



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO  
DEL MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO EN  
CILINDROS HORIZONTALES ROTATORIOS**

**Tesis en opción al título de Master en Ciencias Técnicas**

**DIOLKIS MATOS CASALS**

**Moá  
2012**



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO  
DEL MINERAL LATERÍTICO REDUCIDO EN  
CILINDROS HORIZONTALES ROTATORIOS**

**Tesis en opción al título de Master en Ciencias Técnicas**

**AUTOR: Ing. DIOLKIS MATOS CASALS**

**TUTOR: Prof. Aux., Ing. EVER GÓNGORA LEYVA, M.Sc.**

**Moa**

**2012**



## PENSAMIENTO

---

*...“ Si no existe organización, no existe racionalidad, las ideas después del primer impulso, van perdiendo eficacia, van cayendo en la rutina, en el conformismo y acaban por ser simplemente un recuerdo”...*

*Ernesto Che Guevara*



## AGRADECIMIENTOS

---

*Agradezco la realización de esta investigación al M.Sc. Ever Góngora Leyva, mi tutor, sin su ayuda y confianza depositada no hubiera sido posible la materialización de esta.*

*A mi Abuela Paulina Tamayo Sánchez, que es a la vez mi madre por todo el amor que me ha dado y por estar siempre dispuesta para ayudarme.*

*A mi abuelo Jorge Casals Duboy, que aunque no esté presente supo guiarme en la vida y darme una educación basada en valores y principios, como un padre.*

*A mi esposa Aliuska Guzmán Carcasés y a mi hijo Aharon Diolkis Matos Guzmán por darme fuerzas para seguir adelante y estar junto a mí en los momentos difíciles con todo su amor y dedicación.*

*A mis tíos Néstor, Adonis y Jorge por su ayuda brindada en todos los momentos.*

*A Enodis, Jose, Armando y a los trabajadores de la planta Hornos de Reducción de la empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, por su ayuda incondicional para la realización de esta investigación.*

*A todos “Muchas Gracias”*



## DEDICATORIA

---

*Dedico la culminación de esta investigación:*

*En especial a mi madre Aricel Casals Tamayo y a mi abuelo Jorge Casals Duboy que aunque no estén a mi lado se que estarían orgullosos de ver la materialización de mi sueño.*

*A mi abuela Paulina Tamayo Sánchez quien ha esperado pacientemente todos estos años que mi anhelo se hiciera realidad.*

*A mi esposa Aliuska Guzmán Carcasés y mi hijo Aharon Diolkis Matos Guzmán por darme fuerzas para seguir adelante cada día.*

*A todos “les dedico este éxito”*



## RESUMEN

---

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, basado en el balance térmico y la modelación estadística. Se determinó el rendimiento térmico del enfriador de mineral reducido y se establecieron las tendencias de variables como: temperatura del agua y de la superficie del cilindro en diferentes puntos a lo largo de la instalación, para diferentes flujos de mineral y flujos de agua, siendo esta última la que más influye en la temperatura del mineral a la salida. El trabajo está desarrollado sobre una amplia base experimental a escala industrial y quedó demostrada la factibilidad de emplear el procedimiento propuesto en la planta de Hornos de Reducción, de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.



## ABSTRACT

---

The present work it evaluates in the present work was made an evaluation of the behavior of the main variables that intervene in the process of cooling of the reduced lateritic ore, based on the thermal balance and the statistical modeling. The thermal efficiency of the cooler of reduced ore was determined and the tendencies of variables settled down as: temperature of the water and the surface of the cylinder in different points along the installation, for different mineral flows and water flows, being this last that more influence have in the temperature from the mineral to the exit. The work is developed on a wide experimental base to industrial scale and the feasibility was demonstrated of using the procedure proposed in the plant Furnace of Reduction, of the company "Comandante Ernesto Che Guevara".



**ÍNDICE**

---

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
1.1. Estado del arte .....	6
1.2. Comportamiento del mineral laterítico reducido en el interior del enfriador .....	7
1.3. Proceso de transferencia de calor en los enfriadores de mineral laterítico.....	8
1.4. Proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios .....	10
1.5. Descripción del flujo tecnológico de la planta .....	12
1.6. Descripción de la instalación de estudio .....	13
1.7. Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido .....	15
Conclusiones del capítulo 1 .....	17
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1. Instalación experimental.....	18
2.2. Selección de la variables que influyen en el proceso de enfriamiento.....	24
2.3. Estudio de los factores que influyen en el proceso de enfriamiento .....	27
2.4. Metodología para el análisis estadístico de los experimentos .....	29
2.5. Balance de masa y energía.....	33
Conclusiones del capítulo 2 .....	39
CAPITULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	40
3.1. Análisis estadístico de los resultados experimentales .....	40
3.1.1. Análisis de Regresión.....	42
3.2. Resultados del balance térmico .....	49
3.3. Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso.....	51
3.4. Mejoras para el enfriamiento.....	54
3.5. Valoración técnico-económica .....	55
3.6. Impacto social y medio ambiental .....	56
3.6.1. Caracterización de los impactos .....	57
3.6.2. Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad.....	57
Conclusiones del capítulo 3 .....	59
CONCLUSIONES GENERALES .....	60
RECOMENDACIONES .....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS .....	68

## INTRODUCCIÓN

---

La industria cubana del níquel es determinante en la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos.

Para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal existen dos fábricas en funcionamiento: Las empresas “Comandante René Ramos Latour” y “Comandante Ernesto Che Guevara”, empresa estatal socialista que se ha desarrollado profundamente a partir de la década pasada, lo cual es evidenciado por los elevados índices de producción logrados en ella, que han contribuido exitosamente a la reanimación de la cubana, economía dando valiosos aportes en aras del desarrollo social.

La empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” inició su explotación en Enero de 1986 y se encuentra situada al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la Ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda, al noroeste a 3 km se encuentra el puerto marítimo.

El proceso tecnológico de la fábrica está basado en el esquema de la lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido (proceso CARON) según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. La decisión de utilizar este proceso se explica por las ventajas propias de esta tecnología:

Es un proceso continuo que se realiza en condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos. Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización.

El esquema amoniacal permite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos, proceso que se realiza con un consumo de reactivo relativamente pequeño, excepto el amoníaco que es utilizado en grandes cantidades.

Este complejo minero metalúrgico de níquel comprende varias entidades, entre ellas la planta Hornos de Reducción, la cual debido a la modificación de sus cámaras de combustión trajo como resultado la posibilidad de aumentar la cantidad de mineral reducido, al producirse un aumento brusco en la capacidad de los hornos, se comprobó la incapacidad de los enfriadores de bajar la temperatura del mineral reducido desde 700 hasta 120 °C , ya que según Samalea (1997), por encima de esa temperatura ocurre la ebullición de la solución amoniacal y el sistema de lixiviación y lavado recibe el impacto térmico no solo del calor sensible del mineral laterítico reducido sino, además, de su calor latente, el cual está dado por el llamado calor de oxidación, proveniente de las reacciones de oxidación del hierro metálico y parte del hierro bivalente, así como de las reacciones de oxidación de níquel, cobalto, azufre y demás componentes que pasan a la solución durante la lixiviación.

### **Fundamento de la investigación**

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de La Unión del Níquel, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos.

Dentro de la industria metalúrgica existen complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas (Guzmán, 2001), algunos están ubicados en la planta de Hornos de Reducción, y dentro de ellos los enfriadores de mineral quienes tienen una función esencial dentro del proceso.

Los cilindros horizontales rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos, aunque poco difundidos para el enfriamiento de mineral (Retirado, 2004; Góngora, 2004; Cala, 2005). Se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor pero muy pocos se han centrado en evaluar el proceso de intercambio de calor que se realiza en los mismos, de ahí la importancia de la presente investigación.

### **Situación problemática**

Con el objetivo de estudiar los procesos que tienen lugar durante el enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala industrial, se han realizado diferentes trabajos dirigidos al mejoramiento de la eficiencia del proceso (Valle, 2000 a y b;

Spencer, 2009; Osorio, 2009; Matos, 2007; Leyva, 2010; Góngora, 2009; Álvarez; 2008), quienes dan una visión de los problemas existentes en los enfriadores de mineral, proponen modificaciones para aumentar la capacidad de enfriamiento de la instalación, pero sus experimentos solo se limitaron a observar el proceso a escala industrial, no manipularon ninguna de las variables que caracterizan el proceso, (experimentación Pasiva).

La situación del proceso de enfriamiento en la planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se caracteriza por las siguientes **deficiencias:**

- ✓ Limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso de enfriamiento.
- ✓ Elevadas temperaturas del mineral a la salida del enfriador (mayor de 240 °C).
- ✓ Limitaciones para realizar las mediciones de las variables a escala industrial, que imposibilita emitir criterios certeros sobre su funcionamiento.

Las elevadas temperaturas del mineral a la salida de estos intercambiadores de calor, dificultan el proceso de lixiviación, trayendo consigo la evaporación de gran cantidad de amoníaco y baja eficiencia en la obtención de níquel metálico.

Hasta la fecha los trabajos que se han realizados en la empresa han estado dirigidos a la solución de problemas técnicos relacionados con la rotura y el agrietamiento del cilindro, la modelación del proceso, y los elevados consumos de energía y agua, este último a escala piloto. Las investigaciones relacionadas con este tema, se han desarrollado sobre la base de experimentos pasivo, que se han limitado a la observación de las variables del proceso durante un tiempo determinado excepto en los trabajos realizados por Lamorú (2008) y Góngora (2009) quienes hicieron experimentos para evaluar el proceso a escala piloto.

A partir de las deficiencias expresadas se define como **problema de la investigación:** El desconocimiento de la dependencia entre las variables: flujos de agua y de mineral, temperatura del mineral, del agua y de la pared del cilindro que caracterizan el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, impiden el desarrollo eficiente del proceso.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación se define como **objeto de estudio**: El proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios de la planta de Hornos de Reducción.

En correspondencia con el problema científico declarado se define como **objetivo general del trabajo**: Determinar el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios: flujo de agua, flujo de mineral, temperatura del agua, temperatura de la pared del cilindro, temperatura del mineral a la entrada, y su efecto en la temperatura del mineral a la salida.

Para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar las limitaciones de las investigaciones precedentes, relacionadas con las teorías de los procesos de intercambio de calor, al ser aplicadas al objeto de estudio.
2. Establecer el procedimiento que permita la obtención de modelos que integren las variables que caracterizan el proceso y su relación, el balance de masa, energía y la eficiencia del enfriador de mineral laterítico reducido.

Sobre la base del objetivo general se establece la siguiente **hipótesis científica**: si se determina el comportamiento de las variables que intervienen en el enfriamiento del mineral laterítico reducido en la planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, sustentado en un diseño de experimento, entonces se podrá establecer el efecto de las variables independientes en la temperatura del mineral a la salida, el modelo estadístico que caracteriza el proceso y la eficiencia térmica del enfriador cilíndrico horizontal rotatorio.

Para garantizar el cumplimiento del objetivo de la investigación se proponen las siguientes **tareas**:

1. Realizar el análisis bibliográfico del proceso de enfriamiento del mineral reducido que permita el establecimiento del estado del arte de la temática.
2. Trabajo de campo para caracterizar el proceso y la obtención de la base de datos.

3. Monitoreo y registro de las variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor en el enfriamiento de mineral.
4. Identificación de las variables independientes que tienen mayor efecto en la variable dependiente.
5. Realizar el balance térmico de la instalación y determinar el comportamiento de las principales variables del proceso.
6. Valorar técnica y económicamente el proceso, así como, las afectaciones medioambientales asociadas al mismo.

En el desarrollo de la investigación se aplican los **siguientes métodos**:

- Documental y bibliográfico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.
- Inductivo-deductivo para el establecimiento del procedimiento de cálculo que caracterice térmicamente al enfriador.
- Experimental para determinar las variables que caracterizan el proceso presente en el objeto de estudio.
- Técnicas computacionales para el cálculo y representación gráfica de las variables que caracterizan la instalación.

## **CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

---

En el proceso de obtención del níquel, la planta de Horno de Reducción es de vital importancia, en ella se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica, un elemento importante dentro de ella lo constituyen los enfriadores de mineral, de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de lixiviación. Por tal motivo el objetivo de este capítulo es establecer los principales elementos teóricos relacionados con el objeto de estudio y los aspectos fundamentales que rigen el proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios.

### **1.1. Estado del arte**

Desde los inicios de la industria del níquel en Cuba, los enfriadores de mineral laterítico reducido han presentado dificultades en su funcionamiento, destacándose las elevadas temperaturas del mineral a su descarga, mayor de 200 °C , afectando el proceso de lixiviación y lavado. Para el desarrollo de este trabajo se consultaron diferentes materiales e informes de investigaciones realizadas con anterioridad, la revisión bibliográfica se basó en la búsqueda de información relacionada con la temática del intercambio de calor en cilindros horizontales rotatorios y temas a fines, que desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado.

Presilla (1977), confirma que en el periodo de 1943 a 1946 no garantizaban la temperatura requerida, según diseño debían enfriar el mineral desde 440 a 107 °C con una productividad de 12,5 t/h , siendo en realidad de 315,5 °C , se hicieron varias modificaciones como: instalación de vibradores, cadenas en los extremos interiores, y se le situaron vigas Z dividiendo así el enfriador en varias secciones. Ninguna de las opciones mejoró notablemente la eficiencia.

## 1.2. Comportamiento del mineral laterítico reducido en el interior del enfriador

Desde el punto de vista científico, teórico y práctico existen varios trabajos que abordan criterios acerca del comportamiento del mineral laterítico reducido en los enfriadores de mineral. Fue de gran importancia el experimento realizado por Alonso (1973), donde determinó que el mineral se elevaba hasta una determinada posición y luego resbalaba hasta una posición más abajo, los resultados de la medición del ángulo formado por la superficie del mineral con la horizontal dieron que la posición más alta oscilaba entre 23 y 25° y en la más baja entre 20 y 23°.

Aguilar (1986), planteó que la cantidad de carros que posea el enfriador es determinante en el proceso de enfriamiento y que la cantidad de aletas o levantadores está por debajo de las cantidades especificadas por el fabricante. Argumentó que estos elementos contribuyen a una mejor movilidad del mineral y con ellos facilita la disminución del gradiente de temperatura existente entre el mineral caliente y el agua. Sin embargo Rosell (1986), planteó que una de las causas que inciden sobre el enfriamiento deficiente del mineral se encuentra en la cantidad de carros raspadores y el número de aletas o levantadores. Por otra parte Medina (1995) determinó que no se tiene un criterio serio sobre el comportamiento de los carros en el interior de los enfriadores, pues se carece de experimentos que demuestren la incidencia del diseño y la cantidad de carros en la temperatura de salida del mineral. Con el objetivo de eliminar las averías en el interior de los enfriadores, propuso reforzar los brazos de los mismos incrementando así su tiempo de vida útil.

Es de gran interés el estudio realizado por Font (1990), quien planteó que los carros consumen cerca del 50 % de la potencia del motor y recomendó modificar los dispositivos de transporte de mineral (aletas y cucharas) para una mejor transportación del mineral y disminuir el coeficiente de llenado.

Por su parte Chacón (1982), expuso que los raspadores exteriores impedían la formación de costras en el exterior del cuerpo del enfriador, favoreciendo el enfriamiento, los cuales fueron eliminados en su totalidad. En las condiciones actuales se observa la formación de costras que a su vez disminuyen la

transferencia de calor hacia el agua e introducen errores en las mediciones, demostrando la necesidad de los raspadores exteriores.

Tunra (1998); concluyó mediante una investigación de las propiedades del mineral, que la conductividad térmica de este es deficiente y se reduce con la disminución de la temperatura, de modo que solamente el mineral más próximo a la superficie de contacto es enfriado. Sus recomendaciones están encaminadas a incrementar el área efectiva de los enfriadores o asegurar un buen mezclado de mineral en su interior para obtener 150 °C a 38 t/h de mineral laterítico reducido. Aún conociendo que la conductividad térmica del mineral varía con su composición química, los resultados mostrados pueden ser empleados en investigaciones afines.

En este epígrafe varios autores hicieron hincapié en la importancia de los carros raspadores y la necesidad de remover el mineral para garantizar la reposición del mineral en contacto con la pared del cilindro y mejorar el proceso de transferencia de calor del mineral al agua. Por no tener criterios exactos sobre el tiempo de retención y el área que ocupa el mineral en el interior del enfriador, esta investigación se enmarca en la evaluación de las variables que intervienen en el proceso objeto de estudio sin analizar los mecanismos del proceso de transporte y remoción del mineral laterítico reducido en el interior del cilindro.

### **1.3. Proceso de transferencia de calor en los enfriadores de mineral laterítico**

Al estudio de los procesos de transferencia de calor que se manifiestan durante el enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios se han dedicado varios autores.

Rodríguez (1970), aporta información valiosa sobre los mecanismos de transferencia de calor que provocan el enfriamiento del mineral laterítico reducido cuando se introduce vapor de agua o agua atomizada en la atmósfera del enfriador. Aunque esta acción ya no se realiza, su trabajo no deja de ser de interés para esta investigación.

Al análisis y determinación de los coeficientes de transferencia de calor que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala industrial, tanto en la empresa “Comandante René Ramos Latour” como en la “Comandante Ernesto Che Guevara” se han dedicado un grupo de investigadores (Sotto, 2007; De Valle, 2008; Álvarez 2008; Arena, 2009 y Osorio, 2009). Por su parte (Santana, 2009 y Leyva, 2010 ) agregaron a su estudio, la evaluación de la incidencia de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en el índice de extractable.

Otro grupo de investigadores se centró en el estudio de este fenómeno pero a escala piloto (Tabera y García, 2006; Pujol, 2007 y Araujo 2009). A la simulación del comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0, se dedicaron (Londres, 2007 y Ortiz, 2010) quienes establecieron los perfiles de temperatura para el mineral, el cilindro y el agua de la piscina. En dichos estudios se buscó la implementación de metodologías que permitieran evaluar el proceso y establecer la interrelación entre las variables que lo caracterizan, pero todos carecen de un soporte experimental serio.

Lamorú (2008), estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de la instalación a escala piloto y con la data experimental obtenida, determinó la eficiencia térmica del proceso y el flujo de agua óptimo para que la instalación trabaje de forma más eficiente. A pesar de obtener resultados promisorios su aplicación en la industria está limitada por no cumplir la instalación piloto con los criterios de semejanza en cuanto al enfriador industrial.

Con el objetivo de garantizar un diseño de experimentos sin afectar el proceso industrial se construyó un enfriador horizontal a escala piloto que cumple con los criterios de semejanza geométrica (Quintero y Verdecia, 2008). Se seleccionó el motor eléctrico con la potencia y la velocidad de rotación requerida, para su explotación (García, 2009). Se construyó un transportador de tornillo sin fin con la finalidad de garantizar una alimentación uniforme y continua (Rodríguez, 2010). Se implementó un sistema de medición para variables termohidráulicas al enfriador de mineral reducido. Zalazar (2010), demuestra que la velocidad de rotación para el enfriador a escala piloto debe ser 19,9 rev/min , para un tiempo

de retención del mineral de 12 minutos, garantizando una productividad entre 100 y 123 kg/h y un flujo de agua de 0,308 m<sup>3</sup>/h , para una temperatura del agua en la piscina de 70 °C , para una temperatura del mineral a la entrada entre 600 y 700 °C .

Resultan de gran interés los trabajos realizados por Góngora (2004, 2007 y 2009), quien estableció un modelo teórico para la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros rotatorios, así el procedimiento para la solución del mismo y las ecuaciones que permiten la identificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud. A pesar de que se obtuvieron resultados promisorios, sus experimentos se caracterizaron por ser pasivos, debido a las limitaciones que impone el proceso industrial.

Spencer (2009), realizó la identificación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios con ayuda de Redes Neuronales Artificiales, alcanzando un coeficiente de correlación del 93 % entre la temperatura de salida del mineral y las variables independientes. Se considera que se debe hacer esta identificación sobre la base de un diseño de experimentos en los cuales se destaque la interrelación entre variables, debido a que la experimentación pasiva está afectada por la incidencia de los operadores.

#### **1.4. Proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios**

El estudio de los procesos de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios a través de técnicas experimentales permitió establecer los valores de los números de Rayleigh, Reynolds, Nusselt y de Planck, para diferentes condiciones de trabajo e identificar los modos de intercambio de calor predominante (Iannetta, 1992; Olivas, 1997; Hossain, 1998 y Naumenko, 2001)

Incropera et al. (2003), abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de calor y masa, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de las mismas en sus más diversas formas.

Peng (1998), Dorokhov, Kileeva (2001) y Yapici (2003), se dedicaron al estudio de los procesos de transferencia de calor de diferentes fluidos en el interior de un cilindro giratorio y deducen que la velocidad de rotación tiene un efecto significativo en las características hidrodinámicas y la distribución de los coeficientes de transferencia de calor locales.

Naumenko (2001), analizó los procesos de intercambio de calor en la superficie libre de un cilindro horizontal estacionario y la influencia del número de Reynolds en el régimen de la pared – capa y del flujo circulante que ocurre en la rotación. Demostró que las velocidades cerca de la pared del cilindro indican la influencia de una pared caliente en el espesor de la capa límite y que la velocidad del fluido cercana a una pared caliente es superior, debido a que la expansión tiene lugar en temperaturas más altas.

Investigaciones realizadas sobre la transferencia de calor por convección en un cilindro horizontal calentado y sumergido en un fluido demuestran que las condiciones de flujo dependerán fuertemente del número de Rayleigh, de Prandtl y de la proporción de flotación (Chen, 1997; Scurtu, 2001; Mahfouz, 2003; Nazar, 2004; Molla, 2004; Shrager, 2004 y Abdalla, 2005).

También Mahfouz (1999), estudió la convección (forzada y natural) en un cilindro horizontal rotatorio, donde demostró que la convección forzada es causada por la oscilación del cilindro, y la convección natural por la flotación del fluido. El proceso de transferencia de calor es gobernado por el número de Rayleigh, Reynolds y la frecuencia dimensional de oscilaciones, del mismo concluye que el efecto global de oscilación es reducido por la transferencia de calor.

Panday (2005), presenta los resultados experimentales de la transferencia de calor local en un cilindro al caerse la película de agua por evaporación. En el cual muestra que el coeficiente de transferencia de calor local se eleva aumentando la velocidad del flujo de aire y propone correlaciones para coeficientes de baja transferencia de calor en ausencia de flujos sobrepuestos para la región del estancamiento, para región termalmente desarrollada y el fondo del cilindro calentado.

Como se ha podido observar la bibliografía analizada en este epígrafe aporta consideraciones útiles para esta investigación, pero en ninguno de los casos se estudia un cilindro horizontal rotatorio con las características del objeto de estudio. La consulta bibliográfica en general aborda elementos del proceso de transferencia de calor y masa, y los mecanismos de transporte y movimiento del sólido en el interior del cilindro, solo Spencer (2009), hace un acercamiento a la identificación de proceso con ayuda de las técnicas de inteligencia artificial, pero su investigación se basó en experimentos pasivos, que no permitieron determinar con exactitud la incidencia de las variables flujo de agua y de mineral en la temperatura del agua, de la pared del cilindro y del mineral. Esto se debe a que no se han realizado experimentos que permitan establecer el orden de incidencia de las variables independientes en la temperatura del mineral a la descarga e impone la necesidad de ejecutar una investigación que contribuya a la mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en las industrias productoras de níquel con tecnología carbonato amoniacal.

### **1.5. Descripción del flujo tecnológico de la planta**

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello la planta cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

Una vez el mineral en las tolvas, pasa a los dosificadores de pesaje automático, encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que éstos realizan de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta de 22 t/h .

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores, para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares seis (6), ocho (8), 10, 12 y 15

con quemadores de petróleo de alta presión, encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es garantizada por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable, se cuentan con tres de ellos por cada bloque, dos en operación y uno de reserva.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples, contando con 17 hogares. Además, el horno, cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (cuatro (4) en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas, los cuales mediante la rotación del eje central son encargados de trasladar el mineral de un hogar a otro en forma de zigzag. Los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las cuales se hace necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, el taller cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de seis (6) ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electro-filtro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

El mineral recuperado en la batería de ciclones cae por gravedad al horno a través del hogar cero (0). El mineral que se recupera en los electrofiltros es transportado por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas de 120 t/h de capacidad, las cuales envían el mineral hacia las tolvas de los molinos para más tarde ser bombeado hacia los silos formando así el ciclo de la planta de Hornos de Reducción.

## **1.6. Descripción de la instalación de estudio**

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio cuya función es transportar el mineral reducido de los hornos hasta el enfriador.

El transportador rotatorio consta de un cuerpo tubular que rota en 6 rodillos de apoyo. Dentro del cuerpo está colocado un tornillo transportador. El cuerpo tiene 6 llantas, cada una se asienta en dos (2) rodillos de apoyo. La rotación del cuerpo se realiza por el accionamiento electromagnético. Los desplazamientos axiales

posibles del cuerpo del transportador son asimilados por dos rodillos de apoyo, el cuerpo se enfría con agua.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en los enfriadores rotatorios los cuales tienen las siguientes funciones:

**Transportar:** en el interior del enfriador existe una estructura donde cuelgan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando.

**Mezclar:** el rastrillo, una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y mezcla la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la capa fría.

**Enfriar:** es el intercambio calórico entre el calor que aporta el mineral al shell y al agua de la piscina en la cual está sumergido el enfriador. Debiendo disminuir la temperatura del mineral por debajo de 200 °C en la descarga.

Durante el régimen de trabajo del enfriador es suministrada el agua en una piscina a temperatura ambiente, la cual fluye a contracorriente con el mineral, controlándose el nivel de agua en la piscina a través de unas anillas en la zona caliente de evacuación en función del tonelaje que se está alimentando. El tiempo de retención del mineral en el interior del enfriador es de 30 a 50 minutos (Valle, 2000a). La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 70 a 85 °C .

El accionamiento está compuesto por el grupo motor-reductor principal y motor-reductor auxiliar que se acoplan a través de un embrague frontal. En el cuerpo existen dos puntos de apoyo (rodillos) que se apoyan en chumaceras, los cuales están revestidos por un material sintético conocido como textilita.

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh (0,074 mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso del mineral, éste se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua en la piscina. De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador. El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de lixiviación, por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto (225- TK- 213), los cuales tienen una capacidad de 70 m<sup>3</sup>.

### 1.7. Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido

El proceso de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del mineral hasta valores por debajo de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para ello se utiliza el enfriador cilíndrico rotatorio.

El enfriador utilizado en el proceso es un equipo de transferencia de calor, el mismo está dispuesto horizontalmente como una instalación de transporte. El mineral llega a través del transportador rotatorio al enfriador, que está seccionado en tres partes en el cual al caer el mineral es pasado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores y paletas los cuales se encargan también de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando que el mineral se adhiera e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor entre el mineral y el enfriador, cada sección del mismo posee un separador circular en todo el diámetro del equipo que garantiza el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente.

Desde el punto de vista termoenergético en este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor (Conducción, Convección y Radiación) y los mismos se manifiestan de la forma siguiente: El mineral es descargado en el enfriador a una temperatura entre  $650$  y  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el mismo transfiere calor a la superficie interior del tambor por conducción, convección y radiación, predominando considerablemente la transferencia de calor por conducción debido al contacto sólido-sólido, en este caso mineral-enfriador, también se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases producto de la combustión que acompañan el mineral hasta el interior del cilindro, pero este modo de transmisión del calor puede ser despreciado porque solo se manifiesta cuando se forman burbujas o poros dentro de la masa de mineral, hecho este que no es frecuente en este proceso.

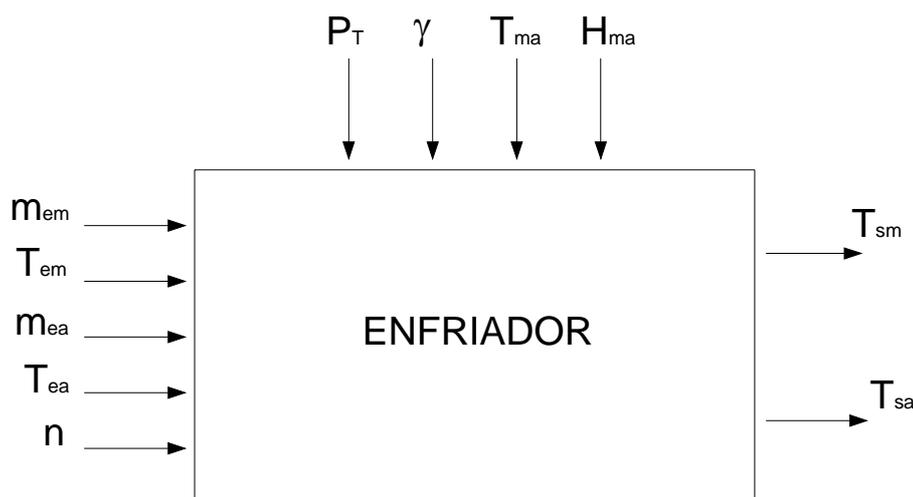
Desde la masa de mineral a la pared superior del equipo se transfiere el calor por radiación debido a la alta temperatura del mineral en el interior del enfriador. En el espesor del enfriador ( $\delta = 18\text{ mm}$ ), o sea desde la pared interior a la superficie exterior el flujo de calor se transfiere por conducción; teniendo en cuenta para el

posterior análisis que es mayor la influencia de la transferencia de calor por conducción en la parte que está en contacto el mineral con el tambor.

Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador, este intercambia calor con el agua de la piscina que se encuentra por encima de 30 °C, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 60 y 95 °C , este proceso de intercambio de calor ocurre por convección y en el mismo se le comunica velocidad al fluido.

Como se aprecia el enfriador de mineral es un objeto complejo para la modelación con gran número de parámetros de entrada y de salida los cuales se encuentran en una compleja interdependencia.

En la figura 1.1 se muestra el esquema estructural de la interacción de los parámetros principales del proceso de enfriamiento del mineral reducido.



**Figura 1.1** Esquema estructural del proceso de enfriamiento del mineral.

Los parámetros de entrada del proceso son:

- $m_{em} \Rightarrow$  Flujo de mineral a la entrada del enfriador.
- $T_{em} \Rightarrow$  Temperatura del mineral a la entrada del enfriador.
- $m_{ea} \Rightarrow$  Flujo de agua de entrada a la piscina.
- $T_{ea} \Rightarrow$  Temperatura del agua a la entrada de la piscina.
- $n \Rightarrow$  Número de revoluciones del tambor.

Como parámetros de salida se destacan los siguientes:

- $T_{sm} \Rightarrow$  Temperatura del mineral a la salida del enfriador.
- $T_{sa} \Rightarrow$  Temperatura del agua a la salida de la piscina.

Además de los parámetros de entrada y de salida, resulta importante destacar algunas perturbaciones propias de este proceso y que ejercen influencia sobre el mismo, ellas son:

- $P_T \Rightarrow$  Presión de trabajo en el interior del enfriador.
- $\gamma \Rightarrow$  Coeficiente de llenado del tambor.
- $T_{ma} \Rightarrow$  Temperatura del medio ambiente.
- $H_{ma} \Rightarrow$  Humedad relativa del medio ambiente.

### Conclusiones del capítulo 1

- Los trabajos consultados se limitaron a la experimentación pasiva y sus autores solo evaluaron el comportamiento de las variables que son registradas por el sistema de adquisición de datos de la empresa (flujo de agua, flujo de mineral, temperatura del mineral a la salida y temperatura del agua en un solo punto de la piscina).
- Existen trabajos relacionados con el proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios, que aportan elementos a considerar en esta investigación, pero en cierta medida no poseen semejanza térmica con el objeto de estudio.
- La bibliografía consultada aborda procedimientos para la evaluación del proceso de enfriamiento, que sirven de punto de partida para esta investigación.

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

---

El conocimiento del proceso y el desarrollo de expresiones matemáticas que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial, ya que conociendo los elementos o factores que influyen en la transferencia de calor se puede tener un mayor control de la temperatura del mineral a la salida de los enfriadores y así aumentar la eficiencia de los mismos.

En este capítulo se plantean como objetivos:

1. Describir los elementos que garantizan la calidad de los experimentos, sustentados en un diseño factorial completo.
2. Establecer el procedimiento para el análisis estadístico y la caracterización de las variables del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.
3. Establecer los procedimientos para el balance térmico, de masa y para determinar la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### 2.1. Instalación experimental

Para la realización de los experimentos se seleccionó el enfriador de la Línea 5, Loza 2, de la planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, el mismo consta de los siguientes equipos y accesorios: enfriador cilíndrico rotatorio, motores eléctricos, piscina de agua de enfriamiento, los que se describen detalladamente en el epígrafe 1.4. Se debe destacar que el enfriador cinco (5), es el único que cuenta con medidor de flujo de agua a la entrada de la piscina y con un control de nivel, que permite mantener el cilindro en posición alineada con el transportador en el tramo 5, evitando las averías en esa línea.

La empresa cuenta con un sistema de adquisición de datos CITECT que permite visualizar, graficar y controlar los parámetros que son de interés para el proceso metalúrgico, en la figura 2.1 se muestra una imagen de las principales variables que son registradas por el CITECT en la Línea 5 (flujo de mineral, temperatura en el hogar 15, temperatura del mineral a la salida, flujo de agua, temperatura del agua en la piscina y corriente consumida por los motores eléctricos) y en la figura 2.2 se muestra una ventana del CITECT para el monitoreo de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento de mineral laterítico reducido.

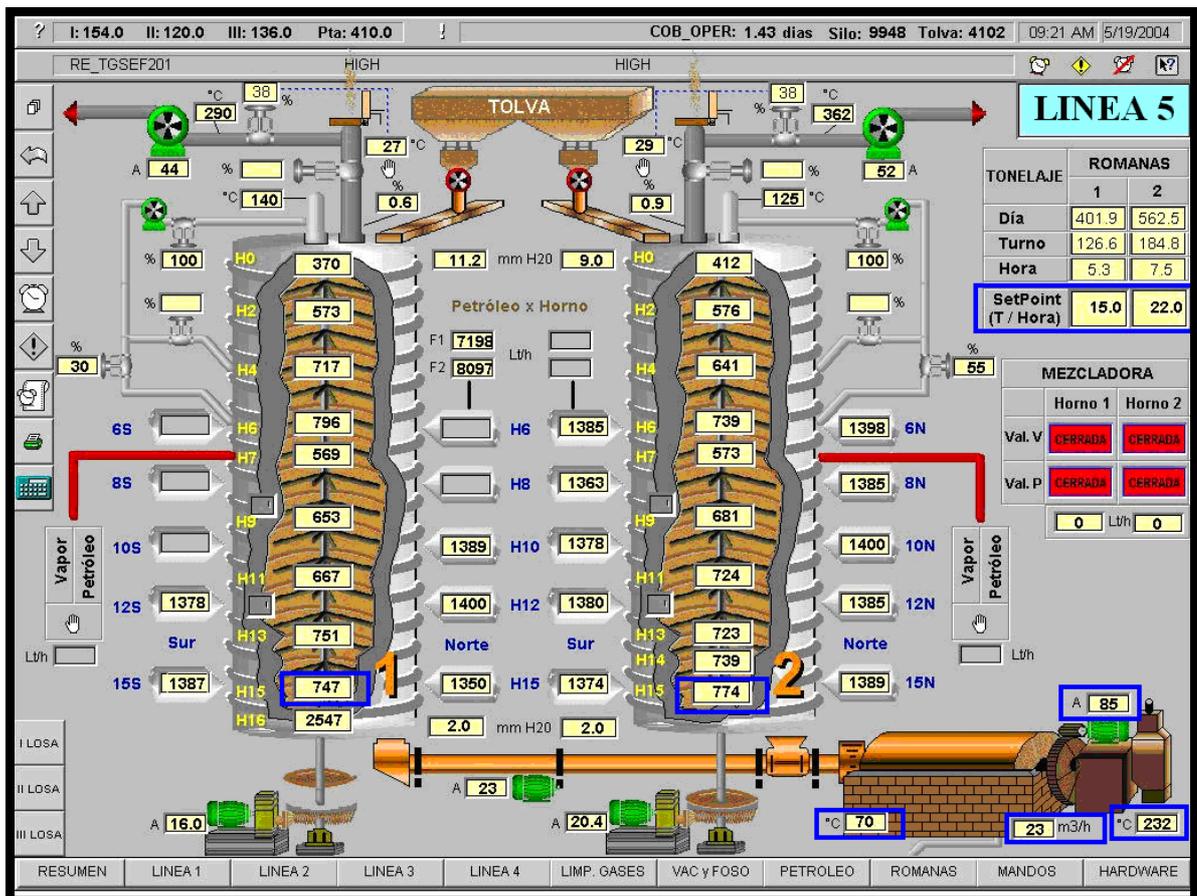
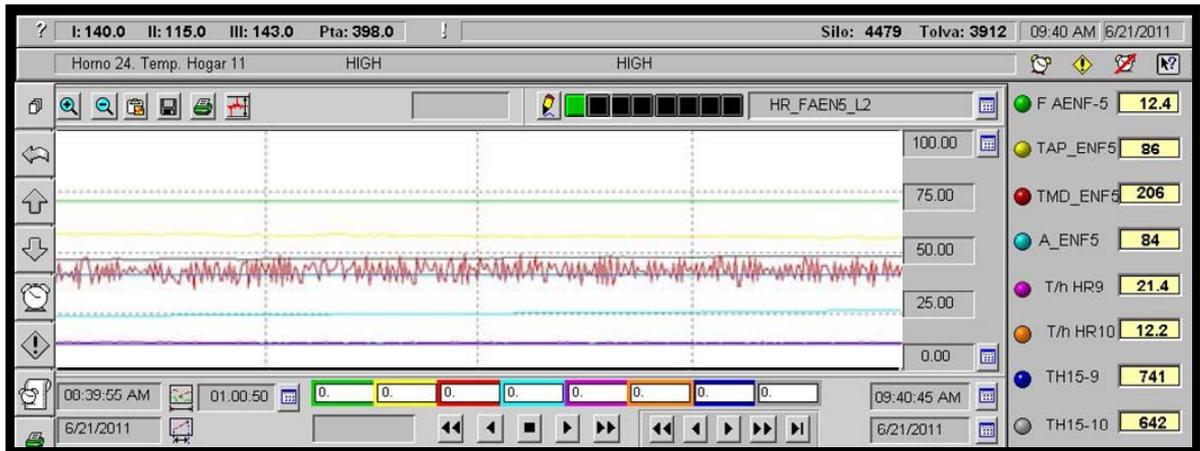
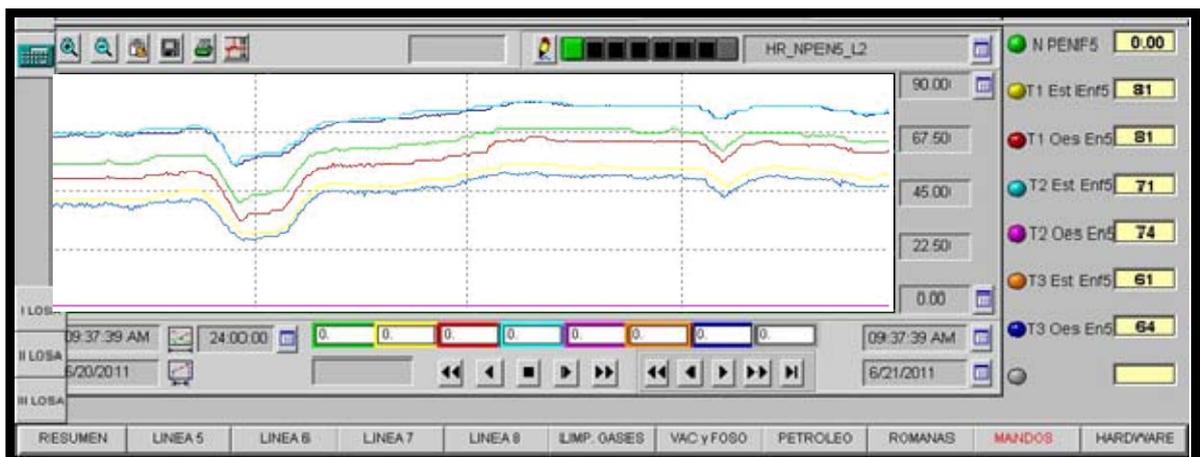


Figura 2.1. Imagen de las variables registradas por el SCADA (CITECT).



**Figura 2.2.** Ventana del CITECT para el monitoreo de las variables del proceso de enfriamiento.

- Donde:
- **TAP\_ENF5:** Temperatura del agua en la piscina; °C
- **TDM\_ENF5:** Temperatura del mineral a la descarga del enfriador; °C
- **A\_ENF5:** Corriente del motor; A
- **T/h HR9:** Flujo de mineral que entra al horno 9; t/h
- **T/h HR10:** Flujo de mineral que entra al horno 10; t/h
- **TH15-9:** Temperatura en el hogar 15 del horno 9; °C
- **TH15-10:** Temperatura en el hogar 15 del horno 10; °C

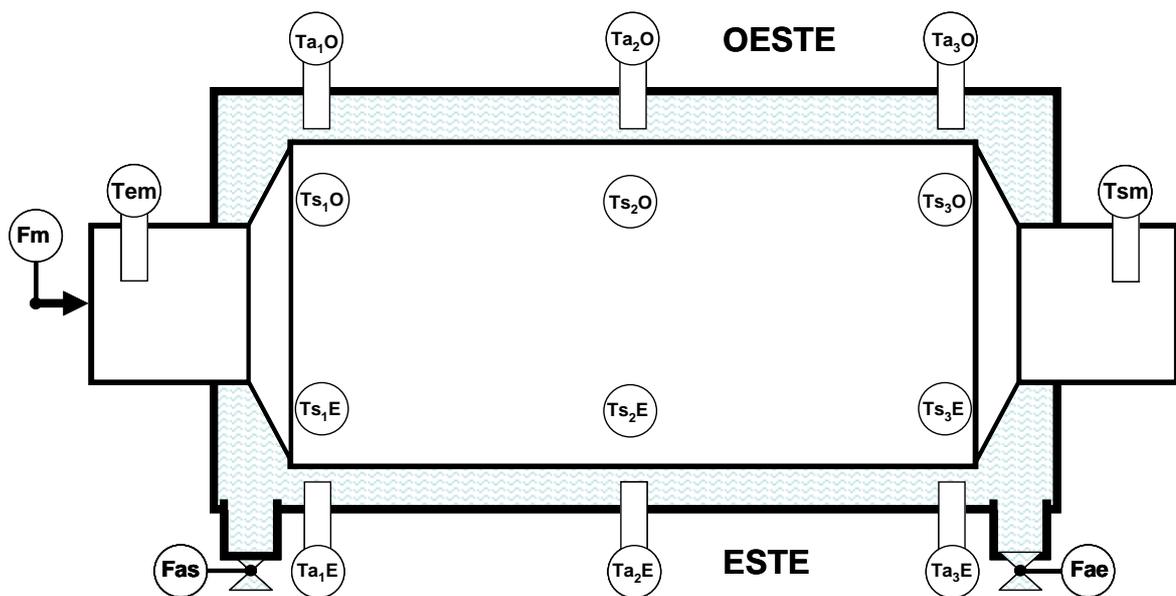


**Figura 2.3.** Ventana del CITECT para el monitoreo de la temperatura del agua en 6 puntos de la piscina.

Donde:

- **N PENF5**: Nivel del enfriador; mm
- **T1 Est Enf5**: Temperatura del agua en el punto 1 del lado este de la piscina; °C
- **T1 Oes En5**: Temperatura del agua en el punto 1 del lado oeste de la piscina; °C
- **T2 Est Enf5**: Temperatura del agua en el punto 2 del lado este de la piscina; °C
- **T2 Oes En5**: Temperatura del agua en el punto 2 del lado oeste de la piscina; °C
- **T3 Est Enf5**: Temperatura del agua en el punto 3 del lado este de la piscina; °C
- **T3 Oes En5**: Temperatura del agua en el punto 3 del lado oeste de la piscina; °C

La figura 2.3 es una imagen de la ventana que fue creada para esta investigación y que monitorea la temperatura del agua en la piscina en seis puntos adicionales, que no existían, tres en el lado Este y tres en el lado Oeste, las cuales son registradas por el CITECT. La figura 2.4 es una vista superior de la instalación donde se muestra la posición de los instrumentos y los puntos donde se harán las mediciones.



**Figura 2.4.** Vista superior de la posición de los instrumentos de medición en el objeto de estudio

En la figura (2.4) para la obtención de la temperatura en diferentes puntos de la superficie de la pared, se utilizó una termocámara, de mano, modelo FLUKE y un pirómetro digital de mano modelo RAYMXPE, donde:

- T1E, T2E, T3E; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos del lado Este.

- T10, T20, T30; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos del lado Oeste.
- Tsm; Temperatura a la que sale el mineral.
- Fae, Fas; Flujo de agua a la entrada y a la salida de la piscina

A continuación se muestran los parámetros que se registran con sus correspondientes instrumentos de medición y sus características técnicas.

- ✓ PARÁMETRO: Flujo de mineral alimentado al enfriador.
  - EQUIPO: Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - Alimentación 220 V AC
    - Entrada 0 a 18 t/h
    - Salida 4 a 20 mA
- ✓ PARÁMETRO: Temperatura del mineral a la entrada y salida del enfriador.
  - EQUIPO: Termopar tipo K con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante la PC alojado en el cabezal.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - Temperatura de servicio hasta 1523,15 K
    - Cabezal de conexión: forma A, DIN 43729; en fundición de metal ligera, con una entrada de cable.
    - Convertidor de señal programable con rango ajustado.
- ✓ PARÁMETRO: Temperatura del agua en la piscina.
  - EQUIPO: Termómetro de resistencia PT-100 con vaina y cabezal de conexión de roscado con convertidor de señal programable mediante PC alojado en el cabezal.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - Longitud de inmersión 250 mm
    - Convertidor de señal programable con rango ajustado. 273 a 393 K
- ✓ PARÁMETRO: Flujo de agua que entra a la piscina.
  - EQUIPOS: Elemento primario de caudal tipo PITOT delta.

- TUBE modelo 301 - AK - 10 - AD para agua.
- Transmisor de presión diferencial para la medida de caudal, inteligente, modelo SITRANS P serie HK.
- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
  - Alcance de medida ajustable 2,5 a 25 kPa
  - Margen de medida ajustado 0 a 15 kPa
  - Precisión mejor que el 1 % incluido la histéresis y la repetibilidad.
  - Rangeabilidad 1 a 10
  - Indicador local incorporado, analógico escala 0 a 100 %
  - Conexión eléctrica conector HAN 7D
- ✓ PARÁMETRO: Velocidad de rotación del enfriador
  - EQUIPO: Tacogenerador.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - 0 a 8,0 rev/min 0 a 10 V
- ✓ PARÁMETRO: Temperatura de la superficie del cilindro.
  - EQUIPO: Pirómetro Digital, de mano. Modelo RAYMXPE de fabricación alemana.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - Temperatura de servicio entre 243 y 1273 K
    - Emisividad de la superficie ajustable.
- ✓ PARÁMETRO: Temperatura de la superficie del enfriador.
  - EQUIPO: Termocámara, de mano, Modelo FLUKE.
  - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:
    - Temperatura de servicio entre 258,15 y 528,15 K
    - Conexión a PC.
    - Emisividad de la superficie ajustable.
    - Capacidad para 100 imágenes.

El sistema de control se realiza a través de la medición de cada uno de estos parámetros por el equipo correspondiente, luego envían la señal a la computadora donde se registra la información y se muestra la interrelación entre los parámetros antes mencionados.

## 2.2. Selección de la variables que influyen en el proceso de enfriamiento

Para la selección de las variables a manipular durante los experimentos, se hizo un estudio del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, y se analizaron aquellas variables que son registradas por el sistema de adquisición de datos de la empresa. Para ello fue necesaria la evaluación de una base de datos (población), a través de un análisis estadístico descriptivo que permitió describir el comportamiento de las variables que describen el proceso, según se muestra en la tabla 2.1, de las cuales la temperatura de entrada del mineral al enfriador, de entrada del agua y de salida del agua de la piscina, no se tienen en cuenta para la realización de los experimentos ya que no existe en el proceso industrial método alguno para su manipulación, además la temperatura de agua a la salida de la piscina tiene significativa dependencia del flujo de agua, esto se puede explicar a través de la ecuación del calor (2.25).

**Tabla 2.1** Análisis estadístico descriptivo. Diciembre 2010 a Mayo 2011.

	Flujo		Temperatura (°C)		
	mineral (t/h)	agua (m <sup>3</sup> /h)	agua	entra mineral	sale mineral
<b>Media</b>	33,96	14,48	84,50	761,82	191,10
<b>Error típico</b>	0,06	0,08	0,05	0,29	0,49
<b>Mediana</b>	34,00	13,27	84,59	761,49	189,20
<b>Moda</b>	34,00	16,39	76,95	766,98	252,15
<b>Desviación estándar</b>	4,02	3,03	3,51	18,47	31,75
<b>Varianza de la muestra</b>	16,13	9,17	12,35	341,21	1008,22
<b>Curtosis</b>	4,06	10,51	1,04	16,42	0,14
<b>Coeficiente de asimetría</b>	-1,49	2,97	-0,50	-0,41	0,03
<b>Rango</b>	28,00	23,55	33,44	401,50	218,39
<b>Mínimo</b>	15,00	10,58	60,45	502,14	101,10
<b>Máximo</b>	43,00	34,14	93,89	903,63	319,48
<b>Cuenta</b>	4162,00	1276,00	4162,00	4162,00	4162,00
<b>Nivel de confianza (95,0%)</b>	0,12	0,17	0,11	0,56	0,96

### **Flujo de mineral**

La variación en los valores mínimos del flujo de mineral se deben a las operaciones que se realizan durante la puesta en marcha del horno, el valor que adquiere el flujo de mineral depende del perfil térmico del horno. Esto se justifica debido a que solo se alcanzan valores por debajo de la media 15 t/h en los casos de averías, el valor medio es de 34 t/h . La capacidad máxima de un horno es 22 t/h , para una productividad por enfriador de 44 t/h , siendo el valor máximo alcanzado en el periodo evaluado de 43 t/h , lo que justifica que los hornos deben de trabajar siempre a su capacidad nominal.

Este parámetro se identifica como una variable de entrada al sistema debido a que la misma se puede manipular para ver su efecto en la temperatura de salida del mineral del enfriador.

### **Temperatura del agua en la piscina**

Esta variable es un reflejo de la eficiencia del proceso de transferencia de calor ya que depende del calor entregado por el mineral y del flujo de agua que se esté suministrando a la piscina de enfriamiento.

La tabla 2.1 muestra el comportamiento de los valores mínimos, medios y máximos de la temperatura del agua en la piscina, donde se observa que los valores de la temperatura se mueven fuera del valor establecido, 70 °C según el Manual de Operaciones de la planta de Hornos de Reducción (1985). Esto puede estar causado por mala operación del proceso, que se realiza de forma manual y muchas veces los operadores no tienen los conocimientos necesarios para la toma de decisiones, provocando de esta manera esa dispersión en la temperatura del agua en la piscina.

Este parámetro se puede mantener constante a través de la manipulación del flujo de agua que entra a la piscina y es por ello que no se selecciona como una variable de entrada al sistema.

### **Flujo de agua que entra a la piscina**

Esta variable solo es controlada en uno de los 12 enfriadores que existen en la instalación y es por ello que se seleccionó este equipo para realizar la investigación. La misma es manipulada con el objetivo de garantizar una

temperatura alrededor de los 70 °C en la piscina, así como también que el cilindro se mantenga flotando y se consuma la menor cantidad de energía eléctrica. Existe un alto por ciento de coincidencia para los valores medio del flujo de agua, el mismo oscila por los 30 a 34 m<sup>3</sup>/h, según el Manual de Operaciones de la planta de Hornos de Reducción (1985) , dicho flujo debe estar entre los 80 y 100 m<sup>3</sup>/h , lo cual puede estar condicionado al igual que en otros parámetros por la incorrecta operación del proceso.

Este parámetro se identifica como una variable de entrada al sistema debido a que la misma se puede manipular para ver su efecto en la temperatura de salida del mineral del enfriador.

### **Temperatura del mineral a la salida del enfriador**

Aunque la temperatura del mineral a la descarga del enfriador es la variable dependiente, se debe destacar que en ella inciden una serie de parámetros que no se registran en el proceso productivo, como son, la temperatura a la que descarga el Jacoby el mineral en el enfriador, la cantidad de agua que se evapora, la temperatura y humedad del medio ambiente, velocidad del aire y flujo de mineral reducido que entra al enfriador. Todas esas variables mencionadas son recogidas en el modelo fenomenológico propuesto por Góngora (2007).

Se puede observar en la tabla 2.1 que el valor medio de la temperatura del mineral a la descarga del enfriador es de 191,10 °C y la moda de 252,15 °C , muestran un comportamiento cercano a la realidad del proceso, según su régimen de explotación actual y al igual que para el flujo de mineral los valores mínimos corresponden a situaciones de arrancadas, paradas y/o averías del proceso en los hornos o en los enfriadores cilíndricos horizontales.

Este parámetro se identifica como variable de salida o dependiente, debido a que es la que caracteriza la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral.

A partir del análisis realizado se definen como variables de entrada:

- Flujo másico de mineral a la entrada del enfriador
- Flujo de agua de enfriamiento

Como variable de salida o dependiente:

- Temperatura del mineral a la salida del enfriador

### 2.3. Estudio de los factores que influyen en el proceso de enfriamiento

Las investigaciones precedentes sobre el enfriamiento del mineral laterítico reducido han estado dirigidas a estudiar los factores que influyen en el proceso de manera independiente, a la determinación de los coeficientes de transferencia de calor y a la modelación matemática del proceso, sin establecer relaciones que permitan indicar el comportamiento de estas, a través de un estudio integrador y exhaustivo sustentado por un diseño experimental.

Las investigaciones preliminares realizadas indicaron la posibilidad de establecer el rango de operación de las variables que garanticen la realización de los experimentos, sin afectar el proceso productivo. Para la realización de esta investigación se tomó como nivel básico para el flujo de mineral y de agua, el valor de la media, tabla 2.1, garantizando así una de las principales exigencias de la dirección de la planta.

La metodología utilizada durante la realización de los experimentos es la siguiente:

1. Se calibraron los instrumentos que se describen en el epígrafe 2.1 y que se utilizan para medir los valores de las variables que intervienen en el proceso.
2. Se comprobó la conexión de los instrumentos empleados al sistema de adquisición de datos de la empresa (CITECT) para el registro y monitoreo de las variables.
3. Se procedió a establecer un flujo de mineral constante, según el diseño de experimentos garantizando el perfil térmico del horno, teniendo en cuenta que el tiempo de retención del mineral en el horno es de 35 a 40 minutos (Valle, 2000a), se registró la hora y la fecha del momento en que se garantizó la estabilidad del sistema para las nuevas condiciones.
4. Se procedió a establecer el flujo de agua, registrando la hora y la fecha, se esperó mientras se observa en el sistema de adquisición de datos de la empresa (CITECT) hasta que la temperatura del mineral a la descarga se mantuviera estable.
5. Se procedió a realizar mediciones de la temperatura de la pared exterior del cilindro en ambos lados (Este y Oeste) de la instalación.

6. La investigación fue llevada a cabo en las instalaciones industriales propuestas para tal objetivo (Figuras 2.1 a 2.4), donde se realizó el balance de masa y energía y la modelación estadística del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.
7. A partir del conocimiento de esta información y de la matriz de experimentación codificada que se muestra en la Tabla 2.2 se determinaron las temperaturas del mineral a la salida para cada caso.

Para el diseño de esta matriz se utilizó el método factorial completo, que está basado en las posibles combinaciones entre las variables de estudio y los niveles escogidos.

Se estudiaron dos factores (flujo de mineral y flujo de agua) en dos niveles (máximo y mínimo) quedando de la siguiente manera la cantidad de pruebas a realizar:  $2^2 = 4$  pruebas. (Murray 1966)

**Tabla 2.2** Matriz de experimentación codificada

Pruebas	Flujo de mineral (t/h)	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /h)
1	+	+
2	-	+
3	+	-
4	-	-

Teniendo en cuenta este diseño se procede al cálculo y determinación de los niveles de experimentación y posteriormente a la realización de la matriz experimental descodificada, según se muestra en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Matriz real de investigación

Pruebas	Flujo de mineral (t/h)	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /h)
1	35	21
2	34	21
3	35	13
4	34	13

8. Los resultados obtenidos son tratados por métodos estadísticos y analizados tecnológicamente.
9. Cada una de las pruebas diseñadas se repitió tres veces, y en las tablas y figuras se expresa el valor medio, con su previa limpieza de datos en los casos necesarios.

## 2.4. Metodología para el análisis estadístico de los experimentos

Con el objetivo de establecer el efecto de las variables independientes, en la temperatura del mineral laterítico reducido a la salida del enfriador cilíndrico rotatorio y la adecuación del modelo obtenido, se propone la siguiente metodología para el análisis estadístico del proceso.

Primero se hace un control de homogeneidad de los valores (según filas), es decir, por cada una de las filas se toman los valores dudosos, por apreciación del investigador ( $y^*$ ) y se determina el valor promedio a través de la ecuación (2.1) (sin tener en cuenta el valor dudoso)

$$\bar{y}_l = \frac{y_a + y_b + \dots y_n}{n - 1} \quad (2.1)$$

donde:

$\bar{y}_l$ : Valor promedio

$y_a, y_n$ : Valores de respuesta

$n$ : Número de repeticiones

Para determinar la desviación cuadrática (sin incluir el valor dudoso) se emplea la ecuación (2.2)

$$Dc = \sqrt{\frac{(\bar{y}_l - y_a)^2 + (\bar{y}_l - y_b)^2 + \dots (\bar{y}_l - y_n)^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

A través de la ecuación (2.3) se calcula el valor del criterio t Student.

$$t_{calc} = \frac{y^* - \bar{y}_l}{Dc} \quad (2.3)$$

Una vez calculada la t Student a través de la ecuación (2.3)  $t_{calc}$ , se determina la t Student a través de las tablas ( $t_{tab}$ ) y los grados de libertad serían  $f = n - 1$ , para un nivel de significación de  $\alpha = 0,05$ .

Luego se comparan de los criterios  $t_{calc}$  y  $t_{tab}$ . Si  $t_{calc} < t_{tab}$ , el valor dudoso se corresponde con la población y participa en el resto de los cálculos. Si  $t_{calc} > t_{tab}$ ,

el valor no se corresponde con la población y no participa en el resto de los cálculos (hay que eliminarlo del sistema).

El valor promedio de cada una de las filas estará en función del análisis anterior, y si durante las pruebas realizadas no existen errores, se pasa directamente a la ecuación (2.4).

La dispersión por fila y control de su homogeneidad se determina a través de la ecuación (2.4) y la suma de las dispersiones a través de la ecuación (2.5).

$$S_1^2 = [(\bar{y}_1 - y_a)^2 + (\bar{y}_1 - y_b)^2 + \dots (\bar{y}_1 - y_n)^2] \cdot \frac{1}{n-1} \quad (2.4)$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^N S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_N^2 \quad (2.5)$$

donde:

$N$  : Número de experimentos.

La dójima de Cochran ( $G_{calc}$ ) para cada fila se estima a través de la ecuación (2.6)

$$G_{calc} = \frac{S_i^2}{\sum S_i^2} \quad (2.6)$$

Luego se determina el valor de ( $G_{tab}$ ) tabulado, para un (1) grado de libertad  $f_1 = n - 1$ ;  $f_2 = N$ ;  $\alpha = 0,05$ . Si  $G_{calc} < G_{tab}$ , la dispersión es homogénea de cada fila analizada con respecto a la población. De manera contraria la fila debe ser excluida, en tales casos generalmente se han producido errores en la experimentación.

La dispersión de reproducibilidad se calcula a través de la ecuación (2.7)

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (2.7)$$

El error de reproducibilidad se determina a través de la ecuación (2.8)

$$S_y = \sqrt{S_y^2} \quad (2.8)$$

El criterio t Student se estima según la ecuación (2.9)

$$t_{calc} = \frac{S_y}{S_y^2} \quad (2.9)$$

Luego se determina  $t_{tab}$ ; para los grados de libertad  $f = N \cdot (n - 1)$ ;  $\alpha = 0,05$  y se comprueban los criterios  $t_{calc}$  y  $t_{tab}$ . Si  $t_{calc} > t_{tab}$ , la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobada estadísticamente. Si se cumple lo contrario no se recomienda repetir el experimento.

Para identificar los coeficientes de la ecuación de regresión ( $b_n$ ) se emplean las ecuaciones (2.10, 2.11, y 2.12). Los cálculos se realizan tomando los signos verticales de la matriz ampliada de experimentación, según se muestra en la tabla 2.4.

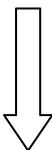
$$b_0 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \quad (2.10)$$

$$b_1 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \quad (2.11)$$

$$b_n = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \quad (2.12)$$

**Tabla 2.4** Matriz ampliada de experimentación (valores verticales)

No.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_{12}$
1	1	1	1	1
2	1	-1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1



La ecuación de regresión se representa a través de la ecuación (2.13).

$$\xi = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_{12} X_1 X_2 + \cdots + b_N X_N \quad (2.13)$$

Para realizar el control estadístico del significado de los coeficientes de la ecuación de regresión (2.13), primeramente se determina el error de la prueba a través de la ecuación (2.14).

$$S_p = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot n}} \quad (2.14)$$

El criterio t Student para los coeficientes de la ecuación de regresión se determinan a través de las ecuaciones (2.15, 2.16, 2.17)

$$t_{calc} = \frac{|b_0|}{S_p} \quad (2.15)$$

$$t_{calc} = \frac{|b_1|}{S_p} \quad (2.16)$$

$$t_{calc} = \frac{|b_2|}{S_p} \quad (2.17)$$

Luego se determina  $t_{tab}$ ; para los grados de libertad  $f = N \cdot (n - 1)$ ;  $\alpha = 0,05$  y se comprueban los criterios  $t_{calc}$  y  $t_{tab}$ . Si  $t_{calc} > t_{tab}$ , los coeficientes de la ecuación son significativos (son incluidos en la expresión). Si  $t_{calc} < t_{tab}$ , los coeficientes de la ecuación no son significativos (no son incluidos en la expresión).

El control de la adecuación de la ecuación de regresión se determina a través de las ecuaciones (2.18, 2.19, 2.20) y se realiza el cálculo para cada punto del plano. Este se realiza tomando los signos horizontales de la matriz de experimentación, según se muestra en la tabla 2.5.

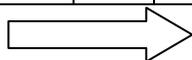
$$\hat{y}_1 = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \quad (2.18)$$

$$\hat{y}_2 = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \quad (2.19)$$

$$\hat{y}_N = \pm b_0 \pm b_1 \pm b_2 + \dots \pm b_N \quad (2.20)$$

**Tabla 2.5** Matriz ampliada de experimentación (valores horizontales)

No	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>12</sub>
1	1	1	1	1
2	1	-1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1



La dispersión de adecuación se determina a través de la ecuación (2.21).

$$S_{adec}^2 = \frac{n}{N - n - 1} \left[ (\bar{y}_1 - \hat{y}_1)^2 + (\bar{y}_2 - \hat{y}_2)^2 + \dots + (\bar{y}_n - \hat{y}_n)^2 \right] \quad (2.21)$$

Luego se determina el Fisher tabulado  $F_{tab}$ ; para los grados de libertad  $f_1 = N - (n - 1)$ ;  $f_2 = N \cdot (n - 1)$ ;  $\alpha = 0,05$ .

Luego se calcula el criterio de Fisher a través de la ecuación (2.22).

$$F_{calc} = \frac{S_{adec}^2}{S_y^2} \tag{2.22}$$

A través de la comprobación del criterio  $F_{calc}$  y  $F_{tab}$ . Si  $F_{calc} < F_{tab}$ ; el modelo es adecuado al objeto investigado.

El coeficiente de correlación se determina a través de la ecuación (2.23) y para ello el cálculo se puede originar según la tabla 2.6.

**Tabla 2.6** Para el cálculo del coeficiente de correlación

Prueba	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$y_G = \frac{\sum y_i}{N}$	$(\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2$
1	$\bar{y}_1$				
2	$\bar{y}_2$				
3	$\bar{y}_3$				
4	$\bar{y}_4$				
	$\sum \bar{y}_i$		$\sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$		$\sum (\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y}_G)^2}} \tag{2.23}$$

$R = 0$ : No hay correlación

$R = 1$ : La relación es positiva

$R = -1$ : La relación es negativa

$-1 < R < 1$ : Existe relación con mayor o menor veracidad

## 2.5. Balance de masa y energía

Como se ha podido observar el análisis estadístico del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, permite determinar el efecto de incidencia de las

variables que caracterizan el proceso, obtener una ecuación que relaciones un número de variables determinado y de esa manera predecir y/o pronosticar el comportamiento de la variable dependiente para el rango en que fue evaluado el proceso. Pero no permite determinar:

- cuál es la zona de mayor intercambio calor,
- cuál es el modo de transferencia de calor predominante,
- para qué valores de flujo de agua y de mineral se alcanza la mayor eficiencia.

Por esos motivos en este trabajo se evaluará a partir de un balance de masa y energía la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema. Una aplicación importante del calor y analogía de transferencia de masa es el enfriamiento evaporativo, que ocurre siempre que un flujo de gas fluye sobre un líquido. La evaporación debe ocurrir de la superficie líquida y la energía asociada al cambio de la fase es el calor latente del líquido. Esta ocurre cuando las moléculas líquidas cerca de la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía, sobre eso necesitan superar la superficie obligatoria de unión (Incropera, 2003). La energía exigida para obtener la evaporación debe venir de la energía interior del líquido, que entonces debe experimentar una reducción en la temperatura (efecto de enfriamiento).

Sin embargo, si se mantienen las condiciones estacionarias, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe ser completada por el traslado de la energía del líquido.

La ecuación (2.24) describe el balance térmico del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, que plantea que todo el calor absorbido por el agua es igual al calor cedido por el mineral menos las pérdidas al medioambiente.

Se debe destacar que para hacer esta consideración se asume que en todo momento el cilindro parcialmente sumergido en la piscina permanece cubierto por una pequeña película de agua. Es decir el cilindro no está en contacto con el aire ambiente, lo hace a través del agua.

$$Q_{H_2O} = Q_m - Q_{ma} \quad (2.24)$$

donde:

$Q_{H_2O}$  - Calor absorbido por el agua; kW

$Q_m$  - Calor cedido por el mineral; kW

$Q_{ma}$  - Pérdida de calor al medioambiente; kW

El calor transferido del mineral al agua se determina por la ecuación (2.25) y depende de las propiedades y las temperaturas de entrada y salida del agua del sistema. Se debe tener en cuenta que existe una pequeña cantidad de agua que se evapora y por lo tanto el flujo de agua que entra no es igual al que sale.

$$Q_{H_2O} = \dot{m}_{sH_2O} \cdot C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O} - \dot{m}_{eH_2O} \cdot C_{peH_2O} \cdot T_{eH_2O} \quad (2.25)$$

donde:

$\dot{m}_{eH_2O}$ ,  $\dot{m}_{sH_2O}$  - Flujo másico del agua a la entrada y a la salida; kg/s

$C_{peH_2O}$ ,  $C_{psH_2O}$  - Calor específico del agua a la entrada y a la salida; J/kg·K

$T_{sH_2O}$  - Temperatura de salida del agua de la piscina; K

$T_{eH_2O}$  - Temperatura de entrada del agua a la piscina; K

Para determinar el calor entregado por el mineral se utiliza la ecuación (2.26), en este caso se considera que todo el mineral que entra al enfriador es igual al que sale.

$$Q_m = \dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot (T_{em} - T_{sm}) \quad (2.26)$$

donde:

$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$  - Flujo másico del mineral; kg/s

$T_{em}$  - Temperatura de entrada del mineral; K

$T_{sm}$  - Temperatura de salida del mineral; K

$C_{pm}$  - Calor específico del mineral; J/kg·K

Las ecuaciones (2.24, 2.25, y 2.26) dependen de las propiedades, del mineral y del agua de enfriamiento, pero para determinar la cantidad de calor transferida al medio ambiente es necesario tener en cuenta la transferencia de calor por convección.

Para determinar la cantidad de calor que se pierde al medioambiente se utiliza la ecuación (2.27) que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire.

$$Q_{ma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.27)$$

donde:

$\alpha_{agua}$  - Coeficiente de transferencia de calor por convección;  $W/m^2 \cdot K$

$A_{agua}$  - Área ocupada por el agua;  $m^2$

$T_{agua}$  - Temperatura del agua en la piscina; K

$T_{aire}$  - Temperatura del aire; K

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio es necesario tener en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua. La energía exigida para la evaporación proviene de la energía interior del líquido que entonces trae consigo reducciones en la temperatura del mismo.

Al aplicar la conservación de la energía a una superficie de control alrededor del líquido, se obtiene la expresión (2.28).

$$q''_{conv} + q''_{agr} = q''_{evap} \quad (2.28)$$

donde:

$q''_{conv}$  - Flujo de calor por convección;  $W/m^2$

$q''_{agr}$  - Flujo de calor agregado;  $W/m^2$

$q''_{evap}$  - Flujo de calor por evaporación;  $W/m^2$

Si no se agrega calor por otros medios, la ecuación (2.28) se reduce a un balance entre la transmisión de calor por convección desde el gas y la pérdida de calor evaporativa desde el líquido representada en la ecuación (2.29).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.29)$$

Donde el flujo de calor por evaporación  $q''_{evap}$  puede calcularse como el producto de flujo de masa de evaporado y el calor latente de vaporización, ecuación (2.30).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.30)$$

donde:

$n''_A$  - Flujo másico de agua que se evapora; kg/s·m<sup>2</sup>

$h_{fgv}$  - Calor latente de vaporización; kJ/kg

El flujo másico de agua que se evapora se determina según la ecuación (2.31).

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.31)$$

donde:

$h_m$  - Coeficiente de transferencia de masa; m/s

$\rho_{A,sat}$  - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie; kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{A,\infty}$  - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura del aire; kg/m<sup>3</sup>

El Número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, y proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y según Incropera (2003) se obtiene a través de la ecuación (2.32). La cual es válida para  $(0,6 < S_c < 3000)$ .

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.32)$$

donde:

$S_c$  - Número de Schmidt.

El Número de Reynolds se determina a través de la ecuación (2.33).

$$R_{eD} = \frac{V_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.33)$$

donde:

$V_{aire}$  - Velocidad del aire; m/s

$\nu_{aire}$  - Coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m<sup>2</sup>/s

Para el calcular el Número de Schmidt se emplea la ecuación (2.34).

$$S_c = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.34)$$

donde:

$\nu_{aire}$  - Viscosidad cinemática del aire; m<sup>2</sup>/s

$D_{AB}$  - Coeficiente de difusión de masa; m<sup>2</sup>/s

Conociendo las ecuaciones (2.32), (2.33), (2.34), y a través de la ecuación (2.35) se puede determinar el Coeficiente de Transferencia de Masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.35)$$

donde:

$L$  - Longitud del enfriador; m

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación (2.36).

$$q''_{conv} = \alpha_{agua} (T_{agua} - T_{aire}) \quad (2.36)$$

Si se sustituyen las ecuaciones (2.30) y (2.36) en la ecuación (2.29) y si despeja el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire  $\alpha_{agua}$ , se obtiene la ecuación (2.37).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(T_{agua} - T_{aire})} \quad (2.37)$$

La eficiencia del enfriador se determina a través de la ecuación (2.38) y expresa la relación entre el calor entregado por el mineral y la cantidad de calor que entra con él.

$$\eta_e = \frac{Q_m}{\dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot T_{em}} \cdot 100 \quad (2.38)$$

Donde:

$\eta_e$  - Eficiencia del enfriador; %

El sistema de ecuaciones establecido en este epígrafe constituye el procedimiento de cálculo para el balance térmico del objeto de estudio. El análisis particular para las condiciones objetivas de la experimentación se describe y resuelve en el Anexo 5 del trabajo.

### Conclusiones del capítulo 2

- Se caracterizó la instalación experimental y se agregaron al sistema de adquisición de datos de la empresa seis termo-resistencias que garantizan una mejor evaluación del comportamiento del agua en la piscina durante el proceso de enfriamiento de mineral, su relación con el flujo de agua, con el flujo de mineral y su incidencia en la temperatura del mineral a la descarga.
- Se estableció la metodología para el análisis estadístico del proceso de enfriamiento de mineral laterítico reducido y la incidencia de las variables flujo de agua y de mineral en la temperatura del mineral a la descarga.
- Se estableció el balance térmico del proceso para cuantificar los modos de transferencia de calor, identificar el predominante sobre la base de los experimentos realizados y la eficiencia térmica de la instalación.

## CAPITULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

---

En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se desarrolla el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, donde se requiere de un procedimiento de cálculo satisfactorio para la evaluación térmica del enfriador y de las variables de mayor incidencia en la temperatura de salida del mineral. Durante el desarrollo de la presente investigación el procedimiento fue establecido y debe ser verificado a partir de los datos experimentales obtenidos en el objeto de estudio. Es por ello que los objetivos del capítulo son:

1. Obtener información experimental del proceso a escala industrial que permita:
  - a. Establecer los modelos que integren los mejores juegos de variables, basados en criterios estadísticos y tecnológicos.
  - b. Establecer el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de enfriamiento, los resultados del balance térmico y la eficiencia térmica del proceso de enfriamiento.
2. Valorar el impacto económico, social y ambiental del proceso de enfriamiento.

### 3.1. Análisis estadístico de los resultados experimentales

A partir de la información experimental obtenida se realizó un análisis estadístico, con el fin de lograr un modelo de regresión que se adecuara a los parámetros de estudio (Murray 1966; Dobrojotov 1988), pero que a la vez contribuyera a comprobar los resultados obtenidos posteriormente en el modelo cinético.

Luego de realizados los experimentos quedó la matriz de experimento como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Matriz de experimento

Flujo de mineral (t/h)	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura del mineral a la salida (°C)		
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
35	21	215,67	216,52	217,37
34	21	224,94	227,74	229,55
35	13	212,75	211,66	210,27
34	13	197,77	198,18	198,60

Los resultados obtenidos fueron sometidos en primer orden a un control de homogeneidad para el caso de la influencia de los principales parámetros del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido. El desarrollo de la metodología para el análisis estadístico de los experimentos propuesto en el epígrafe 2.4, se expone en el Anexo 1.

Luego la información fue sometida a la determinación de la dispersión por filas y control de la homogeneidad basado en el criterio de Cochran: Siendo el mayor valor calculado (0,68), menor al tabulado (7679), por lo que existe homogeneidad entre las diferentes filas de la matriz.

Partiendo del conocimiento anterior se determinó la dispersión de reproducibilidad (1,95) y de ahí el error de reproducibilidad (1,39). Luego de hacer el estudio de la representatividad de la información se logró obtener el siguiente modelo estadístico de regresión.

$$T_{sm} = 213,418 + 0,623 \cdot F_m + 8,548 \cdot F_a - 6,067 \cdot F_m \cdot F_a \quad (3.1)$$

La comparación de cada una de las t Student calculada, con la t Student tabulada (1,94); arroja un error calculado de 0,404. La adecuación de la ecuación de regresión es determinada por la dispersión de adecuación de cada uno de los puntos del plano de investigación; y comparando con el criterio de Fisher, se obtiene que la dispersión de adecuación es cero y el valor de Fisher calculado (0) es menor que el valor de Fisher tabulado (19,4).

Lo anterior demuestra que el modelo es adecuado al objeto investigado en los parámetros tomados. Lo anterior se corrobora con el valor del coeficiente de correlación igual a uno (1), entre la temperatura de salida del mineral y las demás variables independientes.

Del análisis realizado se concluye que:

1. Existe una influencia significativa de las variables estudiadas sobre la temperatura de salida del mineral.
2. Existe una alta correlación entre las variables de entrada del proceso: flujo de agua, flujo de mineral y la temperatura de salida del mineral, siendo esta igual a 1.
3. Se obtuvo una ecuación de regresión que se adecua a los parámetros de estudio teniendo un carácter directamente proporcional a la temperatura de salida del mineral, el flujo de agua y de mineral, mientras que la combinación de las dos se comporta de manera inversa.
4. De los valores de los coeficientes de correlación para cada una de las variables se puede plantear que el grado de influencia de éstas sobre el proceso, en orden descendente es el siguiente: Flujo de agua, la combinación del flujo de agua con el flujo de mineral y el flujo de mineral.

### **3.1.1. Análisis de Regresión**

A partir de los resultados obtenidos en el epígrafe 3.1, se comprobó que la variable flujo de mineral no es significativa, según los resultados del experimento realizado, motivo por el cual se realizó un nuevo experimento donde existe un mayor rango de variación de dicha variable.

Luego se procede a la identificación del proceso con el empleo de los valores medios de los datos mostrados en el Anexo 4 y que se resumen en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Resumen de datos para la identificación del proceso de enfriamiento.

Flujo		Temperatura a la salida (°C)		
Mineral (t/h)	Agua (m <sup>3</sup> /h)	Enfriador	Horno 1	Horno 2
32,40	20,00	217,71	770,14	618,03
35,40	25,00	258,80	788,85	651,27
Temperatura (°C)		1	2	3
Agua Lado Este		77,18	66,06	59,98
		79,44	70,23	64,23
		82,64	75,17	69,09
Agua Lado Oeste		78,09	69,97	61,12
		80,21	73,92	66,14
		83,45	77,98	71,25
Pared Lado Este		81,33	70,53	64,50
		93,71	79,53	74,13
		100,50	87,80	93,98
Pared Lado Oeste		83,63	72,20	68,93
		93,26	79,11	74,71
		96,90	91,67	85,93

La ecuación 3.1 muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la temperatura de salida del mineral ( $T_{ms}$ ) y las 16 variables independientes que intervienen el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, el cual se realizó con ayuda del Software Microsoft Office Excel 2003, se debe destacar que se obtuvieron resultados similares con ayuda del Software Statgraphics Centurion XV, según se muestra en el Anexo 2. Se observa que la temperatura del agua en diferentes puntos de la piscina tiene mayor efecto en la variable dependiente, siendo directamente proporcional en los puntos dos ( $T_{a2E}$ ) y tres ( $T_{a3E}$ ) del lado Este e inversamente proporcional en los puntos dos ( $T_{a2O}$ ) y tres ( $T_{a3O}$ ) Oeste. Es necesario resaltar que el comportamiento de dichas temperaturas está en dependencia del flujo de agua que se suministra a la piscina y su distribución. Se observa además que la temperatura de la pared del cilindro en el punto dos Oeste ( $T_{2pO}$ ), ejerce el

menor efecto sobre la variable dependiente, considerando que dicho comportamiento se debe al estancamiento del agua en esa zona de la piscina.

$$\begin{aligned} T_{ms} = & 1762,082259 + 3,29662503 \cdot F_m + 2,542084692 \cdot F_a - 0,251751817 \cdot Th1 - \\ & 0,657635116 \cdot Th2 - 14,97081883 \cdot Ta1E + 10,21767056 \cdot Ta2E + \\ & 32,66032512 \cdot Ta3E + 3,037850703 \cdot Ta1O - 28,37778784 \cdot Ta2O - \\ & 9,470757847 \cdot Ta3O - 0,818082646 \cdot T1pE + 2,059740803 \cdot T2pE - \\ & 0,464653087 \cdot T3pE - 0,719069481 \cdot T1pO - 0,18409211 \cdot T2pO - \\ & 2,923729991 \cdot T3pO \end{aligned} \quad (3.1)$$

El estadístico coeficiente de determinación ( $R^2$ ) indica que el modelo ajustado explica en un 99,81 % la variabilidad en la temperatura de salida del mineral ( $T_{ms}$ ). Los valores del coeficiente de determinación ajustado, la desviación estándar de los residuos y el error absoluto medio son igual a cero.

La figura 3.1 muestra el comportamiento de los resultados obtenidos experimentalmente y los obtenidos por el modelo de regresión múltiple representado por la ecuación 3.1.

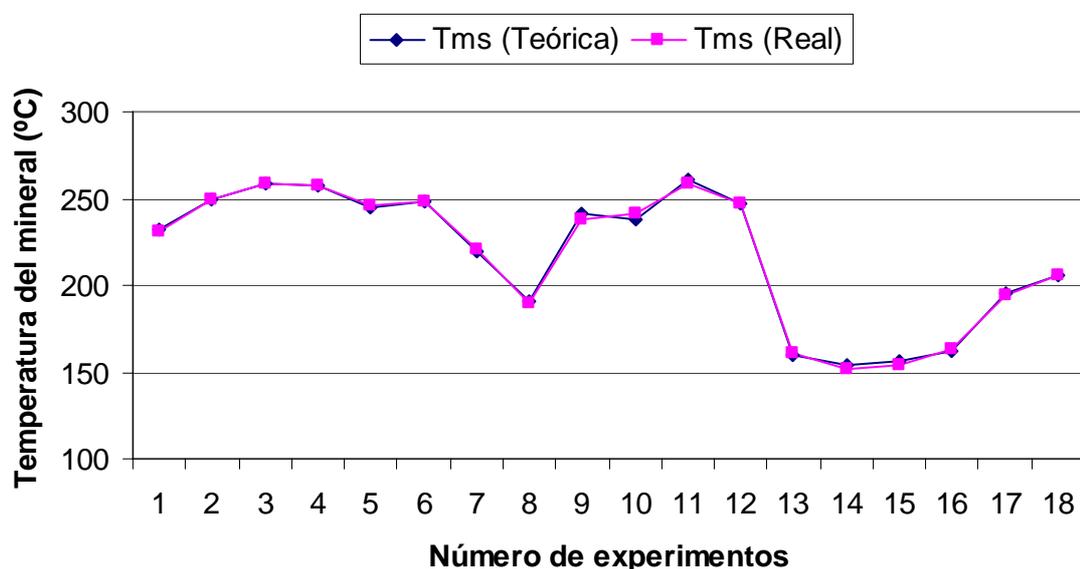


Figura 3.1 Comportamiento de la temperatura del mineral real y del modelo.

Con el objetivo de determinar cuales juegos de variables tienen un mayor efecto en la variable dependiente, que permita pronosticar la temperatura del mineral laterítico reducido a la salida del enfriador cilíndrico rotatorio, se realizó la selección de los posibles modelos de regresión con ayuda del Software Statgraphics Centurion XV, según se muestra en el Anexo 3.

La tabla 3.3 muestra los resultados de los mejores ajuste de varios modelos de regresión múltiple para describir la relación entre la temperatura de salida del mineral (Tms) y 16 variables predictoras. Solo se seleccionaron aquellos modelos con un coeficiente de correlación superior a 0,90 y que incluyan las variables flujo de mineral y flujo de agua, que son las que realmente se pueden manipular por las características propias del proceso de enfriamiento de mineral laterítico reducido a escala industrial.

Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde cero hasta cinco variables. Los estadísticos tabulados incluyen el cuadrado medio del error, los valores de  $R^2$  ajustada y sin ajustar, y el Cp de Mallows. Para determinar cuales modelos son mejores de acuerdo a estos diferentes criterios.

**Tabla 3.3** Resumen de modelos de regresión múltiple ajustados.

Cuadrado medio del error	Estadístico de Mallows, Cp	Coeficiente de determinación		Coeficiente de correlación	Variables independientes
		$R^2$	Ajustado		
114,88	23,00	94,17	92,37	0,97	Fa, Fm, Ta1E, Ta3O
122,58	25,07	93,78	91,86	0,97	Fa, Fm, Ta1E, Ta3E
135,17	28,47	93,14	91,03	0,97	Fa, Fm, Ta1O, Ta3O
136,51	28,83	93,07	90,94	0,96	Fa, Fm, Ta1O, Ta3E
138,79	29,45	92,95	90,79	0,96	Fa, Fm, T3pO, Th1
154,06	33,57	92,18	89,77	0,96	Fa, Fm, Th1, Th2
325,11	89,22	80,96	78,42	0,90	Fa, Fm

Luego se obtuvieron las ecuaciones 3.2 a la 3.8 para cada uno de los modelos propuestos en la tabla 3.2, que son resultado de ajustar los modelos de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la temperatura de salida del mineral (Tms) y las variables independientes, para lo cual también se utilizó el Software Statgraphics Centurion XV.

**Modelo 1:**

$$Tms = 596,115 + 4,45725 \cdot Fa + 6,8648 \cdot Fm - 18,5574 \cdot Ta1E + 11,8552 \cdot Ta3O \quad (3.2)$$

**Modelo 2:**

$$Tms = 617,832 + 4,41776 \cdot Fa + 6,33293 \cdot Fm - 19,1809 \cdot Ta1E + 12,9215 \cdot Ta3E \quad (3.3)$$

**Modelo 3:**

$$Tms = 652,288 + 4,73418 \cdot Fa + 8,60631 \cdot Fm - 17,7585 \cdot Ta1O + 9,31887 \cdot Ta3O \quad (3.4)$$

**Modelo 4:**

$$Tms = 690,752 + 4,75075 \cdot Fa + 8,05688 \cdot Fm - 18,6894 \cdot Ta1O + 10,4317 \cdot Ta3E \quad (3.5)$$

**Modelo 5:**

$$Tms = 1504,24 + 2,90769 \cdot Fa + 3,63358 \cdot Fm - 2,08156 \cdot Th1 + 1,88299 \cdot T3pO \quad (3.6)$$

**Modelo 6:**

$$Tms = 1754,91 + 1,66836 \cdot Fa + 4,2773 \cdot Fm - 1,99139 \cdot Th1 - 0,283973 \cdot Th2 \quad (3.7)$$

**Modelo 7:**

$$Tms = -260,386 + 3,26833 \cdot Fa + 12,7386 \cdot Fm \quad (3.8)$$

Del análisis de regresión múltiple se puede concluir.

1. Puesto que el valor de la probabilidad (P) en la tabla ANOVA, que se muestra en el Anexo 3, para todos los modelos es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables de los modelos propuestos con un nivel de confianza del 95,0 % .
2. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) indica en qué medida los modelos ajustados explican la variabilidad de la temperatura del mineral a la salida.
3. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado es más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes.
4. El error estándar del estimado muestra la desviación estándar de los residuos, valor que puede usarse para construir límites para nuevas observaciones.
5. El estadístico de Durbin-Watson, tabla 3.4, examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos:
  - a. Puesto que el valor de la probabilidad (P) es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95 % en los modelos 1, 3, 5 y 6. Ecuaciones (3.2, 3.4, 3,6 y 3,7)

- b. Puesto que el valor de la probabilidad (P) es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0 % en los modelos 2, 4 y 7. Ecuaciones (3.3, 3.5, y 3,8)
6. Para determinar si el modelo puede simplificarse, se tiene en cuenta que el valor de la probabilidad (P) más alta de las variables independientes sea menor que 0,05, término que es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0 % . De cumplirse esta condición no se recomienda eliminar ninguna variable del modelo:

**Modelo 1:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,0040, que corresponde al flujo de mineral (Fm), no se considera eliminar ninguna variable del modelo.

**Modelo 2:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,0125, que corresponde al flujo de mineral (Fm), no se considera eliminar ninguna variable del modelo.

**Modelo 3:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,0051, que corresponde a la temperatura del agua en el punto tres del lado Oeste (Ta3O), no se considera eliminar ninguna variable del modelo.

**Modelo 4:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,0055, que corresponde a la temperatura del agua en el punto tres del lado Este (Ta3E), no se considera eliminar ninguna variable del modelo.

**Modelo 5:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,2460, que corresponde al flujo de mineral (Fm), podría considerarse eliminar esta variable del modelo.

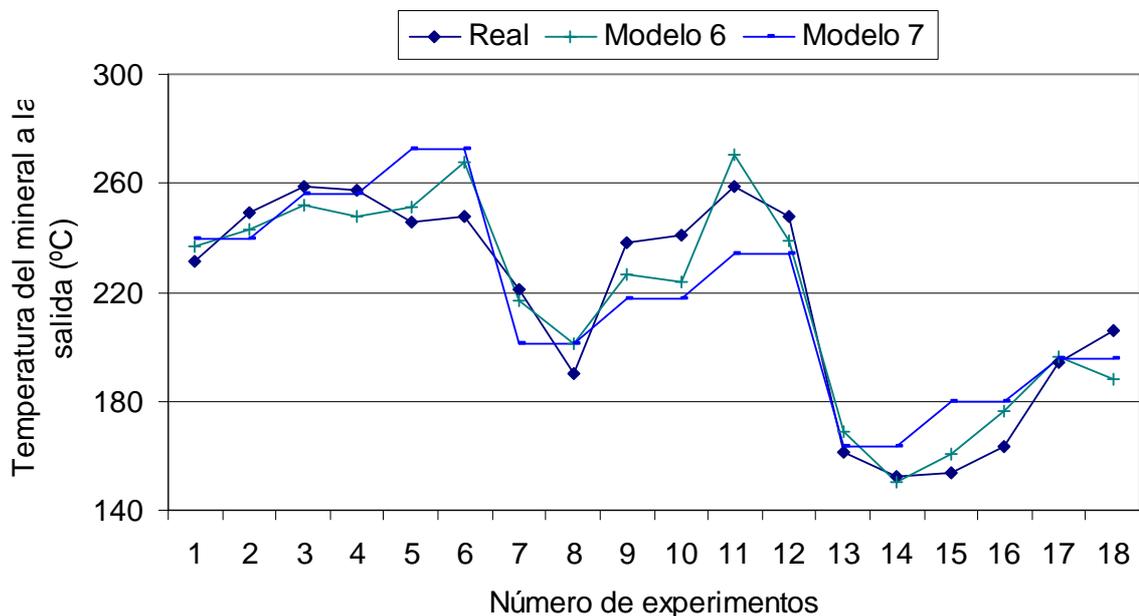
**Modelo 6:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,3302, que corresponde a la temperatura del mineral en el horno 2 (Th2), podría considerarse eliminar esta variable del modelo.

**Modelo 7:** El valor de la probabilidad (P) más alto de las variables independientes es 0,0067, que corresponde al flujo de agua (Fa), no se considera eliminar ninguna variable del modelo.

**Tabla 3.4** Resumen de estadísticos de los modelos de regresión múltiple ajustados.

Modelo No.	Estadístico		Error	
	Durbin - Watson	P	estándar	absoluto medio
1	1,92	0,16	10,72	7,17
2	1,55	0,04	11,07	7,55
3	1,77	0,10	11,63	8,12
4	1,49	0,03	11,68	8,69
5	2,15	0,29	11,78	8,89
6	2,07	0,28	12,41	9,23
7	1,28	0,02	18,03	13,99

La figura 3.2 muestra el comportamiento de la temperatura real del mineral con respecto a los resultados de los modelos 6 y 7 obtenidos a través del análisis de regresión múltiple. Se proponen dichos modelos ya que se alcanzan valores del coeficiente de regresión entre 0,96 y 0,90 respectivamente, además los modelos están conformados por variables que son registradas y monitoreadas en las 12 líneas de la planta de Horno de Reducción (12 enfriadores).

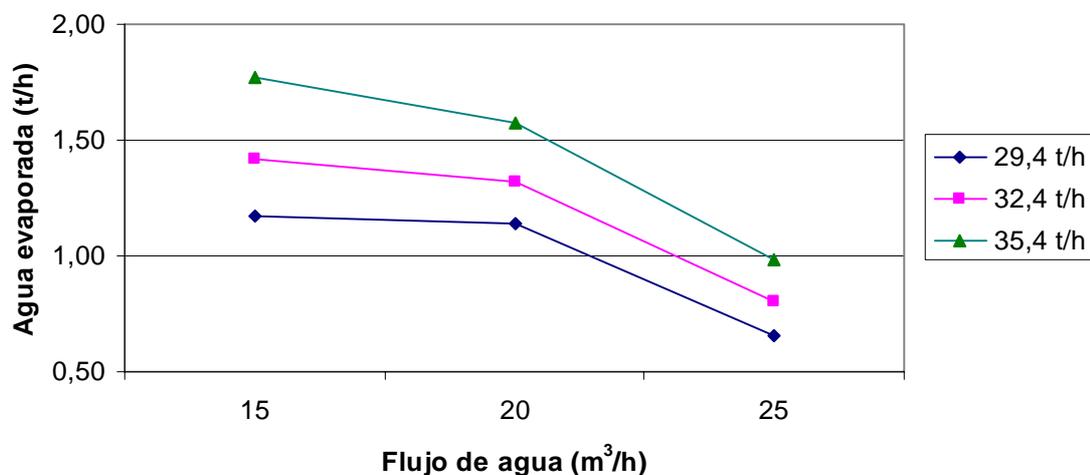


**Figura 3.2** Comportamiento de la temperatura del mineral real y de los modelos.

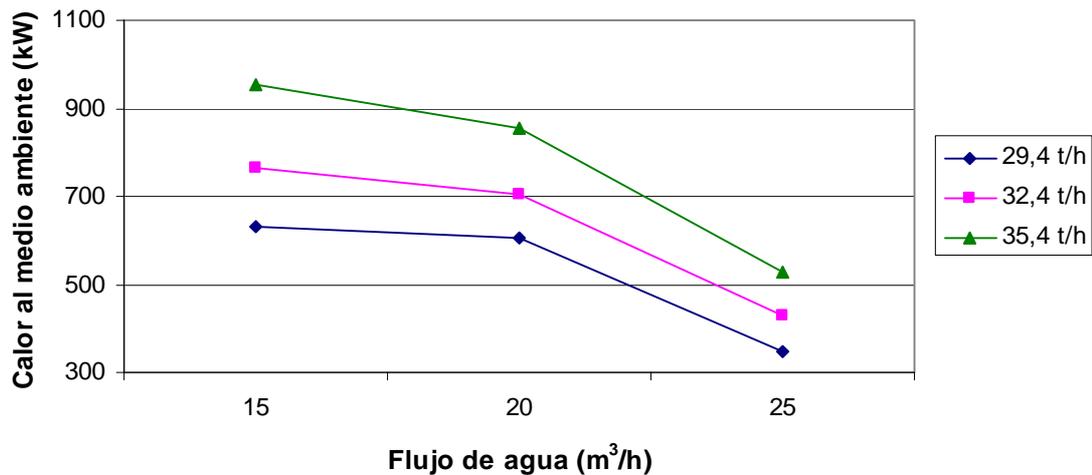
### 3.2. Resultados del balance térmico

Con el objetivo de establecer cual es el modo de transferencia de calor predominante, que garantice el mejor comportamiento del proceso de enfriamiento para diferentes flujos de agua, se realiza el balance térmico y de masa al objeto de estudio, sobre la base del procedimiento de cálculo establecido en el capítulo 2, con la finalidad de llegar a conclusiones profundas respecto a la eficiencia del equipo. Todo sustentado en los valores medios de los datos mostrados en el Anexo 4 y que se resume en la tabla 3.2.

En el Anexo 5, se relacionan los resultados fundamentales obtenidos del balance de energía y masa que se realizó con ayuda del Software Profesional Mathcad 13. La figura 3.3, muestra el comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral. Se observa que para mayores flujos de mineral y menores flujos de agua, el proceso de evaporación al medio ambiente es mayor que para el caso contrario, oscilando los valores mínimos y máximos entre 0,66 y 1,77 t/h de agua evaporada respectivamente.

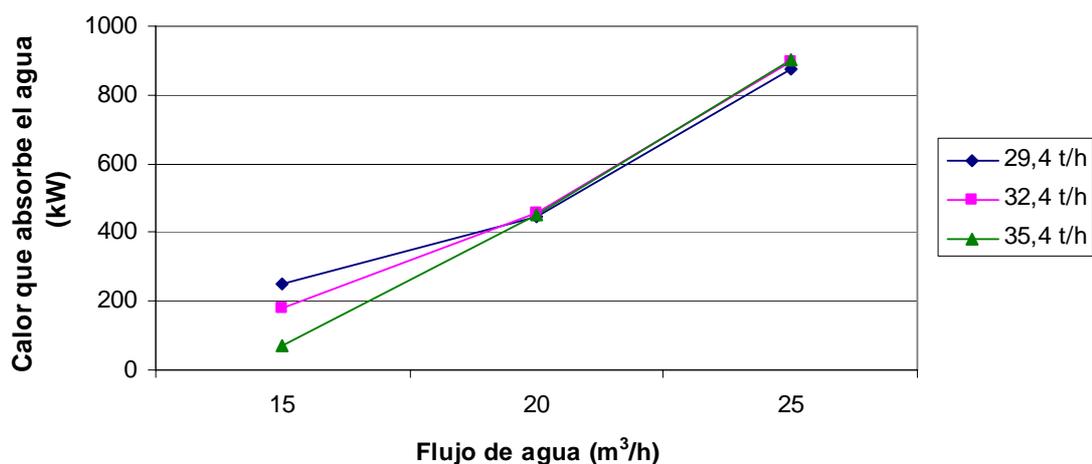


**Figura 3.3** Comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.



**Figura 3.4** Comportamiento del calor cedido al medio ambiente con respecto al flujo de agua para diferentes flujo de mineral.

La figura 3.4 muestra un comportamiento similar al de la figura 3.3 pero en este caso con respecto a la cantidad de calor que se cede al medio ambiente, que aumenta con el incremento del flujo de mineral y la disminución del flujo de agua. Se debe destacar que el modo de transferencia de calor predominante en este proceso es la convección por evaporación, siempre que la temperatura del agua alcance valores cercanos a su temperatura de ebullición (100 °C) a presión atmosférica.

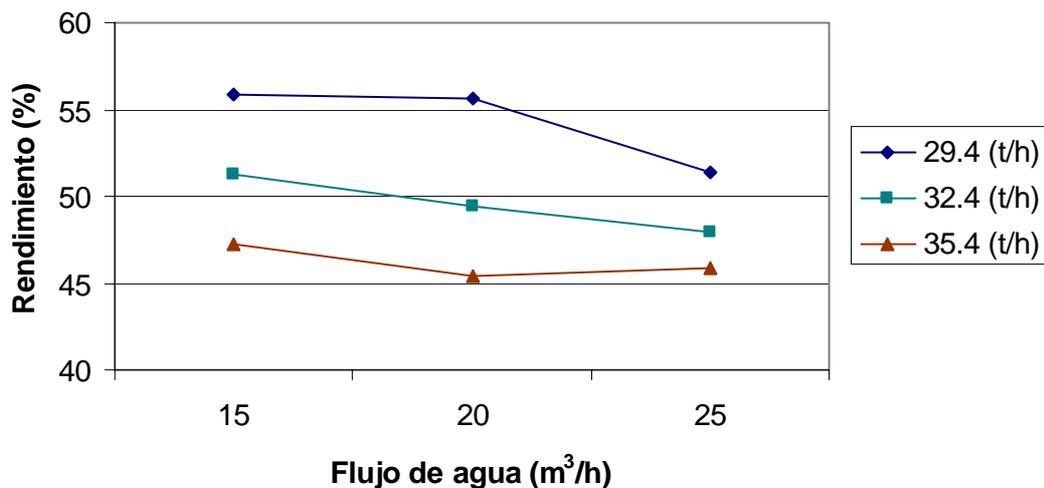


**Figura 3.5** Comportamiento del calor absorbido por el agua con respecto al flujo de agua para diferentes flujo de mineral.

La figura 3.5 muestra el comportamiento del calor absorbido por el agua de la piscina para diferentes flujos de agua, se observa que a medida que se incrementa el flujo de agua esta absorbe mayor cantidad de calor y que para flujos de agua superiores a  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  la diferencia entre la cantidad de calor absorbida para diferentes flujos de mineral es mínima.

A través del balance térmico se comprobó que para altos flujos de mineral y pequeños flujos de agua la mayor cantidad de calor transferida al medio ambiente es por evaporación, pero cuando se opera con flujos de agua superiores a los  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , entonces predomina la transferencia de calor por convección del agua al aire, siendo la sumatoria de ambas cantidades de calor el total transferido al medioambiente, valor que tiende a mantenerse constante.

En la figura 3.6 se observa que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 45 y 56 %, alcanzándose los valores mayores para un flujo de mineral de  $29,4 \text{ t/h}$  y flujos de agua entre 15 y  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ .

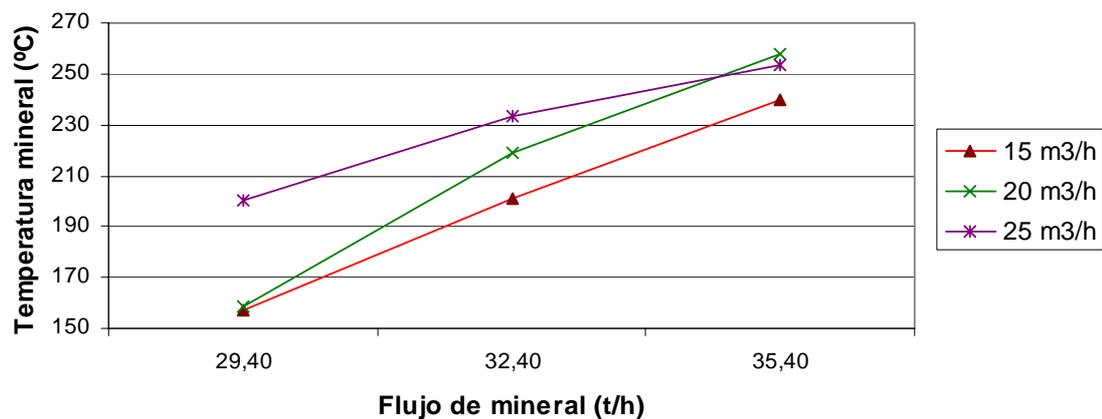


**Figura 3.6** Comportamiento del rendimiento del enfriador con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

### 3.3. Comportamiento de parámetros que inciden en el proceso

La figura 3.7 muestra los resultados de los datos experimentales, observando que a medida que se incrementa el flujo de mineral aumenta la temperatura del mineral a la descarga del enfriador, con el aumento consecuente del flujo de

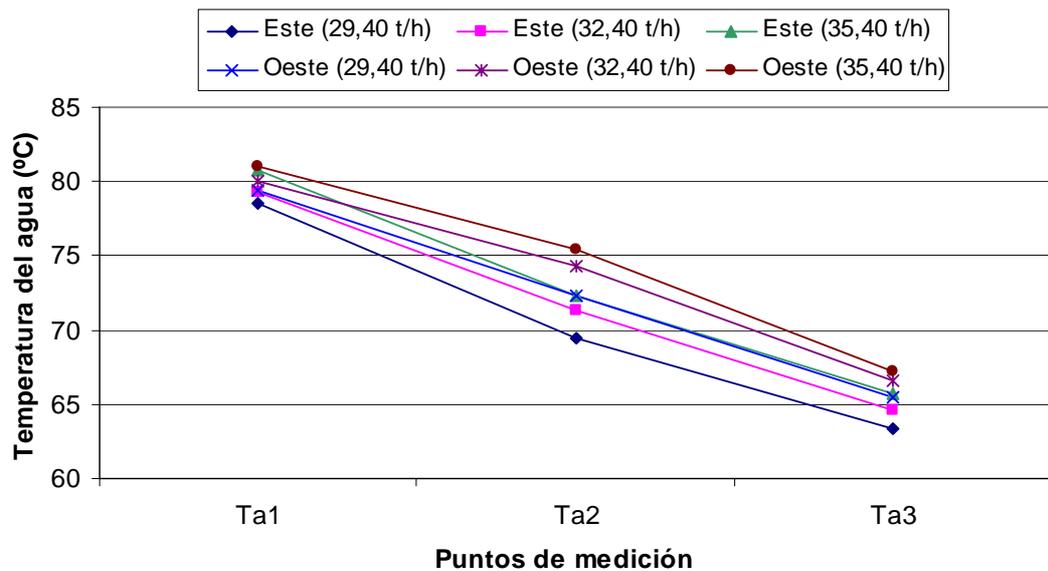
agua. Este incremento de la temperatura del mineral a la descarga con el incremento del flujo de agua, puede ser originado por diferentes causas, considerando que la principal se debe a que no existe una distribución eficiente del agua en la instalación, ya que se realiza a contracorriente por el lado Este de la piscina y en ese mismo lado se encuentra la salida del agua, además la piscina cuenta con estructuras de hormigón en su interior que impiden una eficiente distribución del agua.



**Figura 3.7** Comportamiento de la temperatura del mineral con respecto al flujo de mineral para diferentes flujos de agua.

Una de las limitantes que ha existido en las investigaciones referenciadas en el capítulo 1, es la ausencia de mediciones de la temperatura del agua y de la pared del cilindro en diferentes puntos en toda la longitud del objeto de estudio. Siendo una de las mayores fortalezas de este trabajo, el haber logrado medir y registrar los parámetros antes mencionados y ha servido para que los operadores de la planta perciban con mayor facilidad cuando la instalación está trabajando fuera de parámetros como el nivel del agua en la piscina, por registrarse valores muy inferiores a los establecidos.

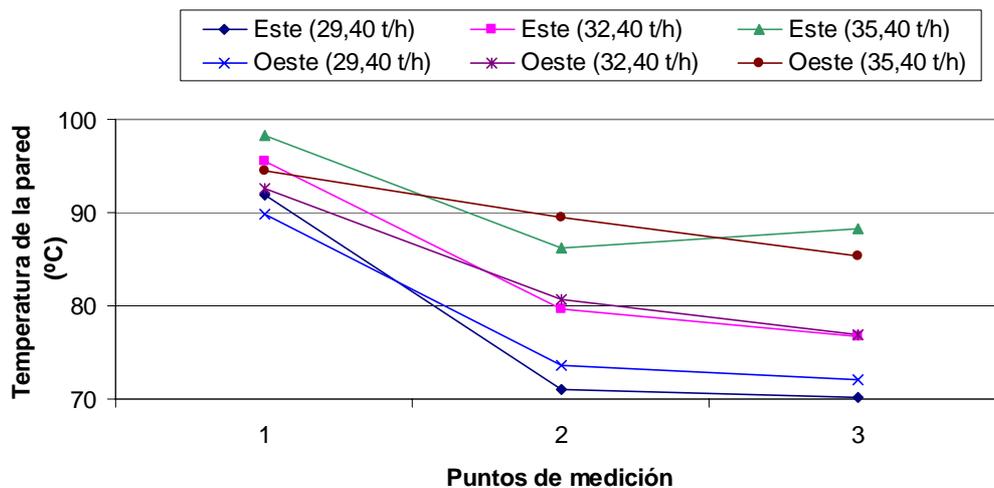
La figura 3.8 muestra el comportamiento de la temperatura del agua en la piscina para un flujo de agua de 15 m<sup>3</sup>/h y diferentes flujos de mineral, donde ha medida que aumenta el flujo de mineral la temperatura del agua alcanza los valores más altos en el punto uno del lado Oeste. Se debe destacar que para flujos de agua de 20 y 25 m<sup>3</sup>/h se obtienen comportamientos similares, con una ligera disminución de la temperatura en los puntos dos y tres, no así en el punto uno.



**Figura 3.8** Comportamiento de la temperatura del agua en la piscina para un flujo de agua de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Donde

- Ta1, Ta2, Ta3; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos.



**Figura 3.9** Comportamiento de la temperatura de la pared del cilindro para un flujo de agua de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ .

La figura 3.9 muestra el comportamiento de la temperatura de la superficie del cilindro para un flujo de agua de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  y diferentes flujos de mineral, donde se ha medido que al aumentar el flujo de mineral se incrementa la temperatura de la pared del cilindro alcanzando los valores más altos en el punto uno del lado

Oeste. Se debe destacar que para flujos de agua de 20 y 25 m<sup>3</sup>/h se obtienen comportamientos similares y se observa además una caída brusca de temperatura desde el punto uno al dos, siendo menos acentuada hacia el punto tres.

### **3.4. Mejoras para el enfriamiento**

#### **1. Comprobar que no lleguen residuos de combustibles crudos al enfriador.**

Su importancia está dada en las dudas existentes sobre el volumen de gas tan grande que permanece en el tambor. De estos gases, no todos pasan por el transportador teniendo un área tan pequeña de transportación y que esta es ocupada totalmente por el mineral con productividades superiores a 16 t/h secas. Se conoce que para lograr una mayor velocidad de enfriamiento, es necesario enfriar el 60 % del volumen de gas contenido por lo que mientras mayor sea el volumen, más área de disipación se necesita; esta última no se puede cambiar y se debe disminuir el volumen de gas.

- Mantener todos los dientes, brazos y bóvedas en buen estado para lograr la mejor combustión en la zona de reducción. Se evita formaciones de gránulos de mineral con gotas de petróleo en su interior que pasan al enfriador y se rompen en la zona caliente generando gases.
- Tomar muestras de mineral en la descarga del horno, enfriarlo rápido y analizar la posibilidad contener combustible.

#### **2. Optimizar la función del agua de enfriamiento.**

- Realizar la prueba pendiente del control de nivel mecánico y la alimentación automática del agua con control de temperatura.

#### **3. Análisis de los carros o rastrillos existentes.**

Este aspecto es definitorio para lograr un mejor resultado en la temperatura de descarga. Profundizando en los resultados prácticos obtenidos es definitivo pensar que los rastrillos no son idóneos porque se han mantenido altas temperaturas desde su surgimiento.

Los carros deben tener la mayor área de apoyo posible a la pared del cilindro y teniendo en cuenta su peso de acuerdo a la masa mineral a enfriar, se completará en cada giro un recorrido superior a los 65° hacia delante y algo menor hacia atrás. He aquí el trabajo de deslizar el mineral frío de la pared inferior para que caiga el caliente hacia la pared.

#### **4. Excentricidad.**

Las modificaciones realizadas para evitar las reiteradas rajaduras provocaron desperfectos actuales que van en contra del buen funcionamiento del tambor. La eliminación de la brida no se realizó con el mejor cuidado para mantener la centricidad del cilindro observándose grandes oscilaciones del agua durante 1 rev/min que hacen difícil el control del nivel, el movimiento desordenado del tambor consiste en flotar y apoyarse en sus extremos en cada giro completo. Así se completan muchas fatigas al metal que lo hacen perder su resistencia mecánica y generan rajaduras. La falta y el exceso de agua también son causas de estas averías. Se conoce que la eliminación de la brida rigidizó el centro del cilindro y trasladó los esfuerzos céntricos hacia los extremos (cabezales y área cercana a las puertas) donde más tarde comenzaron a existir rajaduras.

#### **3.5. Valoración técnico-económica**

El análisis de las pérdidas de amoniaco que existen actualmente son provocadas fundamentalmente por el proceso de enfriamiento en la planta de Hornos de Reducción el cual repercute en los tanques de contacto que es donde incide el efecto de las altas temperaturas influyendo directamente en la eficiencia de extracción de níquel en el proceso, estas pérdidas se clasifican en:

- Pérdidas por evaporación de amoniaco ( $\text{NH}_3$ )
- Pérdidas por mantenimiento.

Por otra parte las elevadas temperaturas del mineral que salen del enfriador debido al deficiente proceso de enfriamiento repercuten negativamente en la Planta de Lixiviación, incidiendo en la evaporación del amoniaco, en trabajos investigativos realizados se demuestra que existe una pérdida aproximada de 10

t/día. Considerando que el precio actual del amoníaco es 584 CUC/t , el daño económico para un año de trabajo continuo es 2 131 600 CUC .

El deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto provocan las pérdidas por mantenimiento, este problema está dado porque el magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa; se incrusta en las paredes de los tanques de contacto y en todo el sistema interno del mismo, lo que provoca que muchas piezas sean renovadas cada cuatro meses aproximadamente, generando pérdidas de 16 787,38 CUC al año por concepto de materiales según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta. Aparejado a esto, se encuentra el costo de la mano de obra que asciende a un valor de 836,9 CUC por año.

En los enfriadores el promedio mensual del consumo de agua es de 271 066 m<sup>3</sup> con un precio de 0,28 CUC el m<sup>3</sup>, para un promedio anual es de 3 252 790 m<sup>3</sup> lo que significa un costo de 910 781 CUC por año.

### **3.6. Impacto social y medio ambiental**

El presente trabajo tiene gran importancia para las empresas con tecnología carbonato amoniacal, porque de ser aplicado con éxito se obtendrían los parámetros más influyentes en la temperatura del mineral a la salida del enfriador y con ello es posible estabilizar este parámetro, lo que permite elevar la eficiencia y la producción de níquel y cobalto, factor decisivo para el desarrollo del país por ser la producción niquelífera el principal renglón de exportación en la actualidad. La incorporación de los resultados permite humanizar la labor de los operadores que están expuestos a las emisiones gaseosas de amoníaco, letal para la vida en altas concentraciones.

Además de lo antes expuesto, el trabajo aporta un procedimiento de cálculo que permite ser utilizado por los estudiantes y otras personas interesadas en la temática para realizar el análisis térmico del proceso sin necesidad de exponer al investigador en contacto con sustancias altamente tóxicas y sus correspondientes emisiones gaseosas.

Al realizar un estudio del comportamiento ambiental del proceso de enfriamiento del mineral reducido en la planta piloto se analizan los factores que de una forma u otra influyen, haciendo énfasis fundamentalmente en los más predominantes.

Las acciones o actividades con repercusión ambiental en la planta son:

- Derrame de mineral
- Derrame de agua
- Escape de gases contaminantes
- Emisiones continuas de polvo y ruido

### 3.6.1. Caracterización de los impactos

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el objeto. En la tabla 3.4 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

**Tabla 3. 4.** Identificación de los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Acciones o actividades	Factores ambientales	Impactos ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Derrame de agua		
Escape de gases contaminantes	Aire	Disminución de la calidad del aire
	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
	Económico	Pérdidas por concepto de evaporación del amoniaco
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de ruido continuo		Pérdidas de la sensibilidad auditiva

Para comprender cual es la situación ambiental real que actualmente presenta la instalación, en el epígrafe 3.7.2 se relacionan algunos estándares sobre medio ambiente. De la comparación de estos valores con los existentes en la planta se puede deducir el nivel de contaminación presente en la misma.

### 3.6.2. Recomendaciones sobre medio ambiente, salud y seguridad

### Calidad del aire en los puestos de trabajo

- El monitoreo periódico de los puestos de trabajo debe dirigirse a los contaminantes del aire en las diferentes tareas de los empleados y funcionamiento de la planta.
- Los equipos de ventilación para el control de la contaminación del aire deben mantenerse en buen estado técnico.
- Los equipos de protección respiratoria deben ser usados por los trabajadores cuando la exposición presente en el lugar de trabajo exceda las normas o los valores límites de umbral siguientes:
  - Arsénico:  $0,5 \text{ mg/m}^3$
  - Monóxido de Carbono:  $29 \text{ mg/m}^3$
  - Cobre:  $1 \text{ mg/m}^3$
  - Sílice libre:  $5 \text{ mg/m}^3$
  - Sulfuro de Hidrógeno:  $14 \text{ mg/m}^3$
  - Plomo:  $0,15 \text{ mg/m}^3$
  - Dióxido de Nitrógeno:  $6 \text{ mg/m}^3$
  - Polvo inerte:  $10 \text{ mg/m}^3$

### El ruido en los puestos de trabajo y su efecto sobre la salud humana

- \_ Los controles administrativos y técnicos deben incluir la revisión de aislamiento del sonido en los equipos y salas de control y serán empleados para reducir el nivel de ruido medio en el área de trabajo.
- \_ Deben mantenerse en buen estado técnico los equipos de la planta para minimizar los niveles de ruido.

El personal debe usar protección auditiva cuando estén expuestos a los niveles de ruido superiores a 85 dB (A).

El hecho de que se relacione al ruido y se le pueda considerar perjudicial, depende de tres factores: la relación de presión, la duración de la exposición y la sensibilidad del individuo.

Los impactos negativos sonoros producidos durante las fases operacionales o industriales son: los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo, entre otras. Se ha demostrado que la exposición prolongada a ciertos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición.

Esto se ha visto sobre todo en caso de personas que trabajan en ambientes ruidosos, un ejemplo de esto lo es: las personas que durante más de 20 años y a

razón de 8 horas diarias, han sido sometidos a niveles de ruido superiores a 90 dB (A) tienen una probabilidad alta de perder el sentido del oído y por tanto convertirse en sordos.

Además de la pérdida de la audición hasta llegar a la sordera, existen otras alteraciones del oído producto del ruido:

- Tapamiento del canal auditivo al aumento de la secreción de la cera.
- Ruptura de la membrana timpánica
- Otitis

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo, una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, entre otras. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

### **Conclusiones del capítulo 3**

- Se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la temperatura de salida del mineral (Tms) y las 17 variables independientes que intervienen el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, con un coeficiente de correlación igual a 1.
- Se demostró que para flujos de mineral de 35,40 t/h y flujos de agua de 15 m<sup>3</sup>/h el modo de transferencia de calor predominante es la convección por evaporación y la cantidad de agua evaporada oscila entre 0,66 y 1,77 t/h .
- Se demostró que para flujos de agua superiores a 20 m<sup>3</sup>/h la diferencia entre la cantidad de calor absorbida para diferentes flujos de mineral es mínima.
- Los principales contaminantes del medio ambiente concernientes al proceso al proceso de enfriamiento y que afectan la salud humana están relacionado con la evaporación de de amoniaco y la contaminación de grandes volúmenes de agua.

## CONCLUSIONES GENERALES

---

- ✓ Se demostró a través del análisis estadístico de los resultados experimentales que las variables flujo de mineral, flujo de agua y la combinación de las dos tienen incidencia significativa en la temperatura de salida del mineral, para un coeficiente de correlación de 0,99.
- ✓ Se seleccionó como mejor modelo de regresión múltiple el que relaciona las variables flujo de mineral, flujo de agua, temperatura del mineral en el horno uno y en el horno dos con la temperatura del mineral a la salida, para un coeficiente de correlación igual a 0,96.
- ✓ Los resultados de las mediciones para flujo de mineral entre 29,4 y 35,4 t/h y flujos de agua entre 15 y 25 m<sup>3</sup>/h , demostraron que:
  - La temperatura de la pared experimenta una variación desde 100,5 °C a la entrada hasta 68,9 °C a la salida del enfriador.
  - La temperatura del agua en la piscina experimenta una variación desde 59,9 °C a la entrada hasta 82,6 °C a la salida de la piscina.
- ✓ Se comprobó que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 45 y 56 %, alcanzándose los valores mayores para un flujo de mineral de 29,4 t/h y flujos de agua entre 15 y 20 m<sup>3</sup>/h .
- ✓ Se comprobó que al aumentar el flujo de mineral asciende la temperatura del agua y de la pared del cilindro alcanzando los valores más altos, 96,9 °C en el punto uno del lado Oeste.



## RECOMENDACIONES

---

- ✓ Continuar con el estudio de la temática en cuestión para garantizar una mejor identificación del proceso.
- ✓ Garantizar la conexión de otros instrumentos de medición al sistema de almacenamiento de datos, para mejorar la precisión en el análisis.
- ✓ Poner a consideración de la dirección de la planta sustituir los muros de contención del interior de la piscina por otras estructuras que faciliten la circulación del agua.
- ✓ Evaluar la incidencia del suministro de agua por diferentes tramos de la piscina y la instalación de duchas, principalmente en la zona oeste.
- ✓ Realizar el mantenimiento a las superficies exteriores del enfriador y los instrumentos de medición presente en la instalación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. ABDALLA, M. 2005. Unsteady numerical simulation of double diffusive convection heat transfer in a pulsating horizontal heating annulus. Heat Mass Transfer, 9p.
2. ALONSO, C. 1973. Características del movimiento del mineral reducido caliente dentro de los enfriadores de mineral. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 27p. Informe técnico.
3. ALEPUZ, H. 1977. Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 38p. Informe técnico.
4. ÁLVAREZ A.R. 2008. Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindro horizontales rotatorios el la empresa "Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. Moa.
5. ARAUJO E. 2009. Evaluación del proceso de transferencia de color en el enfriamiento de mineral laterítico a escala piloto. Trabajo de diploma. Moa.
6. ARENA, A. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la Empresa "Comandante René Ramos Latour". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
7. CHACON, R. 1982. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 21p. Informe técnico.
8. CHEN, M. 1997. Double-diffusive convection for a heated cylinder submerged in a salt stratified fluid layer. Heat Mass Transfer 33, pp. 17-26.
9. DE VALLE, R.E. 2008. Programación de modelo matemático para la evaluación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios para el enfriamiento de mineral laterítico reducido. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.

10. DOBROJOTOV G. N. Representación gráfica de los resultados investigativos experimentales. Informe. ISMM. Moa. 1988.
11. DOROKHOV, A. R. 2001. Heat exchange with horizontal cylinders in a centrifugal-bubbling bed. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 74, No. 3, pp. 800-805.
12. GANGARA, C. 1980. Enfriamiento del mineral reducido mediante la adición directa de agua atomizada en el enfriador rotatorio de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 32p. Informe técnico.
13. GARCÍA M.D.A. 2009. Establecimiento de los parámetros de diseño y explotación del mineral experimental. Trabajo de diploma Moa.
14. GÓNGORA, E. 2004. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Tesis de maestría. ISMMANJ, Moa, Cuba. 80p.
15. GÓNGORA, E. 2007. Modelo Matemático Multivariable para un Proceso de Enfriamiento Industrial de Sólidos en Cilindros Rotatorios Horizontales. Minería y Geología, 7p.
16. GÓNGORA, L, E. 2009. Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. Minería y Geología v.25 n.3.
17. GSCHWENDTNER, M. A. 2004. Optical investigation of the heat transfer from a rotating cylinder in a cross flow. Heat and Mass Transfer 40, pp. 561–572.
18. HOSSAIN, M. A. 1998. Radiation-conduction interaction on mixed convection from a horizontal circular cylinder. Heat and Mass Transfer 35, pp. 307-314.
19. IANNETTA, S. 1992. Experimental analysis of thermal fields in horizontally eccentric cylindrical annuli. Experiments in Fluids 12, pp. 385-393.
20. INCROPERA, F. 2003. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, II. III.
21. LAMORU, M. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo. Góngora, E, Columbié, A. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2008.

22. LEYVA, D.Y. 2010. Influencia de la temperatura del mineral laterítico reducido en el índice de extractable en el tanque de contacto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
23. LONDREZ, M. J. 2007. Modelación y simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos. M.Sc. Ever Góngora Leyva (tutor). Tesis en opción al título de Ing. Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 86 h.
24. MAHFOUZ, F. M. 1999. Heat convection from a cylinder performing steady rotation or rotary oscillation. *Heat and Mass Transfer* 34, pp. 375-380.
25. MAHFOUZ, F. M. 2003. Transient free convection from a horizontal cylinder placed in a micropolar fluid. *Heat and Mass Transfer* 39, pp. 455-462.
26. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 1985. 219p.
27. MATOS C.D. 2007. Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido cilindros horizontales en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Moa.
28. MEDINA, A. 1995. Propuestas de modificación del carro raspador del enfriador de mineral de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 11p. Informe técnico.
29. MOLLA, M. 2004. Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity. *Heat Mass Transfer* 41, pp. 594-598.
30. MURRAY R SPIEGEL. *Theory and problems of Statistics* Edición Revolucionaria. La Habana 1966.
31. NAUMENKO, Y. V. 2001. Numerical calculation of the flow regimes of a fluid partially filling a horizontal rotating heat-exchange cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 74, No. 3, pp. 736-744.
32. NAZAR, R. 2004. Mixed convection boundary-layer flow from a horizontal circular cylinder with a constant surface heat flux. *Heat and Mass Transfer* 40, pp. 219-227.

33. OLIVAS, P. 1997. On unsteady electrochemical coating of a cylinder at moderately large Reynolds number. *Journal of Applied Electrochemistry* 27, pp. 1369-1379.
34. ORTIZ, C.F.A. 2010. Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de elementos finitos. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
35. OSORIO G. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comdte Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma" Moa ISMM.
36. PANDAY, P. K. 2005. Experimental analysis of the local heat transfer coefficient of falling film evaporation with and without co-current air flow velocity. *Heat Mass Transfer* 41, pp. 1066–1076.
37. PENG, S. W. 1998. Theoretical analysis of laminar film condensation in a rotating cylinder with a scraper. *Heat and Mass Transfer* 34, pp. 279-285.
38. PRESILLA, D. 1977. Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 12p. Informe técnico.
39. PUJOL, L.J.O. 2007. Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
40. QIUNTERO, G.E. 2008. Construcción de un enfriador cilíndrico rotatorio a escala de laboratorio. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
41. RODRIGUEZ, R. 1978. Análisis de la influencia de la adición de vapor de agua sobre el enfriamiento de mineral reducido en el proceso de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 10p. Informe técnico.
42. RODRIGUEZ, R. 1970. Investigación de la modelación matemática del horno de calcinación. Vol. No.2. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 24p. Informe técnico.
43. RODRÍGUEZ, G.G. 2010. Construcción de un transportador de tornillo sin fin para la alimentación del enfriador de mineral a escala piloto del ISMM. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.

44. ROSELL, R. 1986. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 15p. Informe técnico.
45. SAMALEA, M. G. J. 1997. Métodos de lixiviación de lateritas que contienen níquel y cobalto. Universidad de la Habana 2000. No de publicación: CU 22620 A1; No. de solicitud: 1997/052; Int. Cl: C22B 3/00, B03B 5/00
46. SANTANA, P.O. 2009. Evaluación técnico – económica del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
47. SCURTU, N. D. 2001. Free convection between two horizontal concentric cylinders filled with a porous medium a perturbed solution. Acta Mechanica 151, pp. 115- 125.
48. SHRAGER, G. R. 2004. Modeling of the Viscous Flow with a Free Surface inside a Rotating Horizontal Cylinder. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 283–289.
49. SOTTO, Y. 2007. Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
50. SPENCER, R.Y. 2009. Identificación del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso CARON, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales Góngora, E. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa.
51. TUNRA. 1998. Ore Cooler Evaluation. The University of New Castle Research Associates Limited. 18p.
52. TABERA, Y; R. 2006. Estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Góngora, E; Retirado, Y. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 61p.
53. VALLE, M. 2000a. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (1). Tecnología Química Vol. XX, No. 1, pp. 70-77.



54. VALLE, M. 2000b. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (2). Tecnología Química Vol. XX, No. 2, pp. 10-15.
55. VARGAS, R.P.L. 2010. Sistema Automático de Medición para variables en un Enfriador de mineral a Escala Piloto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
56. YAPICI, H. 2004. Transient temperature and thermally induced stress distributions in a partly-circumferentially heated cylindrical workpiece. Heat Mass Transfer 41, pp. 104–111.
57. ZALAZAR, O.C. 2010. Obtención de los parámetros de funcionamiento del enfriador rotatorio a escala piloto del ISMM.



## Anexo 1 Análisis estadístico del proceso de enfriamiento

Factorial completo con 2 variables y 3 niveles

Número de niveles      Número de factores      Número de experimentos      Número de réplicas

$$P_{\text{nivel}} := 2$$

$$K_{\text{factor}} := 2$$

$$N_e := P_{\text{nivel}}^{K_{\text{factor}}}$$

$$n_r := 3$$

$$x := 0, 1 \dots 3$$

$$N_e = 4$$

Fm :=

	0
0	34
1	35
2	34
3	35

Fa :=

	0
0	13
1	13
2	21
3	21

y<sub>a</sub> :=

	0
0	197.766
1	212.75
2	224.94
3	215.674

y<sub>b</sub> :=

	0
0	198.18
1	211.663
2	227.744
3	216.522

y<sub>c</sub> :=

	0
0	198.595
1	210.269
2	229.548
3	217.369

### Media aritmética

$$Y_{m_x} := \frac{y_{a_x} + y_{b_x} + y_{c_x}}{n_r}$$

$$Y_{m_x} =$$

198.18
211.56
227.41
216.522

$$Y_{am_0} := \frac{y_{b_0} + y_{c_0}}{n_r - 1}$$

$$Y_{am_1} := \frac{y_{c_1} + y_{b_1}}{n_r - 1}$$

$$Y_{cm_2} := \frac{y_{c_2} + y_{b_2}}{n_r - 1}$$

$$Y_{cm_3} := \frac{y_{a_3} + y_{b_3}}{n_r - 1}$$

$$Y_{am_0} = 198.388$$

$$Y_{am_1} = 210.966$$

$$Y_{cm_2} = 228.646$$

$$Y_{cm_3} = 216.098$$

$$D_{cb_0} := \sqrt{\frac{(Y_{am_0} - y_{b_0})^2 + (Y_{am_0} - y_{c_0})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{ac_1} := \sqrt{\frac{(Y_{am_1} - y_{c_1})^2 + (Y_{am_1} - y_{b_1})^2}{n_r - 1}}$$

$$D_{cb_0} = 0.207$$

$$D_{ac_1} = 0.697$$

$$t_{\text{cala}_0} := \frac{|y_{b_0} - Y_{am_0}|}{D_{cb_0}}$$

$$t_{\text{cala}_0} = 1$$

$$t_{\text{calc}_1} := \frac{|y_{a_1} - Y_{am_1}|}{D_{ac_1}}$$

$$t_{\text{calc}_1} = 2.558$$

$$Dca_2 := \sqrt{\frac{(Ycm_2 - y_{a_2})^2 + (Ycm_2 - y_{c_2})^2}{n_r - 1}}$$

$$Dca_2 = 2.697$$

$$t_{cala_2} := \frac{|y_{c_2} - Ycm_2|}{Dca_2} \quad t_{cala_2} = 0.334$$

$$Dcc_3 := \sqrt{\frac{(Ycm_3 - y_{c_3})^2 + (Ycm_3 - y_{b_3})^2}{n_r - 1}}$$

$$Dcc_3 = 0.948$$

$$t_{calc_3} := \frac{|y_{a_3} - Ycm_3|}{Dcc_3} \quad t_{calc_3} = 0.447$$

**t tab. = 2.92**

### Dispersión por fila y control de homogeneidad

$$Scuad_{n_x} := \left[ (Ym_x - y_{a_x})^2 + (Ym_x - y_{b_x})^2 + (Ym_x - y_{c_x})^2 \right] \cdot \frac{1}{n_r - 1}$$

$$Scuad_{n_x} =$$

0.172
1.547
5.392
0.719

$$\sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x} = 7.829$$

$$G_{cal_x} := \frac{Scuad_{n_x}}{\sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x}}$$

$$G_{cal_x} =$$

0.022
0.198
0.689
0.092

**G tab = 7679**

**Si G calc < G tab , la dispersión SI es homogénea.**

**Si G calc > G tab , la dispersión NO es homogénea.**

### Dispersión reproducibilidad

### Error reproducibilidad T Student calculada

$$Scuad_y := \frac{1}{Ne} \cdot \sum_{x=0}^3 Scuad_{n_x}$$

$$Scuad_y = 1.957$$

$$S_y := \sqrt{Scuad_y}$$

$$S_y = 1.399$$

$$tca_{0_2} := \frac{Ym_2 - Ym_0}{S_y \cdot \sqrt{\frac{1}{n_r} + \frac{1}{n_r}}}$$

$$tca_{0_2} = 25.588$$

**t tab. = 1.94**

$$a0_x :=$$

1
1
1
1

$$\sum_{x=0}^3 a0_x = 4$$

$$a1_x :=$$

-1
1
-1
1

$$\sum_{x=0}^3 a1_x = 0$$

$$a2_x :=$$

-1
-1
1
1

$$\sum_{x=0}^3 a2_x = 0$$

$$a12_x :=$$

1
-1
-1
1

$$\sum_{x=0}^3 a12_x = 0$$

**Si t calc > t tab. puntos del plano está comprobada estadísticamente.**

### Error de la prueba

$$S_p := \frac{S_y}{\sqrt{Ne \cdot n_r}}$$

$$S_p = 0.404$$

### Coefficientes ecuación de regresión

$$b_0 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a0_x \cdot Ym_x)}{Ne} \quad b_1 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a1_x \cdot Ym_x)}{Ne} \quad b_2 := \frac{\sum_{x=0}^3 (a2_x \cdot Ym_x)}{Ne} \quad b_{12} := \frac{\sum_{x=0}^3 (a12_x \cdot Ym_x)}{Ne}$$

$$b_0 = 213.418 \quad b_1 = 0.623 \quad b_2 = 8.548 \quad b_{12} = -6.067$$

### Comprobación de los coeficientes

$$t_{cal0} := \frac{|b_0|}{S_p} \quad t_{cal1} := \frac{|b_1|}{S_p} \quad t_{cal2} := \frac{|b_2|}{S_p} \quad t_{cal12} := \frac{|b_{12}|}{S_p}$$

$$t_{cal0} = 528.431 \quad t_{cal1} = 1.542 \quad t_{cal2} = 21.165 \quad t_{cal12} = 15.023$$

**t tab. = 1.86** Si  $t_{calc} > t_{tab}$ , los coeficientes de la ecuación son significativos.  
 Si  $t_{calc} < t_{tab}$ , los coeficientes de la ecuación no son significativos.

$$Y_{nn_x} := a0_x \cdot b_0 + a1_x \cdot b_1 + a2_x \cdot b_2 + a12_x \cdot b_{12}$$

$Y_{nn_x} =$
198.18
211.56
227.41
216.522

$Ym_x =$
198.18
211.56
227.41
216.522

$$\sum_{x=0}^3 Ym_x = 853.673$$

$$Y_G := \frac{\sum_{x=0}^3 Ym_x}{Ne} \quad Y_G = 213.418$$

### Dispersión adecuación

$$Scuad_{adec} := \frac{n_r \cdot \left[ \sum_{x=0}^3 (Ym_x - Y_{nn_x})^2 \right]}{Ne - (n_r - 1)}$$

$$Scuad_{adec} = 0$$

### Prueba de Fisher

$$F_{cal} := \frac{Scuad_{adec}}{Scuad_y}$$

$F_{cal} = 0$  **Ftab = 19.4** Si  $F_{cal} < F_{tab}$ ; el modelo es adecuado al objeto investigado

### Coefficiente de correlación lineal

$$R_{corr.} := \sqrt{1 - \frac{\left[ \sum_{x=0}^3 (Ym_x - Y_{nn_x})^2 \right]^2}{\left[ \sum_{x=0}^3 (Ym_x - Y_G)^2 \right]^2}}$$

$$R_{corr.} = 1$$

## ANEXOS

### Anexo 2 Regresión Múltiple - Tms

Variable dependiente: Tms

Variables independientes: A, Fa, Fm, T1pE, T1pO, T2pE, T2pO, T3pE, T3pO, Ta1E, Ta1O, Ta2E, Ta2O, Ta3E, Ta3O, Th1, Th2

		Error	Estadístico			Error	Estadístico		
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P	Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Constante	1996.84				T3pO	-3.07605			
A	-3.85722				Ta1E	-15.2438			
Fa	2.88922				Ta1O	0.0024867			
Fm	4.09694				Ta2E	13.6209			
T1pE	-0.659083				Ta2O	-22.636			
T1pO	1.11479				Ta3E	27.51			
T2pE	3.45278				Ta3O	-13.9201			
T2pO	-1.19838				Th1	-0.524343			
T3pE	-0.10994				Th2	-0.274175			

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	25606.7	17	1506.27		
Residuo	0.0	0	0.0		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 100.0 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0.0 por ciento

Error estándar del est. = 0.0

Error absoluto medio = 0.0

Estadístico Durbin-Watson =

Autocorrelación de residuos en retraso 1 =

#### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 17 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Tms} = 1996.84 - 3.85722 * A + 2.88922 * Fa + 4.09694 * Fm - 0.659083 * T1pE + 1.11479 * T1pO + 3.45278 * T2pE - 1.19838 * T2pO - 0.10994 * T3pE - 3.07605 * T3pO - 15.2438 * Ta1E + 0.0024867 * Ta1O + 13.6209 * Ta2E - 22.636 * Ta2O + 27.51 * Ta3E - 13.9201 * Ta3O - 0.524343 * Th1 - 0.274175 * Th2$$

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 100.0% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0.0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 0.0 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

## Anexo 2 Selección del Modelo de Regresión - Tms

Variable dependiente: Tms

A=Fa	E=T2pE	I=Ta1E	M=Ta3E
B=Fm	F=T2pO	J=Ta1O	N=Ta3O
C=T1pE	G=T3pE	K=Ta2E	O=Th1
D=T1pO	H=T3pO	L=Ta2O	P=Th2

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos de regresión múltiple para describir la relación entre Tms y 16 variables predictoras. Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 5 variables. Las estadísticas tabuladas incluyen el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Para determinar cuales modelos son mejores de acuerdo a estos diferentes criterios, seleccione una de las Opciones Tabulares.

Número de casos completos: 18

Número de modelos ajustados: 6885

### Resultados de los Modelos

CME	R-Cuadrada			Variables Incluidas	CME	R-Cuadrada			Variables Incluidas
	R <sup>2</sup>	Ajustada	Cp			R <sup>2</sup>	Ajustada	Cp	
1506.27	01.0	0.0	515.485		314.71	81.5648	79.1067	85.9806	JO
1400.13	12.5147	7.04688	450.972	A	493.153	71.1119	67.2601	141.536	JP
505.079	68.4408	66.4683	153.733	B	1506.27	11.7647	0.0	506.681	KL
1506.27	5.88235	0.0	498.026	C	451.763	73.5364	70.0079	128.65	KM
1418.11	11.3909	5.85285	456.944	D	694.203	59.3346	53.9126	204.131	KN
1506.27	5.88235	0.0	494.846	E	300.951	82.3708	80.0202	81.6968	KO
1506.27	5.88235	0.0	501.526	F	460.135	73.046	69.4521	131.257	KP
1261.4	21.1831	16.257	404.9	G	675.782	60.4137	55.1356	198.395	LM
1154.32	27.8736	23.3657	369.341	H	905.828	46.9379	39.863	270.017	LN
1506.27	5.88235	0.0	517.485	I	273.969	83.9513	81.8115	73.2964	LO
1506.27	5.88235	0.0	516.486	J	323.55	81.0469	78.5198	88.7328	LP
1506.27	5.88235	0.0	504.72	K	1276.89	25.2015	15.2284	385.543	MN
1506.27	5.88235	0.0	505.953	L	262.633	84.6153	82.5641	69.7672	MO
1197.51	25.1751	20.4985	383.684	M	640.428	62.4847	57.4827	187.388	MP
1207.83	24.5303	19.8134	387.111	N	286.028	83.2449	81.0109	77.0508	NO
374.004	76.6309	75.1703	110.204	O	660.119	61.3312	56.1754	193.519	NP
627.355	60.8005	58.3505	194.34	P	163.68	90.4119	89.1335	38.9594	OP
325.111	80.9555	78.4162	89.2189	AB	335.928	81.6337	77.6981	87.614	ABC
1480.4	13.2804	1.71778	448.902	AC	332.656	81.8126	77.9153	86.6634	ABD
1260.28	26.175	16.3316	380.369	AD	267.014	85.4015	82.2732	67.589	ABE
1442.66	15.4912	4.22331	437.152	AE	309.265	83.0915	79.4682	79.8665	ABF
1382.76	19.0002	8.20022	418.502	AF	329.437	81.9886	78.129	85.728	ABG
1090.29	36.1323	27.6166	327.448	AG	346.436	81.0592	77.0004	90.6676	ABH
700.259	58.9799	53.5105	206.016	AH	244.698	86.6216	83.7547	61.1045	ABI
1491.79	12.613	0.961449	452.449	AI	234.679	87.1693	84.4199	58.1932	ABJ
1493.0	12.5423	0.881242	452.825	AJ	300.46	83.5729	80.0528	77.3077	ABK
1389.48	18.6062	7.75368	420.596	AK	265.839	85.4657	82.3512	67.2475	ABL
1446.77	15.2503	3.95029	438.433	AL	332.364	81.8286	77.9347	86.5784	ABM
1024.53	39.9845	31.9824	306.974	AM	336.791	81.5865	77.6408	87.865	ABN
1028.28	39.7651	31.7338	308.14	AN	154.313	91.5632	89.7553	34.8404	ABO
353.441	79.296	76.5354	98.0389	AO	338.05	81.5177	77.5572	88.2308	ABP
628.917	63.159	58.2469	183.805	AP	340.244	82.7265	77.4116	83.8062	ABCD
537.021	68.5421	64.3477	155.194	BC	281.264	85.7208	81.3271	67.8921	ABCE
510.55	70.0928	66.1051	146.953	BD	328.676	83.3138	78.1795	80.6849	ABCF
436.641	74.4222	71.0118	123.942	BE	354.322	82.0118	76.4769	87.6049	ABCG
451.074	73.5767	70.0536	128.436	BF	361.579	81.6434	75.9952	89.5629	ABCH
507.861	70.2503	66.2837	146.115	BG	255.75	87.0161	83.021	61.0078	ABCI
456.47	73.2607	69.6955	130.116	BH	246.224	87.4997	83.6535	58.4372	ABCJ
467.77	72.5988	68.9453	133.634	BI	314.037	84.057	79.1514	76.7349	ABCK
481.29	71.8067	68.0476	137.843	BJ	277.436	85.9151	81.5813	66.859	ABCL
431.196	74.7412	71.3733	122.247	BK	344.271	82.5221	77.1442	84.8928	ABCM
446.981	73.8165	70.3254	127.161	BL	348.998	82.2821	76.8304	86.1682	ABCN



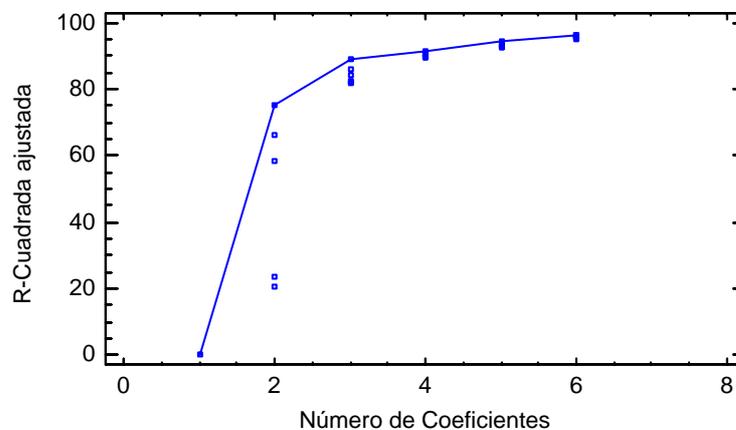
512.69	69.9674	65.963	147.619	BM	164.248	91.6614	89.0957	36.3182	ABCO
516.375	69.7515	65.7184	148.766	BN	352.039	82.1277	76.6285	86.9889	ABCP
239.163	85.9902	84.1222	62.4602	BO	278.22	85.8753	81.5293	67.0705	ABDE
512.387	69.9851	65.9832	147.525	BP	309.385	84.2931	79.4602	75.4798	ABDF
1444.08	15.4081	4.12921	437.593	CD	314.93	84.0116	79.0921	76.976	ABDG
1506.27	11.7647	0.0	473.004	CE	357.153	81.8681	76.289	88.3686	ABDH
1506.27	11.7647	0.0	490.538	CF	261.795	86.7092	82.6197	62.6386	ABDI
1328.41	22.1835	11.8079	401.584	CG	249.639	87.3263	83.4267	59.3589	ABDJ
1215.72	28.7852	19.2899	366.496	CH	310.389	84.2422	79.3936	75.7506	ABDK
1506.27	11.7647	0.0	499.611	CI	277.49	85.9124	81.5777	66.8738	ABDL
1506.27	11.7647	0.0	500.002	CJ	347.329	82.3668	76.9412	85.7179	ABDM
1506.27	11.7647	0.0	489.58	CK	351.354	82.1624	76.674	86.804	ABDN
1506.27	11.7647	0.0	491.906	CL	165.66	91.5898	89.002	36.699	ABDO
1245.96	27.0138	17.2823	375.911	CM	346.646	82.4015	76.9866	85.5335	ABDP
1254.71	26.5008	16.7009	378.638	CN	274.821	86.0479	81.7549	66.1535	ABEF
326.058	80.9	78.3533	89.5137	CO	287.024	85.4284	80.9448	69.4462	ABEG
668.416	60.8452	55.6245	196.102	CP	215.975	89.0354	85.6617	50.2753	ABEH
1404.28	17.7393	6.77122	425.204	DE	243.078	87.6594	83.8623	57.5884	ABEI
1490.54	12.6863	1.04447	452.06	DF	232.481	88.1974	84.5659	54.729	ABEJ
1213.81	28.8966	19.4162	365.904	DG	286.493	85.4553	80.98	69.3028	ABEK
1218.74	28.608	19.089	367.438	DH	275.983	85.9889	81.6778	66.467	ABEL
1487.7	12.8529	1.23329	451.174	DI	287.322	85.4132	80.925	69.5265	ABEM
1506.27	11.7647	0.0	456.97	DJ	287.517	85.4033	80.912	69.5792	ABEN
1506.27	11.7647	0.0	457.56	DK	162.553	91.7475	89.2083	35.8607	ABEO
1506.27	11.7647	0.0	458.174	DL	231.955	88.2241	84.6007	54.5872	ABEP
1263.81	25.9682	16.0973	381.468	DM	332.093	83.1403	77.9527	81.6069	ABFG
1274.05	25.3682	15.4173	384.657	DN	301.735	84.6815	79.9681	73.4156	ABFH
360.758	78.8674	76.0497	100.317	DO	250.813	87.2667	83.3488	59.6756	ABFI
669.143	60.8026	55.5763	196.328	DP	240.308	87.8001	84.0462	56.8409	ABFJ
1104.12	35.3224	26.6987	331.752	EF	314.555	84.0307	79.117	76.8746	ABFK
1093.31	35.9556	27.4164	328.387	EG	285.758	85.4927	81.0289	69.1044	ABFL
815.475	52.2307	45.8615	241.887	EH	328.335	83.3311	78.2022	80.5928	ABFM
1506.27	11.7647	0.0	489.087	EI	327.697	83.3635	78.2446	80.4206	ABFN
1506.27	11.7647	0.0	483.979	EJ	159.712	91.8917	89.3969	35.0942	ABFO
1404.7	17.7149	6.74354	425.333	EK	324.089	83.5466	78.4841	79.4472	ABFP
1320.04	22.674	12.3639	398.976	EL	353.839	82.0363	76.509	87.4745	ABGH
964.683	43.4903	35.9557	288.341	EM	259.176	86.8422	82.7936	61.9319	ABGI
1058.03	38.0221	29.7583	317.404	EN	250.217	87.297	83.3883	59.5148	ABGJ
285.527	83.2742	81.0441	76.895	EO	319.287	83.7904	78.8028	78.1516	ABGK
212.361	87.5602	85.9016	54.1157	EP	285.151	85.5235	81.0692	68.9406	ABGL
1281.15	24.9519	14.9455	386.87	FG	344.205	82.5254	77.1486	84.8749	ABGM
1005.07	41.1245	33.2745	300.915	FH	346.53	82.4074	76.9943	85.5022	ABGN
1506.27	11.7647	0.0	501.595	FI	163.771	91.6857	89.1274	36.1895	ABGO
1506.27	11.7647	0.0	503.452	FJ	352.974	82.0802	76.5664	87.2412	ABGP
1506.27	11.7647	0.0	502.071	FK	260.308	86.7847	82.7184	62.2376	ABHI
1506.27	11.7647	0.0	502.791	FL	250.586	87.2783	83.3639	59.6142	ABHJ
1256.75	26.3812	16.5654	379.273	FM	312.531	84.1334	79.2514	76.3286	ABHK
1282.96	24.8459	14.8254	387.433	FN	256.327	86.9868	82.9827	61.1633	ABHL
294.577	82.7441	80.4433	79.7126	FO	357.405	81.8553	76.2723	88.4366	ABHM
389.936	77.1581	74.1126	109.401	FP	362.698	81.5865	75.9208	89.865	ABHN
1214.89	28.8337	19.3449	366.239	GH	138.785	92.9541	90.7862	29.4477	ABHO
1303.89	23.6202	13.4363	393.947	GI	360.499	81.6982	76.0669	89.2714	ABHP
1317.11	22.846	12.5587	398.063	GJ	246.876	87.4666	83.6102	58.6132	ABIJ
1321.54	22.5861	12.2643	399.443	GK	242.47	87.6903	83.9027	57.4244	ABIK
1320.32	22.6579	12.3456	399.062	GL	263.356	86.63	82.5161	63.0599	ABIL
1208.49	29.2083	19.7694	364.247	GM	122.576	93.7771	91.8623	25.074	ABIM
1204.03	29.47	20.066	362.857	GN	114.881	94.1677	92.3732	22.9976	ABIN
290.67	82.973	80.7027	78.4962	GO	163.773	91.6856	89.1273	36.1899	ABIO
635.867	62.7519	57.7855	185.968	GP	262.653	86.6656	82.5628	62.8702	ABIP
1182.21	30.7482	21.5146	356.063	HI	231.752	88.2344	84.6142	54.5324	ABJK
1210.97	29.0634	19.6051	365.018	HJ	252.719	87.17	83.2222	60.1898	ABJL

1084.98	36.4433	27.9691	325.795	HK	136.511	93.0696	90.9372	28.834	ABJM
1127.14	33.9741	25.1707	338.918	HL	135.166	93.1379	91.0265	28.471	ABJN
1191.39	30.21	20.9046	358.924	HM	161.165	91.818	89.3004	35.4864	ABJO
1186.4	30.5025	21.2362	357.369	HN	251.805	87.2164	83.2829	59.9432	ABJP
291.229	82.9403	80.6656	78.67	HO	182.976	90.7107	87.8524	41.3715	ABKL
645.647	62.179	57.1362	189.013	HP	265.641	86.5139	82.3644	63.6765	ABKM
1506.27	11.7647	0.0	485.635	IJ	284.029	85.5804	81.1436	68.6381	ABKN
1506.27	11.7647	0.0	481.005	IK	161.795	91.786	89.2586	35.6564	ABKO
1506.27	11.7647	0.0	475.794	IL	320.461	83.7308	78.7249	78.4682	ABKP
650.994	61.8657	56.7812	190.678	IM	197.62	89.9672	86.8802	45.3227	ABLM
690.098	59.5751	54.1851	202.852	IN	232.882	88.177	84.5392	54.8374	ABLN
315.874	81.4966	79.0295	86.3429	IO	165.655	91.59	89.0023	36.6979	ABLO
479.984	71.8833	68.1344	137.436	IP	260.868	86.7562	82.6812	62.3887	ABLP
1506.27	11.7647	0.0	498.528	JK	348.823	82.2909	76.842	86.1211	ABMN
1506.27	11.7647	0.0	496.39	JL	158.808	91.9376	89.4569	34.8504	ABMO
834.61	51.1098	44.5911	247.844	JM	355.985	81.9273	76.3665	88.0536	ABMP
882.731	48.2909	41.3964	262.826	JN	161.952	91.778	89.2482	35.6987	ABNO
					358.121	81.8189	76.2247	88.6299	ABNP
					154.057	92.1788	89.7723	33.5684	ABOP

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos de regresión múltiple para describir la relación entre Tms y 16 variables predictoras. Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 5 variables. Las estadísticas tabuladas incluyen el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Para determinar cuales modelos son mejores de acuerdo a estos diferentes criterios, seleccione una de las Opciones Tabulares.

Gráfica de R-Cuadrada Ajustada para Tms



### Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 1

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Ta1E

Ta3O

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	596.115	163.779	3.63975	0.0030
Fa	4.45725	0.666099	6.69158	0.0000
Fm	6.8648	1.96638	3.49109	0.0040
Ta1E	-18.5574	3.50431	-5.2956	0.0001
Ta3O	11.8552	2.89062	4.10126	0.0013

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	24113.2	4	6028.31	52.47	0.0000
Residuo	1493.45	13	114.881		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 94.1677 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92.3732 por ciento

Error estándar del est. = 10.7182

Error absoluto medio = 7.16881

Estadístico Durbin-Watson = 1.91561 (P=0.1609)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.0507451

#### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 596.115 + 4.45725*Fa + 6.8648*Fm - 18.5574*Ta1E + 11.8552*Ta3O$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 94.1677% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 92.3732%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10.7182. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 7.16881 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.0040, que corresponde a Fm. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

## Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 2

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Ta1E

Ta3E

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	617.832	174.618	3.5382	0.0036
Fa	4.41776	0.686778	6.43259	0.0000
Fm	6.33293	2.18789	2.89453	0.0125
Ta1E	-19.1809	3.83919	-4.99609	0.0002
Ta3E	12.9215	3.34209	3.86629	0.0019

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	24013.2	4	6003.3	48.98	0.0000
Residuo	1593.49	13	122.576		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 93.7771 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.8623 por ciento

Error estándar del est. = 11.0714

Error absoluto medio = 7.54668

Estadístico Durbin-Watson = 1.54588 (P=0.0376)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.138526

### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 617.832 + 4.41776*Fa + 6.33293*Fm - 19.1809*Ta1E + 12.9215*Ta3E$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93.7771% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 91.8623%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11.0714. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 7.54668 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.0125, que corresponde a Fm. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

### Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 3

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Ta1O

Ta3O

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
CONSTANTE	652.288	195.075	3.34378	0.0053
Fa	4.73418	0.750641	6.30684	0.0000
Fm	8.60631	1.93637	4.44456	0.0007
Ta1O	-17.7585	3.79618	-4.678	0.0004
Ta3O	9.31887	2.7713	3.36263	0.0051

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	23849.5	4	5962.38	44.11	0.0000
Residuo	1757.15	13	135.166		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 93.1379 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.0265 por ciento

Error estándar del est. = 11.6261

Error absoluto medio = 8.12016

Estadístico Durbin-Watson = 1.77074 (P=0.0984)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.0179736

#### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 652.288 + 4.73418*Fa + 8.60631*Fm - 17.7585*Ta1O + 9.31887*Ta3O$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93.1379% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 91.0265%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11.6261. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 8.12016 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.0051, que corresponde a Ta3O. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

### Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 4

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Ta1O

Ta3E

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
CONSTANTE	690.752	203.662	3.39166	0.0048
Fa	4.75075	0.757239	6.27378	0.0000
Fm	8.05688	2.0879	3.85885	0.0020
Ta1O	-18.6894	4.07004	-4.59194	0.0005
Ta3E	10.4317	3.13564	3.32683	0.0055

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	23832.0	4	5958.01	43.64	0.0000
Residuo	1774.64	13	136.511		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 93.0696 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90.9372 por ciento

Error estándar del est. = 11.6838

Error absoluto medio = 8.69291

Estadístico Durbin-Watson = 1.48586 (P=0.0274)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.154381

#### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 690.752 + 4.75075*Fa + 8.05688*Fm - 18.6894*Ta1O + 10.4317*Ta3E$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93.0696% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90.9372%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11.6838. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 8.69291 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.0055, que corresponde a Ta3E. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

## Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 5

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Th1

T3pO

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
CONSTANTE	1504.24	377.122	3.98874	0.0015
Fa	2.90769	0.811525	3.58299	0.0033
Fm	3.63358	2.99048	1.21505	0.2460
Th1	-2.08156	0.444327	-4.68475	0.0004
T3pO	1.88299	1.1754	1.60199	0.1332

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	23802.5	4	5950.62	42.88	0.0000
Residuo	1804.21	13	138.785		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 92.9541 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90.7862 por ciento

Error estándar del est. = 11.7807

Error absoluto medio = 8.89413

Estadístico Durbin-Watson = 2.14972 (P=0.2882)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.193323

### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 1504.24 + 2.90769*Fa + 3.63358*Fm - 2.08156*Th1 + 1.88299*T3pO$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 92.9541% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90.7862%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11.7807. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 8.89413 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.2460, que corresponde a Fm. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Fm del modelo.

## Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 6

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

Th1

Th2

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
CONSTANTE	1754.91	589.304	2.97794	0.0107
Fa	1.66836	0.973929	1.71302	0.1104
Fm	4.2773	3.75827	1.1381	0.2756
Th1	-1.99139	0.473062	-4.20957	0.0010
Th2	-0.283973	0.280724	-1.01157	0.3302

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	23603.9	4	5900.98	38.30	0.0000
Residuo	2002.74	13	154.057		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 92.1788 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 89.7723 por ciento

Error estándar del est. = 12.412

Error absoluto medio = 9.22783

Estadístico Durbin-Watson = 2.06887 (P=0.2827)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.12416

### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = 1754.91 + 1.66836*Fa + 4.2773*Fm - 1.99139*Th1 - 0.283973*Th2$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 92.1788% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 89.7723%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 12.412. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 9.22783 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.3302, que corresponde a Th2. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Th2 del modelo.

### Anexo 3 Regresión Múltiple – Tms: Modelo 7

Variable dependiente: Tms

Variables independientes:

Fa

Fm

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-260.386	60.0968	-4.33278	0.0006
Fa	3.26833	1.04101	3.13958	0.0067
Fm	12.7386	1.73502	7.34206	0.0000

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	20730.0	2	10365.0	31.88	0.0000
Residuo	4876.67	15	325.111		
Total (Corr.)	25606.7	17			

R-cuadrada = 80.9555 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 78.4162 por ciento

Error estándar del est. = 18.0308

Error absoluto medio = 13.9891

Estadístico Durbin-Watson = 1.27628 (P=0.0218)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.343732

#### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Tms y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$Tms = -260.386 + 3.26833*Fa + 12.7386*Fm$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 80.9555% de la variabilidad en Tms. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 78.4162%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 18.0308. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 13.9891 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.0067, que corresponde a Fa. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

**Anexo 4** Base datos experimental para balance de energía y masa

Flujo		Temperatura a la salida (°C)		
Mineral (t/h)	Agua (m <sup>3</sup> /h)	Enfriador	Horno 1	Horno 2
35,4	15	231,13	767,25	587,13
35,4	15	249,02	765,53	577,60
35,4	20	258,46	763,55	587,77
35,4	20	257,54	766,95	578,49
35,4	25	245,98	768,93	581,78
35,4	25	248,13	761,01	580,38
32,4	15	221,25	763,20	639,62
32,4	15	189,92	770,14	646,14
32,4	20	238,46	763,61	632,82
32,4	20	240,92	764,28	637,00
32,4	25	258,80	749,35	606,83
32,4	25	247,53	762,85	623,03
29,4	15	161,38	779,40	651,27
29,4	15	152,29	788,85	648,73
29,4	20	153,74	787,48	651,22
29,4	20	163,61	780,83	643,48
29,4	25	194,55	776,72	631,69
29,4	25	206,10	782,59	619,58

Flujo		Temperatura del agua (°C)					
Mineral (t/h)	Agua (m <sup>3</sup> /h)	Lado Este			Lado Oeste		
		1	2	3	1	2	3
35,4	15	77,98	71,64	64,64	78,92	74,88	66,27
35,4	15	79,06	72,89	66,75	79,84	76,00	68,17
35,4	20	81,08	74,93	68,59	81,49	77,73	70,38
35,4	20	82,16	75,17	69,09	82,39	77,98	71,25
35,4	25	82,64	72,90	67,70	83,45	76,79	69,77
35,4	25	80,52	70,26	65,54	81,44	74,94	67,49
32,4	15	77,99	68,60	62,91	78,96	71,56	65,00
32,4	15	79,30	70,30	63,86	80,34	73,18	66,06
32,4	20	77,85	66,06	62,20	78,83	70,05	64,07
32,4	20	77,18	66,53	61,52	78,09	69,97	63,71
32,4	25	78,50	68,53	64,02	79,54	72,66	66,15
32,4	25	77,71	67,05	63,18	78,60	71,47	65,50
29,4	15	80,57	71,92	64,64	81,00	74,75	66,98
29,4	15	80,99	72,35	64,68	81,00	75,21	66,92
29,4	20	79,67	69,36	62,09	80,49	73,60	64,01
29,4	20	78,03	66,36	59,98	78,94	71,87	61,12
29,4	25	78,46	68,22	60,81	79,26	72,68	62,44
29,4	25	80,16	71,03	64,01	81,29	75,29	65,32

**Anexo 4** Base datos experimental para balance de energía y masa (Continuación)

Flujo		Temperatura de la pared (°C)					
Mineral (t/h)	Agua (m <sup>3</sup> /h)	Lado Este			Lado Oeste		
		1	2	3	1	2	3
35,4	15	84,3	84,6	91,7	92,6	91,7	84,7
35,4	15	99,5	87,8	84,8	96,3	87,5	85,9
35,4	20	96,7	86,5	77,4	96,9	87,3	81,1
35,4	20	91,9	86,7	75,7	96,7	81,4	81,9
35,4	25	81,3	81,2	94,0	95,6	81,0	77,7
35,4	25	99,3	78,1	71,1	96,8	80,4	74,5
32,4	15	100,5	71,3	72,3	89,8	74,4	71,6
32,4	15	96,0	70,8	71,5	89,7	72,8	72,4
32,4	20	92,8	72,0	70,4	94,9	74,6	72,8
32,4	20	91,1	70,5	68,5	94,2	74,3	71,7
32,4	25	94,4	71,1	71,2	92,5	72,8	71,7
32,4	25	92,7	70,6	69,9	94,3	72,2	73,6
29,4	15	96,5	82,1	69,9	92,4	80,6	75,2
29,4	15	96,0	81,6	70,3	94,8	77,3	71,7
29,4	20	95,1	84,6	64,9	94,6	77,8	70,0
29,4	20	95,1	84,3	64,5	94,3	76,8	69,2
29,4	25	92,9	85,0	73,3	83,6	80,6	68,9
29,4	25	90,9	83,0	72,9	88,5	80,5	70,2

	Flujo		Temperatura a la salida (°C)		
	Mineral (t/h)	Agua (m <sup>3</sup> /h)	Enfriador	Horno 1	Horno 2
Media	32,40	20,00	217,71	770,14	618,03
Error típico	0,59	0,99	9,15	2,44	6,71
Mediana	32,40	20,00	234,80	767,10	627,36
Desviación estándar	2,52	4,20	38,81	10,37	28,46
Varianza de la muestra	6,35	17,65	1506,28	107,51	810,04
Curtosis	-1,59	-1,59	-1,16	-0,25	-1,64
Coefficiente de asimetría	0,00	0,00	-0,66	0,27	-0,36
Rango	6,00	10,00	106,51	39,50	73,67
Mínimo	29,40	15,00	152,29	749,35	577,60
Máximo	35,40	25,00	258,80	788,85	651,27
Nivel de confianza (95,0%)	1,25	2,09	19,30	5,16	14,15

**Anexo 4** Base datos experimental para balance de energía y masa (Continuación)

	Temperatura del agua (°C)					
	Lado Este			Lado Oeste		
	1	2	3	1	2	3
Media	79,44	70,23	64,23	80,21	73,92	66,14
Error típico	0,38	0,67	0,61	0,34	0,57	0,63
Mediana	79,18	70,28	64,02	80,09	74,17	66,10
Desviación estándar	1,62	2,84	2,57	1,46	2,42	2,66
Varianza de la muestra	2,62	8,08	6,60	2,13	5,87	7,09
Curtosis	-0,78	-0,95	-0,40	-0,31	-0,85	-0,12
Coefficiente de asimetría	0,52	0,14	0,38	0,56	0,00	0,20
Rango	5,46	9,12	9,11	5,36	8,01	10,13
Mínimo	77,18	66,06	59,98	78,09	69,97	61,12
Máximo	82,64	75,17	69,09	83,45	77,98	71,25
Nivel de confianza (95,0%)	0,81	1,41	1,28	0,73	1,21	1,32

	Temperatura del agua (°C)					
	Lado Este			Lado Oeste		
	1	2	3	1	2	3
Media	93,71	79,53	74,13	93,26	79,11	74,71
Error típico	1,15	1,55	1,93	0,82	1,30	1,25
Mediana	94,72	81,83	71,33	94,32	79,08	72,63
Desviación estándar	4,87	6,56	8,17	3,47	5,50	5,31
Varianza de la muestra	23,73	43,07	66,78	12,03	30,24	28,25
Curtosis	1,71	-1,61	1,69	2,19	0,16	-0,10
Coefficiente de asimetría	-1,16	-0,43	1,49	-1,42	0,79	1,04
Rango	19,18	17,27	29,48	13,27	19,47	17,00
Mínimo	81,33	70,53	64,50	83,63	72,20	68,93
Máximo	100,50	87,80	93,98	96,90	91,67	85,93
Nivel de confianza (95,0%)	2,42	3,26	4,06	1,72	2,73	2,64



### Anexo 5 Evaluación del enfriador de mineral para un flujo de agua de 15 m<sup>3</sup>/h

$x := 0, 1 \dots 2$

#### Masa aparente del mineral dentro del tambor

**0.9978** Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

**0.88** Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

#### Flujo másico de mineral

$$M_{\text{mineral}_x} :=$$

29.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
32.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
35.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

$$M_{\text{Red}_x} =$$

25.815	tonne hr
28.449	
31.083	

#### Temperatura

##### de la pared

$$\theta_{p_x} :=$$

352.50K
356.98K
362.45K

##### del agua en la piscina

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

345.60 · K
347.33 · K
349.38 · K

#### Datos del enfriador

D := 3.040m      Diámetro interior

De := 3.08m      Diámetro exterior

Le := 30m      Longitud

$f_{\text{corr}} := 0.88 \cdot 0.9978$

#### Volumen específico del agua

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

$1.024 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$1.025 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$1.027 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Densidad del agua

$$\rho_{\text{agua}_x} := \frac{1}{v_{\text{esp}_x}}$$

$$\rho_{\text{agua}_x} =$$

976.563	kg m <sup>3</sup>
975.61	
973.71	

#### Temperatura

##### entrada del mineral

$\theta_e := 973.15\text{K}$

##### salida del mineral

$\theta_{s_x} :=$

429.98 · K
473.98 · K
513.23 · K

##### del aire

$\theta_{\text{aire}} := 305.15 \cdot \text{K}$

##### saturación del aire

$\theta_{\text{sat,aire}} := 297.15 \cdot \text{K}$

##### entrada del agua

$\theta_{e,\text{agua}} := 305.15 \cdot \text{K}$

##### saturación del agua

$\theta_{\text{sat,agua}} := 373.15 \cdot \text{K}$

#### Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire

##### Velocidad del aire

$$V_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

##### Coeficiente cinemático de viscosidad del aire

$$v_{\text{aire}} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

##### Coeficiente de difusión de masa

$$D_{\text{AB}} := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

**Número de:**

**Reynolds**

**Schmidt**

**Sherwood**

$$\text{Reaire} := \frac{\text{Vaire} \cdot \text{De}}{\text{vaire}}$$

$$\text{Sc} := \frac{\text{vaire}}{\text{DAB}}$$

$$\text{Sh} := 0.0296 \text{Reaire}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Reaire} = 4.264 \times 10^5$$

$$\text{Sc} = 0.611$$

$$\text{Sh} = 801.472$$

**Volumen específico del vapor de agua a 32°C**

**Coefficiente de transferencia de masa**

**Densidad del vapor a 32°C**

$$\text{vva} := 27.90 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{va}} := \frac{1}{\text{vva}}$$

$$\text{hm} := \frac{\text{Sh} \cdot \text{DAB}}{\text{De}}$$

$$\rho_{\text{va}} = 0.036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{hm} = 6.766 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared**

**Calor latente de vaporización**

**Volumen específico**

**Densidad del vapor**

$$\text{hfgv}_x :=$$

$$\text{vvas}_x :=$$

$$\rho_{\text{vas}_x} := \frac{1}{\text{vvas}_x}$$

$2310.51 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2298.85 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2284.64 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

$3.514 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.968 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.433 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

$\rho_{\text{vas}_x} =$
$\frac{0.285}{\text{m}^3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\frac{0.337}{\text{m}^3}$
$\frac{0.411}{\text{m}^3}$

**Calor específico del agua**

**Volumen específico del agua a 32 °C**

**a la entrada**

**a la salida**

$$\text{Cp}_{\text{eagua}_x} :=$$

$$\text{Cp}_{\text{sagua}_x} :=$$

$$\text{va}_{\text{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$4191.5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4192.9 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4194.5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

**Flujo volumétrico de agua**

**Flujo másico de agua**

$$\text{V}_{\text{agua}} := 15 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} := \frac{1}{\text{va}_{\text{ma}}} \cdot \text{V}_{\text{agua}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} = 1.493 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

**Longitud sumergida en el agua**

**Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire**

$$\text{hs} := 1 \cdot \text{m}$$

$$\text{L}_{\text{secc}} := 0.6 \cdot \text{m}$$

**Área ocupada por el agua**

$$A_{\text{agua}} := D \cdot \left[ \pi - \text{asin} \left[ \frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_e}{2} - h_s\right)^2}}{D_e} \right] \right] + L_{\text{secc}} \cdot L_e$$

$$A_{\text{agua}} = 193.93 \text{ m}^2$$

**Cantidad de agua vaporizada**

$$N_{a_x} := h_m \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})$$

$$N_{a_x} =$$

1.175·103	kg hr
1.422·103	
1.772·103	

**Calor absorbido por el agua**

$$Q_{\text{agua}_x} := \left[ (M_{\text{agua}} - N_{a_x}) \cdot C_{p_{\text{sagua}_x}} \cdot \theta_{\text{agua}_x} \right] - (M_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{eagua}_x}} \cdot \theta_{\text{eagua}})$$

$$Q_{\text{agua}_x} =$$

2.473·105	W
1.768·105	
6.866·104	

**Eficiencia del enfriador**

$$Ee_{f_x} := \frac{(\theta_e - \theta_{s_x}) \cdot 100}{\theta_e}$$

$$Ee_{f_x} =$$

55.816
51.294
47.261

**Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire**

$$\alpha_{\text{agua}_x} := \frac{h_{f_{g_v_x}} \cdot [h_m \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})]}{\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{sat}_{\text{aire}}}}$$

$$\alpha_{\text{agua}_x} =$$

80.253	watt m <sup>2</sup> ·K
93.321	
111.03	

**Pérdida de calor al medioambiente**

$$Q_{\text{ma}_x} := \alpha_{\text{agua}_x} \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{aire}})$$

$$Q_{\text{ma}_x} =$$

6.295·105	W
7.634·105	
9.524·105	

**Calor específico del mineral**

$$C_{pm} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{J}{\text{kg} \cdot K}$$

**Calor cedido por el mineral**

$$Q_{m_x} := M_{\text{Red}_x} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_e - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

3.766·106	W
3.815·106	
3.84·106	



### Anexo 5 Evaluación del enfriador de mineral para un flujo de agua de 20 m<sup>3</sup>/h

$x := 0, 1 \dots 2$

#### Masa aparente del mineral dentro del tambor

**0.9978** Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

**0.88** Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

#### Flujo másico de mineral

$$M_{\text{mineral}_x} :=$$

29.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
32.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
35.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

$$M_{\text{Red}_x} = \begin{pmatrix} 25.815 \\ 28.449 \\ 31.083 \end{pmatrix} \frac{\text{tonne}}{\text{hr}}$$

#### Datos del enfriador

D := 3.040m      Diámetro interior

De := 3.08 · m      Diámetro exterior

Le := 30m      Longitud

f<sub>corr</sub> := 0.88 · 0.9978

#### Volumen específico del agua

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

1.0229 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>
1.0251 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>
1.0277 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>

#### Densidad del agua

$$\rho_{\text{agua}_x} := \frac{1}{v_{\text{esp}_x}}$$

$$\rho_{\text{agua}_x} = \begin{pmatrix} 977.613 \\ 975.515 \\ 973.047 \end{pmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### Temperatura

##### de la pared

$$\theta_{p_x} :=$$

352.17K
356.07K
360.39K

##### del agua en la piscina

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

343.14 · K
346.79 · K
351.15 · K

#### Temperatura

##### entrada del mineral

$$\theta_e := 973.15\text{K}$$

##### salida del mineral

$$\theta_{s_x} :=$$

431.83 · K
491.94 · K
531.15 · K

##### del aire

$$\theta_{\text{aire}} := 305.15 \cdot \text{K}$$

##### saturación del aire

$$\theta_{\text{sat}_{\text{aire}}} := 297.15 \cdot \text{K}$$

##### entrada del agua

$$\theta_{e_{\text{agua}}} := 305.15 \cdot \text{K}$$

##### saturación del agua

$$\theta_{\text{sat}_{\text{agua}}} := 373.15 \cdot \text{K}$$

#### Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire

##### Velocidad del aire

$$V_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

##### Coeficiente cinemático de viscosidad del aire

$$v_{\text{aire}} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

##### Coeficiente de difusión de masa

$$DAB := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

**Número de:**

**Reynolds**

**Schmidt**

**Sherwood**

$$\text{Reaire} := \frac{\text{Vaire} \cdot \text{De}}{\text{vaire}}$$

$$\text{Sc} := \frac{\text{vaire}}{\text{DAB}}$$

$$\text{Sh} := 0.0296 \text{Reaire}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Reaire} = 4.264 \times 10^5$$

$$\text{Sc} = 0.611$$

$$\text{Sh} = 801.472$$

**Volumen específico del vapor de agua a 32°C**

**Coefficiente de transferencia de masa**

**Densidad del vapor a 32°C**

$$\text{vva} := 27.90 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{va}} := \frac{1}{\text{vva}}$$

$$\text{hm} := \frac{\text{Sh} \cdot \text{DAB}}{\text{De}}$$

$$\rho_{\text{va}} = 0.036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{hm} = 6.766 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared**

**Calor latente de vaporización**

**Volumen específico**

**Densidad del vapor**

$$\text{hfgv}_x :=$$

$$\text{vvas}_x :=$$

$$\rho_{\text{vas}_x} := \frac{1}{\text{vvas}_x}$$

$2311.37 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2301.21 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2289.97 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

$3.61 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$3.18 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$2.71 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

$\rho_{\text{vas}_x} =$
$\frac{0.277}{\text{kg}}$
$\frac{0.314}{\text{m}^3}$
$\frac{0.369}{\text{m}^3}$

**Calor específico del agua**

**Volumen específico del agua a 32 °C**

**a la entrada**

**a la salida**

$$\text{Cp}_{\text{eagua}_x} :=$$

$$\text{Cp}_{\text{sagua}_x} :=$$

$$\text{va}_{\text{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$4190.3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4193.0 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4196.2 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

**Flujo volumétrico de agua**

**Flujo másico de agua**

$$\text{V}_{\text{agua}} := 20 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} := \frac{1}{\text{va}_{\text{ma}}} \cdot \text{V}_{\text{agua}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} = 1.99 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

**Longitud sumergida en el agua**

**Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire**

$$\text{hs} := 1 \cdot \text{m}$$

$$\text{L}_{\text{secc}} := 0.6 \cdot \text{m}$$

### Área ocupada por el agua

$$A_{\text{agua}} := D \cdot \left[ \pi - \text{asin} \left[ \frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_e}{2} - h_s\right)^2}}{D_e} \right] \right] + L_{\text{secc}} \cdot L_e$$

$$A_{\text{agua}} = 193.93 \text{ m}^2$$

### Cantidad de agua vaporizada

$$N_{a_x} := h_m \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})$$

$$N_{a_x} =$$

1.139·10 <sup>3</sup>	$\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
1.316·10 <sup>3</sup>	
1.574·10 <sup>3</sup>	

### Calor absorbido por el agua

$$Q_{\text{agua}_x} := \left[ (M_{\text{agua}} - N_{a_x}) \cdot C_{p_{\text{sagua}_x}} \cdot \theta_{\text{agua}_x} \right] - (M_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{eagua}_x}} \cdot \theta_{\text{eagua}})$$

$$Q_{\text{agua}_x} =$$

4.458·10 <sup>5</sup>	W
4.589·10 <sup>5</sup>	
4.536·10 <sup>5</sup>	

### Calor específico del mineral

$$C_{pm} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

### Calor cedido por el mineral

$$Q_{m_x} := M_{\text{Red}_x} \cdot C_{pm} \cdot (\theta_e - \theta_{s_x})$$

$$Q_{m_x} =$$

3.754·10 <sup>6</sup>	W
3.677·10 <sup>6</sup>	
3.69·10 <sup>6</sup>	

### Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{\text{agua}_x} := \frac{h_{fgv_x} \cdot [h_m \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})]}{\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{sat}_{\text{aire}}}}$$

$$\alpha_{\text{agua}_x} =$$

82.004	$\frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
87.388	
95.588	

### Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{\text{ma}_x} := \alpha_{\text{agua}_x} \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{aire}})$$

$$Q_{\text{ma}_x} =$$

6.042·10 <sup>5</sup>	W
7.057·10 <sup>5</sup>	
8.527·10 <sup>5</sup>	

### Eficiencia del enfriador

$$Ee_{f_x} := \frac{(\theta_e - \theta_{s_x}) \cdot 100}{\theta_e}$$

$$Ee_{f_x} =$$

55.626
49.449
45.42



**Anexo 5 Evaluación del enfriador de mineral para un flujo de agua de 25 m<sup>3</sup>/h**

$x := 0, 1 \dots 2$

**Masa aparente del mineral dentro del tambor**

**0.9978** Coeficiente que considera el extractable en la Planta de Secaderos y Hornos

**0.88** Coeficiente que considera las pérdidas durante la calcinación y reducción del mineral

**Flujo másico de mineral**

$$M_{\text{mineral}_x} :=$$

29.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
32.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>
35.4 · tonne · hr <sup>-1</sup>

$$M_{\text{Red}_x} := M_{\text{mineral}_x} \cdot f_{\text{corr}}$$

$$M_{\text{Red}_x} =$$

25.815	tonne
28.449	hr
31.083	

**Datos del enfriador**

D := 3.040m      Diámetro interior

De := 3.08 · m      Diámetro exterior

Le := 30m      Longitud

f<sub>corr</sub> := 0.88 · 0.9978

**Volumen específico del agua**

**Densidad del agua**

$$v_{\text{esp}_x} :=$$

1.0231 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>
1.0247 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>
1.0264 · 10 <sup>-3</sup> · m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup>

$$\rho_{\text{agua}_x} := \frac{1}{v_{\text{esp}_x}}$$

977.422	kg
975.895	m <sup>3</sup>
974.279	

**Temperatura**

**de la pared**

**del agua en la piscina**

$$\theta_{p_x} :=$$

350.06K
354.70K
358.59K

$$\theta_{\text{agua}_x} :=$$

343.47 · K
346.20 · K
348.92 · K

**Temperatura**

**entrada del mineral**

$\theta_e := 973.15\text{K}$

**salida del mineral**

$$\theta_{s_x} :=$$

473.48 · K
506.67 · K
526.32K

**del aire**

$\theta_{\text{aire}} := 305.15 \cdot \text{K}$

**saturación del aire**

$\theta_{\text{sat,aire}} := 297.15 \cdot \text{K}$

**entrada del agua**

$\theta_{e,\text{agua}} := 305.15 \cdot \text{K}$

**saturación del agua**

$\theta_{\text{sat,agua}} := 373.15 \cdot \text{K}$

**Determinación del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire**

**Velocidad del aire**

$$v_{\text{aire}} := 2.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

**Coeficiente cinemático de viscosidad del aire**

$$v_{\text{aire}} := 15.89 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

**Coeficiente de difusión de masa**

$$DAB := 0.26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

**Número de:**

**Reynolds**

**Schmidt**

**Sherwood**

$$\text{Reaire} := \frac{\text{Vaire} \cdot \text{De}}{\text{vaire}}$$

$$\text{Sc} := \frac{\text{vaire}}{\text{DAB}}$$

$$\text{Sh} := 0.0296 \text{Reaire}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Reaire} = 4.264 \times 10^5$$

$$\text{Sc} = 0.611$$

$$\text{Sh} = 801.472$$

**Volumen específico del vapor de agua a 32°C**

**Coefficiente de transferencia de masa**

**Densidad del vapor a 32°C**

$$\text{vva} := 27.90 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{va}} := \frac{1}{\text{vva}}$$

$$\text{hm} := \frac{\text{Sh} \cdot \text{DAB}}{\text{De}}$$

$$\rho_{\text{va}} = 0.036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{hm} = 6.766 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Las propiedades del vapor de agua saturado se determinan a la temperatura de la pared**

**Calor latente de vaporización**

**Volumen específico**

**Densidad del vapor**

$$\text{hfgv}_x :=$$

$$\text{vvas}_x :=$$

$$\rho_{\text{vas}_x} := \frac{1}{\text{vvas}_x}$$

$2316.85 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2304.78 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$
$2294.67 \cdot 10^3 \cdot \text{joule} \cdot \text{kg}^{-1}$

$5.73 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$4.85 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$4.11 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

$\rho_{\text{vas}_x} =$
$\frac{0.175}{\text{kg}}$
$\frac{0.206}{\text{m}^3}$
$\frac{0.243}{\text{m}^3}$

**Calor específico del agua**

**Volumen específico del agua a 32 °C**

**a la entrada a la salida**

$$\text{Cp}_{\text{eagua}_x} :=$$

$$\text{Cp}_{\text{sagua}_x} :=$$

$$\text{va}_{\text{ma}} := 1.005 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4178 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$4190.4 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4192.3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$4194.2 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

**Flujo volumétrico de agua**

**Flujo másico de agua**

$$\text{V}_{\text{agua}} := 25 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} := \frac{1}{\text{va}_{\text{ma}}} \cdot \text{V}_{\text{agua}}$$

$$\text{M}_{\text{agua}} = 2.488 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

**Longitud sumergida en el agua**

**Lógitud de la sección ocupada por el agua entre el enfriador y la pared de la piscina en contacto con el aire**

$$\text{hs} := 1 \cdot \text{m}$$

$$\text{L}_{\text{secc}} := 0.6 \cdot \text{m}$$

### Área ocupada por el agua

$$A_{\text{agua}} := D \cdot \left[ \pi - \text{asin} \left[ \frac{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{2}\right)^2 - \left(\frac{De}{2} - hs\right)^2}}{De} \right] \right] + L_{\text{secc}} \cdot Le$$

$$A_{\text{agua}} = 193.93 \text{ m}^2$$

### Cantidad de agua vaporizada

$$Na_x := hm \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})$$

$$Na_x =$$

655.037	kg
804.607	hr
979.958	

### Calor absorbido por el agua

$$Q_{\text{agua}_x} := \left[ (M_{\text{agua}} - Na_x) \cdot Cp_{\text{sagua}_x} \cdot \theta_{\text{agua}_x} \right] - (M_{\text{agua}} \cdot Cp_{\text{eagua}_x} \cdot \theta_{\text{eagua}})$$

$$Q_{\text{agua}_x} =$$

8.738·105	W
8.949·105	
9.043·105	

### Calor específico del mineral

$$C_{\text{pm}} := 0.967 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

### Calor cedido por el mineral

$$Q_{\text{m}_x} := M_{\text{Red}_x} \cdot C_{\text{pm}} \cdot (\theta_{\text{e}} - \theta_{\text{s}_x})$$

$$Q_{\text{m}_x} =$$

3.465·106	W
3.565·106	
3.731·106	

### Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire

$$\alpha_{\text{agua}_x} := \frac{hfgv_x \cdot [hm \cdot (\rho_{\text{vas}_x} - \rho_{\text{va}})]}{\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{sat}_{\text{aire}}}}$$

$$\alpha_{\text{agua}_x} =$$

46.93	watt
54.153	m <sup>2</sup> ·K
62.216	

### Pérdida de calor al medioambiente

$$Q_{\text{ma}_x} := \alpha_{\text{agua}_x} \cdot A_{\text{agua}} \cdot (\theta_{\text{agua}_x} - \theta_{\text{aire}})$$

$$Q_{\text{ma}_x} =$$

3.488·105	W
4.311·105	
5.281·105	

### Eficiencia del enfriador

$$Ee_{\text{f}_x} := \frac{(\theta_{\text{e}} - \theta_{\text{s}_x}) \cdot 100}{\theta_{\text{e}}}$$

$$Ee_{\text{f}_x} =$$

51.346
47.935
45.916