tiempos muertos y no se requiere de un equipo especial de limpieza, los costos de mantenimiento son menores.
- La eficiencia del intercambio es mayor que en los equipos que usan tubos.
- Mayor coeficiente global de transferencia de calor, hasta cinco veces superior a las que se pueden conseguir en los intercambiadores de tubo y coraza.
- Ocupan muy poco espacio comparados con los intercambiadores de tubo y coraza, lo que trae consigo menor inversión hasta un 90 % menor en costo como consecuencia de necesitar menor área de transferencia.
- Pueden adaptarse y ser utilizados para una diversa gama de fluidos y condiciones, incluyendo fluidos viscosos.
- Adaptabilidad y diseño modular. La capacidad puede aumentarse o disminuirse con solo poner o quitar placas. La modificación de la disposición de las placas permite modificar fácilmente el programa de temperatura de trabajo e incluso su utilización en distintos procesos. Esta característica no la presentan los termosoldados ya que su desmontaje y ampliación no son posibles. En el caso de los de carcasa y tubo no es fácil adaptarlos a los cambios de la demanda térmica.

Desventajas

- Tienen un rango de temperaturas y presiones más limitadas que otros equipos.
- La chapa del metal, esté o no ondulada, no es el elemento adecuado para soportar presiones elevadas, de modo que las presiones máximas para los modelos más comunes son de 10 a 15 bar, aunque existen modelos capaces de soportar presiones algo mayores. Este problema no es tan acusado en el caso de los intercambiadores termosoldados que pueden llegar a soportar presiones que rondan los 30 – 32 bar. Esta es la principal limitación que presenta este intercambiador.
- No son prácticos para flujo gaseoso, excepto vapor de calefacción.



- No funcionan correctamente con líquidos que tengan sólidos de gran tamaño, debido a la pequeña distancia de separación entre las placas.

El producto terminado de la planta de lixiviación y lavado presenta la siguiente característica:

El licor producto de la primera etapa de lixiviación, es un líquido de color azul prusia, de 1,026 g/l de densidad y una temperatura que oscila entre 40 y 42°C. En su composición química se encuentran presente:

Ni = (9 a 11) g/l.

CO = (0,20 a 0,48) g/l.

NH₃ = (68 a 78) g/l.

CO₂ ≥ 34 g/l.

Sólidos ≤ 120 p.p.m.

1.7. Conclusiones del capítulo

- Existe en la actualidad, suficiente información especializada sobre los procesos de intercambio térmico y su relación con los métodos de cálculo para la evaluación y selección de los mismos.
- Quedaron establecidos los fundamentos teóricos que permiten caracterizar los intercambiadores de calor de placas, en cuanto a su clasificación, tipo, ventajas, desventajas y aplicaciones.



CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL LICOR AMONIAL

2.1. Introducción

La evaluación adecuada de los intercambiadores de calor, para el enfriamiento del licor amoniacal que se utiliza en las canales de contacto, requiere del conocimiento de los métodos para el cálculo de eficiencia en función de los parámetros de funcionamiento que intervienen en el proceso de transferencia de calor de forma general.

Objetivo del capítulo

Establecer una metodología de cálculo, adecuada para la evaluación de los equipos de intercambio térmico que intervienen en el proceso del enfriamiento del licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado.

2.2. Cálculo del flujo total de calor transferido

Los intercambiadores de calor operan en condiciones estacionarias con un coeficiente global de transferencia de calor constante. Las propiedades de los fluidos, usados en los equipos de intercambio térmico, dependen de la temperatura de entrada y salida de los mismos. Debido a que no se conoce la temperatura del fluido en cada punto a lo largo de todo el intercambiador, se usará un valor medio entre la temperatura de entrada y la temperatura salida del equipo.

En la evaluación de un sistema de intercambio térmico es posible el uso de dos métodos:

- Método de la diferencia de temperatura media logarítmica.
- Método de la efectividad y el número de unidades de transmisión del calor.

En la presente investigación se usa el método de la diferencia de temperatura media logarítmica debido a que se conocen los valores de temperaturas en la entrada y salida del intercambiador.

El flujo de calor transferido en un equipo de intercambio térmico se puede obtener a partir del conocimiento de las temperaturas de entrada y salida del fluido; o mediante el conocimiento del coeficiente global de transferencia de calor, el área de



intercambio térmico y la diferencia de temperatura media logarítmica (Incropera, 2003).

Como no hay cambio de fase se asume la constancia de los C_p para ambos fluidos:

$$Q_l = \dot{m}_l \cdot C_{pl} \cdot (T_{e,l} - T_{s,l}) \quad (2.1)$$

$$Q_a = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{s,a} - T_{e,a}) \quad (2.2)$$

Donde:

Q_l - flujo total de calor transferido para el licor amoniacal; (W)

Q_a - flujo total da calor transferido para el agua de enfriamiento; (W)

$\dot{m}_l$ - flujo másico del licor amoniacal; (kg/s).

$\dot{m}_a$ - flujo másico del agua de enfriamiento; (kg/s).

$T_{e,l}$ - temperatura de entrada del licor amoniacal; (K).

$T_{s,l}$ - temperatura de salida del licor amoniacal; (K).

$T_{e,a}$ - temperatura de entrada del agua de enfriamiento; (K).

$T_{s,a}$ - temperatura de salida del agua de enfriamiento; (K).

$C_{p,l}$ - capacidad calorífica del licor amoniacal; ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

$C_{p,a}$ - capacidad calorífica del agua de enfriamiento; ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

Flujo másico para ambos fluidos

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{vl} \cdot \rho_l \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_l = \frac{Q_l}{C_{pl} \cdot (T_{s,l} - T_{e,l})} \quad (2.4)$$

Donde:

$\dot{m}_l$ - flujo másico del licor; (kg/s).

$\dot{m}_{v,l}$ - flujo volumétrico del licor; (m³/s).

ρ_l - densidad del licor; (kg/m³).



El flujo total de calor transferido entre los fluidos frío y caliente al pasar a través de un intercambiador de placas puede expresarse por el método expuesto por Hewitt, (Izquierdo, 2002) como sigue:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; \text{ (W)} \quad (2.5)$$

Donde:

U -coeficiente global de transferencia de calor; $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$. (Tabla 11.2; Incropera, 2003)

A - área de transferencia de calor; m^2 .

ΔT_{ml} - diferencia de temperatura media logarítmica; K.

2.3. Procedimiento para determinar el coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente U depende de los coeficientes de transferencia de calor por convección del licor amoniacal y del agua de enfriamiento y está fuertemente influenciado por la forma de las corrugaciones de las placas. Por su parte el valor de ΔT_{lm} es función de las temperaturas de los fluidos, las capacidades térmicas, y la configuración del intercambiador.

El coeficiente global de transferencia de calor viene dado por la expresión:

$$\frac{1}{UA} = \left(\frac{1}{h_l A} + \frac{e}{K_m} + \frac{1}{h_a A} + R_l + R_a \right) \quad (2.6)$$

De forma similar:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_l A} + \frac{e}{K_m A} + \frac{1}{h_a A} + R_l + R_a} \quad (2.7)$$

Donde:

h_l y h_a - coeficientes de transferencia de calor por convección del licor amoniacal y del agua de enfriamiento; $(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$.

K_m - conductividad térmica del material del que están construidas las placas, en este caso, acero inoxidable AISI 316 y Titanio. Cuya conductividad térmica es de 13,4 y 21,9 W/m K respectivamente. (tabla A1; Incropera, 2003)

e - espesor de la placa; (m).

R_l y R_a - resistencias térmicas por ensuciamiento del licor amoniacal y del agua de enfriamiento; (K/W). (tabla 11.1; Incropera, 2003) (2.8)

Estas resistencias térmicas, originadas por los contaminantes de los fluidos se depositan en las dos superficies de las placas. Su peso, en porcentaje, es significativo. Las resistencias de ensuciamiento antes mencionadas, se generan como consecuencia de que los fluidos (licor amoniacal) pueden transportar contaminantes, y con el paso del tiempo éstos se van depositando sobre las superficies. De este modo se va creando una capa entre el fluido y la superficie que va creciendo en espesor generando una resistencia térmica adicional.

Los coeficientes de convección de los fluidos son función de sus propiedades físicas y de la geometría de las placas, figura 2.1. Se pueden calcular a partir de correlaciones o bien se pueden obtener de manera aproximada de gráficas como las propuestas por Cooper y Usher (1983, exclusivas para fluidos Newtonianos y placas de pequeño tamaño).

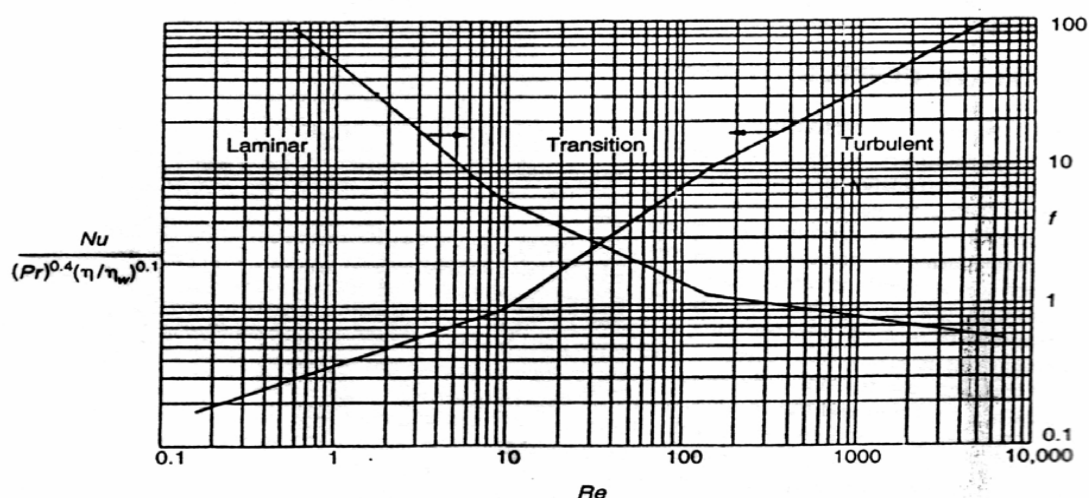


Figura 2.1. Correlaciones de transferencia de calor de una placa pequeña con geometría chevron; (Izquierdo, 2002).



Número de Nusselt (Nu)

Para el cálculo de los coeficientes de convección resulta apropiado utilizar correlaciones de la forma $f(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}) = 0$ (Izquierdo, 2002). En este caso es ampliamente utilizada la expresión:

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Pr}^n \cdot \text{Re}^m; \text{ (adimensional)}. \quad (2.9)$$

Donde:

n, m y C - características del flujo; (adimensional).

Re - número de **Reynolds**; (adimensional).

Pr - número de **Prandtl**; (adimensional).

Las características del flujo se refiere a flujo laminar o turbulento (**tabla 7.3; Incropera, 2003**).

Los intercambiadores de placas se caracterizan por poseer unas corrugaciones que provocan turbulencias en el fluido mejorando la transferencia de calor. En régimen turbulento una correlación que puede utilizarse para el cálculo del número de Nusselt es:

$$\text{Nu} = 0,4 \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot \text{Re}^{0,64} \quad (2.10)$$

En función del número adimensional Nusselt se puede obtener el coeficiente de convección de ambos fluidos.

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot l_c}{k} \quad (2.11)$$

$$h_l = \frac{\text{Nu} \cdot k_l}{l_c} \quad (2.12)$$

$$h_a = \frac{\text{Nu} \cdot k_a}{l_c} \quad (2.13)$$

k_l, k_a - conductividad del licor y el agua; (W/m·K) (**tabla A. 6; Incropera, 2003**).

l_c - longitud característica; (m)

h_l, h_a - coeficiente de transferencia de calor por convección para el licor amoniacal y el agua de enfriamiento.



2.4. Método para el cálculo verificativo del área de transferencia de calor

En cuanto al área de transferencia hay que tener en cuenta el área total de las placas incluyendo las corrugaciones, o bien, el área proyectada. La diferencia entre ambos criterios puede ser de hasta un 50% mayor para el primer caso. Por simplicidad, referiremos A como el área proyectada de modo que vendrá definida por la expresión:

$$A = N \cdot a = N \cdot L \cdot W ; \text{ (Izquierdo, 2002)} \quad (2.14)$$

Donde:

N - número de placas útiles para la transferencia de calor; adimensional.

a - área proyectada de una única placa; m^2 .

L - altura de las placas (en la dirección del flujo); m .

W - anchura de una placa; m .

Dado que a es la superficie efectiva de transferencia, es importante tener en cuenta que las placas de los extremos no son útiles para la transferencia de calor de manera que no se incluirán a la hora del cálculo del área total. Además los valores de L y W no son los valores de las dimensiones totales sino la altura y anchura efectiva de cada placa, es decir, solo se considera el área de cada placa que pone en contacto ambos fluidos. Esto es debido a que en la placa existen diversos orificios de entrada y salida de los fluidos y orificios para el paso de las barras que hacen presión manteniendo juntas las placas y zonas donde los fluidos no están puestos en contacto a través de la propia placa. Estos efectos se describen con mayor claridad en la figura 2.2.

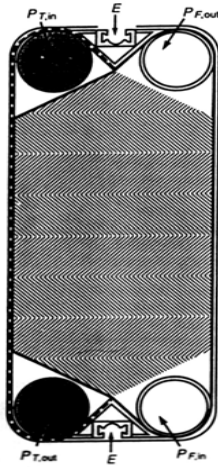


Figura 2.2. Área total y área efectiva de la placa;(Izquierdo, 2002).

2.5. Método de la diferencia de temperatura media logarítmica

Como se conoce por la teoría general de intercambiadores la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos a lo largo del intercambiador no es constante. Para el cálculo de la diferencia efectiva haremos uso de la temperatura media logarítmica, que viene expresada en función de las temperaturas en las secciones de entrada y salida de los fluidos:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.15)$$

Los intercambiadores de placas se diseñan para funcionar con el flujo de los fluidos en contracorriente, figura 2.3. De modo que la expresión utilizada es:

$$\Delta T_m = \Delta T_{ml} = \frac{(T_{e,l} - T_{s,a}) - (T_{s,l} - T_{e,a})}{\ln\left(\frac{T_{e,l} - T_{s,a}}{T_{s,l} - T_{e,a}}\right)} \quad (2.16)$$

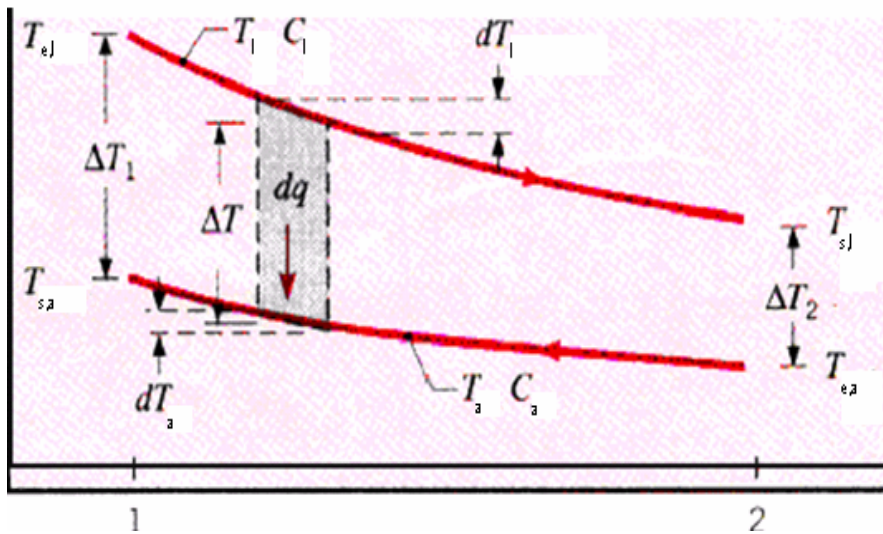


Figura 2.3. Diferencia de temperaturas en un intercambiador de calor a contra flujo;(Incropera, 2003).

El intercambiador de placas con doble paso no se puede configurar como de contracorriente puro: los fluidos intercambian calor en parte en contracorriente y en parte como flujos paralelos. En este caso, la expresión de la temperatura media logarítmica utilizada también es la (2.15), tal y como se hace en los intercambiadores de (tubo y coraza) con dos pasos por tubo y uno por coraza.

Los canales de los extremos del intercambiador presentan la mitad de superficie de transferencia de los canales interiores y por tanto transfieren menos calor. Esto provoca que la efectividad del intercambiador sea algo menor que la que se predice mediante el uso de la temperatura media logarítmica. Es necesario introducir un factor F , menor que la unidad, quedando que la transferencia de calor a lo largo del intercambiador es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml} \quad (2.17)$$

Para el cálculo de este factor de corrección F es necesario definir la llamada relación de capacidades (R) y la efectividad (P) ya que proveen información sobre cómo son las capacidades caloríficas del licor amoniacal y del agua de enfriamiento y cuál es la efectividad del intercambiador. Existen tablas en las que entrando con los valores de R y P es posible calcular el factor F .



$$R = \frac{(m_a \cdot cp)_a}{(m_l \cdot cp)_l} = \frac{T_{e,l} - T_{s,l}}{T_{s,a} - T_{e,a}} \quad (2.18)$$

$$P = \frac{T_{s,a} - T_{e,a}}{T_{e,l} - T_{s,a}} \quad (2.19)$$

$$\Delta T_m = F \cdot \Delta T_{ml} \quad (2.20)$$

El efecto de la disminución de la efectividad, debido a que la superficie de transferencia de los canales exteriores es menor que la de los interiores, es importante cuando se trata con intercambiadores cuyo número de placas es menor que 50. En estos intercambiadores es necesario el cálculo del factor F para poder utilizar la temperatura media logarítmica como modelización de la diferencia efectiva de temperaturas. Para aquellos cuyo número de placas es superior a 50, los efectos de los extremos dejan de ser significativos y es posible despreciarlos. En este caso no es necesario el cálculo del factor F y podemos tomar un valor para él de F=1. De este modo queda que:

$$\Delta T_m = \Delta T_{ml} \quad (2.21)$$

2.6. Cálculo hidráulico del intercambiador de calor

Tanto para el cálculo del Reynolds como para la obtención de los coeficientes de convección en función de número de Nusselt es necesario el cálculo previo de la longitud característica del canal. Podemos obtenerla por la siguiente expresión (también denominada diámetro hidráulico); (Izquierdo, 2002)

$$l_c = \frac{4 \cdot S_c}{P_c} = \frac{4 \cdot b \cdot W}{(2 \cdot b + W)} \cong \frac{4 \cdot b \cdot W}{2 \cdot W} = 2 \cdot b \quad (2.22)$$

Donde:

S_c - sección transversal del canal; m².

P_c - perímetro de la sección del canal; m.

b - ancho del canal o distancia entre placas; m.

W - Ancho de la placa; m. $b \ll \ll W$.

**Número de Reynolds**

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot l_c}{\mu}; \text{ (adimensional).} \quad (2.23)$$

Donde:

l_c - longitud característica del canal; m.

ρ - densidad del fluido; (kg/m³).

v - velocidad del fluido; (m/s).

μ - viscosidad del fluido; N.s/m²

Nota: Las propiedades físicas de los fluidos se seleccionan para el valor medio de la temperatura de entrada y de salida del licor amoniacal y el agua de enfriamiento.

Porcentaje de error

$$\%error = \frac{U_{mayor} - U_{menor}}{U_{mayor}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.24)$$

Debe cumplir con la condición que el:

$$\%error \leq 10\%$$

2.7. Pérdida de carga en el intercambiador de calor

En el diseño mecánico de cualquier intercambiador la pérdida de carga es decisiva, ya que determina la potencia y el consumo de energía en los motores de las bombas que impulsan los fluidos y por tanto influye en la inversión, en los costos de operación y en mantenimiento del sistema de bombeo.

El cálculo de la caída de presión puede hacerse por la siguiente expresión; (Izquierdo, 2002):

$$\Delta P = \frac{4 \cdot f \cdot l_c \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot l_c}; \text{ (Pa).} \quad (2.25)$$

Donde f es el denominado factor de fricción y que puede calcularse bien a partir de tablas o bien a partir de la ecuación de Shah y Focke que presenta la forma; según (Izquierdo, 2002):

$$f = C \cdot Re^m; \text{ (adimensional).} \quad (2.26)$$

Las constantes C y m son función del número de Reynolds y dependiendo del rango en el que se encuentren presentan los valores siguientes:

Tabla 2.1. Constantes C y m en función del número de Reynolds.

	C	m
$Re < 10$	17	-1
$10 < Re < 101$	6,29	-0,57
$101 < Re < 855$	1,141	-0,2
$Re > 855$	0,581	-0,1

Como se puede observar de la definición de ΔP y f ambos parámetros aumentan cuanto menor es la longitud característica (el factor f se ve afectado por la longitud característica a través de la definición del Reynolds). Es decir, cuanto menor es la distancia entre placas (o tamaño de los canales) la caída de presión es mayor. También se observa que la caída de presión aumenta con la velocidad del fluido o lo que es lo mismo, aumenta cuanto menor es el número de canales. Por tanto para un caudal dado, habrá que llegar a un compromiso entre el número de canales y la velocidad de paso.

La pérdida de carga no puede ser demasiado elevada, por lo que dependiendo de la aplicación y sus características se tendrán valores máximos permitidos. Para valores superiores no es rentable el uso del intercambiador.

La **demanda de potencia necesaria** para el movimiento del fluido por las instalaciones de intercambio térmico se obtiene a partir de los valores de pérdida de presión en el interior de los intercambiadores de calor, la expresión usada es la siguiente (Izquierdo, 2002):

$$N = \frac{\Delta P \cdot m^{\bullet}}{1000 \cdot \rho} \quad (2.27)$$

Donde:

N- potencia demandada; kW.

$m^{\bullet}$ - flujo másico; kg/s.

Si se divide la ecuación 2.27 por el flujo másico del fluido se obtiene la demanda de energía específica expresada en kJ/kg.

$$E = \frac{N}{m^{\bullet}} \quad (2.28)$$

2.8. Método para el cálculo experimental

Coeficiente global de transferencia de calor

Para determinar la influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia de los intercambiadores de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal se emplea el método temporal, mediante el cual se calculan las variables de funcionamiento del intercambiador en función del tiempo de trabajo.

El coeficiente global de transferencia de calor mediante el uso de la expresión del flujo total de calor transferido (ecuación 2.1), entre el licor amoniacal y el agua de enfriamiento al pasar a través de un intercambiador de placas puede expresarse de la siguiente manera:

$$U = \frac{m_l \cdot C_{pl} \cdot (T_{el} - T_{sl})}{A \cdot \left[\frac{(T_{el} - T_{sa}) - (T_{sl} - T_{ea})}{\ln \left(\frac{T_{el} - T_{sa}}{T_{sl} - T_{ea}} \right)} \right]} ; \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (2.29)$$

Cálculo del factor de incrustaciones

Para calcular el factor de incrustaciones se compara el valor de U máximo experimental del equipo limpio con los valores experimentales en función del tiempo; (Raju & Chand, 1987):

$$Rd = \frac{U_{máx} - U}{U_{máx} \cdot U} ; (\text{m}^2 \text{K/W}) \quad (2.30)$$

Cálculo de la eficiencia térmica

La eficiencia es el porcentaje que representa la relación del desempeño real del equipo con respecto al desempeño máximo:

$$\eta = \left(\frac{T_{e,l} - T_{s,l}}{T_{e,l} - T_{e,a}} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.31)$$



2.9. Instalación experimental para la evaluación del proceso de enfriamiento del licor amoniacal.

Para realizar la evaluación del proceso de enfriamiento del licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado de la de la empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara”, se usaron los equipos de la propia instalación, la cual está compuesta como sigue:

- Bombas centrífugas
- Intercambiador de calor de placas
- Instrumentación y control de los parámetros
- Válvulas de control

Las bombas centrífugas para licor amoniacal son las encargadas de trasegar el flujo que succionan de los tanques colectores, a cada enfriador que se encuentre operando y luego hacia las canales de contacto, para disminuir la temperatura del mineral reducido. Sus características son las siguientes:

Potencia nominal: 110 kW

Tensión nominal de la red: 440 V

Corriente nominal: 172.5 A

Frecuencia: 60 Hz

Rendimiento nominal: 95%

Frecuencia de rotación: 1120 rpm

En la UBS Termoeléctrica existe un sistema de torres de enfriamiento, el cual tiene la función de disminuir la temperatura del agua que se utiliza en determinados procesos de producción de la empresa. Específicamente los intercambiadores de calor de placas, en cuestión, utilizan esta agua como medio refrigerante. Para llevar a cabo este proceso se utilizan 3 bombas que tienen las siguientes características:

Caudal: 2400 m³/h

Altura de presión: 66 m

Potencia nominal: 630 kW

Tensión nominal de la red: 6000 V

Corriente nominal: 71.4A

Frecuencia: 60 Hz

Rendimiento nominal: 0.90

Frecuencia de rotación: 900 rpm

Intercambiadores de calor de placas

En el sistema de enfriamiento de licor amoniacal existen cinco intercambiadores con placas de acero inoxidable AISI 316 y uno con placas de Titanio este último es de menor capacidad.

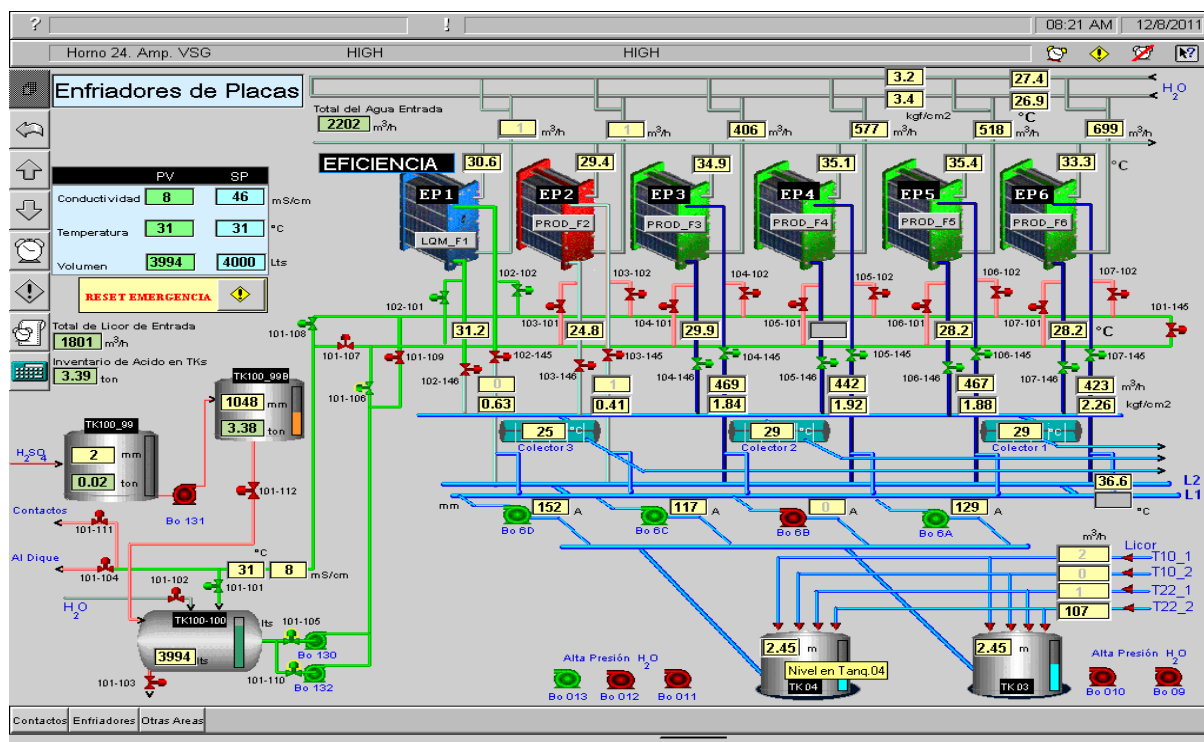


Figura 2.4. Diagrama de flujo de los intercambiadores de calor de placas; (imagen, CITEC).

Tabla 2.2. Datos Técnicos de los intercambiadores de calor de placas.

Parámetros y dimensiones	Unidad de medida	Cámara caliente	Cámara fría
Fluido	-	Licor amoniacal	Agua de enfriamiento
Área de intercambio de calor(Ni)	m ²	871,6	
Área de intercambio de calor(Ti)	m ²	600	
Número de placas (Ni)	U	495	



Número de placas (Ti)	U	393	
Temperatura de entrada	⁰ C	38.70	27.74
Temperatura de salida	⁰ C	28,01	35.5
Temperatura promedio	⁰ C	33.3	31.6
Máx. Temperatura de trabajo(Ni)	⁰ C	65	
Máx. Temperatura de trabajo(Ti)	⁰ C	80	
Presión de prueba(Ni)	bar	7,8	
Presión de trabajo(Ni)	bar	6	
Presión de trabajo(Ti)	bar	6	
Volumen en cámaras(Ni)	m ³	1,215	
Volumen en cámaras(Ti)	m ³	1,149	
Dirección relativa de los fluidos	Contracorriente		
Material de las placas (Acero inoxidable)	Placas de geometría chevron : AISI 316 Placas de geometría chevron: Titanio		
Capacidad nominal de trabajo(Ni)	Kcal/h	11190000	

Instrumentación y control de los parámetros

La medición de los diferentes parámetros durante el proceso de experimentación se realizó con la instrumentación disponible en la propia empresa, previo a la toma de datos se calibraron los instrumentos con vista a garantizar la confiabilidad de los resultados.

Para la medición de flujo de licor y de agua de enfriamiento se usaron flujómetros inductivos CROHNE-IFC090 con salida de corriente de 4 a 20 mA, conectado a un PLC S7 300 y se observa la medición de los parámetros en tiempo real, en la máquina computadora ubicada en el panel de control con un sistema supervisor CITEC.

Para la medición de presión de entrada y salida del agua de enfriamiento y licor amoniacal al enfriador, se usaron transmisores de presión manométrica SMAR LD-301 con presión máxima de 3600 PSI y salida de corriente de 4 a 20 mA, conectado a un PLC S7 300 y se visualiza la medición en la computadora ubicada en el panel de control con un sistema supervisor CITEC.



Para la medición de temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento y del licor amoniacal al enfriador, se usaron termoresistencias PT100 de 0 a 500 °C, con salida de corriente de 4 a 20 mA, conectadas a un PLC S7 300 y se visualizan las mediciones en la computadora ubicada en el panel de control con un sistema supervisor CITEC. Estas termoresistencias están instaladas en la propia línea de tubería por donde se transportan el agua de enfriamiento y el licor amoniacal.

Válvulas de control

Las válvulas con las que cuentan los intercambiadores de calor son del tipo Larox PEV 200A10–603LZ (automática), InterApp GB-232-10 y InterApp GB-232-07, con una presión máxima de trabajo de 8 bar y temperatura máxima de 95°C. La apertura de éstas, determinan la velocidad del flujo que se maneja en el proceso. Las válvulas se seleccionan en función del tipo de fluido, la presión, velocidad de trabajo y el diámetro de tuberías.

2.10. Diseño experimental

Teniendo en cuenta las literaturas consultadas y el procedimiento de cálculo expuesto se considera que las variables que existen en el proceso de enfriamiento del licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado son:

- Temperatura de entrada del licor amoniacal
- Temperatura de entrada del agua de enfriamiento
- Temperatura de salida del licor amoniacal
- Temperatura de salida del agua de enfriamiento
- Flujo másico del licor amoniacal
- Flujo másico del agua de enfriamiento
- Presión de entrada y salida del licor amoniacal y agua de enfriamiento

Técnica experimental para determinar la pérdida de eficiencia en función de las incrustaciones

La influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia de los intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal se determinó mediante treinta corridas experimentales con un tiempo de duración de 24 horas cada uno. Antes de cada experimento se realizó la limpieza de las placas a través del sistema de limpieza químico que existe en la instalación. Este sistema emplea una solución de ácido sulfúrico al 3%. Antes de iniciar el proceso de limpieza, se corta el flujo de licor que está atravesando el enfriador en cuestión y se hace fluir agua para sacar todo el licor que quedó dentro de la cámara del enfriador. Una vez que se ha realizado esta operación, se corta el agua y se hace fluir la solución de ácido sulfúrico durante un tiempo establecido, al terminar este tiempo la solución ácida fluye en sentido contrario automáticamente y luego se hace fluir agua para sacar el ácido y las partículas sólidas que antes estaban impregnadas en el interior de las placas, quedando limpio y listo para operar.

2.11 Procedimiento para el procesamiento estadístico de los resultados

El valor medio de temperatura de salida del licor posee un valor permisible pero no se conoce con qué certeza se puede afirmar que es una buena estimación de las temperaturas medias del licor para todos los ciclos que se realizan en el proceso estudiado.

Para dar respuesta a esta necesidad, se procedió a calcular la probabilidad de que el error cometido en la estimación de la temperatura promedio del licor, fuese menor o igual que $6,74^{\circ}\text{C}$ para las placas de Acero Inoxidable y $5,86^{\circ}\text{C}$ para las placas de Titanio.

Los pasos desarrollados se muestran a continuación:

$$P(|E(\theta) - \theta| \leq d) = 1 - \alpha \quad (2.32)$$

Donde θ es el parámetro en estudio (temperatura media del licor), $E(\theta)$ es el valor esperado del parámetro (coincide con la media muestral), d es el error máximo permisible; y $1 - \alpha$ es la probabilidad que se busca.

La ecuación (2.32) puede transformarse en $P(-d \leq \bar{X} - \mu \leq d) = 1 - \alpha$ y su desarrollo es equivalente a la siguiente expresión:

$$P\left(-\frac{d}{s/\sqrt{n}} \leq t(n-1) \leq \frac{d}{s/\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (2.33)$$

En este caso no se conoce la varianza del fenómeno, por lo que debe estimarse mediante su estimador óptimo (la varianza muestral); y la fórmula es la siguiente:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (2.34)$$

Como el tamaño de la muestra es igual a 16 que es menor que 25, y la varianza poblacional es desconocida, el estadígrafo usado es T-Student con 15 grados de libertad. Como la distribución Student es simétrica respecto a la media, la probabilidad buscada se calcula de la siguiente manera

$$P\left(-\frac{d}{s/\sqrt{n}} \leq t(n-1) \leq \frac{d}{s/\sqrt{n}}\right) = 1 - 2P\left(t(n-1) \geq \frac{d}{s/\sqrt{n}}\right) \quad (2.35)$$

2.12 Conclusiones del capítulo.

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de los intercambiadores de calor de placas en la UBP Lixiviación y Lavado.
- Los índices de eficiencia térmica según el método propuesto, está directamente relacionado con la temperatura de entrada y de salida del licor amoniacal y del agua de enfriamiento además de los flujos volumétricos de ambos fluidos.
- La influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia de los intercambiadores de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal, se determinó mediante treinta corridas experimentales con un tiempo de duración de 24 horas.



CAPÍTULO 3: VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1. Introducción

Por la importancia que reviste, desde el punto de vista económico y ambiental, conocer el estado actual de la batería de intercambiadores de calor de placas ya que ello influye en los costos de mantenimiento en la eficiencia metalúrgica del proceso y en el ambiente donde laboran las personas encargadas de la operación, el presente capítulo tiene como principal **objetivo:**

Evaluar el comportamiento de los principales parámetros de trabajo del proceso de enfriamiento del licor amoniacal en la UBP Lixiviación y Lavado.

3.2 Análisis de los resultados para la selección del equipo

De acuerdo con la metodología de cálculo expuesta en el capítulo 2 se efectuó el cálculo verificativo de los principales parámetros de la instalación.

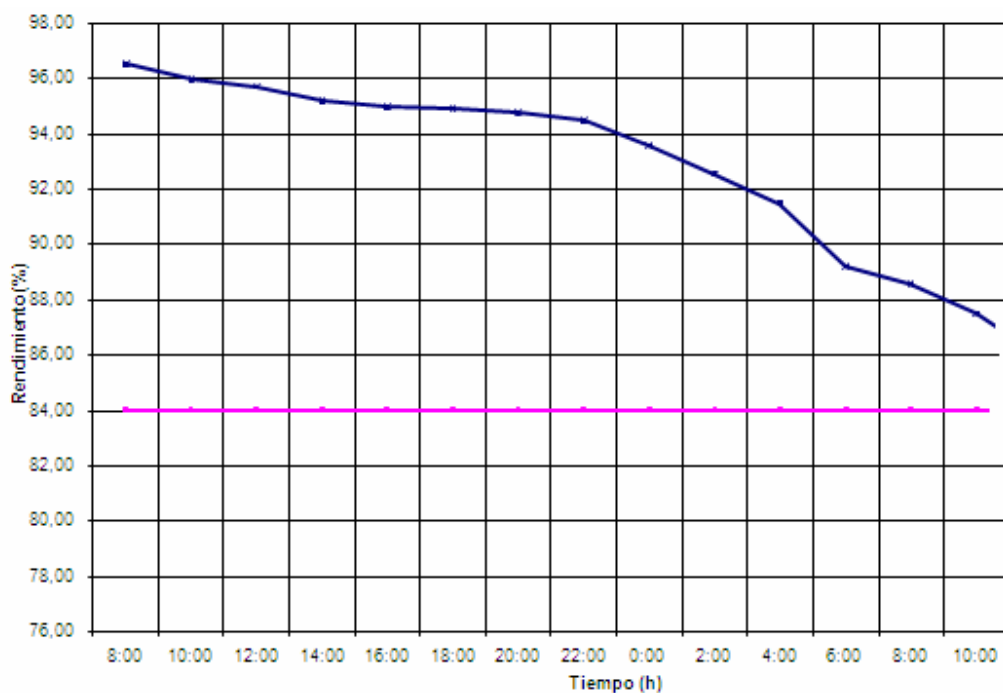
En las siguientes tablas se muestran los principales resultados obtenidos para la selección de los equipos que operan en el proceso de enfriamiento de licor amoniacal.

Tabla 3.1. Resultados principales del cálculo.

Parámetros a comparar	Parámetros de la instalación		Cálculo verificativo	
Flujo másico de agua que se necesita para enfriar el licor	154.23 kg/s		117.83 kg/s	
Flujo másico del licor	121,39 kg/s		86.15 kg/s	
Área de transferencia de calor	871.6 m ²		867.07 m ²	
Caída de presión	Licor	Agua	Licor	Agua
	$2.89 \cdot 10^3$ Pa	$367 \cdot 10^3$ Pa	205.364 Pa	260.70 Pa
Flujo total de calor transferido para el licor	1785028 W			

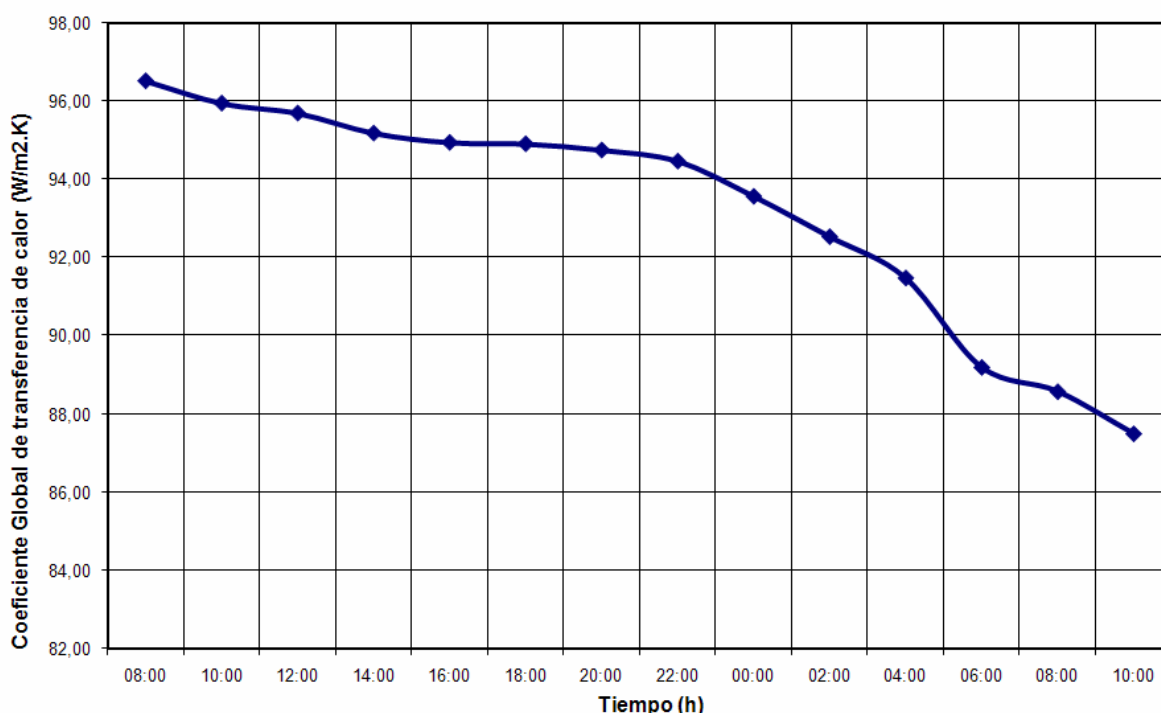
Flujo total de calor transferido para el agua	4819824.36 W
Coefficiente global de transferencia de calor	980,3031 W/m ² .K
Diferencia de temperatura media logarítmica	1.924 K
Reynolds para el agua de enfriamiento	68965.51
Reynolds para el licor	99453.78

Gráfica 3.1. Comportamiento del rendimiento en función del tiempo de operación para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.



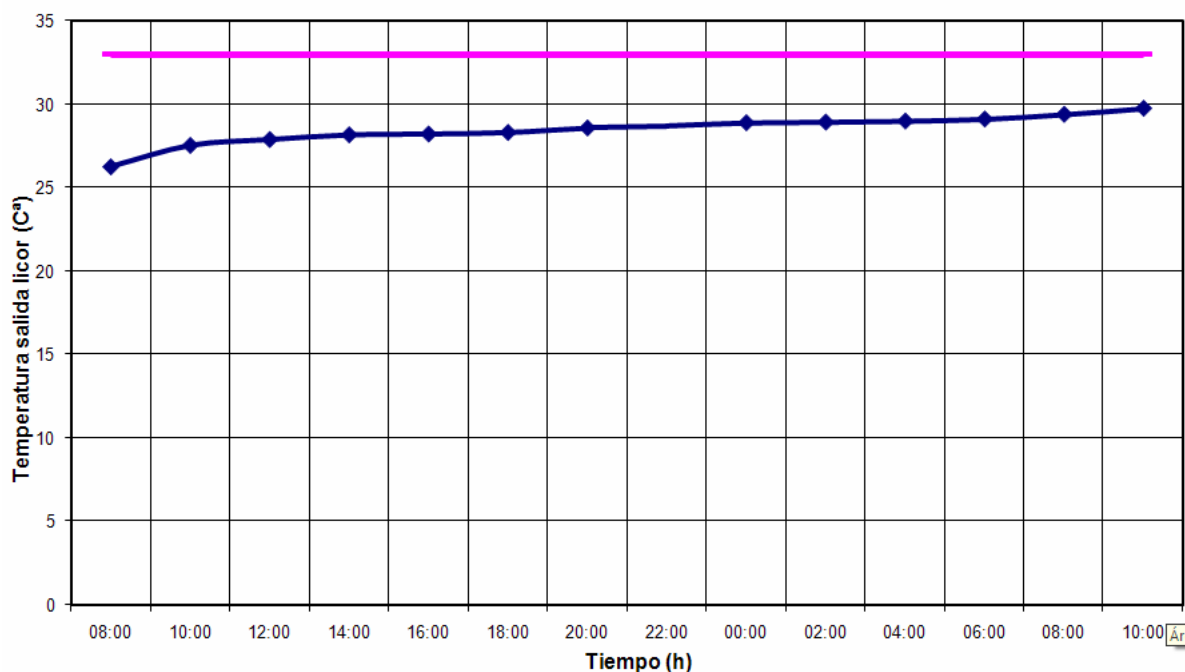
La gráfica anterior muestra la manera en que varia la eficiencia a medida que transcurre el tiempo de operación de estos intercambiadores, este comportamiento está asociado con las características incrustantes que tiene el licor amoniacal.

Gráfica 3.2. Comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor en función del tiempo de operación para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.



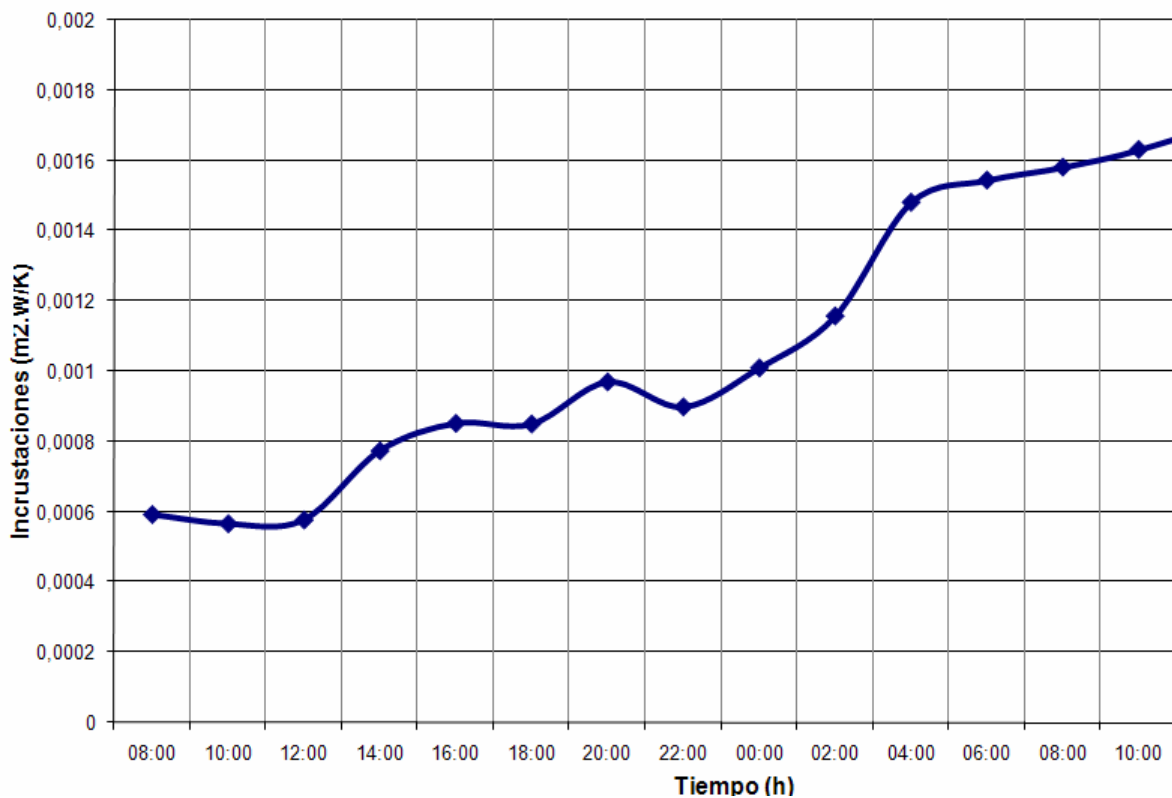
Existe cierta diferencia en el comportamiento del coeficiente mostrado anteriormente y el coeficiente que muestra el intercambiador que posee placas de Titanio; ya que este último tiene menor área de intercambio (600 m^2), lo que trae consigo que tenga menor eficiencia térmica aunque las placas tengan mayor conductividad térmica ($21,9 \text{ W/m K}$).

Gráfica3.3. Comportamiento de la temperatura de salida del licor en función del tiempo.



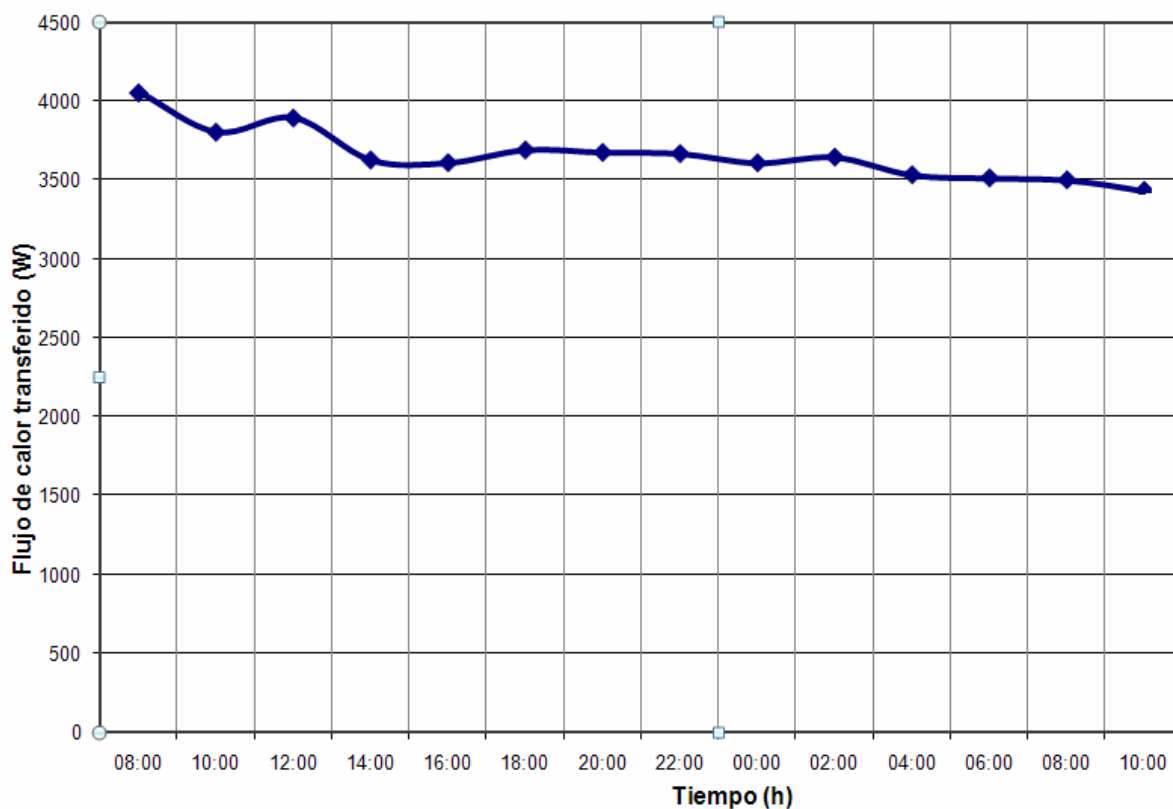
La temperatura de salida del licor aumenta en función del tiempo de operación. Para estos intercambiadores que poseen placas de Acero Inoxidable se estableció un límite de temperatura (33°C) que se muestra en la gráfica, lo que quiere decir que si se viola esta condición pueden aparecer perturbaciones en el proceso de enfriamiento del mineral que llega a las canales de contacto y por tanto el proceso productivo también se afecta.

Gráfica 3.4. Comportamiento del factor de incrustaciones en función del tiempo de operación para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.



Este factor tiene una fuerte relación con el coeficiente global de transferencia de calor y prácticamente depende de la cantidad de sólidos en suspensión. A medida que aumenta, la temperatura de salida del licor también lo hace, lo que provoca que disminuya la eficiencia del proceso.

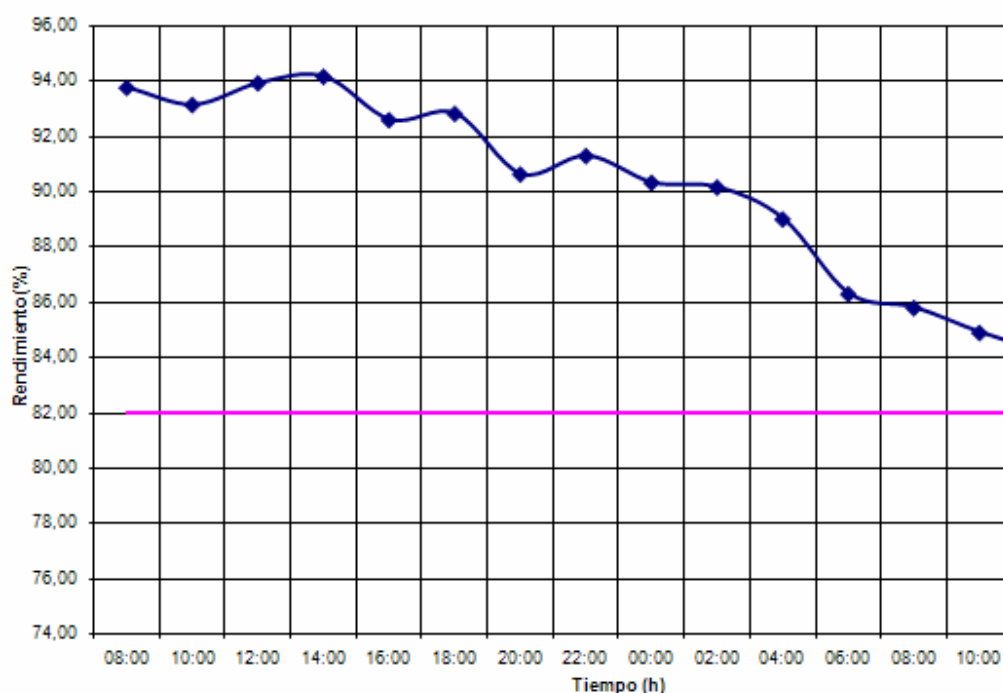
Gráfica 3.5. Comportamiento del flujo de calor transferido en función del tiempo de operación para intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.



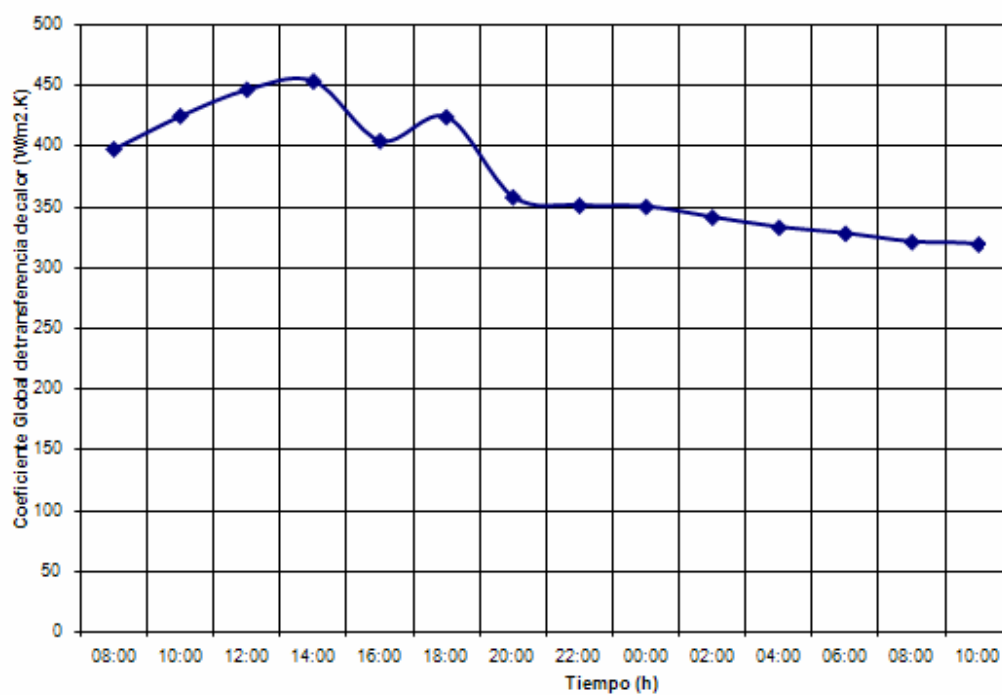
El flujo de calor transferido es proporcional al área de intercambio térmico. Al igual que otros parámetros, se ve afectado cuando aumenta el factor de incrustaciones. El intercambiador con placas de titanio muestra menor flujo de calor transferido que los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable, aunque para estos últimos el flujo de entrada de licor es menor.

En la siguiente gráfica se analizó el comportamiento del rendimiento par el intercambiador con placas de Titanio. Al igual que los intercambiadores expuestos anteriormente, para este intercambiador se estableció un límite de temperatura para la salida del licor (35°C) que corresponde aproximadamente a una eficiencia de 82%, sin embargo la eficiencia que se estableció para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable es de 84 %. Estos tienen 495 placas y el de Titanio tiene 102 placas menos, lo que tributa a que desempeñe menor rendimiento térmico.

Gráfica 3.6. Comportamiento del rendimiento en función del tiempo de operación para el intercambiador con placas de Titanio.

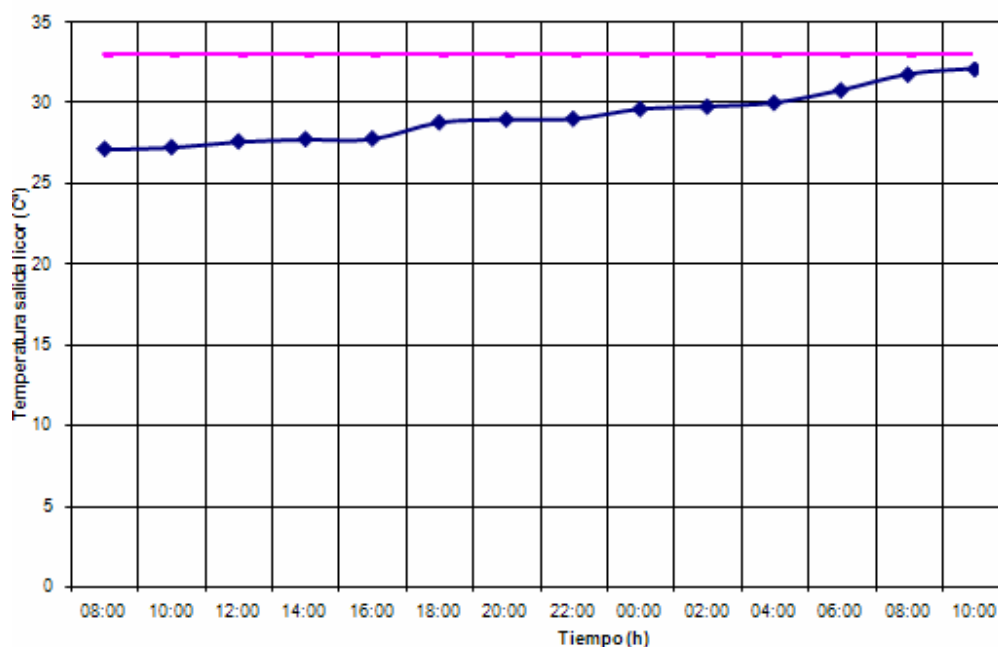


Gráfica 3.7. Comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor en función del tiempo de operación para el intercambiador con placas de Titanio.



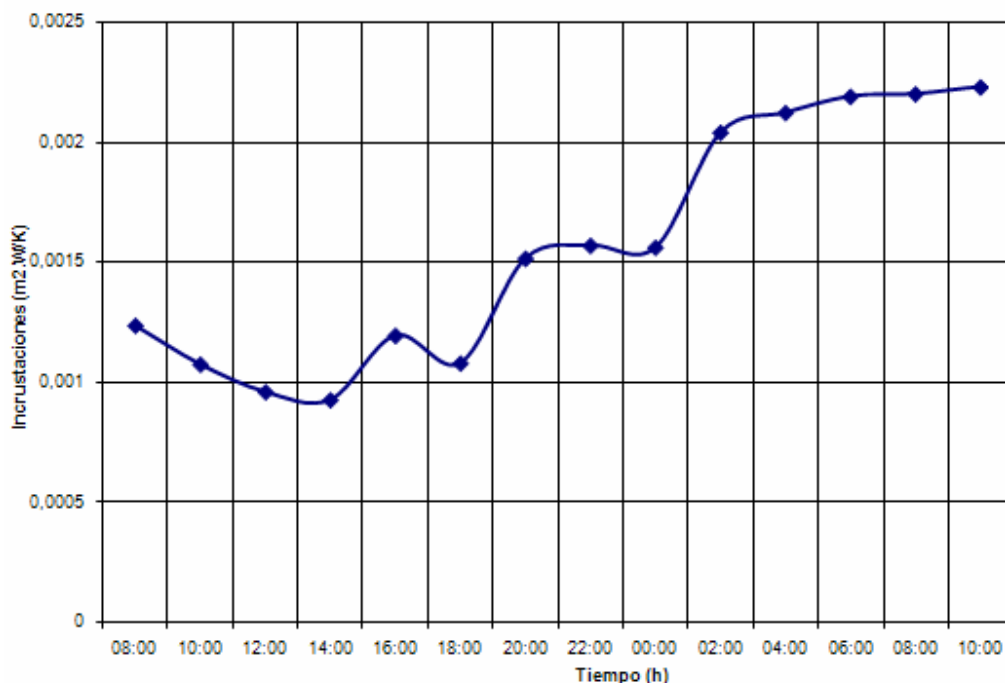
Como se expuso anteriormente, este intercambiador posee placas que su conductividad térmica es mayor que la de los demás intercambiadores, además el flujo de entrada de licor es mayor y el flujo de entrada de agua de enfriamiento también es mayor lo que tributa a que exista mayor eficiencia pero debido al número de placas que posee, el tiempo de retención de los fluidos en su interior es menor que en los otros intercambiadores, lo que provoca que la temperatura de salida del licor sea mayor y por tanto muestre menor rendimiento.

Gráfica 3.8. Comportamiento de la temperatura de salida del licor función del tiempo de operación para el intercambiador con placas de Titanio.



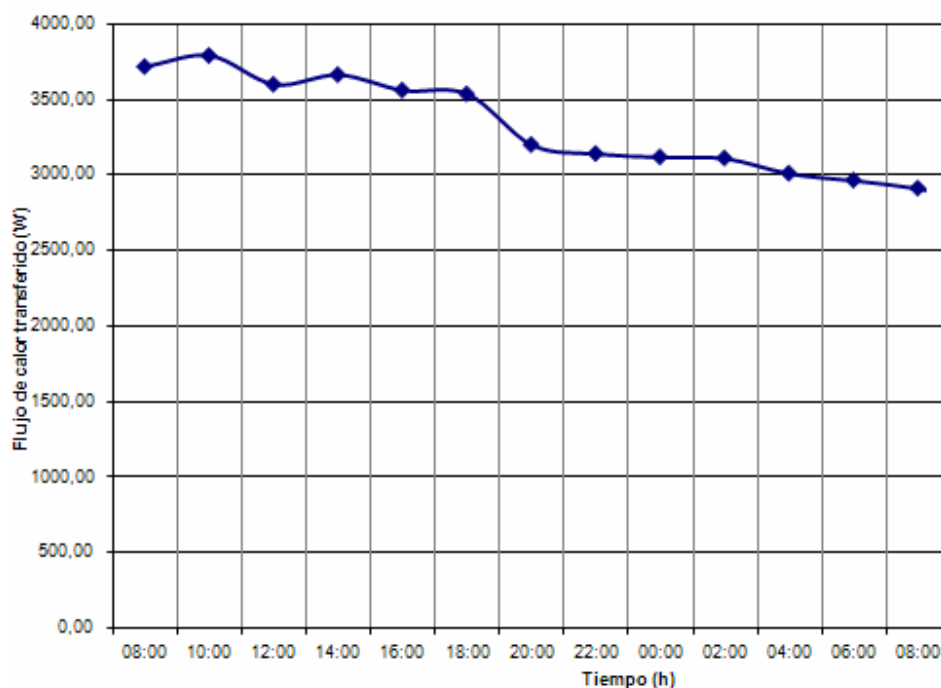
El límite de temperatura para este intercambiador es de 35°C como muestra la gráfica. La curva tiene pendiente positiva lo que indica que la temperatura aumenta en el tiempo. Es conocido que cuando la temperatura de salida del licor amoniacal está por encima de los valores prescritos la planta pierde su balance térmico, este hecho ocasiona considerables pérdidas económicas ya que se dificulta la absorción de los gases (NH_3 y CO_2) que son de vital importancia en el proceso de Lixiviación del mineral que se procesa en la UBP Hornos de Reducción.

Gráfica 3.9. Comportamiento del factor de incrustaciones en función del tiempo de operación para el intercambiador con placas de Titanio.



Las incrustaciones en este intercambiador aumentan debido a que opera con mayor flujo de licor que los demás. Por criterios de expertos se conoció que en ocasiones se hace necesario realizar la limpieza con más prontitud que en el caso de los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.

Gráfica 3.10. Comportamiento del flujo de calor transferido en función del tiempo de operación para el intercambiador con placas de Titanio.



Se comprobó que este intercambiador presenta un menor flujo de calor transferido que los demás intercambiadores, lo que trae consigo que sea menos eficiente que los demás, con una eficiencia promedio de 89.81 % en comparación con los de placas de Acero Inoxidable que tienen una eficiencia promedio de 92.31 %

3.3. Valoración económica

Para la valoración económica se tendrá en cuenta lo que se comprobó en la realización del procesamiento estadístico de los resultados. Ver anexo 1

Sustituyendo los valores reales en la ecuación (2.35), se tiene que: $1 - \alpha = 0,9999$

De manera que como su valor es bien alto significa que la estimación ha sido buena y se puede asumir el valor de la media muestral como el valor de la temperatura promedio para todo el proceso de intercambio de calor con placas de Acero Inoxidable y placas de Titanio.

La eficiencia térmica posee una proporcionalidad inversa con la temperatura de salida del licor, la temperatura promedio de salida del licor es 28,82° C y 29.57 ° C



para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable y con placas de Titanio respectivamente (están muy cerca de la óptima que son 26,26° C y 27.14 ° C), y las observaciones de temperatura de salida del licor nunca sobrepasan los 32.4° C. La eficiencia promedio para ambos ciclos según representa la muestra, es igual a 92.31% y 89.81 % para el intercambiador de Placas de Titanio lo que indica que cuando se detienen los intercambiadores para realizar la limpieza, aún pueden funcionar más tiempo con una eficiencia que ha disminuido pero es factible todavía. Al alargar el ciclo de limpieza, se logra ahorrar los productos aditivos necesarios para eliminar las incrustaciones en las placas y por tanto existe cierto ahorro monetario. Las rectas de regresión muestran que se puede mantener 2 horas más en operación los intercambiadores antes de realizar la limpieza, aunque el rendimiento alcanza un 87 % para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable y 85 % para el intercambiador con placas de titanio. Con este estiramiento del tiempo de operación se ahorran 228 lavados lo que se traduce en un ahorro de 6067.08 CUC por concepto de limpieza.

Gasto de la explotación de la instalación para transportar 1 m³ de licor amoniacal a 108 m de distancia.

$$G_{\text{exp}} = \frac{G_A}{Q} \quad (\text{CUC/m}^3) \quad (3.1)$$

Donde:

G_A - gasto anual de explotación de una bomba; (CUC/año).

Q - caudal transportado por las bombas (6B + 6C + 6D); (m³/año).

Gasto anual de explotación de una bomba

$$G_A = V + F \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.2)$$

Donde:

V - gasto unitario variable; (CUC/año).

F - gasto fijo global; (CUC/año).

Gasto unitario variable



$$V = g_{elect} + g_{mant} + g_{agua} + g_s \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.3)$$

Donde:

g_{elect} - gasto por consumo de energía eléctrica; (CUC/año).

g_{mant} - gasto anual por mantenimiento; (CUC/año).

g_{agua} - gasto por consumo de agua; (CUC/año).

g_s - gasto por salarios de los operadores de la instalación; (CUC/año).

Gasto por consumo de energía eléctrica

$$g_{elect} = \frac{T \cdot N_m \cdot K_p \cdot t_{tb}}{\eta} \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.4)$$

Donde:

T - tarifa de corriente eléctrica; (CUC/kW·h).

N_m - potencia consumida por el motor de las máquinas; (kW).

K_p - coeficiente de pérdida; (adimensional).

t_{tb} - tiempo trabajo de las bomba; (h/año).

η - rendimiento del motor; (adimensional).

Gasto por consumo de agua

$$g_{agua} = P_a \cdot Q_a \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.5)$$

Donde:

P_a - precio del agua tratada; (CUC/m³).

Q_a - volumen de agua; (m³/año).

Gasto por salarios de los operadores de la instalación



$$g_s = t_a \cdot t_n \cdot k_{ss} \cdot k_{dr} \cdot k_{pc} \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.6)$$

t_a - tarifa salarial del personal directo de la instalación; (CUC/h).

t_n - tiempo de trabajo del operario en la instalación; (h/año).

K_{ss} - coeficiente de seguridad social; (adimensional).

k_{dr} - coeficiente de descanso distribuido; (adimensional).

k_{pc} - coeficiente de pago complementario; (adimensional).

Gasto fijo global

$$F = g_{amort1} + g_{amort2} + g_{spi} \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.7)$$

Donde:

g_{amort1} - gasto por amortización de las bombas; (CUC/año).

g_{amort2} - gasto por amortización de tuberías y soportes; (CUC/año).

g_{spi} - gasto por salario del personal indirecto; (CUC/año).

Gasto por amortización de las bombas

$$g_{amort1} = \frac{N_g \cdot I}{n} \cdot 100 \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.8)$$

Donde:

N_g - tasa de amortización de las máquinas; (%).

I - valor inicial de las máquinas; (CUC).

n - tiempo de amortización de las bombas; (h).

Gasto por amortización de tuberías y soportes

$$g_{amort2} = \frac{N_{gt} \cdot I_t}{100} \quad (\text{CUC/año}) \quad (3.9)$$

Donde:



N_{gt} - tasa de amortización de las tuberías y soportes; (%).

I_t - costo de las tuberías y soportes; (CUC/año).

Gasto por tareas de limpieza química de los intercambiadores

$$G_{lim} = P_A + P_{Ad} + P_{Ac}$$

P_A – Precio del agua tratada; CUC/m³

P_{Ad} – Precio de aditivos; CUC/m³

P_{Ac} – Precio del ácido sulfúrico; CUC/m³

Tabla 3.2. Costos económicos

Gasto de la explotación de la instalación	0,18 CUC/m ³
Gasto anual de explotación de una bomba	798 837 CUC/año
Gasto por consumo de agua	1 300 CUC/año
Gasto por salarios de los operadores de la instalación	11 894,75 CUC/año
Gasto por amortización de las bombas	1 609,65 CUC/año
Gasto por amortización de tuberías y soportes	179,1 CUC/año
Gasto por consumo de energía eléctrica	126 690,72 CUC/año
Gasto fijos globales	2 794 CUC/año
Gasto por tareas de limpieza	38850.6CUC/año



Costo de una limpieza	26.61 CUC
-----------------------	-----------

3.4 Impacto medioambiental

La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas, por lo tanto se pretende reducir este efecto negativo que solo se logra creando una conciencia ambiental sólida en la sociedad para garantizar una vida sana y agradable para las generaciones venideras.

Las labores mineras causan una destrucción total del medio ambiente del lugar donde se efectúan, afectando todo el ecosistema existente.

En la UBP Lixiviación y Lavado, se llevan a cabo tareas encaminadas a disminuir las afectaciones producidas al medio ambiente, por ser esta una zona de mayor contaminación al trabajar con productos químicos peligrosos que perjudican el ecosistema.

Operación de la instalación

Aire:

- Aumento de los niveles de emisión de polvo en suspensión.
- Gases contaminantes como el amoniaco, sulfuro de amonio, hidrosulfuro de amonio, sulfhidrato de sodio, etc.

Calidad de aguas superficiales:

Aumento de la contaminación de las aguas superficiales debido a la existencia de sólidos en suspensión provenientes de las colas del proceso y de la UBP Hornos de Reducción, que en ocasiones se precipitan en zonas de escurrimiento de las aguas.



Socio - económicos:

- Incremento del riesgo.
- Generación de empleo
- Afectaciones de la salud por el amoniaco y otras sustancias químicas que también poseen determinado grado de toxicidad.

Medidas de seguridad

Debido a que la UBP Lixiviación y Lavado es una de los lugares donde se utiliza amoniaco, sulfuro e hidrosulfuro de amonio y otras sustancias peligrosas para el desarrollo del proceso productivo, el personal que allí labora debe estar debidamente instruido y cumplir con las medidas de seguridad para evitar cualquier daño o lesión ocasionada por estas sustancia.

- Tener conocimiento de las lesiones y los daños que puede ocasionar al organismo no cumplir con las medidas de seguridad.
- Utilizar los medios de protección personal tales como: mascara contra gases, botas de goma, guantes de goma y traje de protección química con aire asistido en caso que se requiera, con el objetivo de prevenir el contacto directo o una exposición imprevista al gas.
- Conocer donde están situadas las duchas y lavadores de ojos y el cuerpo para que cualquier persona afectada tenga la posibilidad de aplicarse abundante agua tan pronto como sea posible.
- Cumplir todo lo establecido en las instrucciones de los puestos de trabajo, instrucciones para realizar trabajos peligrosos y tener el permiso de vía libre para la realización de cualquier labor.
- Tener en cuenta la dirección hacia donde sopla el viento para poder abandonar el lugar en caso de algún escape de estas sustancias.



3.5 Conclusiones del capítulo

- Los intercambiadores operan con más agua que la necesaria para realizar una buena transferencia de calor. Ver tabla 3.1.
- Se comprobó que los intercambiadores que presentan las placas de Acero Inoxidable tienen una eficiencia promedio (92,31%) mayor que el intercambiador que tiene las placas de Titanio (89,81%) este desperfecto está asociado a la cantidad de placas que este último posee, lo que incide directamente en el área de intercambio térmico como se explicó anteriormente. Ver anexo 2
- La principal fuente de contaminación ambiental en el área donde operan los intercambiadores, es la existencia de Amoniaco, Dióxido de carbono, Monóxido de Carbono y los aditivos que allí se utilizan para realizar las tareas de limpieza de las placas.



CONCLUSIONES GENERALES

- Para valores de temperatura de salida del licor amoniacal en los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable superiores a los 33 °C, se reduce la eficiencia a un 81.43 %, lo que muestra la necesidad de que los intercambiadores operen por encima de este valor para evitar que la planta pierda su necesario balance térmico.
- Para valores de temperatura de salida del licor superior a los 34 ° C en el intercambiador con placas de Titanio, la eficiencia disminuye a un valor de 81.17 %, de igual forma este valor es perjudicial.
- Cuando el factor de incrustaciones alcanza un valor de 0,001882 m².K/W el coeficiente global de transferencia de calor disminuye a 3314,4 W/m².K en los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable. En los intercambiadores con placas de Titanio los valores son 0,002275 m².K/W y 301 W/m².K respectivamente.
- Si en lugar de detener la operación de los intercambiadores a las 24 horas como está establecido se prolonga este tiempo hasta 26 horas se ahorran 6067.08 CUC en un año.



RECOMENDACIONES

- Prolongar el ciclo de operación hasta las 26 horas cuando las condiciones lo permitan ya que se logran ahorros económicos.
- Capacitar a los operadores de la planta en cuanto a la importancia que tiene la preservación del medio ambiente y el hecho de garantizar operacionalmente que los intercambiadores permanezcan en la zona racional de operación.
- Capacitar a los operadores en cuanto a la importancia que tiene el cumplimiento de las medidas de seguridad y salud en el trabajo debido a las características de la zona donde trabajan.
- Usar el trabajo como material de consultas para la asignatura de Transferencia de Calor.



BIBLIOGRAFÍA

1. ABRIL J.J. 2008. Determinación del coeficiente superficial de transmisión del calor en los procesos que utilizan pulverización de agua. V congreso español de ingeniería. Barcelona, España.
2. ANDERSON, D. A (2007). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Taylor & Francis, Bristol, PA. USA.
3. ANDRÉS F. L. 2009. Identificación del coeficiente de transferencia de calor en una ecuación diferencial ordinaria. México.
4. BETANCOURT A. R. 2005. Interv1.12 Software para el cálculo y la selección de intercambiadores de calor. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
5. CABRAL G. T. (2004). Solución numérica al problema transferencia de calor en pozo intercambiador de calor vertical en el subsuelo. Revista Tecnológica18(2). Universidad Nacional del nordeste. Argentina.
6. FAIRES M. V. Equipos de transferencia de calor. Cuarta Edición. Santiago de Cuba, Universidad de Oriente, 1991.
7. FERNÁNDEZ, E. Termodinámica Técnica. La Habana. Editorial "Félix Varela", 1994.
8. FERNÁNDEZ M. E. 2011. Evaluación térmica de la batería de intercambiadores de calor en la UBP. Lixiviación y Lavado en la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
9. GIRÓN A. 2004. Cálculo verificativo de los intercambiadores de calor de placas en el proceso de lixiviación y lavado de la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
10. GONZÁLEZ F. N. 2008. Determinación experimental del coeficiente de convección y el factor de fricción de un intercambiador de placas. Trabajo de diploma. Universidad Carlos III, Madrid, España.
11. GÓNGORA L.E. 2009. Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. Revista Minería y Geología. 25(3), pp. 1-18. Cuba.
12. HERRERA, O; BLANCO, A. Equipos de Transferencia de Calor. La Habana. Instituto Cubano del Libro, 1985. 343 pp.



13. INCROPERA, F. P. & DAVID P. W. 2003. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons. New York. USA.
14. ISACHENKO, V.; OSIPOVA, V.; SUKOMEL, A. 1979. Transmisión del calor. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 556 pp.
15. IZQUIERDO M. M. 2002. Intercambiadores de calor de placas. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad de Carlos Tercero. Madrid, España.
16. JAMES, C.A. 2005. The application of Uncertainty Analysis to cross-flow Heat Exchanger Performance Predictions, ASME/JSME Thermal Eng. Conf.
17. KASATKIN A. G. 1985. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Editorial pueblo y educación.
18. KERN, D. 1999. Procesos de Transferencia de Calor. Primera Edición. Editorial Continental S.A. 970 pp.
19. KNOWLES, M. 2001. Influencia de la transferencia de calor en los enfriadores de mineral de la UBP. Hornos de Reducción de la fábrica "Cdte. Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
20. LABORIT, H; PEDRO, A. 2001. Cálculo verificativo de intercambiadores de calor de placas. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
21. MIJEEV, M. Fundamentos de Termo-transferencia. Moscú: Editorial Mir, 1956.
22. MORAGA N. O. 2004. Numerical simulation of three-dimensional mixed convection in an air-cooled cavity. ISSN: 1040-7782. Universidad de Santiago de Chile, Chile.
23. PERRY R. H. 1999. Chemical Engineers' Handbook [cd-rom]. The McGraw-Hill Companies, INC. USA.
24. PICÓN N.M. 2004. Diseño termohidráulico de intercambiadores de calor plato y marco en arreglo simple y multipaso. Revista mexicana de Ingeniería Química 17 (3), pp. 22-34.
25. RAJU K.S. & CHAND J. 1987. Consider the plate heat exchanger. Heat Transfer, the Chemical Engineering Guide, Volume 2, pp.241- 252, McGraw Hill Public.
26. SUNDÉN B (2006). Computer Simulations in Compact Heat Exchangers. Computational Mechanics Publications. Southampton, UK



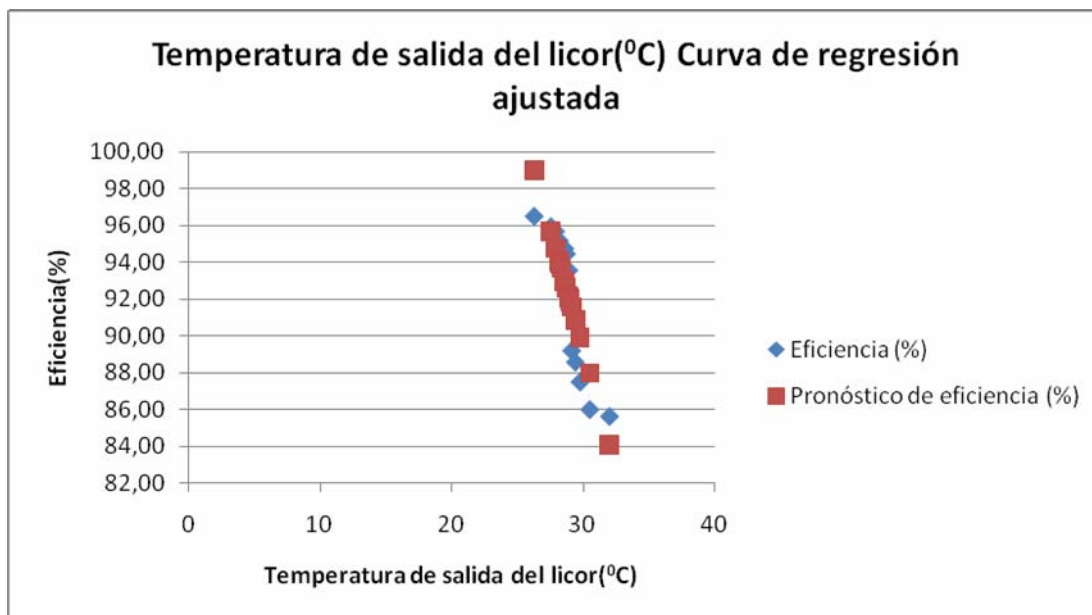
27. VARONA B. F. 2007. Análisis del intercambiador de calor de placas enfriador de mosto en la cervecería "Tínima". Tecnología Química 27 (3), pp 61-67.

Anexos



ANEXOS

Anexo 1. Análisis de regresión Intercambiadores con placas de Acero Inoxidable



$$\hat{y} = 167,419765 - 2,60573551.x$$

Estadísticas de la regresión

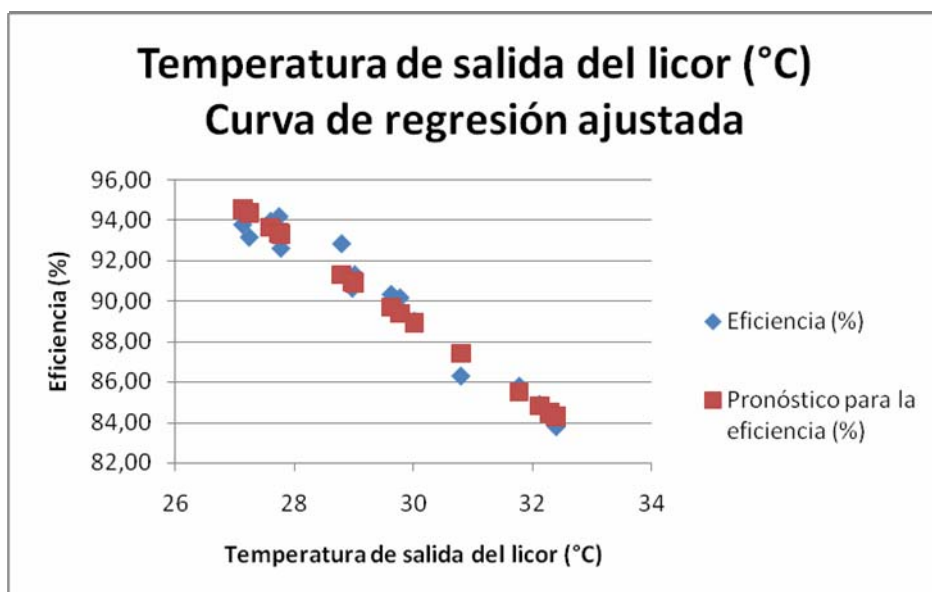
Coefficiente de correlación múltiple	0,89059085
Coefficiente de determinación R ²	0,79315206
R ² ajustado	0,77837721
Error típico	1,75408486
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	165,171263	165,171263	53,6825691	3,7511E-06
Residuos	14	43,0753917	3,07681369		
Total	15	208,246655			



Coeficientes	
Intercepción	167,419765
Temperatura de salida del licor (°C)	-2,60573551



$$\hat{y} = 147,4329527 - 1,948697544 \cdot x$$

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,978956266
Coeficiente de determinación R ²	0,95835537
R ² ajustado	0,955380754
Error típico	0,77870288
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	195,361585	195,361585	322,177797	4,6356E-11
Residuos	14	8,48929446	0,60637818		
Total	15	203,850879			



<i>Coeficientes</i>	
Intercepción	147,4329527
Temperatura de salida del licor (°C)	-1,948697544



Anexo 2. Resultados del cálculo experimental para los intercambiadores con placas de Acero Inoxidable.

Tiempo (h)	Temperatura de salida del licor (°C)	Flujo de calor transferido (kW)	Coefficiente global de transferencia de calor (W/m²·°K)	Factor de incrustación (m²·°K/W)	Eficiencia (%)
08:00	26,26	4055,1	5.301,5	0,00059449	96,51
10:00	27,54	3805,3	5.375,1	0,0005683	95,95
12:00	27,89	3894,9	5.344,6	0,0005791	95,69
14:00	28,17	3628,5	4.838,1	0,00077565	95,18
16:00	28,22	3611	4.661,9	0,00085369	94,94
18:00	28,31	3692,1	4.665,9	0,00085169	94,91
20:00	28,58	3676,6	4.419,6	0,00097144	94,75
22:00	28,71	3668,8	4.561,3	0,0009005	94,46
00:00	28,89	3610	4.341,6	0,0010115	93,57
02:00	28,93	3646,2	4.081,0	0,0011589	92,54
04:00	28,99	3534,3	3.605,1	0,001482	91,48
06:00	29,11	3514,1	3.578,2	0,001545	89,20
08:00	29,39	3501,9	3.505,3	0,001582	88,58
10:00	29,75	3434,6	3.467,6	0,001632	87,50



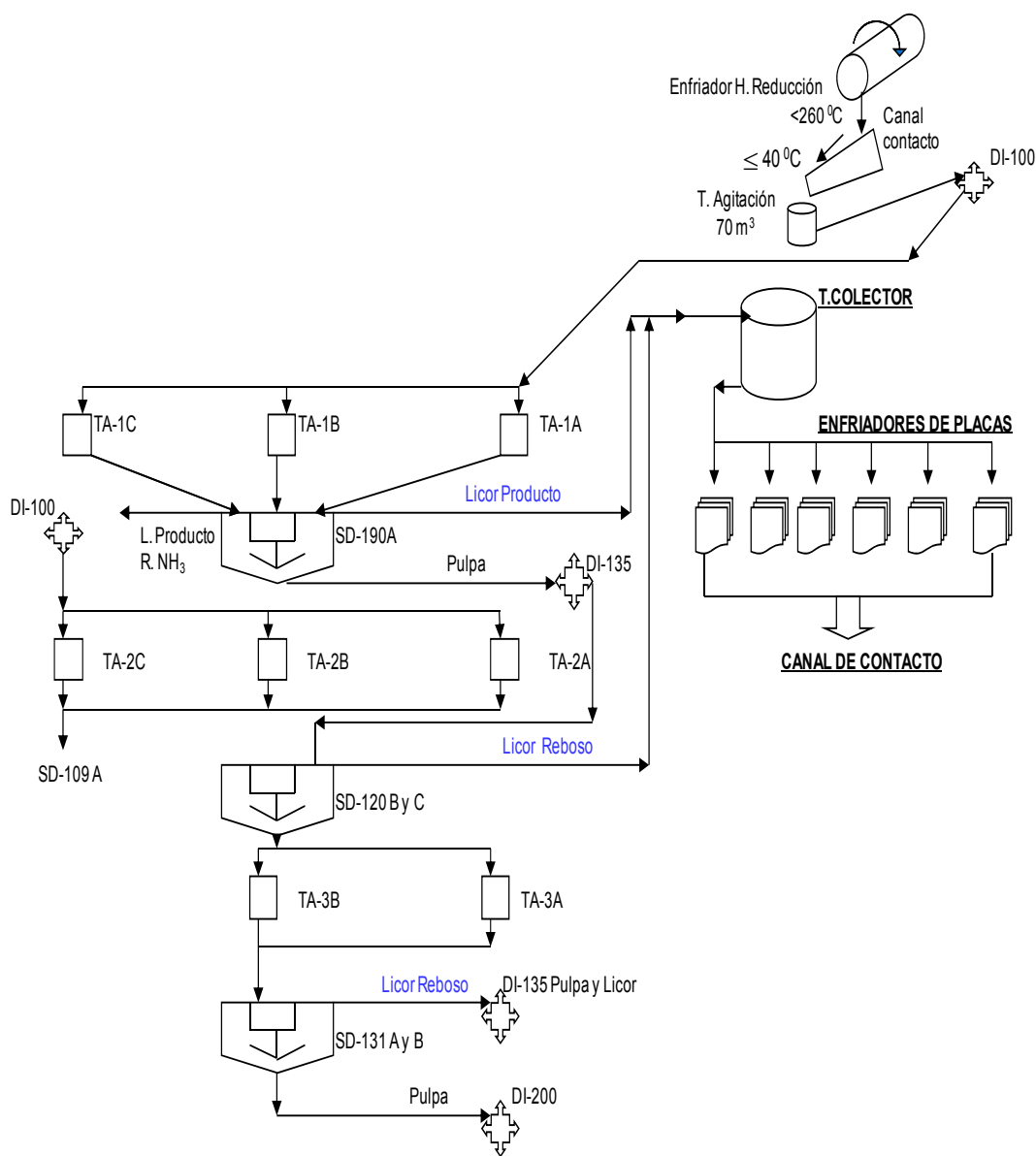
Resultados del cálculo experimental para el intercambiador con placas de Titanio.

Tiempo (h)	Temperatura de salida del licor (°C)	Flujo de calor transferido (kW)	Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W/m}^2\cdot\text{°K}$)	Factor de incrustación ($\text{m}^2\cdot\text{°K/W}$)	Eficiencia (%)
08:00	27,14	3717,00	398	0,001238	93,77
10:00	27,25	3790,00	424,93	0,001076	93,15
12:00	27,61	3599,00	447	0,0009611	93,94
14:00	27,75	3663,00	454	0,0009276	94,17
16:00	27,78	3560,00	404	0,001196	92,60
18:00	28,8	3535,00	424,01	0,001081	92,83
20:00	28,98	3198,00	358	0,001517	90,64
22:00	29,02	3139,00	351	0,001571	91,30
00:00	29,63	3117,00	350,03	0,001563	90,33
02:00	29,78	3109,00	341	0,002042	90,16
04:00	30,02	3008,00	333	0,002124	89,01
06:00	30,8	2962,00	328	0,002192	86,30
08:00	31,78	2909,00	321	0,002202	85,80
10:00	32,12	2817,00	319	0,002231	84,90



Anexo 3. Esquema del flujo tecnológico de la UBP Lixiviación y Lavado de la empresa "Cdte. Ernesto Che Guevara".

Sección Lixiviación.





Sección lavado.

