



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

# *Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico.*

**Tema:** Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de elementos finitos.

**Autor:** Fidel Alejandro Ortiz Castro

**Tutor(es):** *Ing. Yodelkis Delgado Drubey*

*Ms.C. Ever Góngora Leyva.*

*Ms.C. Marbelis Lamorú Urgelles.*

*Moa-2010*

*"Año 52 de la Revolución"*

## Declaración de autoridad

Yo, **Fidel Alejandro Ortiz Castro**, autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", y a la empresa Cmdte "Ernesto Che Guevara", los cuales podrán hacer uso del mismo cuando estimen conveniente.

\_\_\_\_\_  
Fidel Alejandro Ortiz Castro  
Autor

\_\_\_\_\_  
Ing. Yodelkis Delgado Drubey  
Tutor

\_\_\_\_\_  
Ms.C. Ever Góngora Leyva.  
Tutor

\_\_\_\_\_  
Ms.C. Marbelis Lamorú Urgelles.  
Tutor

## *PENSAMIENTO*

*"Haríamos mucho más si pensáramos que son menos las cosas imposibles."*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Revolución Cubana, por haberme dado la oportunidad de formarme como Ingeniero Mecánico.*

*A mí padres Rafaela Castro y Fidel Ortiz, al igual que mi hermana Dilma Ortiz Castro por el apoyo que siempre me han dado.*

*A mis tutores, Ing. Yodelkis Delgado Drubey, M.S.c Ever Góngora Leyva y Ms.C. Marbelis Lamorú Urgelles por su ayuda y dedicación durante la realización de este trabajo.*

*A los profesores de mi facultad y a mis compañeros de estudios.*

*A mis amigos, con los cuales he podido contar en todo momento.*

*A las personas que se convirtieron en mi familia aquí en Moa e incondicionalmente me ayudaron.*

*A quienes de forma desinteresada ayudaron a la realización de este trabajo.*

*A todas aquellas personas que imperdonablemente aquí no he citado y siempre han estado presente para brindarme su ayuda.*

*A todos, muchas gracias.*

## DEDICATORIA

*Dedico la culminación de este trabajo:*

*A mis padres y hermanas, que están siempre a mi lado brindándome su mano amiga.*

*A toda mi familia, que siempre se ha mantenido unida.*

*A mis padrinos los cuales me han ayudado en todo cuanto han podido.*

*A mis queridos amigos, quienes son unos hermanos para mí.*

*A mis Tutores, ya que en el momento preciso dieron lo mejor de sí para que este día fuera posible.*

*A las amistades que aquí en Moa dejó, y que siempre recordaré como la familia que son para mí.*

*A los profesores que durante estos cinco años me han ayudado a formarme como profesional.*

*A mis compañeros de estudio que han luchado a mi lado todo este tiempo.*

*A todas aquellas personas que han compartido conmigo el día a día.*

## Resumen

El presente trabajo de diploma que lleva como título **Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de Elementos Finitos**; tiene como objetivo fundamental simular el comportamiento de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", mediante el empleo del método de Elementos Finitos.

Se realizó una amplia búsqueda bibliográfica de la temática en cuestión, valorando el estado actual del proceso de enfriamiento.

A través de las simulaciones se mostró que el mineral reducido experimenta una variación de su temperatura en aproximadamente unos 450 K (450°C). En la temperatura del agua de la piscina se aprecia un cambio de 48 K (48°C).

Se realizó una pequeña valoración económica de los costos del amoníaco que se pierde producto a las altas temperaturas del mineral al salir del enfriador; incluyendo el costo del agua de la piscina y el mantenimiento de los enfriadores, además, se analizaron los principales impactos ambientales del proceso de enfriamiento de mineral reducido.

## ABSTRACT

The present thesis paper titled **Estimation of the temperature of the reduced mineral by the method of Finite Elements during the cooling process** has the principal objective of simulating the thermal behaviour of the reduced mineral during its cooling in the company "Cmdte. Ernesto Che Guevara", by means of the Finite Elements method.

A broad bibliography search on the topic in question was realized and the actual state of the cooling process was valued.

By means of simulations, it was demonstrated that the reduced mineral experiences a variation of approximately 450 K (450°C) in its temperature. An increment of 48 K (48°C) is observed in the temperature of the water in the pool.

In addition, a little economic evaluation was realized which includes the analysis of the cost of ammonia which is lost due to the high temperature of the mineral at the outlet cooler, the water in the pool and the maintenance of the cooler. Also, the principal environmental side effects caused by cooling of the reduced mineral were analyzed.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Trabajos Precedentes.....	4
1.3. Descripción del flujo tecnológico de la planta .....	9
1.4. Descripción de la instalación de estudio .....	10
1.5. Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento de mineral.....	11
1.7. Conclusiones del capítulo I.....	14
CAPÍTULO II: TEORÍA BÁSICA PARA LA MODELACIÓN Y LA SIMULACION EN PROCESOS TÉRMICOS Y DE FLUJO .....	15
2.1. Introducción .....	15
2.2. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación. ....	15
2.3. Método de Elementos Finitos aplicados a problemas térmicos y de flujos .....	16
2.3.1. Antecedentes históricos .....	16
2.3.2. Fundamentos teóricos del método de Elementos Finitos.....	18
2.3.3. Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos...22	
2.4. Principios de Flujo de calor.....	23
2.4.1. Conducción y Convección.....	23
2.4.2. Radiación .....	25
2.5. Condiciones de fronteras a tener en cuenta en el análisis térmico.....	26
2.6. Notación del flujo de calor en matrices .....	27
2.7. Método de la matriz en el análisis de la radiación .....	30
2.8. Flujo de fluido .....	30
2.8.1. Ecuación de continuidad .....	31
2.8.2. Ecuación de Momentum.....	31
2.8.3. Ecuación de Energía Incompresible.....	35
2.8.4. Turbulencia .....	35
2.9. Análisis de Fenómenos Térmicos con el uso del ANSYS.....	35
2.9.1. Modelos térmicos en ANSYS .....	36

Nombre de archivo: 07 INDICE  
Directorio: E:\USER\YODELKIS\Drubey\FIDEL\TESIS PARA  
IMPRIMIR  
Plantilla: C:\Documents and Settings\Yodel\Application  
Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dotm  
Título: BIBLIOGRAFÍA  
Asunto:  
Autor: alumno  
Palabras clave:  
Comentarios:  
Fecha de creación: 16/06/2010 22:14:00  
Cambio número: 24  
Guardado el: 30/06/2010 13:37:00  
Guardado por: WinuE  
Tiempo de edición: 45 minutos  
Impreso el: 30/06/2010 14:40:00  
Última impresión completa  
Número de páginas: 2  
Número de palabras: 508 (aprox.)  
Número de caracteres: 2.795 (aprox.)

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales renglones de la economía cubana es la industria del níquel, que actualmente se encuentra afectada por la crisis económica que azota al mundo, provocando un descenso brusco en el precio de éste en el mercado mundial. Es ésta una de las razones por la que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que componen esta industria se hace sumamente necesario.

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal: la empresa "Cmdte. René Ramos Latour" y la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", ésta última se encuentra situada al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín, 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 esquema de lixiviación carbonato amoniacal, o proceso CARON, según el cual el mineral oxidado de níquel es reducido selectivamente. Comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, incorporándose al flujo tecnológico por la planta de Secaderos y Molinos, a partir de este momento el material circula por las diferentes plantas del proceso entre las que se encuentran: la planta de Hornos de Reducción, la planta de Lixiviación y Lavado, y la planta de Calcinación y Sínter, donde culmina el proceso con la obtención del sínter de níquel más cobalto.

En el esquema carbonato amoniacal existen complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de esos están ubicados en la planta de Hornos de Reducción, como son los enfriadores de mineral, quienes juegan un papel esencial dentro del proceso, pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura 973 K ( $t = 700^{\circ}\text{C}$ ) a la salida del horno hasta la temperatura 443 K ( $t = 170^{\circ}\text{C}$ ) que sale del enfriador para pasar al proceso de Lixiviación y Lavado.

Los enfriadores cilíndricos rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos, en éstos equipos se enfría el mineral proveniente de los hornos por un sistema de

rotación dentro de una piscina donde fluye constantemente agua a temperatura ambiente, dando lugar a una de las problemáticas principales surgidas por la incapacidad de los enfriadores de mineral no lograr enfriar el mineral reducido hasta 443 K (170°C), que es la temperatura de diseño para el mineral después de los enfriadores.

### **Fundamento de la investigación**

- Se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor como los de Londrez (2007), Lamorú (2008) y Góngora; et. al (2009) pero todavía no se ha resuelto la problemática de estos equipos de intercambio de calor, de ahí la importancia de la presente investigación.

**La situación actual del proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios se caracteriza por las siguientes deficiencias:**

- Las limitaciones de los métodos existentes para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso.
- La baja eficiencia térmica del proceso de transferencia de calor presente en los enfriadores.
- Elevadas temperaturas del mineral a la salida del enfriador (mayores de 513 K (240°C)).
- Las limitaciones para realizar las mediciones de las variables a escala industrial, que imposibilitan emitir criterios certeros sobre su funcionamiento.

### **Problema de la investigación:**

- Las limitaciones tecnológicas existentes en la industria que impiden la determinación del comportamiento real de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento en los enfriadores cilíndricos rotatorios de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara".

### **Objeto de estudio:**

- El proceso de enfriamiento del mineral reducido en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara".

### **Objetivo:**

- Simular el comportamiento de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", mediante el empleo del método de Elementos Finitos.

### **Objetivos específicos:**

- Establecer las limitaciones de los trabajos sobre simulación por el método de Elementos Finitos que se han realizado a intercambiadores de calor horizontales, al ser aplicados a los enfriadores de mineral utilizados en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara".
- Obtener la variación de temperatura en el enfriador de mineral y el agua de la piscina con el apoyo del software profesional ANSYS 11.0.

### **Hipótesis:**

- Si se realiza la simulación del proceso de enfriamiento de mineral reducido con ayuda del software profesional ANSYS, a través del método de Elementos Finitos, será posible obtener el comportamiento de la temperatura del mineral dentro del enfriador.

### **Tareas del trabajo:**

- Establecer el estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Describir el proceso de enfriamiento del mineral.
- Exponer la teoría básica para la simulación de procesos térmicos con ayuda del software profesional ANSYS 11.0.
- Desarrollar la simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido por el método de Elementos Finitos.

## **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Introducción**

La planta de Hornos de Reducción es de gran importancia dentro del proceso de obtención de níquel. Dentro de ésta se encuentran los enfriadores de mineral, de los cuales depende su buen funcionamiento. En este capítulo se analizan los principales trabajos realizados a través de los años y las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada sobre el tema de los enfriadores de mineral reducido o similares. Se aborda sobre el proceso tecnológico utilizado para la reducción del mineral.

### **1.2. Trabajos Precedentes**

Durante la investigación se consultaron diferentes bibliografías, la misma está dirigida hacia aquellos trabajos que tratan criterios sobre el intercambio de calor en cilindros horizontales rotatorios desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos tiempos.

Enrich (1981), determinó que los factores que influyen en la temperatura de la mezcla en el tanque de contacto dentro de la tecnología carbonato-amoniaco se encuentran: el tonelaje de mineral dentro de los hornos de reducción, la temperatura del mineral reducido, la temperatura de licor fresco, la cantidad de enfriadores y los niveles de limpieza que presente el sistema de enfriamiento.

Bird; et. al (1982), resaltan que el calor que se transporta en el interior de un fluido, cuando por efecto de movimiento de la masa, la temperatura de éste sufre un incremento, es igual a la diferencia de la energía calorífica que tiene la masa en dicho movimiento.

Seborg; et. al (1989), hacen consideraciones sobre el intercambiador de calor de tubo, en el cual se tiene en cuenta, además de la diferencia en el tiempo de las variables, el factor posición; siendo descrito por ecuaciones diferenciales con parámetros distribuidos, es decir, la variable de salida en función del tiempo y la posición.

Fuchs (1996), plantea que en los intercambiadores de calor, para que la pared de los mismos no contribuya de forma significativa a la resistencia térmica es necesario que la

conductividad térmica por unidad de longitud de la pared, sea considerablemente inferior al coeficiente de transferencia térmica por convección.

Valle; et. al (2000a, 2000b), da una visión de los problemas existentes en los enfriadores de mineral, proponiendo algunas modificaciones para aumentar la capacidad de enfriamiento de la instalación, así como una metodología de cálculo; expone, además, los resultados obtenidos en cuatro corridas experimentales de evaluación de un enfriador.

Guzmán; et. al (2000), exponen los resultados obtenidos a través la modelación matemática y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación, proponen un modelo matemático dinámico con balances de masa y energía, expresando todas las dependencias dinámicas en ecuaciones diferenciales no lineales.

Morón (2000), realiza una modelación matemática y simulación de un banco de intercambiadores de calor de una refinería de petróleo, determinando las temperaturas de ambos fluidos a la salida, también, el calor cedido, calor absorbido y el porcentaje de pérdidas de calor. Expone que es posible aplicar, tanto el modelo matemático, como el módulo de cálculo para simular el banco o intercambiadores de calor por separado de otras refinerías, siempre y cuando se conozcan los datos de diseño de los mismos.

Columbié (2001), estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno tubular rotatorio, quedando éste conformado por 9 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico del objeto; determinó la dirección del proceso definiéndose como criterio de calidad, el mantenimiento del perfil térmico del horno; ésta tesis también aporta ecuaciones importantes que por primera vez aparecen en la bibliografía para el análisis de los procesos de transferencia de calor de gran complejidad.

Cengel y Turner (2001), muestran detalladamente el concepto de resistencia de contacto, dando a conocer las causas que la provocan y las consecuencias que este fenómeno trae consigo.

Chang y Coello (2001), exponen que los experimentos para pronosticar el intervalo de temperatura óptima de reducción del Ni y su tiempo de equilibrio indicaron que la misma

posee mayor probabilidad de encontrarse entre 760 y 780°C ya que al buscar el tiempo de equilibrio de la reducción a estas temperaturas demostraron que este tiempo se compone de 1,07 h de calentamiento hasta la temperatura de 760°C y 52 minutos (0,87 h) de reducción del mineral a dicha temperatura; no obstante los resultados positivos alcanzados podrían mejorar su confiabilidad si se incluye el estudio detallado del tiempo de equilibrio a las temperaturas de 700 y 760°C .

Incropera; et. al. (2003), abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor; en ésta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de transferencia de calor con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como en otras empresas donde ocurren fenómenos térmicos.

Góngora (2004), establece el modelo teórico para el proceso de enfriamiento en los cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción, así como el procedimiento para la solución del mismo, y realizó una identificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, utilizando para ello la media de los resultados experimentales obtenidos. Demostró que dentro de los parámetros más influyentes en la transferencia de calor del proceso, se encuentran la temperatura de entrada y el flujo másico de mineral. Obtiene tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que conforman el modelo matemático que caracteriza el comportamiento dinámico del proceso de enfriamiento de mineral en los cilindros rotatorios horizontales. Las curvas obtenidas muestran la tendencia a la disminución de la temperatura del mineral con la variación de la longitud del tambor para diferentes valores de coeficientes superficiales de transferencia de calor, de temperatura de la pared y de temperatura del agua en la piscina.

Acosta (2004), presentó un modelo matemático dinámico de los tanques de contactos y los enfriadores de licor de la empresa "Cmdte. René Ramos Latour" de Nicaro, expresados en ecuaciones para el balance de masa y energía, realiza las simulaciones

a lazo abierto para evaluar la influencia de cada una de las variables de entrada sobre las de salida con ayuda de las herramientas de identificación del MATLAB.

Shrager (2004), realiza la modelación de un fluido de alta viscosidad dentro de un cilindro horizontal giratorio que gira a velocidad constante. Realiza estudios paramétricos de la cinemática y de las características dinámicas del proceso, se revelan dos modelos de flujo, así como las curvas específicas para cada flujo que caracteriza la intensidad de dispersión líquida.

Abdalla (2005), realiza la simulación numérica de la convección natural de doble difusividad en un cilindro horizontal, con el cual demuestra que el aumento de la transferencia de calor puede lograrse aumentando la amplitud de la fuerza termal y frecuencia, aumentando el número de Rayleigh o también disminuyendo el número de Lewis y aumentando el parámetro de proporción de flotación.

Tabera y García (2006), desarrollan un procedimiento de cálculo para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud basado en el análisis térmico del proceso de enfriamiento del mineral a escala piloto. Estos autores omiten la transferencia de calor por radiación en el interior del cilindro, realizan algunas suposiciones que resultan importantes en el análisis térmico del proceso.

Góngora (2007), expone las ecuaciones que conforman el modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales y la fundamentación científica sobre la cual fueron obtenidas. La modelación se basa principalmente en el planteamiento de las ecuaciones del balance energético en forma dinámica de lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, las cuales se complementan con otras ecuaciones que establecen la relación entre los coeficientes y parámetros físicos.

Londrez (2007), aunque utiliza una conductividad térmica del mineral superior a la que es en realidad, logró un perfil aproximado de temperatura que describe el comportamiento del proceso de transferencia de calor desde el mineral al agua de la piscina, obteniéndolo a través de la simulación de las temperaturas del mineral a la salida del enfriador para diferentes flujos.

Lamorú (2008), estableció el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica de la instalación a escala piloto, haciendo uso del procedimiento de cálculo expuesto por Tabera y García (2006), realizó su cálculo con una data experimental significativa, determinó la eficiencia térmica del proceso y el flujo de agua óptimo para que la instalación trabaje de forma más eficiente.

Echeverría (2009), caracterizó la microestructura del material del cilindro del enfriador de mineral reducido y realizó un análisis tenso-deformacional, demostrando que existen cambios en la estructura del material, en el tamaño de los granos así como una nueva disposición en la red cristalina. Realizó ensayos de dureza y microdureza al material, demostrando que existe un incremento de dureza en el tramo de la entrada del enfriador en relación al de la salida, los cuales están dados por las altas temperaturas (por encima de 727°C) a la entrada del enfriador.

Góngora; et. al (2009), realizaron una investigación, a escala piloto, en los enfriadores de mineral reducido, para ello registraron los valores de temperatura del agua, del flujo y la temperatura del mineral, tanto a la entrada como a la salida de la instalación, para valores de flujos de 10 y 19 l/min . Obteniendo el procedimiento de cálculo para determinar los coeficientes superficiales de transferencia de calor por unidad de longitud.

La revisión bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática surgida, en su mayoría aborda elementos aislados del proceso de transferencia de masa y calor. Algunas de las investigaciones y artículos consultados tratan temas relacionados con la modelación matemática y simulación de intercambiadores de calor, pero muy pocas simulan por el método de Elementos Finitos. Solo se pudo consultar un trabajo que se realizó mediante la simulación por método de Elementos Finitos a los intercambiadores de calor horizontal rotatorios de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" en los cuales se encuentra el proceso objeto de estudio de la investigación en curso, el mismo tiene como principales deficiencias que la simulación solo se realiza haciendo un corte lateral del enfriador de mineral y que reutiliza una conductividad térmica del mineral que no es la correcta. Esto impone la necesidad de ejecutar una investigación que

contribuya a la mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en las industrias del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

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

El objetivo que se persigue en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico; haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello se 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 que son los equipos 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 6, 8, 10, 12 y 15 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es facilitada 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 (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas, los cuales mediante la rotación del eje central son encargados de facilitar el traslado de 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 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electrofiltro 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 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.

#### **1.4. 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 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 el cual está sumergido el enfriador. Debiendo disminuir la temperatura del mineral por debajo de 473 K (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 minutos. La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 343 K (70°C) a 358 K (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 textolita.

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>.

### **1.5. Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento de mineral**

Actualmente el proceso de enfriamiento de mineral reducido en la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" esta atravesando por su primera etapa desde el punto de vista de su automatización y control, pues sólo mide y registra algunos parámetros del proceso, para esto se usa un sistema de supervisión y control de procesos CITECT (Ver Anexo 2).

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

PARÁMETRO: Flujo de mineral alimentando el enfriador.

EQUIPO: Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

---

Alimentación	220 V AC
Entrada	0 – 18 t/h
Salida	4 – 20 mA

PARÁMETRO: Temperatura del mineral a la entrada y salida del enfriador.

EQUIPO: Termómetro de resistencia PT-100 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 873 K

Cabezal de conexión tipo B, construido de material ligero, para alojar un convertidor.

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 – 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, no smart, modelo SITRANS P serie HK.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Alcance de medida ajustable 2,5 - 25 kPa

Margen de medida ajustado 0 - 15 kPa

Precisión mejor que el 1 % incluido la histéresis y la repetibilidad.

---

Rangeabilidad	1 - 10
Indicador local incorporado, analógico	escala 0 - 100 %
Conexión eléctrica	conector HAN 7D

PARÁMETRO: Velocidad de rotación del enfriador

EQUIPO: Tacogenerador.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

0 – 8,0 rev/min.    0 – 10 V

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

### **1.6. Consecuencias de no enfriar el mineral hasta una temperatura por debajo de 200°C**

- El amoníaco se evapora y sale a la atmósfera por lo que ocurren pérdidas económicas y afecta al medio ambiente.
- Disminuye la eficiencia de la extracción de Níquel.
- La solubilidad del magnesio con el aumento de la temperatura limita la capacidad de extracción de Níquel y Cobalto y lleva impurezas al producto final.

En todos los casos el flujo de calor depende de la variación de la temperatura en el sentido longitudinal del enfriador.

Como puede apreciarse el enfriador de mineral es un objeto de modelación matemática complejo con una serie de parámetros de entrada y de salida los cuales se encuentran en una compleja interdependencia.

### **1.7. Conclusiones del capítulo I**

- Se consultaron diferentes bibliografías, en las cuales se observa que se han hecho muy pocas simulaciones por el método de Elementos Finitos a intercambiadores de calor horizontales.
- Se presentaron las principales deficiencias de las investigaciones consultadas que tratan aspectos relacionados con el tema.
- En el estado que se encuentra el proceso de automatización del proceso de enfriamiento de mineral, evidencia que no existe un sistema de control integral y el mismo está limitando a solo algunas mediciones de control aisladas.

## **CAPÍTULO II: TEORÍA BÁSICA PARA LA MODELACIÓN Y LA SIMULACION EN PROCESOS TÉRMICOS Y DE FLUJO**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se dan a conocer los principios generales del análisis de procesos mediante la simulación. Se expone la teoría básica para la simulación de procesos térmicos y de flujo. Se presenta una explicación de los fundamentos teóricos del método de Elementos Finitos.

### **2.2. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación.**

La combinación de la computadora y software profesionales conforman la simulación digital, que es una herramienta capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Actualmente se han obtenido experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: ANSYS, COSMOS DESIGN, y MATLAB. La simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

**Simulación:** es el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo matemático se tendrá la simulación matemática, en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico.

**Modelo matemático:** es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados cuantitativos precisos.

Para construir un modelo matemático que presente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que constituyen el modelo. Estas ecuaciones son luego trabajadas para predecir qué efecto se logrará sobre el proceso al tomar los valores deseados en las variables de interés.

Para obtener el modelo matemático que represente el proceso que está siendo investigado es necesario seguir una trayectoria bien definida y desglosada en diferentes pasos adecuadamente ordenados los cuales constituyan un enfoque lógico y consistente. El tipo de estructura matemática se utilizará acorde al nivel de detalles del proceso que se representa, y debe ser el resultado de un compromiso entre la complejidad que tenga dicha descripción matemática al abarcar numerosos detalles del proceso y la simplicidad matemática requerida para un fácil y adecuado trabajo del modelo en su aplicación.

## **2.3. Método de Elementos Finitos aplicados a problemas térmicos y de flujos**

### **2.3.1. Antecedentes históricos**

El desarrollo y éxito del método de Elementos Finitos se expande con el creciente desempeño de las computadoras digitales. Los geómetras antiguos ya habían empleado los "Elementos Finitos" para determinar un valor aproximado de  $\pi$ . Arquímedes usó ideas similares para determinar el área de figuras planas. Este hecho dio una premisa para el desarrollo del cálculo integral por Newton y Leibniz dos mil años después.

Walter Ritz (1878–1909), físico suizo fue el primero en formalizar el método de Elementos Finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número de "elementos". Ritz desarrolló la formulación matemática del método de Elementos Finitos, con base en el cálculo variacional. El método de Ritz es también conocido como variacional o formulación clásica.

La incorporación del cálculo matricial al método de Elementos Finitos fue propuesta por el ingeniero ruso Boris G. Galerkin (1871-1945). Galerkin publicó sus primeros trabajos en base al método clásico durante su prisión en 1906 por orden del zar en la Rusia prerrevolucionaria. En muchos textos rusos el método de Elementos Finitos de Galerkin se conoce como método de Bubnov-Galerkin. Él publicó un trabajo usando esta idea en 1915. El método también fue atribuido a Bubnov en 1913.

La aplicabilidad del método de Elementos Finitos fue detenida por lo extenso de los cálculos necesarios para resolver un sistema de un considerable número de elementos finitos. El desarrollo de los computadores digitales durante la década de 1950, permitió la aplicación del método de elementos finitos a la solución de ecuaciones diferenciales.

El uso moderno de los Elementos Finitos inició en el campo de ingeniería de estructuras en 1950, para que luego los conceptos básicos fueran reconocidos de amplia aplicabilidad y prontamente empleados en muchas otras áreas. El subsecuente desarrollo ha sido vertiginoso y ahora el método está bien establecido dentro de varias disciplinas científicas.

Recientemente en adición a las formulaciones de Ritz y Galerkin, otros métodos han venido a emplearse. Los más conocidos son el método de los mínimos cuadrados y un método conocido como método directo, método de balance global o método de Oden. Como se ha indicado, existen cuatro formulaciones del método de Elementos Finitos, todas orientadas a la solución de la ecuación diferencial:

$$\Delta\phi = f \quad (2.1)$$

- Formulación variacional o de Ritz.
- Formulación matricial o de Galerkin.
- Formulación de mínimos cuadrados.
- Formulación global o de Oden.

De ellos los más utilizados son el método variacional de Ritz y la formulación matricial o de Galerkin.

### **Método de Galerkin.**

El método matricial de Galerkin se basa en el método variacional de Ritz. El procedimiento básico es el siguiente:

- I. Discretización del dominio.
- II. Aproximación por elementos finitos.
- III. Ensamblamiento.

### **I. Discretización del dominio.**

- La región donde interesa la solución se divide en un número determinado de elementos.
- Dependiendo si el problema es en una, dos o tres dimensiones la región puede dividirse en segmentos, triángulos, rectángulos o paralelepípedos.
- Los vértices de cada elemento se denominan nodos.

### **II. Aproximación por elementos finitos.**

- En toda la región y por tanto en cada elemento rige la ecuación diferencial o integral.
- Se obtiene el funcional variacional de Ritz en cada elemento.
- Se aproxima la solución en cada elemento por un polinomio que luego se reemplaza en el funcional de Ritz.

### **III. Ensamblamiento.**

- Se obtiene el funcional total de Ritz y se encuentra el mínimo.
- El mínimo del funcional corresponde a la solución del problema.
- Dependiendo si se trabaja en una, dos o tres dimensiones la forma de los elementos finitos es diferente.

#### **2.3.2. Fundamentos teóricos del método de Elementos Finitos**

Los conceptos teóricos básicos de las herramientas de cálculo mediante el método de Elementos Finitos, representan problemas físicos que pueden ser expresados mediante alguna de las siguientes ecuaciones:

$$[K](q) = \{f\} \quad (2.2)$$

$$[C](q_1) + [K](q) = \{f\} \quad (2.3)$$

$$[M](q_2) + [C](q_1) + [K](q) = \{f\} \quad (2.4)$$

Donde:

$[K]$  → Matriz de rigidez

$[C]$  → Matriz de amortiguamiento

$[M]$  → Matriz de masa

$(q)$  → Vector de desplazamientos nodales

$(\dot{q}_1)$  → Vector de velocidades nodales

$(\ddot{q}_2)$  → Vector de aceleraciones nodales

$\{f\}$  → Vector de fuerzas externas

En general, el método de Elementos Finitos, puede resumirse dentro de los siguientes pasos:

1°.- A partir de la realidad física de la estructura, sus apoyos y tipos de carga que actúen sobre ella, es necesario primeramente seleccionar un modelo matemático apropiado para describir el comportamiento de la estructura. También hay que definir con detalle las propiedades mecánicas de los materiales y el carácter de la deformación de la misma (pequeños o grandes desplazamientos, análisis estático o dinámico, etc.) Asimismo, para el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio, se hará uso de las diferentes teorías establecidas.

2°.- Una vez seleccionado el modelo matemático se procede a discretizar la estructura en porciones no intersectantes entre sí denominadas "elementos finitos", dentro de los cuales se interpolan las variables principales en función de sus valores en una serie de puntos discretos del elemento denominados "nodos". Los elementos se conectan entre sí por nodos situados en sus contornos. Esta etapa de discretización constituye una parte esencial de la fase de preproceso que incluye la representación gráfica de la malla de elementos finitos.

3°.- A partir de las teorías para el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio se obtendrán las matrices de rigidez  $\mathbf{K}$  (e) y el vector de cargas  $\mathbf{f}$  (e) para cada elemento.

4°.- Se procede a ensamblar las matrices de rigidez y el vector de carga elemental en la matriz de rigidez global de toda la malla de elementos finitos  $\mathbf{K}$  y el vector de cargas sobre los nodos  $\mathbf{f}$ , respectivamente.

5°.- El sistema de ecuaciones resultante  $\mathbf{Kq} = \mathbf{f}$  se resuelve para calcular las variables incógnitas (desplazamientos de todos los nodos de la malla)  $\mathbf{q}$ , utilizando uno, cualquiera, de los métodos conocidos para la solución de ecuaciones algebraicas simultáneas lineales.

6°.- Una vez calculados los movimientos nodales se pueden calcular las deformaciones y, seguidamente, las tensiones en cada elemento, así como las reacciones en los nodos con movimientos prescritos.

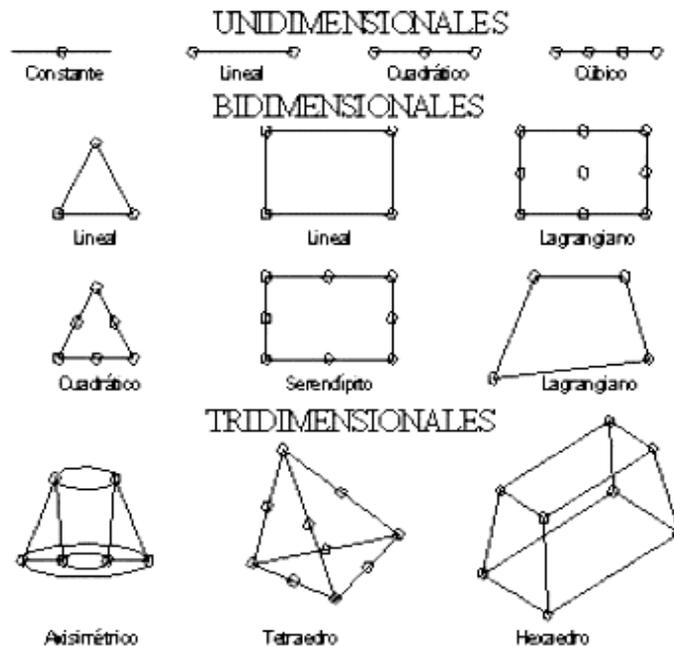
7°.- Obtenidos los resultados, la etapa siguiente es la interpretación y presentación de los mismos. Para ello suelen usarse las presentaciones gráficas de la misma herramienta informática en uso.

#### **2.3.2.1. Etapas de Aplicación**

La estructura básica de los programas de aplicación del elemento finito al cálculo directo de estructuras, consta de tres módulos principales:

**Pre-proceso:** etapa en la cual se define el problema a resolver mediante las siguientes etapas:

Selección del Tipo de elemento finito, dentro de las librerías de los software se encuentra una gran variedad de tipos de elementos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, con los cuales se simulan barras, vigas, cáscaras, placas, elementos sólidos, y fluidos. Ver figura 2.1.



**Figura 2.1:** Tipos de elementos.

Selección de las características geométricas y mecánicas del material, en esta etapa son asignados alturas, momentos de inercia, espesores, áreas transversales, módulos de elasticidad, coeficiente de Poisson, etc, para cada tipo de elemento.

Creación de la geometría del modelo, debe representar lo más fielmente al modelo físico en estudio, obligando a la herramienta informática en uso a presentar facilidad de generación de geometrías complejas tales como partes curvas del casco, en general todo parte de la base de generar una serie de puntos (nodos) que componen el modelo, definido en un sistema de coordenadas ya establecido, para posteriormente generar superficies y luego sólidos, dependiendo del modelo, ya que en algunos casos basta solo con superficies.

**Solución:** Durante la fase de solución se asigna el tipo de análisis aplicado a la estructura, las condiciones de contorno del modelo, las cargas aplicadas, y por último se procede a resolver los sistemas de ecuaciones resultantes de la etapa anterior. Dentro de los tipos de análisis se pueden destacar:

Análisis estático, determina desplazamientos, tensiones, deformaciones, etc. en la estructura analizada.

Análisis modal, incluye la determinación de frecuencias naturales y modos de vibración

Análisis armónicos, usado para determinar la respuesta de una estructura sometida a cargas que varían armónicamente en el tiempo.

Análisis de pandeo, usado para calcular cargas críticas y deformaciones debidas a pandeo.

En el caso de las condiciones de contorno, éstas son restricciones de desplazamientos y rotaciones que se aplican a la matriz de rigidez completa resultante, la cual relaciona las cargas aplicadas al sólido elástico con los desplazamientos.

**Post-proceso:** La etapa de post-proceso e interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la etapa de solución es de gran importancia, ya que no necesariamente los resultados obtenidos son correctos. Dentro de la función del ingeniero, la acertada interpretación de la enorme cantidad de información que entregan las herramientas informáticas será preponderante a la hora de diferenciar un buen diseño de otro realizado deficientemente.

La aplicación correcta del método de Elemento Finitos requiere de:

- Desarrollar una estrategia global para la creación del modelo,
- Tener un conocimiento a priori de la estructura a analizar,
- Comparar el comportamiento de la estructura idealizada con el comportamiento esperado de la estructura real.

### **2.3.3. Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos**

El método de Elementos Finitos permite a los ingenieros obtener información de objetos de formas complicadas bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo entre atrás). Permite resolver problemas en estado estacionario o dependientes del tiempo, lineales o no lineales: Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden además considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura. A nivel empresarial las ventajas del método son notorias: la etapa de desarrollo de un producto se acorta, se

pueden identificar problemas de diseño antes de fabricar un producto, se reducen las etapas de prueba y error en el diseño de un nuevo producto, entre otras.

La principal limitación del método de Elementos Finitos radica en que la precisión los resultados depende de la densidad de elementos utilizados. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.

## 2.4. Principios de Flujo de calor

### 2.4.1. Conducción y Convección

La ley de Fourier en el análisis térmico se usa para relacionar el vector flujo de calor a los gradientes térmicos.

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (2.5)$$

Donde:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$[D]$  = Matriz de conductividad

$\{q\}$  = El vector flujo de calor

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  = conductividad térmica del elemento en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , respectivamente (W/m.K)

$T$  = temperatura,  $T(x,y,z,t)$

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \text{Vector operador}$$

Combinando la ley de Fourier con la primera ley de la termodinámica se obtiene:

$$\rho \cdot c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\}T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\}T) + \ddot{q} \quad (2.7)$$

Donde:

$\rho$  = densidad, kg/m<sup>3</sup>

$c$  = calor específico, kJ/kg\*K

$t$  = tiempo, s

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} = \text{Vector velocidad para el transporte másico}$$

$\ddot{q}$  = Vector flujo de calor generado por unidad de volumen

Expresando la ecuación 3.3 en su forma más familiar se obtiene:

$$\rho \cdot c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Las condiciones de fronteras a tener en cuenta en el análisis térmico son las siguientes:

1. Se conoce la temperatura que actúa sobre la superficie  $S_1$ .

$$T = T^* \quad (2.9)$$

Donde  $T^*$  es la temperatura superficial, K

2. Se conoce el flujo de calor que actúa sobre la superficie  $S_2$ .

$$[q]^T \{\eta\} = -q^* \quad (2.10)$$

Donde:

$\{\eta\}$  = vector normal externo unitario.

$q^*$  = flujo de calor conocido, W

3. Se conoce la transferencia de calor por convección superficial actuando sobre la superficie  $S_3$  (Ley de Newton de enfriamiento):

$$\{q\}^T \{\eta\} = h_f (T_S - T_B) \quad (2.11)$$

Donde:

$h_f$  = Coeficiente pelicular, W/m<sup>2</sup>\*K . Evaluado a  $(T_B + T_S)/2$  a menos que se especifique otra condición para el elemento.

$T_B$  = Temperatura del fluido adyacente, K

$T_S$  = Temperatura en la superficie del modelo, K

#### 2.4.2. Radiación

El intercambio de energía radiante entre las superficies vecinas de una región o entre una región y los alrededores pueden producir grandes efectos en el análisis general de la transferencia de calor. Aunque los efectos de la radiación en la transferencia de calor generalmente influyen a través de las condiciones límites, la interrelación se hace más fuerte debido a la dependencia no lineal de la radiación de la temperatura de la superficie.

Para un sistema de dos superficies la transferencia de calor se expresa por la siguiente expresión:

$$Q_i = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.12)$$

Donde:

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman

$\varepsilon_i$  = emisividad efectiva

$F_{ij}$  = factor de visión por radiación

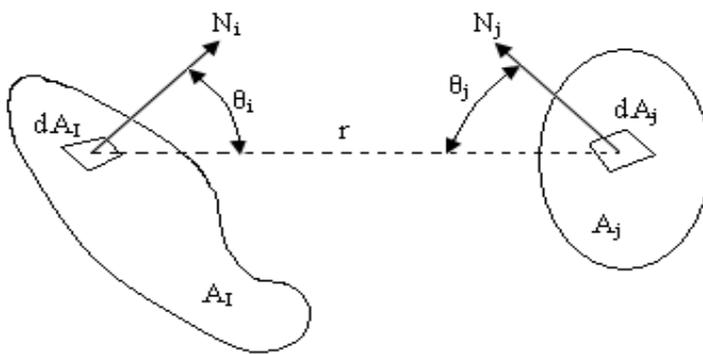
$A_i$  = área de la superficie i

$Q_i$  = pérdida de energía de la superficie i

$T_i, T_j$  = temperatura absoluta en la superficie i y j, respectivamente

### 2.4.2.1. Factores de visión

El factor de visión ( $F_{ij}$ ) se define como la fracción de energía radiante que deja (i) y llega directamente a la superficie (j), como se observa en la **figura 2.1** Este puede expresarse por la ecuación siguiente:



**Figura 2.2:** Intercambio de radiación entre superficie.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot r^2} d(A_j) \cdot d(A_i) \quad (2.13)$$

Donde:

$A_i, A_j$  = área de superficie i y j

$r$  = distancia entre la superficie diferencial i y j

$\theta_i$  = Angulo entre  $N_i$  y el radio lineal para la superficie  $d(A_j)$

$\theta_j$  = Angulo entre  $N_j$  y el radio lineal para la superficie  $d(A_i)$

$N_i, N_j$  = superficie normal de  $d(A_i)$  y  $d(A_j)$

## 2.5. Condiciones de fronteras a tener en cuenta en el análisis térmico

### 1. Se conoce la temperatura que actúa sobre la superficie $S_1$ .

$$T = T^* \quad (2.14)$$

Donde  $T^*$  es la temperatura superficial, K

**2. Se conoce el flujo de calor que actúa sobre la superficie  $S_2$ .**

$$[q]^T \{\eta\} = -q^* \quad (2.15)$$

Donde:

$\{\eta\}$  = vector normal externo unitario.

$q^*$  = flujo de calor conocido, W

**3. Se conoce la transferencia de calor por convección superficial actuando sobre la superficie  $S_3$  (Ley de Newton de enfriamiento):**

$$\{q\}^T \{\eta\} = h_f (T_S - T_B) \quad (2.16)$$

Donde:

$h_f$  = Coeficiente pelicular, W/m.K. Evaluado a  $(T_B + T_S)/2$  a menos que se especifique otra condición para el elemento.

$T_B$  = Temperatura del fluido adyacente, K

$T_S$  = Temperatura en la superficie del modelo, K

**2.6. Notación del flujo de calor en matrices**

Como se planteó anteriormente la variable  $T$  varía en el espacio y el tiempo. Esta dependencia está expresada como:

$$T = \{N\}^T \{T_e\} \quad (2.17)$$

Donde:

$T = T(x,y,z,t)$  = temperatura

$\{N\} = \{N(x,y,z)\}$  = funciones de forma del elemento

$\{T_e\} = \{T_e(t)\}$  = vector de temperatura nodal del elemento

Así la derivada del tiempo de la ecuación 2.11 pueden escribirse como:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{\dot{T}_e\} \quad (2.18)$$

En esta última ecuación tiene la misma forma de  $T$ :

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\} \quad (2.19)$$

La combinación  $\{L\} T$  es escrito como:

$$\{L\}T = [B]\{T_e\} \quad (2.20)$$

Donde:  $[B] = \{L\}\{N\}^T$

Ahora, el estado variacional y la notación del flujo de calor en matrices puede expresarse por la ecuación:

$$[C_e^t]\{\dot{T}_e\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tm}] + [K_e^{tc}])\{T_e\} = \{Q_e\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \quad (2.21)$$

Donde:

$$[C_e^t] = \rho \int_{vol} c \{N\}\{N\}^T d(vol) = \text{Matriz del calor específico del elemento.}$$

$$[K_e^{tm}] = \rho \int_{vol} c \{N\}\{V\}^T [B] d(vol) = \text{Matriz de transporte de masa del elemento.}$$

$$[K_e^{tb}] = \int_{vol} [B]^T [D][B] d(vol) = \text{Matriz de difusión en el elemento.}$$

$$[K_e^{tc}] = \int_{S_3} h_f \{N\}\{N\}^T d(S_3) = \text{Matriz de convección superficial en el elemento.}$$

$$\{Q_e^f\} = \int_{S_2} \{N\} \cdot q^* \cdot d(S_2) = \text{Vector de flujo másico en el elemento.}$$

$$\{Q_e^c\} = \int_{S_3} T_B \cdot h_f \{N\} \cdot d(S_3) = \text{Vector flujo de calor para la convección superficial del elemento.}$$

$$\{Q_e^g\} = \int_{vol} \ddot{q} \{N\} d(vol) = \text{Generación de calor en el elemento}$$

Comentarios sobre las modificaciones anteriores:

1.  $[K_e^{tm}]$  no es simétrico
2.  $[K_e^{tc}]$  Se calcula como se definió anteriormente, sólo para SOLID90. Todos los otros elementos usan una matriz diagonal, con las condiciones diagonales definidas por el vector  $\int_{S_3} h_f \{N\} \cdot d(S_3)$ .
3.  $[C_e^t]$  es frecuentemente en la diagonal.

Evaluaciones de flujo de calor.

Punto de integración

Los gradientes térmicos del elemento en los puntos de integración son:

$$\{a\} = \{L\}T = \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \quad \frac{\partial T}{\partial y} \quad \frac{\partial T}{\partial z} \right]^T \quad (2.22)$$

Donde:

{a} = vector gradiente térmico (se denota como TG).

{L} = vector operador.

T = temperatura.

Usando la forma de funciones, la Ecuación 3.16 puede escribirse como:

$$\{a\} = [B]\{T_e\} \quad (2.23)$$

Donde:

[B] = matriz derivativa de la función, evaluada en el punto de integración.

{Te} = vector de temperatura nodal del elemento.

Entonces, el vector flujo de calor en los puntos de integración puede calcularse a partir de los gradientes térmicos:

$$\{q\} = -[D]\{a\} = -[D][B]\{T_e\} \quad (2.24)$$

Donde:

{q} = vector flujo de calor (se denota como TF).

[D] = matriz de conductividad.

El flujo de calor por convección como variable de salida puede calcularse por la expresión:

$$q^c = h_f(T_s - T_B) \quad (2.25)$$

Donde:

$q^c$  = flujo de calor por unidad de área debido a la convección.

$h_f$  = coeficiente pelicular.

$T_S$  = temperatura en la superficie del modelo.

$T_B$  = temperatura media del fluido adyacente.

## 2.7. Método de la matriz en el análisis de la radiación

El método de la matriz en la radiación para un sistema de dos superficies radiando puede expresarse como:

$$Q_i = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) (T_i - T_j) \quad (2.26)$$

También se puede emplear la ecuación 2.21.

$$Q_i = K^1 (T_i + T_j) \quad (2.27)$$

Donde:

$$K^1 = \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot F_{ij} \cdot A_i (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j)$$

$K^1$  no puede calcularse directamente ya que es una función de las variables desconocidas  $T_i$  y  $T_j$ . Las temperaturas a partir de iteraciones previas se usan para calcular  $K^1$  y la solución se obtiene varias veces.

## 2.8. Flujo de fluido

Los problemas de flujo fluido se definen por las leyes de conservación de la masa, momentum y energía. Estas leyes se expresan en términos de ecuaciones diferenciales parciales los que son discretizados con una técnica basada en elementos finitos.

Para el análisis es necesario asumir lo siguiente:

1. Flujos de una sola fase.
2. El usuario debe determinar: (a) si el problema es laminar (por defecto) o turbulento; (b) si el fluido es incompresible (por defecto) o si es compresible  $\zeta$ .

### 2.8.1. Ecuación de continuidad

De la ley de conservación de la masa la ecuación de continuidad queda expresada como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.28)$$

Donde:

$V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$  = componentes del vector de velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , respectivamente.

$\rho$  = densidad,  $\text{kg/m}^3$

$x$ ,  $y$ ,  $z$  = coordenadas cartesianas globales.

$t$  = tiempo,  $s$

El cambio de la densidad puede reemplazarse por la relación de cambio de presión, es decir la rapidez en la cual la densidad cambia con la presión:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.29)$$

Donde:

$P$  = presión,  $\text{N/m}^2$

La evaluación de la derivada de la densidad con respecto a la presión se obtiene a partir de la ecuación de estado. Si se asumen las propiedades del gas ideal.

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{R \cdot T} \quad (2.30)$$

Donde:

$R$  = Constante de los gases.

$T$  = Temperatura,  $K$

### 2.8.2. Ecuación de Momentum

En un fluido Newtoniano, la relación entre las tensiones y la deformación del fluido es:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.31)$$

Donde:

$\tau_{ij}$  = tensiones tangenciales.

$u_i$  = velocidades ortogonales ( $u_1 = V_x$ ,  $u_2 = V_y$ ,  $u_3 = V_z$ ).

$\mu$  = coeficiente dinámico de viscosidad.

$\lambda$  = segundo coeficiente de viscosidad.

El último término de la ecuación, el producto del segundo coeficiente de viscosidad y la diferencia de la velocidad, es cero para un fluido de densidad constante y es considerado pequeño un fluido comprimible.

Las ecuaciones de momentum, sin consideraciones con respecto a las propiedades, se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} \\ + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &+ T_x \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_y)}{\partial z} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} \\ + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &+ T_y \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_z)}{\partial z} &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} \\ + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &+ T_z \end{aligned} \quad (2.34)$$

Donde:

$g_x, g_y, g_z$  = los componentes de la aceleración debido a la gravedad.

$\rho$  = densidad.

$\mu_e$  = viscosidad efectiva.

$R_x, R_y, R_z$  = resistencias distribuidas.

$T_x, T_y, T_z$  = condiciones de pérdidas viscosas.

En caso del flujo laminar, la viscosidad se toma como la viscosidad dinámica, una propiedad del fluido. La viscosidad eficaz para un modelo de flujo turbulento se describe más adelante.

Los términos  $R_x, R_y, R_z$  representan fuentes que el usuario puede agregar. Un ejemplo es el flujo a través de un medio poroso.

Los términos  $T_x, T_y$  y  $T_z$  son pérdidas viscosas que no se tienen en cuenta en los flujos incompresibles, el caso de flujos con propiedades constantes. Reduciendo la ecuación de momentum se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) - T_x = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) - T_y = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - T_z = 0 \quad (2.37)$$

La conservación de energía puede expresarse en términos de temperatura en flujos de alta compresibilidad o en términos de temperatura estática apropiado para el análisis de flujos incompresibles.

Ecuación de Energía en flujos compresibles.

La ecuación de energía en flujos compresibles con transferencia de calor se resuelve

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot C_p \cdot T_o) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot V_x \cdot C_p \cdot T_o) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot V_y \cdot C_p \cdot T_o) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot V_z \cdot C_p \cdot T_o) = \\ \text{por:} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T_o}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) + W^v + E^k + Q_v + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Donde:

$C_p$  = calor específico.

$T_o$  = temperatura total.

$K$  = conductividad térmica.

$Q_v$  = fuente de calor volumétrica.

$\Phi$  = generación de calor en medios viscosos.

$E^k$  = energía cinética.

La temperatura estacionaria se calcula de la temperatura total a partir de la ecuación:

$$T = T_o - \frac{V^2}{2C_p} \quad (2.39)$$

Donde:

$T$  = temperatura estacionaria.

$v$  = magnitud del vector de velocidad fluido.

El término de trabajo viscoso usando la tensión tangencial es:

$$W^v = U_j \mu \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad (2.40)$$

Donde la repetición de los subíndices implica una suma sobre las tres direcciones ortogonales.

La energía cinética se calcula por la siguiente ecuación:

$$E^k = -\frac{\partial}{\partial X} \left[ \frac{K}{C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K}{C_p} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ \frac{K}{C_p} \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{1}{2} |V^2| \right) \right] \quad (2.41)$$

Finalmente el término de disipación viscosa en la notación tangencial.

$$\Phi = \mu \left[ \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad (2.42)$$

### 2.8.3. Ecuación de Energía Incompresible

La ecuación de energía para el caso de flujo incompresible se puede obtener del análisis de flujos compresibles omitiendo el trabajo viscoso ( $W^V$ ), el trabajo de presión, la dispersión viscosa ( $f$ ), y la energía cinética ( $E^K$ ). Cuando se omite la energía cinética, la temperatura estacionaria ( $T$ ) y la temperatura total ( $T_0$ ) es la misma. La ecuación de energía se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot V_x \cdot C_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot V_y \cdot C_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot V_z \cdot C_p \cdot T) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (2.43)$$

### 2.8.4. Turbulencia

Si los efectos inerciales son bastante grandes en comparación con los efectos viscosos, el flujo puede ser turbulento. El usuario es responsable para decidir si el flujo es turbulento.

Si el flujo es turbulento quiere decir que la velocidad instantánea fluctúa en cada punto en el campo de flujo. La velocidad se expresa por su valor medio y una componente de fluctuación.

$$V_x = \overline{V_x} + V'_x \quad (2.44)$$

Donde:

$\overline{V_x}$  = componente medio de velocidad en la dirección x.

$V'_x$  = componente fluctuante de velocidad en dirección x.

## 2.9. Análisis de Fenómenos Térmicos con el uso del ANSYS

En los análisis térmicos se calcula la distribución de temperatura y las cantidades térmicas relacionada en un sistema o componente. Las cantidades térmicas típicas de interés son:

- Las distribuciones de temperaturas.

- La cantidad de calor perdida o ganada.
- Los gradientes térmicos.
- Los flujos térmicos.

Las simulaciones térmicas juegan un papel importante en el diseño de muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la combustión interna en motores, turbinas, intercambiadores de calor, sistemas de tuberías y componentes electrónicos. En muchos casos los ingenieros siguen un análisis térmico con un análisis de tensiones para calcular las tensiones térmicas (es decir, tensiones causadas por expansiones térmicas o contracciones).

### **2.9.1. Modelos térmicos en ANSYS**

Sólo los programas ANSYS: Multi-físico, Mecánico, Profesional y Fortran soportan los análisis térmicos.

La base para el análisis térmico en ANSYS es una ecuación de balance de calor obtenida a partir de los principios de conservación de la energía. La solución se obtiene aplicando el método de elementos finitos para calcular las temperaturas nodales y obtener otros parámetros térmicos.

El programa ANSYS contiene los tres modos primarios de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

#### **2.9.1.1. Convección**

Se especifica la convección como una carga superficial aplicada sobre un elemento sólido o elementos de coraza. Para el cálculo es necesario especificar el coeficiente de convección pelicular y la temperatura en la superficie, entonces ANSYS calcula la transferencia de calor a través de esa superficie. Si el coeficiente pelicular depende de la temperatura, se especifica una tabla de temperaturas junto con los valores correspondientes del coeficiente pelicular temperatura.

Para el uso del método de Elementos Finitos en la convección con elementos de conducción o en el caso en que no se conoce la temperatura del fluido, ANSYS ofrece un elemento de convección nombrado PLANE55 y LINK34. Además se puede usar el

FLOTRAN CFD para simular detalles del proceso de convección, tales como las velocidades del fluido, valores locales del coeficiente pelicular y el flujo de calor, y las distribuciones de temperaturas tanto en fluidos como en las regiones sólidas.

### **2.9.1.2. Conducción**

Para el análisis de problemas de transferencia de calor por conducción ANSYS utiliza los elementos

- LINK32 para conducción lineal en 2d, 2 nodos.
- LINK33 para conducción lineal en 3d, 2 nodos
- LINK34 para conducción lineal en 3d, 2 nodos

### **2.9.1.3. Radiación**

ANSYS puede resolver problemas de radiación, que son no lineales, de cuatro maneras:

- Usando el elemento, LINK31.
- Usando efecto de superficie SURF151 para los modelos en 2D ó SURF152 para los modelos 3D).
- Generando una matriz de radiación con AUX12 y usándolo como un súper elemento en un análisis térmico.
- Usando el método solver para la Radiosidad.

Además de los tres modos de transferencia de calor con el empleo del ANSYS se pueden tratar otros problemas térmicos relacionados con el cambio de fase.

## **2.9.2. Tipos de Análisis Térmico**

ANSYS soporta dos tipos de análisis térmicos:

1. Análisis térmico en estado estacionario donde se determina la distribución de temperatura y otras cantidades térmicas bajo las condiciones de carga en estado estacionario.

2. Análisis térmico transitorio donde se determina la distribución de temperatura y otros parámetros térmicos bajo condiciones que varían en el tiempo.

### 2.9.2.1. Elementos para el análisis térmico

En el ANSYS se incluyen aproximadamente 40 elementos para realizar análisis térmicos. En las tablas que se muestran a continuación se exponen los mismos, se pueden utilizar para el estado estacionario y transitorio.

**Tabla 2.1:** Elementos de barras para la conducción

Elementos	Dimensiones	Formas o características	DOFs
<u>LINK32</u>	2-D	Línea, 2 nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>LINK33</u>	3-D	Línea, 2 nodos	Temperatura (en cada nodo)

**Tabla 2.2:** Elementos sólidos en 2D

Elemento	Dimensión	Forma o característica	DOFs
<u>PLANE35</u>	2-D	Triangulo, 6-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>PLANE55</u>	2-D	Cuadrilátero, 4-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>PLANE75</u>	2-D	Harmónico, 4-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>PLANE77</u>	2-D	Cuadrilátero, 8-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>PLANE78</u>	2-D	Harmónico, 8-nodos	Temperatura (en cada nodo)

**Tabla 2.3.** Elementos sólidos en 3D

Elemento	Dimensión	Forma o característica	DOFs
<u>SOLID70</u>	3-D	Ladrillo, 8-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>SOLID87</u>	3-D	Tetraedro, 10-nodos	Temperatura (en cada nodo)
<u>SOLID90</u>	3-D	Ladrillo, 20-nodos	Temperatura (en cada nodo)

**Tabla 2.4:** Elementos de vínculos para la radiación

Elemento	Dimensión	Forma o característica	DOFs
<u>LINK31</u>	2D o 3D	Línea, 2-nodos	Temperatura (en cada nodo)

**Tabla 2.5:** Elementos de vínculos en la convección

Elementos	Dimensiones	Formas o características	DOFs
<u>LINK34</u>	3-D	Línea, 2-nodos	Temperatura (en cada nodo)

**Tabla 2.6:** Elementos para coraza

Elementos	Dimensiones	Formas o características	DOFs
<u>SHELL57</u>	3-D	Cuadrilátero, 4-nodos	Temperaturas (en cada nodo)
<u>SHELL131</u>	3-D	Cuadrilátero, 4-nodos	temperaturas múltiple (en cada nodo)
<u>SHELL132</u>	3-D	Cuadrilátero, 8-nodos	temperaturas múltiple (en cada nodo)

## 2.10. Conclusiones del capítulo II

- Aparece reflejada una breve reseña histórica del uso del método de Elementos Finitos en el mundo.
- Se establecieron los fundamentos teóricos más importantes para la simulación numérica con el empleo del método de Elementos Finitos.
- Se dieron a conocer las ventajas y desventajas del método de Elementos Finitos.
- Quedaron representadas las etapas de aplicación para la simulación con el programa profesional ANSYS.
- Se expusieron los tipos de análisis térmico sobre los cuales trabaja el programa profesional ANSYS.

## CAPÍTULO III: ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

### 3.1. Introducción

En este capítulo se muestran imágenes de algunas de las simulaciones realizadas a los enfriadores de mineral de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara", con las cuales se da una visión de la variación de temperatura en éstos. Se hace un análisis de los resultados de la simulación por el método de Elementos Finitos del proceso de enfriamiento del mineral laterítico, cuyos resultados son el principal objetivo de análisis en el presente capítulo.

### 3.2. Análisis de los resultados de la simulación por el método de elementos finitos

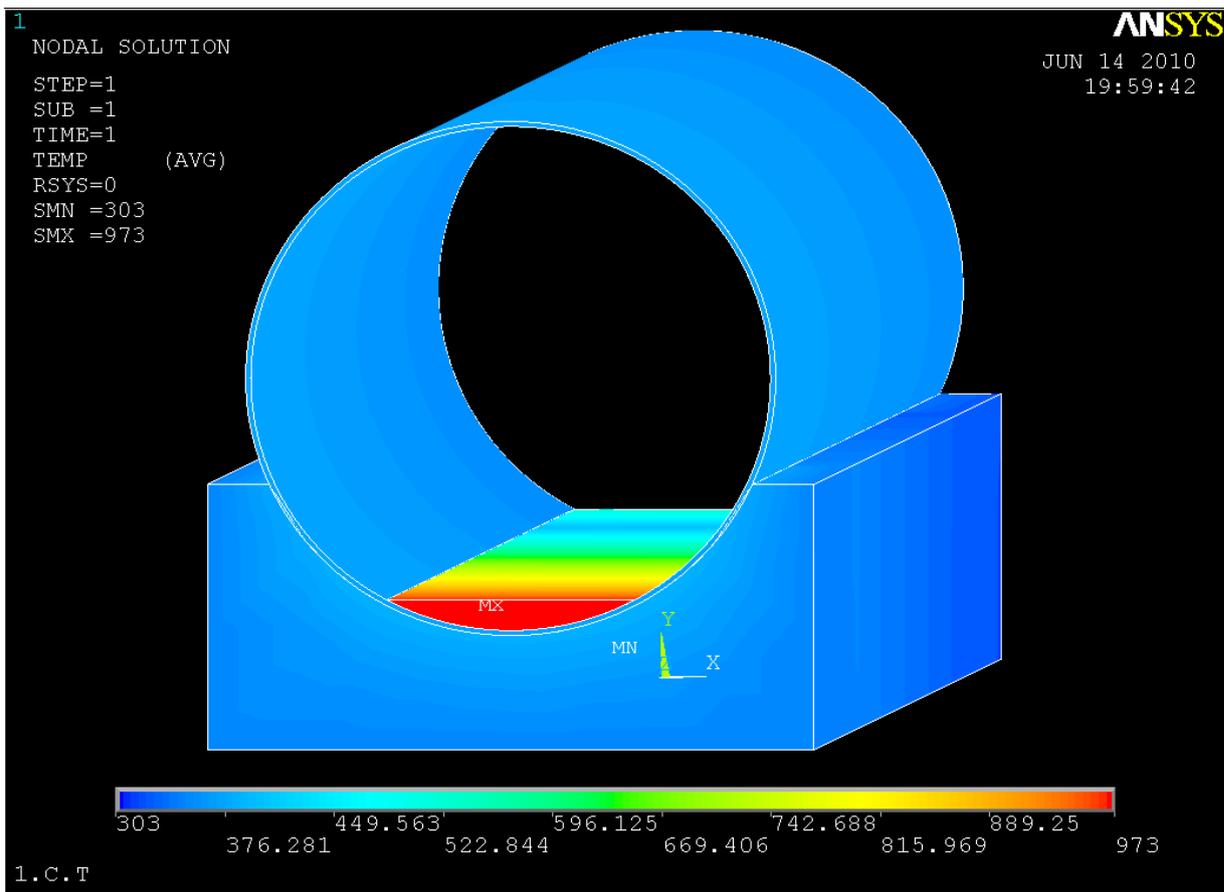
En esta investigación se llevaron a cabo simulaciones de un enfriador de mineral en tres dimensiones. Así como también se hizo un corte lateral del enfriador, tomando como base de estudio el mineral, el enfriador y el agua de la piscina.

Los datos que se utilizaron para efectuar las mismas se tomaron de Londrez (2007) y Osorio (2009) los mismos aparecen reflejados a continuación:

Tabla 3.1: Datos que se utilizaron en la simulación

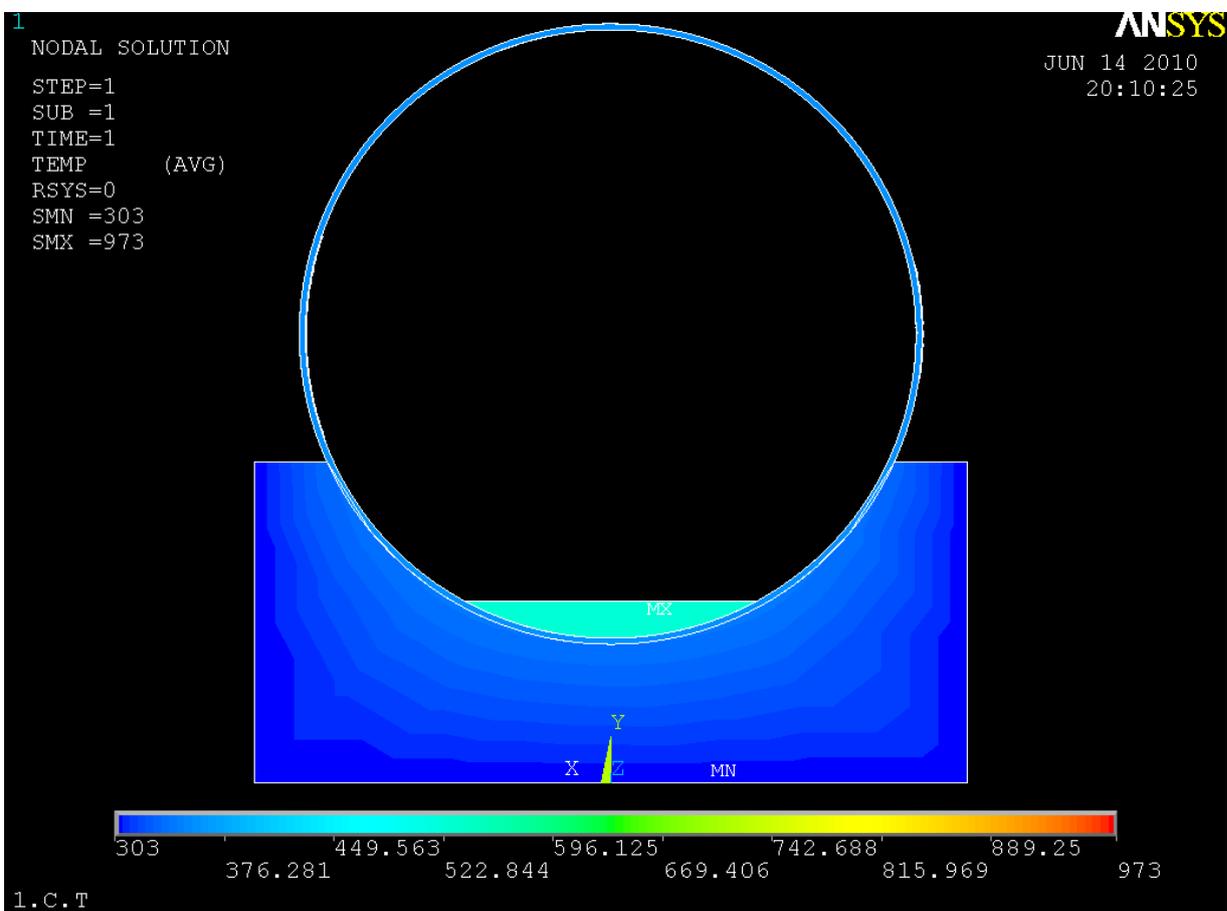
Longitud del enfriador	31 m
Atura del mineral para un flujo de 9.72 kg/s	0.181 m
Espesor del enfriador	0.015 m
Densidad del mineral	3500 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del material del cilindro	7832 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del agua de la piscina	1000 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica del mineral	0.14 W/m*K
Conductividad térmica del material del enfriador	58.7 W/m*K
Conductividad térmica del agua de la piscina	0.668 W/m*K
Temperatura del mineral a la entrada del enfriador	973 K
Temperatura en el agua de la piscina	350 K
Temperatura del mineral a la entrada del enfriador	973 K

La **figura 3.1** representa la simulación en tres dimensiones del proceso de transferencia de calor que ocurre en los enfriadores de mineral reducido de la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara". Observándose como el mineral reducido experimenta variación de su temperatura en aproximadamente unos 450 K (450°C), entrando al cilindro horizontal rotatorio a 973 K (700°C) aproximadamente y saliendo a 523 K (250°C). Esta figura tiene marcada similitud con el proceso real ya que en éste, el mineral no sale a la temperatura de diseño 443 K (170°C) para la cual fueron creados los enfriadores de mineral. Se perciben también las isoterma que describen el proceso de transferencia de calor desde el mineral al agua de la piscina, a la entrada del enfriador, notándose aquí que el agua que está en contacto con la parte inferior del cilindro rotatorio se encuentra a una temperatura de 373 K (100°C) aproximadamente (Ver Anexo 1).



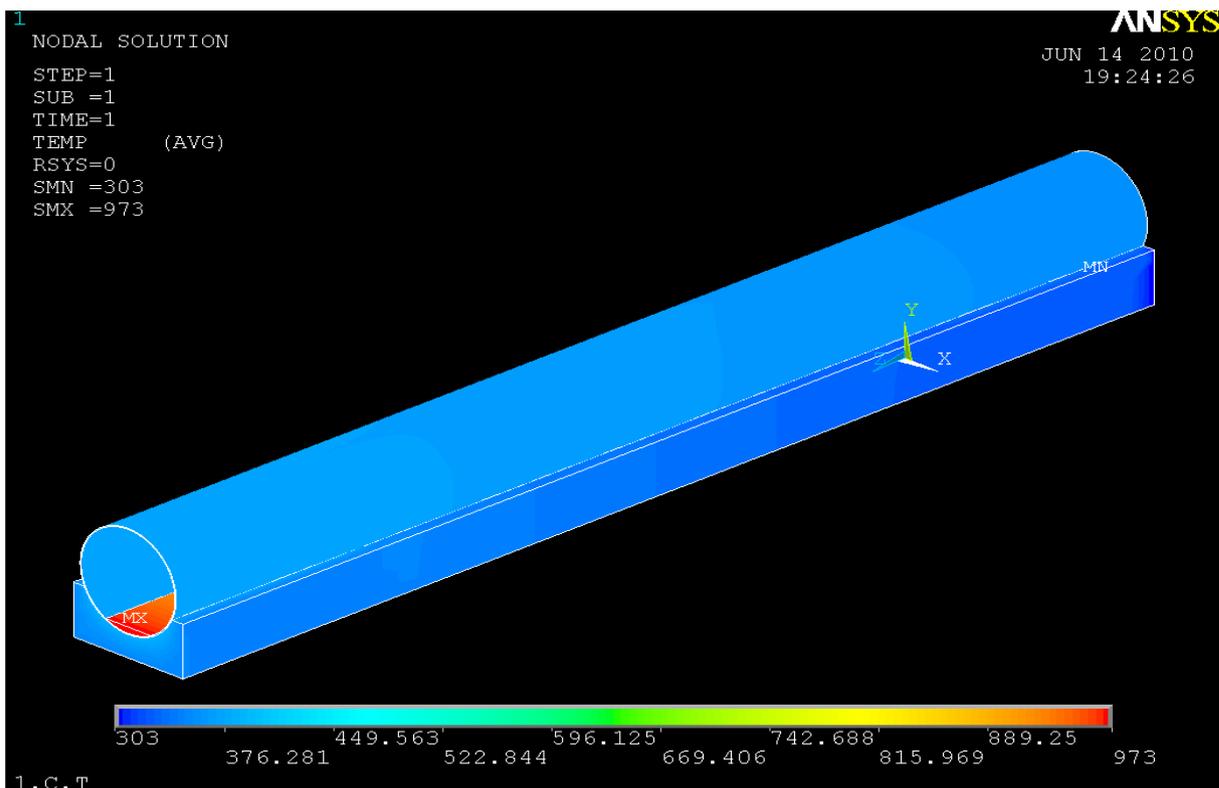
**Figura 3.1:** Distribución de las temperaturas en el mineral cilindro y agua de la piscina (K).

En la **figura 3.2** se puede ver con más claridad la temperatura a la cual se encuentra el mineral a la salida del enfriador, como ya se había expuesto, la misma es de unos 523 K (250°C). Se evidencia también la variación de temperatura del agua cuando la misma entra a la piscina experimentando un cambio de 303 K (30°C) a 344 K (71°C) aproximadamente, esta temperatura es la del agua que se encuentra en contacto con la parte inferior del cilindro. En la parte media del frente de la piscina el agua se encuentra a una temperatura de 330 K (57°C) aproximadamente y la que está próxima a las paredes de la piscina posee unos 315 K (42°C).



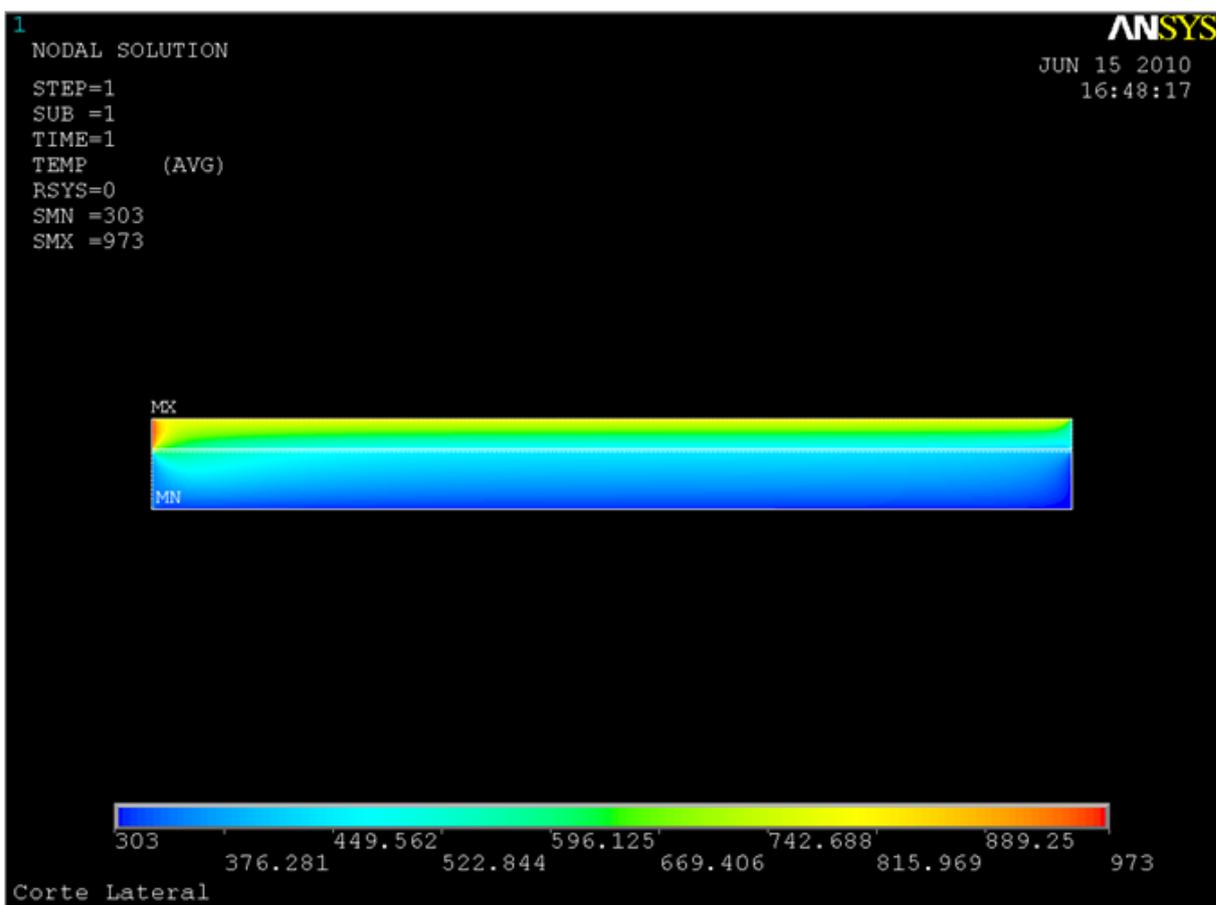
**Figura 3.2** Distribución de temperatura a la salida del enfriador (K).

En la **Figura 3.3** se tiene una vista del cilindro y la piscina mostrando el cambio de temperatura que existe de un extremo a otro en estos. Se nota como el agua de la piscina que está próxima a las paredes de la misma, en la zona cercana a la parte por donde sale el mineral, se halla a una temperatura de 322 K (49°C) aproximadamente, y la que sale de la piscina está a 351 K (78°C); la parte central se encuentra de 334 K (61°C) a unos 340 K (67°C). con estos datos y los que arrojó la **figura 3.2** se puede decir que el agua experimenta un cambio en su temperatura de 48 K (48°C) ya que la misma entra a 303 K (30°C) aproximadamente. En el cilindro se percibe como la temperatura varía desde 371 K (98°C) a la entrada del mineral hasta 364 K (91°C) a la salida del mineral esto ocurre en parte superior del enfriador. En la zona del enfriador que está en contacto con el mineral y con el agua, la temperatura va desde 534 K (261°C) a unos 407 K (134°C).



**Figura 3.3** Distribución de la temperatura a lo largo de la piscina y el cilindro (K).

La **figura 3.4** muestra un corte lateral del mineral, el cilindro y el agua de la piscina, se observa el mineral entrando a una temperatura de 973 K (700°C) y se presencia cómo se va enfriando por capas hasta la temperatura de 523 K (250°C) teniendo una variación de la temperatura más rápida en la capa que se encuentra cerca de la superficie interior del cilindro, y a medida que se va alejando mismo esta variación es más lenta. En la superficie interior y exterior del espesor del enfriador se experimenta una temperatura que prácticamente no varía, ya que el espesor del enfriador es pequeño con respecto a la longitud del mismo. El agua de la parte superior de la piscina se observa que llega a la temperatura de 367 K (97 °C), producto al calor absorbido, se observa que la capa inferior varía poco, esto es debido a que como el intercambio de calor ocurre en la zona de superior de la piscina el agua caliente se mantiene en la superficie y la más fría en la parte baja de la misma.



**Figura 3.4** Distribución de la temperatura a lo largo del mineral y el agua de la piscina (K).

### 3.3. Valoración económica

El análisis de la pérdida de amoníaco que existe actualmente, reflejó que 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, éstas pérdidas se clasifican en:

- Pérdidas por evaporación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ )
- 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 amoníaco, en trabajos investigativos realizados se demostró 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 2131600 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 16787.38 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.

### 3.4. Impacto ambiental

En estos días se realiza un gran esfuerzo en nuestro país por garantizar un uso racional de los recursos naturales. En la empresa "Cmdte. Ernesto Che Guevara" el personal también se esfuerza por minimizar los daños al medio ambiente. Tal es el caso que esta

entidad lleva a la práctica la reforestación popular territorial mediante la siembra de aproximadamente unas 50 000 posturas de árboles maderables y frutales. Se garantiza la mínima emanación de polvo al medio ambiente y también se realizan operaciones para evitar a toda costa los escapes de gases nocivos y contaminantes dentro y fuera de la fábrica. En la planta de horno de reducción se encuentran algunos problemas con la contaminación del medio ambiente. Podemos comenzar a mencionar estos, empezando por la parte de los silos de almacenamiento de mineral debido a que en esta zona se producen emanaciones de polvo, esto ocurre mientras los silos están llenos a su máxima capacidad. La limpieza que se realiza en esta parte de la fábrica es hecha manualmente y es casi nula. Este tipo de contaminación es muy dañina para el hombre produciéndole daños en la piel, ojos y sistema respiratorio pues las partículas entran al cuerpo en mayor medida por las fosas nasales y se alojan en los pulmones. Las partículas con tamaño mayor a los 0.005mm son detenidas por los vellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas en la mucosa que tapiza la las tráqueas y la cavidad nasal. La situación se agrava cuando las partículas son menores a los 0.005mm y se estima que el 50% de éstas penetran al cuerpo quedándose en éste meses y hasta años, degradando la salud del hombre, sin embargo el efecto causado en la vegetación por este tipo de contaminación no es de gran envergadura puede considerarse muy pequeño casi inexistente.

Otro agente contaminante es el ruido provocado por las bombas neumáticas que están instaladas debajo de los silos, las cuales producen ruidos superiores a los 80 db ; incidiendo directamente en la salud del sistema auditivo del trabajador y trayendo como consecuencia la pérdida de la audición.

Por otra parte se produce gran contaminación en la zona de los hornos donde existe gran cantidad de emanaciones de gases debido a la combustión incompleta que se lleva a cabo en estos. Siendo estos grandes destructores de la salud del ser humano y del medio ambiente, también muchos de estos gases van a parar a la atmósfera dañando la capa de ozono.

La contaminación también es provocada por salideros de mineral, en romanas, alimentadores y sinfines de polvo. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y

este es eliminado mediante el soplado con aire (provocando contaminación en el área y en el exterior de la planta).

El agua en la piscina de los enfriadores se contamina con polvo y grasa por los salideros de los sellos del enfriador del mineral y por las grasas de la transmisión del mismo.

### 3.4.1. Caracterización de los impactos ambientales

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta de como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el objeto. En la Tabla 3.2 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

**Tabla 3.2** Identificación de los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Acciones o Actividades	Factores	Impactos
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Derrame de agua		
Evaporación de Amoníaco	Aire	Disminución de la calidad del aire
	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
	Económico	Pérdidas por concepto económico
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de Ruido continuo		Pérdidas de la sensibilidad auditiva

### 3.5. Conclusiones del capítulo III

- Las simulaciones muestran el comportamiento de la temperatura a todo lo largo del enfriador en las diferentes partes que componen el sistema de enfriamiento. El mineral reducido experimenta variación de su temperatura en aproximadamente unos 450 K (450°C), entrando al cilindro horizontal rotatorio a 973 K aproximadamente y saliendo a 523 K (250°C). La temperatura del agua de la piscina experimenta un cambio de 303 K (30°C) a 351 K (78°C) producto al contacto con la parte inferior del cilindro.
- En la superficie interior y exterior del espesor del enfriador la temperatura prácticamente no varía, ya que el espesor del enfriador es pequeño con respecto a su volumen.
- 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 amoníaco, en trabajos investigativos realizados se demostró que existe una pérdida aproximada de 10 t/día . Considerando que el precio actual del amoniaco es 584 CUC/ t, el daño económico para un año de trabajo continuo es 2131600 CUC .

## CONCLUSIONES GENERALES

- Se han realizados pocos trabajos relacionados con la simulación por el método de Elementos Finitos a los enfriadores de mineral reducido de la empresa Cmdte "Ernesto Che Guevara. Solo un trabajo trata la temática utilizando el software profesional ANSYS y se limitó al análisis en el plano, es decir haciendo un corte lateral del enfriador.
- El mineral reducido experimenta variación de su temperatura en aproximadamente unos 450 K (450°C). En la temperatura del agua de la piscina se aprecia aumento de 48 K (48°C). En la parte superior del cilindro horizontal rotatorio la temperatura va desde 371 K (98°C) a 364 K (91°C).
- En la superficie interior y exterior del espesor del enfriador la temperatura prácticamente no varía, ya que el espesor del enfriador es pequeño con respecto a su volumen.
- 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 que se han realizado antes se demostró que existe una pérdida aproximada de 10 t/día . Considerando que el precio actual del amoniaco es 584 CUC/t , el daño económico para un año de trabajo continuo es 2131600 CUC .

## RECOMENDACIONES

- Continuar la búsqueda bibliográfica sobre la temática abordada en este trabajo.
- Seguir implementando el estudio de los procesos de transferencia de calor a través de las simulaciones por el método de Elementos Finitos.
- Obtener el área transversal que ocupa el mineral dentro de los enfriadores y la posición del mismo cuando los cilindros están en movimientos, para así lograr la simulación un enfriador de mineral dándole movimiento al mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ENRICH, A. *Análisis de la Situaciones de la Temperatura en los Tanques de Contactos*. Informe Técnico DT-103/81. E.C.R.R.L. Nicaro 1981.
2. BIRD R, B; STEWART, W, E; LIGHTFOOT, E, N. *Fenómenos de Transporte*. Editorial Reveté, 1982.
3. SEBORG, D, E.; EDGAR, T, F; MELLICHANP, D, A. *Process Dynamics and Control*. John Wile & Sons: New York, 1989
4. FUCHS U, H. *The Dynamics of Heat*, Springer, 1996.
5. VALLE MATOS, M; GARCIA PÉREZ, M; RABELL GGONZÁLEZ, D; MORALES MORALES, Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cde. Ernesto Che Guevara de Moa (I). *Tecnología Química*. 2000a. 20 (1): 70-77.
6. VALLE MATOS, M; GARCIA PÉREZ, M; RABELL GGONZÁLEZ, D; MORALES MORALES, Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cde. Ernesto Che Guevara de Moa (II). *Tecnología Química*. 2000b. 20 (2): 10-15.
7. GUZMÁN DEL RÍO, D; GARCIA, C; MISA LLORCA, R; COLUMBIÉ NABARRO, A. Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato – amoniacal con minerales lateríticos cubanos. *Revista Minería y Geología*. [en línea]. [Consultado: 2010-01-15]. 2000 Disponible en: <http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/index.htm>
8. MORÓN ÁLVAREZ, C J. Modelación matemática y simulación de un banco de intercambiadores de calor de una refinería de petróleo. *Tecnología Química*. 2000.
9. COLUMBIÉ NABARRO, A. *Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
10. CENGEL Y, A; TURNER R. *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. McGraw Hill.2001.
11. CHANG CARDONA, A R; COELLO VELAZQUEZ, A. Consideraciones acerca de la metodología de investigación a escala de laboratorio para la reducción y

- lixiviación de menas lateríticas. *Revista Minería y Geología*. [en línea]. [Consultado: 2010-01-15] enero 2001. Disponible en: <http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/index.htm>
12. INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 ed. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II, III.
13. GÓNGORA LEYVA, E. *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, 2004. 80p.
14. ACOSTAS FERNÁNDEZ, Y. *Modelación, simulación y control del sistema enfriadores y tanques de la planta Lixiviación y Lavado de la empresa "Cmdte. René Ramos Latour*. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa, 2004. 103p.
15. SHRAGER, G. R. Modeling of the Viscous Flow with a Free Surface inside a Rotating Horizontal Cylinder. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 39, No. 3, 2004: 283–289
16. ABDALLA, M. Unsteady numerical simulation of double diffusive convection heat transfer in a pulsating horizontal heating annulus. *Heat Mass Transfer*, 2005. 9p.
17. TABERA, Y; R. GARCIA. *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, 2006. 61p.
18. GÓNGORA LEYVA, E. *Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales*. *Energética*, Vol. XXVIII, No. 2, 2007. 15 -25.
19. LONDREZ MENA, J. *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. 2007. 86 h.

20. LAMORÚ URGELLÉS, M. *Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico para diferentes condiciones de trabajo*. Góngora L, E, Columbié N, A (tutores). Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa, 2008. 54p.
21. ECHAVERRIA REVELO, J. W. *Caracterización microestructural del material del cilindro*. Ing. Yunaydi Paumier Castañeda (tutora). Tesis en opción al título de Ing. Metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2009. 93 h.
22. GÓNGORA LEYVA E; LAMORÚ URGELLÉS, M; COLUMBIÉ NABARRO, A O; RETIRADO MEDIACEJA, Y; LEGRÁ LEGRÁ, A; SPENCRE RODRÍGEZ, Y. Coeficientes de calor en los enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. *Revista Minería y Geología*. [en línea]. [Consultado: 2010-01-15] Nov 2009. Disponible en: <http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/index.htm>
23. OSORIO GÓNGORA, I. *Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comdte. Ernesto Che Guevara"*. M.Sc. Ever Góngora Leyva (tutor). Tesis en opción al título de Ing. Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2009. 64 h.

## ANEXOS

### Anexo 1

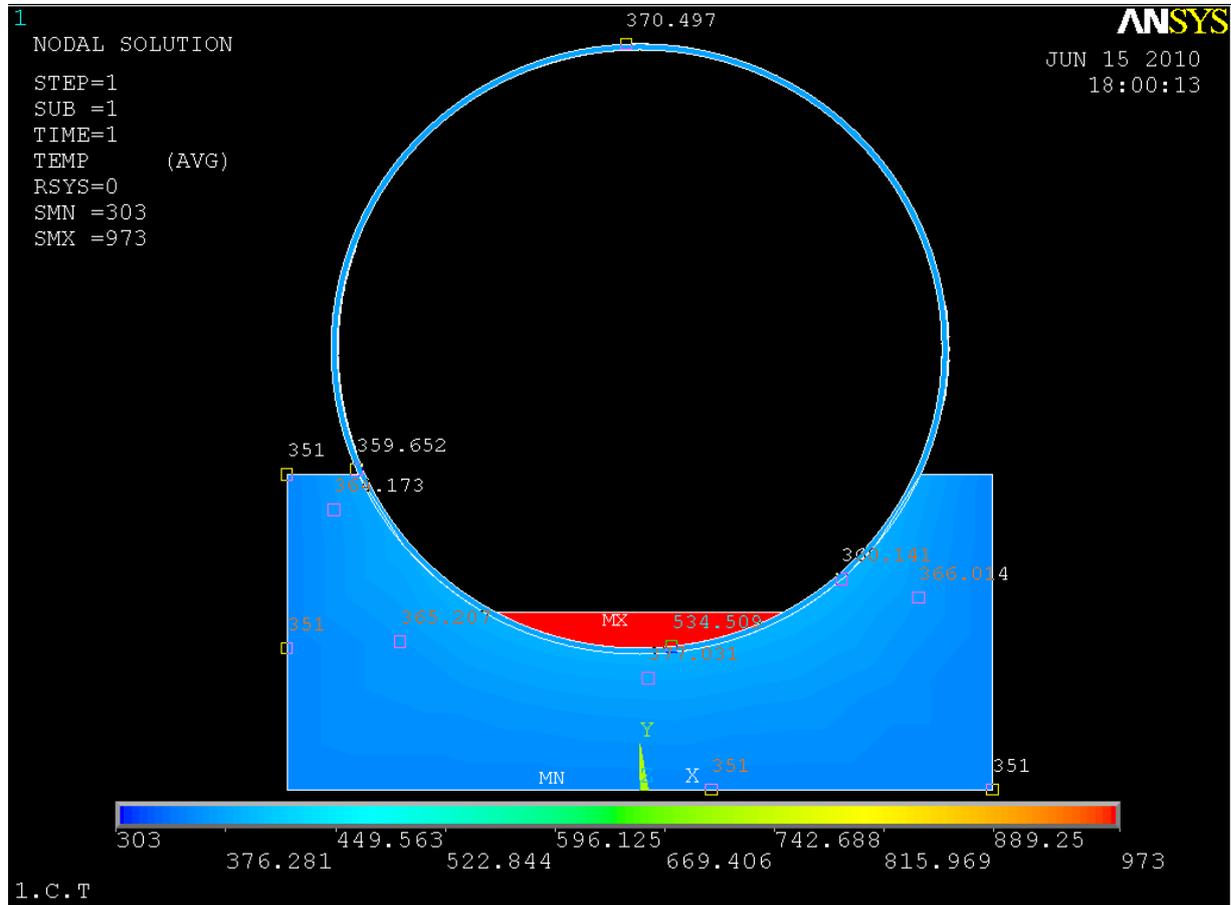
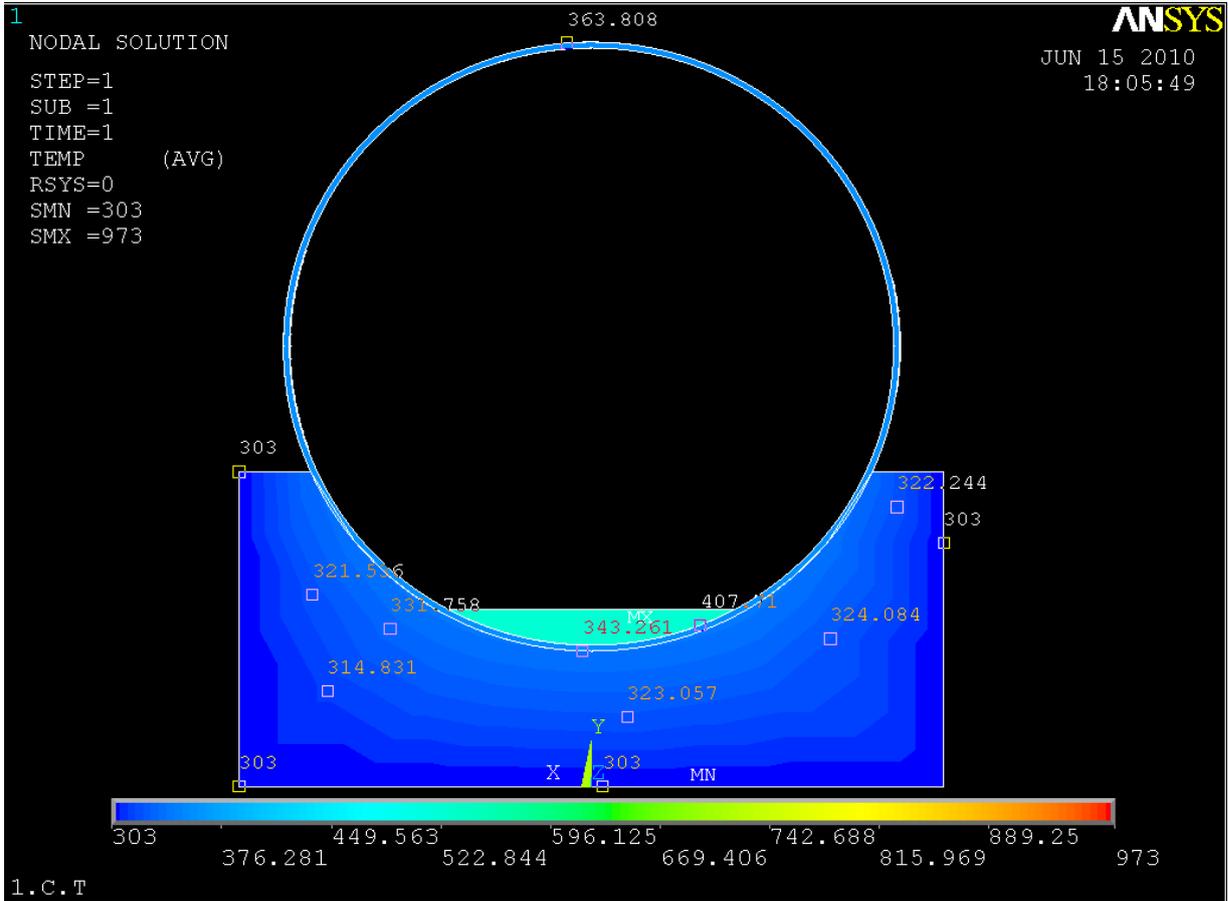


Figura 1: Vista de la distribución de las temperaturas a la entrada del enfriador (K).

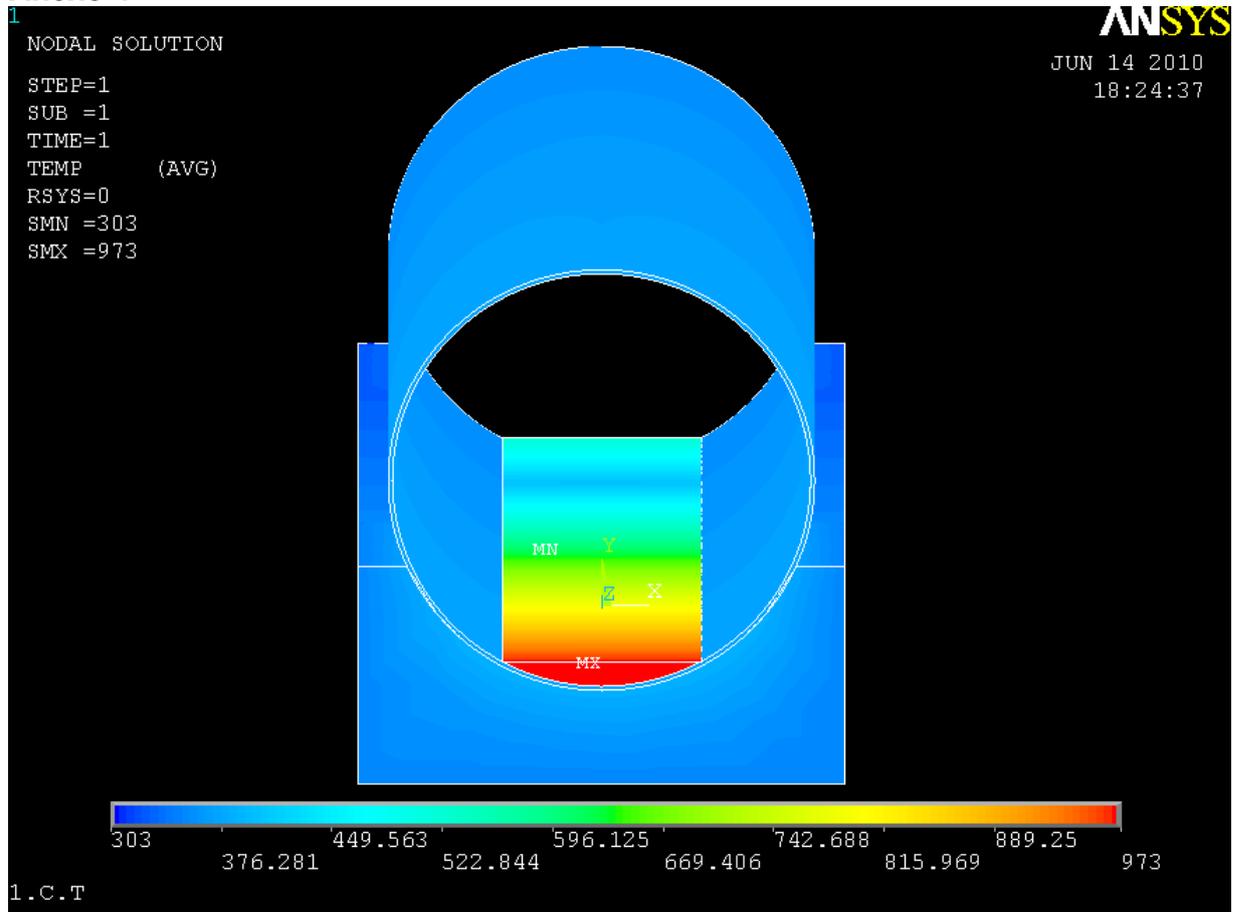
## Anexo 2



**Figura 2:** Vista de la distribución de las temperaturas a la salida del enfriador (K).



#### Anexo 4



**Figura 4:** Vista de la distribución de las temperaturas en el mineral dentro del enfriador (K).

## Anexos 5



**Figura 5:** Vista superior de la de un enfriador mineral, en la imagen se puede observar fácilmente el proceso de ebullición y evaporación de la película de agua.

## Anexo 6



**Figura 16:** Instalación destinada para el proceso de enfriamiento estudiado, al fondo se encuentra la sección de los hornos de reducción.

## Anexo 7: Programación para la simulación del corte lateral

```
/BATCH
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/prep7
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/CWD,'D:\CarpetaAnsys'
/TITLE,Corte Lateral
ET,1,PLANE67
TOFFST,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,0.14
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,3500
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,10
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,7832
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,3,,0.668
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,1000
K,1,0,0,,
K,2,0,0.3,,
K,3,0,0.315,,
K,3,0,0.715,,
K,4,0,0.715,,
FLST,2,3,3,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,-4
KDELE,P51X
KDELE, 1
K,1,1,1,,
K,2,1,1.2,,
K,3,1,0.985,,
K,4,1,0.6,,
K,5,1,7,,
KDELE, 5
K,5,7,1,,
```

```
K,6,7,1.2,,  
K,7,7,0.985,,  
K,8,7,0.6,,  
K,8,7,0.6,,  
LSTR, 2, 6  
LSTR, 6, 5  
LSTR, 5, 7  
LSTR, 7, 8  
LSTR, 8, 4  
LSTR, 4, 3  
LSTR, 3, 1  
LSTR, 1, 2  
LSTR, 2, 6  
LSTR, 5, 1  
LSTR, 3, 7  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,1  
FITEM,2,2  
FITEM,2,8  
FITEM,2,9  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,3  
FITEM,2,10  
FITEM,2,9  
FITEM,2,7  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,6  
FITEM,2,10  
FITEM,2,5  
FITEM,2,4  
AL,P51X  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,1  
AESIZE,P51X,0.03,  
TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL,  
ESYS, 0  
SECNUM,  
MSHAPE,0,2D  
MSHKEY,0  
CM,_Y,AREA  
ASEL, , , 1  
CM,_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'
```



```
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
AESIZE,P51X,0.010,
TYPE, 1
MAT, 2
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
AESIZE,P51X,0.0075,
TYPE, 1
MAT, 2
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
ACLEAR,_Y1
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
AESIZE,P51X,0.03,
TYPE, 1
MAT, 3
REAL,
ESYS, 0
```

```
SECNUM,  
CM,_Y,AREA  
ASEL, , , , 3  
CM,_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'  
CMSEL,S,_Y  
AMESH,_Y1  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,3  
AESIZE,P51X  
ACLEAR, 3  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,2  
AESIZE,P51X  
ACLEAR, 2  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,3  
AESIZE,P51X,0.03,  
TYPE, 1  
MAT, 3  
REAL,  
ESYS, 0  
SECNUM,  
CM,_Y,AREA  
ASEL, , , , 3  
CM,_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'  
CMSEL,S,_Y  
AMESH,_Y1  
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,2  
AESIZE,P51X,0.01,  
TYPE, 1  
MAT, 2  
REAL,  
ESYS, 0  
SECNUM,  
CM,_Y,AREA  
ASEL, , , , 2  
CM,_Y1,AREA  
CHKMSH,'AREA'
```

```
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
/UI,MESH,OFF
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,8
/GO
DL,P51X, ,TEMP,973,0
FINISH
/SOL
ANTYPE,0
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LAST
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
/GO
DL,P51X, ,TEMP,303,0
FINISH
/POST1
SET,LIST
SET,LAST
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
/GO
DL,P51X, ,TEMP,303,0
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,8
/GO
DL,P51X, ,TEMP,973,0
FINISH
/SOL
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LAST
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
```

```
/GO
DL,P51X, ,TEMP,503,0
FINISH
/SOL
FINISH
/POST1
SET,LAST
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,6
/GO
DL,P51X, ,TEMP,343,0
FINISH
/SOL
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LAST
FINISH
/PREP7
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
/GO
DL,P51X, ,TEMP,800,0
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,5
/GO
DL,P51X, ,TEMP,303,0
FINISH
/SOL
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LAST
SET,FIRST
/POST1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,KXX,1
MPDATA,KXX,1,,54
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,KXX,1
MPDATA,KXX,1,,54
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
```

```
MPDE,DENS,2
MPDATA,DENS,2,,7800
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,KXX,1
MPDATA,KXX,1,,0.14
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,DENS,1
MPDATA,DENS,1,,3300
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,DENS,2
MPDATA,DENS,2,,7800
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,DENS,2
MPDATA,DENS,2,,7800
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,KXX,2
MPDATA,KXX,2,,58
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,DENS,3
MPDATA,DENS,3,,1000
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,KXX,3
MPDATA,KXX,3,,0.668
FINISH
/SOL
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,FIRST
```

## Anexo 8: Programación para la simulación del enfriador en 3d

```
/BATCH
/input,start110,ans,'C:\Archivos de programa\ANSYS Inc\v110\ANSYS\apdl\,,,,,,,,,,,,,1
/PREP7
RECTNG,-1.75,1.75,1.58,,
CYL4,0,1.58+0.25+0.38,1.5, ,1.5+0.03
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-10
ASBL,P51X,P51X
ADELE, 3
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,7
FITEM,3,-8
ASBL, 4,P51X
ADELE, 1
RECTNG,-1,1,0.695+0.015+0.181,,
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,7
FITEM,3,-8
ASBL, 1,P51X
ADELE, 5
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-10
ASBL, 4,P51X
ADELE, 5
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
ET,1,PLANE55
ET,2,SHELL57
```

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,0.14
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,3500
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,58.7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,7832
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,3,,0.668
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,1000
/TITLE,1.C.T
/PREP7
VOFFST,1,-6.2, ,
VOFFST,2,-6.2, ,
VOFFST,3,-6.2, ,
VOFFST,1,6.2, ,
VOFFST,2,6.2, ,
VOFFST,3,6.2, ,
VOFFST,25,6.2, ,
VOFFST,38,6.2, ,
VOFFST,29,6.2, ,
VOFFST,46,6.2, ,
VOFFST,50,6.2, ,
VOFFST,58,6.2, ,
VOFFST,67,6.2, ,
VOFFST,71,6.2, ,
VOFFST,79,6.2, ,
FLST,5,5,6,ORDE,5
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,7
FITEM,5,10
FITEM,5,13
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
```

```
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,5,6,ORDE,5
FITEM,5,2
FITEM,5,5
FITEM,5,9
FITEM,5,12
FITEM,5,15
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,3,6,ORDE,3
FITEM,5,8
FITEM,5,11
FITEM,5,14
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 8
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 3
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
```

```
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 6
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
ETDEL,1
ETDEL,2
ET,1,SOLID70
SMRT,6
SMRT,4
SMRT,4
SMRT,5
SMRT,4
/UI,MESH,OFF
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,5,5,6,ORDE,5
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,7
FITEM,5,10
FITEM,5,13
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,5,5,6,ORDE,5
FITEM,5,2
FITEM,5,5
FITEM,5,9
FITEM,5,12
FITEM,5,15
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
```

```
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
FLST,5,10,6,ORDE,9
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
FITEM,5,6
FITEM,5,-8
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
FITEM,5,13
FITEM,5,-14
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VCLEAR,_Y1
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/SOL
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,88
/GO
DA,P51X,TEMP,973
DADELE, 88,TEMP
/SOLU
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,183
FITEM,2,-184
FITEM,2,189
/GO
DL,P51X, ,TEMP,78+273,0
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,55
FITEM,2,-56
FITEM,2,61
```

/GO  
DL,P51X, ,TEMP,30+273,0  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,94  
/GO  
DA,P51X,TEMP,74+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,93  
/GO  
DA,P51X,TEMP,62+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,19  
/GO  
DA,P51X,TEMP,52+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,18  
/GO  
DA,P51X,TEMP,41+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,24  
/GO  
DA,P51X,TEMP,52+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,99  
/GO  
DA,P51X,TEMP,74+273  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,88  
/GO  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,4  
/GO  
DA,P51X,TEMP,252+273  
FLST,2,2,5,ORDE,2  
FITEM,2,21  
FITEM,2,-22  
/GO  
SFA,P51X,1,CONV,0.668,382  
FLST,2,2,5,ORDE,2  
FITEM,2,10  
FITEM,2,16  
/GO  
SFA,P51X,1,CONV,0.668,80+273  
FLST,2,2,5,ORDE,2  
FITEM,2,96  
FITEM,2,-97  
/GO

SFA,P51X,1,CONV,0.668,452  
FLST,2,2,5,ORDE,2  
FITEM,2,101  
FITEM,2,107  
/GO  
SFA,P51X,1,CONV,0.668,92+273  
SOLVE  
FINISH