

665.5385
CORa

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica



D-28727 -

"ANALISIS TERMICO DE UN CALENTADOR - MEZCLADOR PARA LA ELABORACION DE ACEITE LUBRICANTE"

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Eduardo Germán / Córdova Romero



| | |
|-------------------------------------|---------------|
| CENTRO DE INFORMACION BIBLIOTECARIO | |
| "Ing. Gonzalo Zevallos G." | |
| F.I.M.C.P. ESPOL | |
| No. de inventario: | D-28727 |
| Clasificación: | T665.5385CORa |
| Fecha de Ingreso: | |
| Procedencia: | |

Guayaquil - Ecuador

1990



A.F. 128162

DEDICATORIA



A MIS PADRES QUIENES EN TODO
MOMENTO ME DIERON SU ALIENTO Y
PARA QUIENES GUARDO MI MAS
PROFUNDO AMOR.

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Tópico de Graduación de la ESPOL)



EDUARDO GERMAN CORDOVA ROMERO



Ing. Nelson Cevallos B.
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



Dr. Alfredo Barriga R.
DIRECTOR DE PROYECTO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. Jorge Duque R.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. Francisco Andrade
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



BIBLIOTECA

RESUMEN

Se analiza en este trabajo el calentamiento de aceite lubricante en un calentador-mezclador, el cual consiste de un tanque cilíndrico de aproximadamente 14 m³ de capacidad dentro del cual el aceite es calentado desde la temperatura ambiente hasta 60 °C mediante dos serpentines, el uno localizado en la parte interior en el fondo del recipiente, y el otro soldado exteriormente a la pared lateral del tanque. El aceite es agitado mediante recirculación con una bomba de 15 m³/h de capacidad que toma el aceite desde la parte inferior y lo mezcla con la masa del mismo mediante una tobera ubicada en la parte inferior del tanque.

Mediante mediciones de temperatura realizadas durante el transcurso del proceso de calentamiento, se calcularon las pérdidas de calor del recipiente en un valor igual al 3% de la energía que absorbe el aceite.

En base a estos valores se obtiene la ecuación de calentamiento del aceite y se evalúan los coeficientes de transferencia de calor involucrados. Se determina de manera experimental el coeficiente convectivo promedio

entre el aceite y la pared del tanque.

Al final del análisis se detecta que existe mala junta entre el serpentín lateral y la pared. Se determina la inconveniencia de aislar todo el recipiente para incrementar rapidez de calentamiento. Se calcula que de existir buena junta, el tiempo se reduciría desde 155 minutos que demora actualmente el proceso, a aproximadamente 95 minutos y que, de reducirse el paso del serpentín lateral a la mitad, el tiempo se reduciría a aproximadamente 75 minutos.



INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

SIMBOLOGIA

INTRODUCCION

I FUNDAMENTOS GENERALES

- 1.1 Objetivos
- 1.2 Alcance
- 1.3 Justificación

II ELABORACION DE ACEITES LUBRICANTES

- 2.1 Generalidades
 - 2.1.1 Introducción
 - 2.1.2 Indice de Viscosidad
 - 2.1.3 Bases Lubricantes
 - 2.1.4 Aditivos
 - 2.1.5 Proceso de Elaboración de Lubricantes
- 2.2 Recipientes Agitados
- 2.3 Descripción del Calentador-Mezclador
- 2.4 Operación

III ANALISIS TERMICO Y CALCULOS

- 3.1 Mecanismos de Transferencia de Calor y Balance de Energía.
- 3.2 Cálculo de las Pérdidas de Calor del Tanque



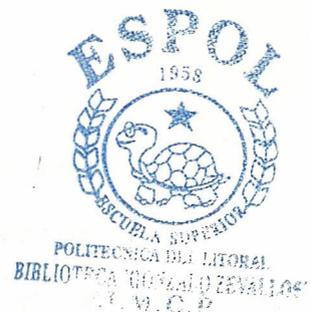
- 3.3 Balance de Energía y Obtención de la Ecuación del Sistema
- 3.4 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de calor en el Serpentín del Fondo (Uf).
- 3.5 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de calor en la Parte Lateral (U1).
 - 3.5.1 Cálculo del Coeficiente Convectivo en la Pared Interior del Tanque
 - 3.5.2 Cálculo de la Resistencia de Contacto del Serpentín lateral
- 3.6 Cálculo de la Cantidad de Condensado en los Serpentes
- 3.7 Cálculo del Coeficiente Global U1 si el Serpetín Estuviera Continuamente Soldado a la Pared del Tanque
- 3.8 Cálculo del Tiempo de Calentamiento si el Tanque Estuviera Completamente Aislado
- 3.9 Resultados y Análisis

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICE

- FIGURAS
- TABLAS

BIBLIOGRAFIA





BIBLIOTECA

SIMBOLOGIA

| | |
|------------------|--|
| A | Area |
| A _{min} | Area minima |
| A _o | Area del módulo |
| A _l | Area lateral del tanque abrazado por el serpentín lateral |
| A _f | Area del serpentín del fondo |
| A _t | Area total de transferencia de calor |
| C | Capacidad calorífica |
| D | Diámetro |
| D _o | Diámetro exterior |
| D _i | Diámetro interior |
| e | Neperiano 2,7182 |
| e | Espesor de la pared del tubo |
| Gr | Número de Grashof |
| G | Flujo |
| H | Coefficiente combinado de convección y radiación |
| H _c | Coefficiente convectivo |
| H _i | Coefficiente convectivo interior |
| H _o | Coefficiente convectivo exterior |
| H _a | Coefficiente convectivo desde la pared caliente del tanque hacia el aceite |

| | |
|--------|---|
| Hr | Coeficiente de radiación |
| Hfg | Entalpia de condensación |
| 1/Hinc | Resistencia térmica de las incrustaciones |
| j | Factor j de Colburn para transferencia de calor |
| J | Joule |
| K | Conductividad térmica |
| KJ | Kilojoule |
| L | Longitud de la aleta |
| ln | Logaritmo natural |
| m | Flujo másico |
| M | Masa del Aceite |
| N | Número de tubos |
| Pr | Número de Prandtl |
| Qa | Calor absorbido por el aceite |
| Qv | Calor cedido por el vapor |
| Qr | Calor por radiación |
| Re | Número de Reynolds |
| Rinc | Resistencia debido a incrustaciones |
| Rext | Resistencia filmica exterior |
| Rcont | Resistencia de contacto |
| Rint | Resistencia filmica interior |
| Rtubo | Resistencia de la pared del tubo |
| Sf | Serpentín del fondo |
| Sl | Serpentín lateral |
| T | Temperatura del aceite |
| Tam | Temperatura ambiente |

| | |
|------------|--|
| Tv | Temperatura del vapor |
| Tb | Temperatura de la masa principal |
| Tf | Temperatura filmica |
| t | Espesor de pared |
| u | viscosidad dinàmica |
| us | Viscosidad dinàmica a la temperatura de la pared. |
| ub | Viscosidad dinàmica a la temperatura de la masa principal. |
| Ul | Coeficiente global de transferencia de calor en la parte lateral |
| Uf | Coeficiente global de transferencia de calor en el serpentín del fondo |
| Ut | Coeficiente global total de transferencia de calor |
| x | Calidad de vapor |
| x | Distancia desde la raíz de la aleta |
| Xb | Espesor de junta soldada |
| W | Wattios |
| V | Velocidad |
| β | Coeficiente de expansión tèrmica |
| Δ | Diferencia |
| ϵ | Emisividad normal |
| ρ | Densidad |
| σ | Constante de Stefan Botlzmann |
| π | 3.1416 |
| τ | Constante de tiempo |

e Tiempo



INTRODUCCION

El proceso de elaboración de aceites lubricantes en las plantas de nuestro país consiste en la mezcla de uno o mas aceites base con aditivos en proporciones indicadas expresamente por una formulación dada por la marca (por ejemplo CEPE, CASTROL, VEEDOL, etc.) que solicita se fabrique determinado tipo de aceite.

Cada marca tiene para un aceite específico una formulación patentada la cual debe ser rigurosamente seguida por la planta elaboradora para la producción. De esta manera una planta trabaja bajo pedido para varias marcas de aceite. En el calentador mezclador objeto de nuestro análisis, se elaboran entre otros los aceites de las siguientes marcas: CEPE, VEEDOL, GOLDEN BEAR, CASTROL, SPI, RPM y SHELL.

El proceso de elaboración se lo realiza en un tanque mezclador de aproximadamente 14 metros cúbicos de capacidad, que a su vez calienta la mezcla. Los componentes son agitados mediante recirculación y calentados desde la temperatura ambiente hasta 50 o 60 °C según indicación de fórmula.

El principal interés de este trabajo es el investigar la posibilidad de incrementar la rapidez de calentamiento del aceite en este sistema, que actualmente demora aproximadamente dos horas y media, así como la reducción de las pérdidas de calor. Para ello se procederá en este estudio a la identificación de los mecanismos de transferencia de calor involucrados, cuantificación de las energías y la obtención del modelo matemático que describa el comportamiento del sistema.





BIBLIOTECA

CAPITULO I

FUNDAMENTOS GENERALES

1.1 OBJETIVOS

Se aspira en este trabajo, mediante el análisis de los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el proceso, lograr el modelo matemático que describa el comportamiento del sistema. Cuantificar los diferentes coeficientes de transferencia de calor involucrados para según estos resultados efectuar recomendaciones tendientes a reducir el tiempo que demora el aceite en calentarse desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de fórmula el cual es en promedio de dos horas con treinta minutos.

Un punto de principal interés la conveniencia o no de cubrir con aislamiento la porción del tanque que permanece sin aislante la cual es aproximadamente el 60% de la superficie total del mismo.

1.2 ALCANCE

En este estudio se realizan mediciones de temperatura, se identifican los principales coeficientes de transferencia de calor, se deduce la ecuación matemática de la variación de la temperatura del aceite con respecto al tiempo. Se obtiene la eficiencia del sistema, se cuantifican las pérdidas de calor se hacen sugerencias para el mejoramiento de la rapidez de calentamiento.

No se abarca en este trabajo el estudio de la incidencia de las condiciones de mezcla en el interior del recipiente sobre el proceso de calentamiento por ser este un tema para el cual en el caso de agitación por recirculación, muy poca información existe. Ese estudio por si solo podría ser tomado como tópico para una investigación posterior que incluiría principalmente experimentaciones con las variables involucradas en el proceso de agitación. Existe un compromiso entre las condiciones de mezcla en el interior del recipiente y las de transferencia de calor, y pueden haber casos de condiciones satisfactorias de transferencia de calor pero con condiciones poco satisfactorias de mezclado el cual es muy importante en el caso de elaboración de aceites lubricantes.

1.3 JUSTIFICACION

El estudio se justifica debido a que si logramos efectuar correcciones que nos ahorren tiempo de calentamiento y disminuyan el desperdicio de energía, estaremos incrementando la producción y disminuyendo costos más aún cuando existen cuatro mezcladores de similares características en la planta dedicados a la elaboración de aceite lubricante.





CAPITULO II

ELABORACION DE ACEITES LUBRICANTES Y DESCRIPCION DEL SISTEMA

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 Introducción

Con la menor excepción de aceites sintéticos, los aceites lubricantes están basados en hidrocarburos obtenidos por destilación y refinación de petróleo crudo seleccionado.

La mayoría de los aceites lubricantes terminados son hechos mezclando una o más bases lubricantes producidas por proceso de refinación con cantidades variables de aditivos químicos. Un volumen menor de un número limitado de grados conocidos como mezclas de aceites minerales son hechos de bases lubricantes sin aditivos.

2.1.2 Índice de Viscosidad

Todos los aceites lubricantes cambian de viscosidad con la temperatura, aumentando la viscosidad cuando se enfrían y disminuyendo cuando se calientan. No todos los aceites se comportan de igual manera, unos reducen su viscosidad mucho más rápido que otros cuando se calientan. Esta propiedad es importante al seleccionar aceite para varias aplicaciones, por ejemplo un aceite de motor debe cambiar su viscosidad lo menos posible, de tal manera que no esté tan espeso en estado frío, dificultando el arranque, y que no sea tan fino cuando esté caliente, ya que se retiraría de las superficies de lubricación. No hay medida absoluta de esta propiedad, pero para comparación de diferentes aceites se ha ideado una escala arbitraria conocida como Índice de Viscosidad. (IV). Un número bajo indica un aceite que cambia de viscosidad rápidamente con la temperatura, un número alto de índice de viscosidad indica un aceite que cambia poco la viscosidad cuando es calentado o enfriado.

El índice de viscosidad no es una indicación de la viscosidad de un aceite, así un aceite, con



un alto índice de viscosidad (IV) puede ser un aceite con baja viscosidad, ej. un aceite de motor de baja viscosidad para uso en temperatura ambiental baja (SAE 10) tendrá un alto índice de viscosidad (mínimo 95 IV) para así retener sus propiedades de lubricación cuando el motor está caliente. Por otro lado, un aceite pesado y viscoso usado para lubricar cilindros a vapor puede tener un índice bajo de viscosidad.

2.1.3 Bases Lubrificantes

Las bases lubricantes que se usan en las plantas nacionales para la elaboración de aceites lubricantes son importadas y se producen en refinerías de aceite por varios procesos de refinación.

En la industria se usan algunos sistemas de clasificación y nomenclatura, con el resultado de que aceites base con propiedades similares pueden tener nombres diferentes, dependiendo de la procedencia del aceite. Un sistema simple y lógico de nomenclatura adoptado por Shell toma en cuenta:

(a) Viscosidad de la base lubricante a

temperatura normal tradicionalmente expresada en segundos Redwood I a 60 °C.

(b) Rango del índice de viscosidad del aceite expresado como:

(i) HVI para aceites con un alto índice de viscosidad mayor a 80.

(ii) MVI para aceites con un índice de viscosidad medio entre 40 a 80.

(iii) LVI para aceites con un índice de viscosidad bajo inferior a 40.

La estructura química de los hidrocarburos es indicada por una letra en paréntesis, (N) para nafténico o (P) para parafínico; esto se necesita únicamente para aceites MVI, los cuales pueden ser de cualquiera de los dos tipos. Los aceites HVI siempre son parafínicos mientras que los aceites LVI siempre son nafténicos.

Una planta de elaboración de lubricantes grande puede manejar hasta 30 bases lubricantes diferentes pero esto incluiría grados especialmente refinados para electricidad,

turbina, aviación y aceites especiales. Varias plantas pequeñas de elaboración producen un rango limitado de aceites de motor a partir de tres o cuatro básicos. Un rango típico de bases lubricantes de las cuales se puede elaborar la mayoría de los grados universales sería:

HVI 65 (o 60) - un aceite con baja viscosidad y un índice de viscosidad alto; viscosidad 65 segundos Redwood I a 60 °C

HVI 160B - un aceite de viscosidad media con un índice de viscosidad alto; viscosidad 160 segundos Redwood I a 60 °C. El sufijo B indica que el aceite ha sido previamente mezclado en la refinería con otros componentes.

HVI 650 - un aceite de alta viscosidad con un índice de viscosidad alto; viscosidad 650 segundos Redwood I a 60 °C.

MVI (N) 40 - un aceite de viscosidad baja

con un índice de viscosidad medio; hecho de un crudo nafténico; viscosidad 40 segundos Redwood I a 60 °C.

MVI (N) 170 - un aceite de viscosidad media con un índice de viscosidad medio, hecho de crudo nafténico; viscosidad 170 segundos Redwood I a 60 °C.

MVI (P) 1300 - un aceite de viscosidad alta con un índice de viscosidad medio, hecho de crudo parafínico; viscosidad 1300 segundos Redwood I a 60 °C.

LVI 50 - un aceite de viscosidad baja con un índice de viscosidad bajo, viscosidad 50 segundos Redwood I a 60 °C.

LVI 375 - un aceite de viscosidad media a alta con un índice de viscosidad bajo; viscosidad 375 segundos Redwood I a 60 °C.

LVI 1100 - un aceite de viscosidad alta con un índice de viscosidad bajo; viscosidad 1100 segundos Redwood I a 60 °C.

Los aceites HVI normalmente son usados para elaborar aceites para máquinas de combustión interna. Los aceites MVI pueden ser usados ya sea solos o mezclados con aceites HVI. Los aceites LVI son usados principalmente para lubricar maquinaria industrial y para otras aplicaciones tales como aceites emulsibles y textiles.

2.1.4 Aditivos

Las propiedades de bases lubricantes originarias del petróleo son usualmente inadecuadas para cumplir los arduos requerimientos de la maquinaria y motores modernos. Aditivos especiales, usualmente químicos sintéticos (frecuentemente de origen petroquímico) son usados para mejorar propiedades específicas. Las más importantes son:

- (a) Mejoradores del índice de viscosidad que mejoran las propiedades naturales de



aceites HVI y permiten la elaboración de lubricantes multigrados, es decir aceites que cubren un rango de números SAE.



- (b) Dispersantes o aditivos detergentes, usualmente compuestos organo-metálicos, que mantienen suspendidas en el aceite partículas de carbón, productos de oxidación y otros elementos dañinos.
- (c) Aditivos de extrema presión conteniendo elementos activos que aseguran que una película de lubricante se adhiera bajo presión local alta en engranajes hipoidales.
- (d) Antioxidantes que impiden la oxidación de aceites y previenen la corrosión.
- (e) Debilitantes del punto de fluidez para bajar la temperatura a la cual el aceite no se puede bombear a temperaturas ambientales bajas.
- (f) Aditivos anti-espumantes, usualmente un compuesto de silicona, mezclado en pequeñas cantidades de partes por millón (ppm).

2.1.5 Proceso de Elaboración de Aceites Lubricantes

La maquinaria industrial y los motores de combustión requieren un rango más amplio de viscosidad y un mejor desempeño del lubricante que el disponible del número limitado de bases lubricantes producidas por proceso en la refinería. Mezclando dos (o más) bases lubricantes en proporciones apropiadas se puede obtener una viscosidad intermedia o un aceite con IV intermedio; otras cualidades deseadas se obtienen incluyendo aditivos. La elaboración en una planta de producción de lubricantes es un proceso físico que involucra mezclar dos o más bases lubricantes, y en la mayoría de los casos varios aditivos, para formar un producto completamente homogéneo. Las bases lubricantes son hidrocarburos del petróleo y son completamente mezclables. La mayoría de los aditivos son abastecidos como soluciones en aceite y pueden incorporarse directamente en una mezcla.

La relación entre la proporción de los componentes y las propiedades de la elaboración resultante no es simple, pero hay disponibles fórmulas y tablas para propósitos de cálculo.

La concentración de componentes activos en los aditivos puede variar levemente de una elaboración a otra, manteniéndose dentro de los límites permisibles. En estas circunstancias las compañías deben permitir estas diferencias cuando calculan las proporciones de mezcla para evitar correcciones de elaboración o para ahorrar aditivos costosos.

2.2 RECIPIENTES AGITADOS

El mezclado de fluidos es ampliamente aplicado en procesos químicos, en industrias de alimentos, petróleo, farmacéuticas, papelera y las dedicadas al tratamiento de desechos, nombrando unas pocas.

Existen varias maneras de proveer agitación a un recipiente tales como el uso de hélices o impellers, recirculación, y cada manera a su vez tiene sus modos de particularizar la agitación. La selección del tipo de agitación a emplearse se la realiza en función de los requerimientos de mezclado que tenga el proceso en particular. La forma de proveer mezclado depende de la clase y cantidad de flujo y esfuerzo cortante que deba producirse, del tipo de régimen requerido (láminar, transición o turbulento), esta es una selección muy especializada y en muchos casos solo se comprueba la

efectividad de un tipo de mezclado evaluándolo experimentalmente. Muchos son los parámetros de los cuales depende la calidad y modo de mezclado a producirse con un determinado tipo de agitación así por ejemplo, si utilizamos un impeller la agitación dependerá de la geometría del recipiente, sus dimensiones, el tipo de impeller, su posición, dirección de flujo (axial, radial), velocidad, entre otras características.

Para la producción de aceites lubricantes Shell utiliza agitación por recirculación extrayendo aceite del recipiente por la parte inferior y bombeándolo a través de una tobera colocada en el fondo, la cual dirige el flujo a través de la masa del aceite hasta alcanzar la superficie libre como se ve en la fig. 1. Este método de agitación proporciona excelentes resultados en el caso de elaboración de aceites lubricantes y por lo mismo la industria que los produce continua usándolo. Los parámetros de agitación (velocidad de flujo, dirección, nivel de líquido, forma de la tobera) han sido seleccionados en base a la experiencia de tal modo que se obtienen alta eficiencia de mezclado de bases lubricantes y aditivos.

La investigación de el aspecto de la agitación es un



campo muy vasto, una investigación entera puede dedicarse solamente a este tema, con pruebas experimentales, que además determinen la incidencia de los parámetros de agitación sobre el coeficiente de transferencia de calor en la pared interior del recipiente, un estudio de este tipo llevaría mucho tiempo para la consecución de los objetivos planteados y está fuera del alcance de este tópico.

2.3 DESCRIPCION DEL CALENTADOR-MEZCLADOR (BLENDING)

En la fig. 1 podemos apreciar el calentador mezclador que estamos analizando, el cual es básicamente un tanque cilíndrico que está construido de acero estructural con una capacidad aproximada de 14 m³. El tanque es calentado mediante dos serpentines dentro de los cuales se condensa vapor a 160 °C, el uno ubicado en la parte lateral arrollado exteriormente alrededor del tanque y el otro serpentín está colocado interiormente en la parte inferior del tanque en contacto directo con el aceite. Una bomba de 15 m³/h de velocidad de flujo, toma el aceite desde la parte inferior y la mezcla con la masa de aceite mediante la tobera (jet) (punto 11) la cual dirige el flujo hasta la superficie libre del aceite, la dirección de flujo es tal, que el chorro llega hasta la superficie libre del líquido a una distancia de la pared igual a un

tercio de el diámetro del tanque como se aprecia en la Fig. 1. Dos trampas de vapor termostáticas de flotador, una para cada serpentín están colocadas en la parte inferior del tanque, desde las trampas el condensado va al tanque de realimentación de la caldera.

2.4 OPERACION

Para elaborar un determinado tipo de aceite, la fórmula es enviada desde el laboratorio a la sección de elaboración. La formulación contiene la descripción y cantidad en peso de las bases y aditivos que van a mezclarse, la temperatura hasta la cual debe calentarse (usualmente 50 a 60 °C), y el tiempo que debe permanecer mezclándose una vez alcanzada ya esa temperatura de fórmula.

Se bombean hacia el calentador-mezclador (que de aquí en adelante llamaremos simplemente, el tanque) los aceites base componentes cuya cantidad es medida mediante flujómetros calibrados, se agregan los aditivos correspondientes y se empiezan a mezclar los componentes bombeando la mezcla desde la parte inferior y recirculándola mediante la tobera que está ubicada al fondo del tanque el cual dirige el chorro hasta la superficie del aceite. Al mismo tiempo que

empieza la recirculación se abren las válvulas de vapor 12 y 10 (fig. 1) de los serpentines y se espera hasta que el aceite se caliente hasta la temperatura de fórmula, una vez alcanzada se cierran las válvulas de vapor y se continua con la recirculación. Entonces se comienzan a sacar muestras del aceite desde la parte de arriba y del fondo del tanque, cada 10 minutos hasta que reúne las especificaciones previstas, a las cuales en estos mezcladores se llega a los 30 minutos en promedio.

Para conservar la temperatura de fórmula el operario abre o cierra la válvula de vapor cuando baja o sube la temperatura, pero este "abre y cierra" no es tan continuo ya que la temperatura del aceite no baja rápidamente y solo se necesitan mínimo unas dos veces que se abran y cierren las válvulas de vapor.

Cuando el laboratorio dá el "visto bueno", se bombea el aceite desde el mezclador hacia los tanques de almacenamiento para el posterior envasado.



CAPITULO 3

ANALISIS TERMICO Y CALCULOS

3.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y BALANCE DE ENERGIA

En la Fig. 2 podemos observar la manera en que se transmite el calor al aceite, este calor procede de dos fuentes, el serpentín lateral (Sl) y el serpentín del fondo (Sf), el vapor, a 160 °C se condensa en los serpentines y este condensado se expulsa inmediatamente de los mismos mediante sendas trampas de vapor las cuales tienen una capacidad de drenaje de condensado de 2.650 lb/hr (1.200 kg/hr) a 75 psig. Dentro de los serpentines, desde el vapor se transmite calor por convección a la pared del tubo (H_i) luego por conducción a través del mismo (K) y finalmente, en el caso del serpentín del fondo al aceite por convección H_o , en el caso del serpentín lateral el tubo calienta por conducción la pared del tanque y esta, actuando como una superficie extendida del tubo calentará al aceite por convección (H_a).

Se pierde calor a través del aislante, el cual se transmite por conducción hasta la superficie exterior del mismo y de allí es removido el calor por convección natural y radiación al ambiente, cosa similar sucede con las paredes sin aislar que pierden calor (Q_p) de la siguiente manera, la masa de aceite calienta la pared del tanque por convección luego el calor se transmite por conducción hacia la superficie exterior de la pared y de allí el calor es transferido al ambiente por convección natural y radiación.

El primer paso que damos en el análisis es la medición de temperaturas en los puntos que se señalan en la Fig. 3, además de la temperatura del aceite. Estas temperaturas fueron tomadas desde el inicio del calentamiento hasta el final del mismo, y están tabuladas en la tabla 1 en la que consta también el tiempo transcurrido desde el inicio del calentamiento. Se realizaron mediciones en tres tandas distintas de elaboración arrojando las tres resultados similares, en la tercera tanda en base a la experiencia de las mediciones de las dos anteriores fue realizada con mucho mayor cuidado y son esos resultados los que se tienen en la tabla 1. En esa tanda se producían 9.507 kilogramos de aceite SAE 50, cuya fórmula de composición no puede ser revelada debido a razones de patente.

Las mediciones de temperatura fueron efectuadas usando dos termómetros digitales de pared con termocuplas tipo K, rango de -20 a 1200 $^{\circ}\text{C}$ y precisión de 1 $^{\circ}\text{C}$. Se perforaron agujeros en el aislante para poder hacer las mediciones en los puntos 8, 9, 10 y 11.

3.2 CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR DEL TANQUE

Estas pérdidas las calculamos evaluando los coeficientes convectivo (H_c) y radiativo (H_r) de las paredes del tanque debido a que conocemos sus temperaturas. El coeficiente combinado de convección y radiación será obtenido y podremos calcular el calor perdido. Es así como se ha construido la tabla 2 en la cual tenemos tabulados estos coeficientes y el calor emanado por la pared lateral sin aislar y por la tapa que son las más grandes áreas y las de mayor temperatura. Veamos un ejemplo de cómo se calcularon estos coeficientes.

Cálculo del coeficiente convectivo (H_c) en la pared lateral sin aislar del tanque

$T_1 = 31$ $^{\circ}\text{C} = 87,8$ $^{\circ}\text{F}$ = Temperatura de la pared

$T_{am} = 28$ $^{\circ}\text{C} = 82,4$ $^{\circ}\text{F}$ = Temperatura ambiental

$T_f = (T_1 + T_{am})/2$



donde T_f = Temperaturas filmicas

$$T_f = 29,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 85,1 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Propiedades del aire a $85,1 \text{ } ^\circ\text{F} = 29,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (tabla A3 Ref.1)

$$F_f^2 \beta_f g / (u_f)^2 = 2,07 \times 10^6 \text{ } 1/^\circ\text{F pie}^3$$

$$Pr = 0,72$$

$$Gr = F_f^2 g \beta_f L^3 (T_1 - T_{am}) / u_f^2$$

donde $L = 2.13 \text{ m} = 7 \text{ pies}$ Altura de la pared sin aislar

$$Gr = 2,07 \times 10^6 \times 7^3 \times (87,8 - 82,4)$$

$$Gr = 3,8340 \times 10^9$$

$$GrPr = 3,8340 \times 10^9 \times 0,72$$

$$GrPr = 2,7605 \times 10^9 \text{ adimensional}$$

Para este rango de número de $GrPr$ vamos a la tabla 7.2 pag. 285 Ref.2, y seleccionamos la fórmula del coeficiente de convección natural H_c .

$$H_c = 0,95 (\Delta T)^{1/3}$$

donde $\Delta T = (T_1 - T_{am})$ en $^\circ\text{C}$

H_c = Coeficiente convectivo $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$H_c = 0,95 (31 - 28)^{1/3}$$

$$H_c = 1,37 \text{ W/m}^2$$

Coefficiente de Radiación Hr

Para hallar este coeficiente debemos calcular el calor por radiación (Q_r).

$$Q_r = \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_{am}^4)$$

Q_r = calor transferido al ambiente por radiación W

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ oK}^4 \text{ Constante de Stefan Boltzmann}$$

$$\epsilon = 0.94 \text{ adimensional} = \text{emisividad normal de la superficie que está pintada con pintura amarilla}$$

Ref. 3 Pag. 97 tabla 4.1

$A = 14,76 \text{ m}^2$ área de la pared lateral sin aislante

$T_1 = 304 \text{ oK}$ temperatura de la pared

$T_{am} = 301 \text{ oK}$ temperatura ambiental

$$Q_r = 5,670 \times 10^{-8} \times 0,94 \times 14,76 \times (304^4 - 301^4)$$

$$Q_r = 261 \text{ W}$$

$$Q_r = H_r A (T_1 - T_{am})$$

H_r coeficiente de transferencia de calor por radiación

$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$A = 14,76 \text{ m}^2$ área de pared lateral sin aislante

$$T_1 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{am} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

de donde

$$H_r = Q_r / A(T_1 - T_{am})$$

$$H_r = 261 / 14,76(31 - 28)$$

$$H_r = 5,88 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Entonces el coeficiente combinado de transferencia de calor H será

$$H = H_c + H_r$$

$$H = 1,37 + 5,88$$

$$H = 7,25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

El calor transferido al ambiente Q_p será

$$Q_p = HA(T_1 - T_{am})$$

$$Q_p = 7.25 \times 14.76(31 - 28)$$

$$Q_p = 321,03 \text{ W}$$

De la misma manera se calcula el calor transferido al ambiente por la tapa Q_p , pero para calcular el coeficiente convectivo natural H_c se tomó de la Ref. 2 Pag. 285 Tabla 7.2, la fórmula $H_c = 1.43 (\Delta T)^{1/3}$ que corresponde a superficie horizontal con el lado caliente hacia arriba. Si observamos las temperaturas obtenidas en la superficie del fondo en la tabla 1, veremos que el calor emanado es despreciable, más aún

si consideramos su reducida área y que el coeficiente convectivo natural para una superficie en esa posición, es el más pequeño de todas las posiciones.

De la tabla 2 obtenemos mediante la sumatoria de cada uno de los flujos de calor en W, multiplicado por cada uno de los tiempos, el valor:

$$Q_p = 10.380 \text{ KJ}$$

El calor perdido por el aceite en los 155 min. que demora el proceso es $Q_p = 10.380 \text{ KJ}$

El calor que emana la parte aislada de la pared lateral Q_{pa} la podemos calcular considerando la temperatura promedio de la misma, la cual es (de la Tabla 1) $34 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{pa} = H A (T - T_{am})$$

Q_{pa} = calor transferido al ambiente por la pared aislada del tanque W

$H = 7,68 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ coeficiente combinado de transferencia de calor para una pared vertical a $34 \text{ }^\circ\text{C}$ (tomado de la Tabla 2)

T = 34 °C promedio de temperatura de la pared aislada

A = 14,86 Area aislada (lateral + fondo), considerando de esta manera la superficie del fondo debido a que es pequeña en relación al área total.

$$Q_{pa} = 7,68 \times 14,86 (34 - 28)$$

$$Q_{pa} = 685 \text{ W}$$

La cantidad de calor perdida por el aislante Q_{pa} en los 155 min. que dura el proceso será:

$$Q_{pa} = 685 \text{ J/seg} \times 155 \text{ min} \times (60 \text{ seg/min}) (1 \text{ KJ}/1000 \text{ J})$$

$$Q_{pa} = 6.370 \text{ KJ}$$

Cálculo de la cantidad de calor absorbido por el aceite Q_a

$$Q_a = MC\Delta T$$

donde Q_a = calor transferido al aceite KJ

M = 9507 Kg masa de aceite

C = 1,980 KJ/Kg °C, calor específico promedio del aceite a 44 °C

ΔT = Variación de temperatura del aceite

Podemos efectuar este cálculo debido a que el calor específico del aceite como se observa en la tabla 3,



solo tiene una variación del 3% en el rango de temperatura del proceso, respecto al calor específico a la temperatura promedio de 44 °C.

$$Q_a = 9.057 \times 1,980 (60 - 28)$$

$$Q_a = 602.363 \text{ KJ}$$

Resumiendo los datos calculados anteriormente

$$Q_p = 10.380 \text{ KJ}$$

$$Q_{pa} = 6.370 \text{ KJ}$$

$$Q_a = 602.363 \text{ KJ}$$

Estas energías pueden visualizarse en mejor forma en el diagrama de Sankey de la Fig. 4, todas las energías arriba indicadas provienen de la condensación del vapor Q_v así:

$$Q_v = Q_a + Q_p + Q_{pa}$$

$$Q_v = 602.363 + 10.380 + 6.370$$

$$Q_v = 619.113 \text{ KJ}$$

Calculemos cuántos grados incrementaría en el aceite, el calor Q_p de las pérdidas.

$$Q_p = MC T$$

$$T = Q_p / MC$$

$$T = 10.380 \text{ KJ} / 9.507 [\text{Kg}] \times 1,980 [\text{KJ/Kg } ^\circ\text{C}]$$

$$T = 0,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El aceite se elevaría 0,55 °C más si las pérdidas de calor fueran aprovechadas.

3.3 BALANCE DE ENERGIA Y OBTENCION DE LA ECUACION DEL SISTEMA

Hagamos el balance de energía para el aceite.

Energía que se almacena en el aceite. + Energía que sale del aceite = Energía transferida por el vapor.

$$MC \frac{dT}{d\theta} + \frac{dQ_p}{d\theta} = U_t A_t (T_v - T) \quad E-1$$

donde M = masa de aceite en Kg

C = calor específico del aceite J/Kg °C

Q_p = Calor perdido por el aceite a través de las paredes J

θ = tiempo seg.

T = temperatura del aceite °C

T_v = temperatura del vapor °C

U_t = coeficiente global total de transferencia de calor entre el vapor y el aceite W/m² °C

A_t = área total de transferencia de calor entre el vapor y el aceite m²

Observando que la magnitud de la energía perdida Q_p

representa solo un 1.7% de la energía entregada por el vapor, la misma puede ser despreciada quedando la ecuación.

$$MC \frac{dT}{d\theta} = U_t A_t (T_v - T) \quad E-2$$

Existen dos áreas de transferencia de calor, en el serpentín del fondo A_f y, en la parte lateral A_l . Así:

$$A_t = A_f + A_l$$

Cada una con sus correspondientes coeficientes globales de transferencia de calor entre el vapor y el aceite, U_f para el serpentín del fondo y U_l para la parte lateral, así:

$$U_t A_t = U_l A_l + U_f A_f$$

Podemos resolver la ecuación E-2 por integración bajo las siguientes condiciones:

- 1 C es constante para el proceso
- 2 U_t es constante para el proceso
- 3 La agitación produce temperatura uniforme en el lote
- 4 La temperatura del medio calefactor (vapor) se mantiene constante.

La solución de E-2 es:

$$\frac{T - T_v}{T_o - T_v} = e^{-\frac{U_t A_t}{M C} \theta} \quad \text{E-3}$$

donde θ = tiempo en segundos

T = temperatura del aceite al tiempo θ

T_o = temperatura del aceite al tiempo $\theta = 0$

e = neperiano 2,7182

los restantes términos fueron definidos en la ecuación E-1.

Como en E-3 para el proceso conocemos todos los términos exepcto U_t, podemos despejarlo. De esta forma para:

$$T = 60,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_o = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_v = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$M = 9507 \text{ Kg}$$

$$C = 1980 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$A_t = 13,59 \text{ m}^2$$

$$\theta = 93000 \text{ seg. (155 min)}$$

Despejando en E-3

$$\ln [(T_v - T_o)/(T_v - T)] = U_t A_t \theta / M C \quad \text{E-4}$$

Calentamos hasta 60,55 °C para considerar las pérdidas

de calor de la masa de aceite.

$$\ln \left[\frac{(160 - 28)}{(160 - 60,55)} \right] =$$

$$= U_t \times 13,59 \times 9300 / 9507 \times 1980$$

de aquí:

$$U_t A_t = 574,8 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$U_t = 42,30 \text{ W/m}^2$$

Reemplazando estos valores en E-3 podemos obtener la función de temperatura T del aceite con respecto al tiempo, así:

$$\frac{T - 160}{28 - 160} = e^{-\frac{574,8}{9507 \times 1980} \theta \times 60}$$

en la que θ está en minutos, despejando para T

$$T = 160 - 132 e^{-\theta/545,809} \quad \text{E-5}$$

En la tabla 4 escribimos en función del tiempo las temperaturas calculadas mediante E-5 y las medidas experimentalmente; estos datos se encuentran graficados en la figura # 5. De el análisis de la tabla y el gráfico podemos observar lo siguiente:

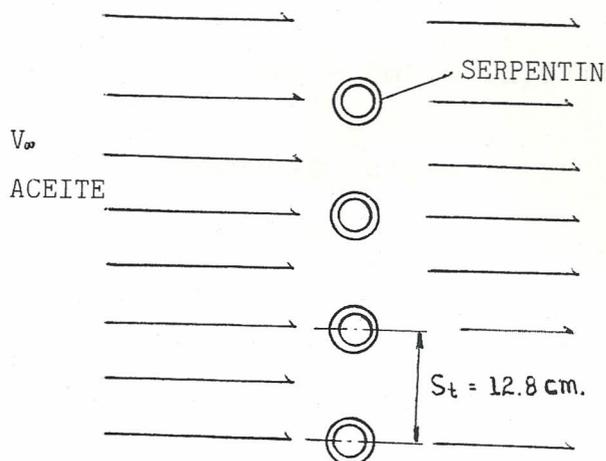
- Los datos de temperatura del aceite obtenidos

experimentalmente son practicamente iguales a los datos calculados mediante E-3.

- El sistema se comporta de acuerdo a E-3, que representa el calentamiento de un cuerpo con resistencia interna despreciable.
- El valor de la constante de tiempo del sistema es $\tau = 545,809$ min.
- Un valor promedio de $U_t A_t$ es suficiente para el rango de temperatura en que opera el sistema para representarlo matemáticamente con exactitud aceptable.

3.4 CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SERPENTIN DEL FONDO UF

Para calcular el coeficiente global, visualizamos el serpentín del fondo como un banco de tubos de una sola hilera a través del cual atraviesa aceite. La bomba que produce la recirculación de aceite tiene un caudal $Q_v = 15 \text{ m}^3/\text{h}$, este caudal es el que se moviliza a través del banco de tubos como podemos apreciar en el esquema que está a continuación



Número de tubos = 15

Paso transversal $St = 12,8 \text{ cm.}$

$D_o =$ Diámetro exterior de los tubos = $4,216 \text{ cm.}$

Area exterior del serpentín $2,53 \text{ m}^2$

$Q_v = 15 \text{ m}^3/\text{h} = 4,17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg.} =$ caudal a través del serpentín

$A_\infty =$ Area de sección libre = $\pi D^2/4 = 3,80 \text{ m}^2$ donde

$D = 2,20 \text{ m}$ diámetro del tanque

$V_\infty = Q_v/A_\infty = 4,17 \times 10^{-3} / 3,80 \text{ m}^2 = 1,097 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{seg.}$

donde $V_\infty =$ velocidad en la sección libre del tanque

$V_{\text{max}} = V_\infty A_\infty/A_{\text{min.}}$



V_{max} = velocidad máxima del aceite al pasar por el serpentín

$$A_{\omega}/A_{min} = St/(St - D_{\omega}) = 12,8/(12,8 - 4,216) = 1,49$$

$$V_{max} = 1,097 \times 10^{-3} \times 1,49$$

$$V_{max} = 1,64 \times 10^{-3} \text{ m/seg.}$$

Cálculo del Coeficiente Convectivo en el Interior del Serpentín

Usamos la ecuación 5.59 de la Ref. 4 que se usa para calcular coeficiente convectivo en el interior de un tubo cuando existe condensación.

$$H_i = 0,557 \left[\frac{K_f^3 \cdot \rho_f (\rho_f - \rho_g) \cdot g \cdot H_{fg}}{u_f \cdot D_i (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

- donde H_i = coeficiente convectivo interior $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
- K_f = Conductividad térmica del agua = $685 \times 10^{-3} W/m \text{ } ^\circ K$
- ρ_f = densidad del agua = $909,92 \text{ Kg/m}^3$
- ρ_g = densidad del vapor = $3,021 \text{ Kg/m}^3$
- H_{fg} = entalpia de evaporación = 2091000 J/kg
- D_i = Diámetro interior del tubo = $35,05 \times 10^{-3} \text{ m}$
- u_f = Viscosidad del agua = $173 \times 10^{-6} \text{ Kg/m seg.}$

Tsat = Temperatura del vapor (°C)

Tw = Temperatura de la pared del tubo (°C)

g = Subíndice indica fase gaseosa del vapor humedo

g = gravedad 9.8 m/seg

f = Subíndice indica fase liquida del vapor húmedo

. Las propiedades son evaluadas a la temperatura filmica Tf=(Tw+Tv)/2

Asumimos Tw = 150 °C, así Tf=155 °C. Reemplazando valores:

$$Hi = 0,557 \left[\frac{(685 \times 10^{-3})^3 \times 909,92 (909,92 - 3,021) \times 9,8 \times 2091000}{173 \times 10^{-6} \times 35,05 \times 10^{-3} (160 - 150)} \right]^{1/4}$$

$$Hi = 17.303 \text{ W/m}^2 \text{ °C} = 3.047 \text{ Btu/hr pie}^2 \text{ °F}$$

Si asumimos Tw = 140 °C obtendriamos Hi = 14.549 W/m² °C

Una variación del 100% en ΔT = (Tsat - Tw) solo produce una variación en Hi del 16%.

Cálculo del Coeficiente Convectivo exterior Ho del Serpentin del Fondo

Las propiedades del aceite a 44 °C son las siguientes:



(datos obtenidos de la tabla A5 Ref.5)

$$\mu = 17,43 \times 10^{-2} \text{ Kg/m seg viscosidad}$$

$$\rho = 873,63 \text{ Kg/m}^3 \text{ densidad}$$

$$C = 1980 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C calor especifico}$$

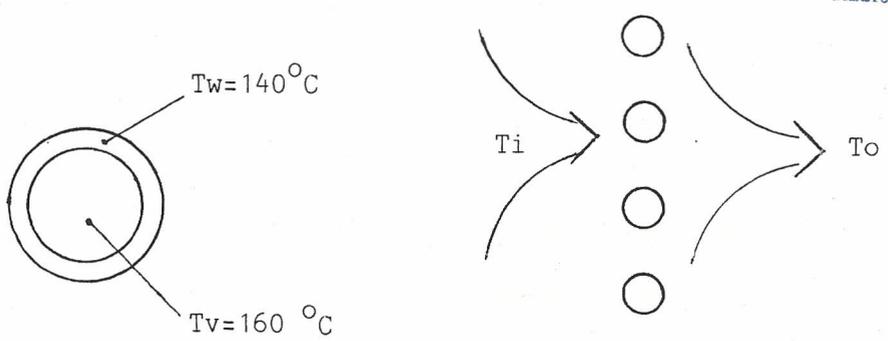
$$K = 143,6 \times 10^{-3} \text{ W/m } ^\circ\text{C conductividad termica}$$

$$Pr = 3256,5 \text{ número de Prandtl}$$

Consideremos $H_i = 17300 \text{ W/m}^2$ oK

Asumimos $T_w = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

Esquemmatizando



Asumo $T_i =$ Temperatura del aceite antes del serpentín = $44 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_o =$ Temperatura del aceite después del serpentín = $45 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_b =$ Temperatura promedio de la masa principal

$$T_b = (T_i + T_o)/2 = (44 + 45)/2 = 44,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Re = \frac{G_{max} D_o}{\mu_b}$$

$\mu_b = 17,43 \times 10^{-2}$ Kg/m seg. Viscosidad del aceite a la temperatura T_b

G_{max} = Velocidad del flujo por unidad de área mínima entre los tubos en Kg/seg m^2

$$G_{max} = \rho_b V_{max} = 873,63 \times 1,64 \times 10^{-3}$$

donde ρ_b = densidad a la temperatura T_b

$$G_{max} = 1,433 \text{ Kg/seg } m^2$$

$$Re = 1,433 \times 0,04216 / 17,43 \times 10^{-2} \text{ Kg/m seg.}$$

$$Re = 0,34$$

El valor del Reynolds implica régimen laminar, entonces debemos usar la fórmula siguiente obtenida de la Ref. 1 ecuación 9-8

$$j = (Ho/C G_{max}) \rho_b^{2/3} (\mu_s/\mu_b)^{0.14}$$

donde μ_s es la viscosidad del aceite a la temperatura de la pared.

Con el valor de Re vamos a la Fig. 9-18 de la Ref. 1 y encontramos que para $Re = 0,34$ $j = 2,7$ (extrapolando) Reemplazando este valor en la fórmula anterior

$$2,7 = (Ho/C Gmax) Pr_b^{2/3} (us/ub)^{0.14}$$

$$us = 0,658 \times 10^{-2} \text{ Kg/m seg. (a } 140 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$ub = 17,43 \times 10^{-2} \text{ Kg/m seg}$$

$$C = 1980 \text{ J/Kg }^\circ\text{K}$$

Con estos valores reemplazados en la fórmula anterior tenemos:

$$Ho = 55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K} = Hc(10 \text{ hileras})$$

Este valor de Ho es para 10 hileras de tubos, aplicando la ecuación 9-9 de la Ref. 1

$$Ho(N \text{ hileras}) = (10/N)^{0.18} \times Hc(10 \text{ hileras})$$

$$Ho(1 \text{ hilera}) = 55 \times (10/1)^{0.18}$$

$$Ho = 83,25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K} \text{ para 1 hilera}$$

El factor de incrustación dentro del tubo para vapor de agua es $0.0005 \text{ hr pie}^2 \text{ }^\circ\text{F/Btu} = 8,80 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Ref. 1 Tabla 11-1

$$U_f = \frac{1}{1/H_i + R_{inc} + e/K + 1/H_o}$$

$$R_t = 1/H_i + R_{inc} + e/K + 1/H_o$$

donde $R_{inc} = \text{Resistencia por incrustación } \text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$

R_t = Resistencia total $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$

$$R_t = (1/17300) + 8,80 \times 10^{-5} + (7,11 \times 10^{-3} / 45) + 1/83,25$$

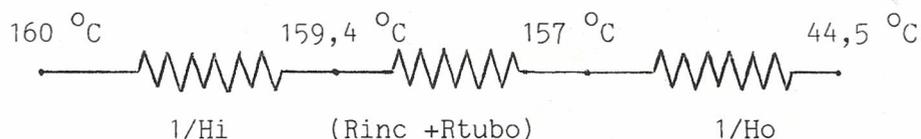
$$R_t = 12,31 \times 10^{-3} \text{ } m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

R_t en componentes porcentuales es

$$R_t = 0,5\% \quad + \quad 2\% \quad + \quad 97,5\%$$

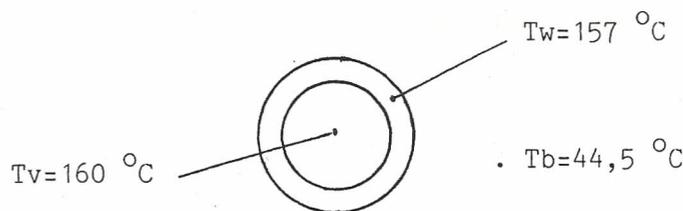
$$\quad 1/H_i \quad (R_{inc} + R_{tubo}) \quad 1/H_o$$

Debido a estas resistencias las caídas de temperaturas deberían ser de la forma que se esquematiza a continuación:



En vista de esto asumimos esta vez $T_w = 157 \text{ } ^\circ\text{C}$

Esquemmatizando:



$$\mu_s = 0,470 \times 10^{-2} \text{ } \text{Kg}/\text{m seg} \text{ (a } 157 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$Re = (G_{max} D_o) / \mu_b = 0,34 \quad j = 2,7 \quad \text{Fig. 9-18 Ref. 1}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación

$$j = (Ho/C G_{max})^{Prb} \quad (us/ub)^{0.14}$$

$$2,7 = (Ho/1980 \times 1,433)^{2/3} \times (3256,5)^{2/3}$$

$$\times (0,470 \times 10^{-2} / 17,43 \times 10^{-2})^{0.14}$$

despejando

$Ho = 57,7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ para 10 hileras de tubos

$$Ho = 1 \text{ hilera} = (10/1)^{0.18} \times 57,7$$

$Ho = 87,12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ para una hilera de tubos

Analizando las resistencias tenemos

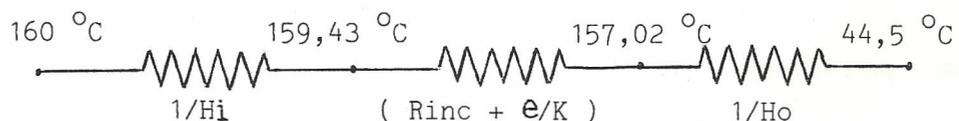
$$Rt = 1/Hi + (R_{inc} + e/k) + 1/Ho$$

$$Rt = 0,0578 \times 10^{-3} + 0,246 \times 10^{-3} + 11,48 \times 10^{-3}$$

$$Rt = 0,49\% + 2,09\% + 97,42\%$$

$$Rt = 11,78 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Esquemmatizando las caídas de temperatura



La suposición de T_w es correcta

$$Uf = 1/Rt = 1/11,78 \times 10^{-3}$$

$$Uf = 84,89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = U_f A_f (T_{\text{vapor}} - T_a)$$

Q_1 = calor transferido del vapor al aceite W

A_f = 2,53 m² Area del serpentín del fondo

T_a = 44,5 °C Temperatura de la masa principal de aceite

$$Q_1 = 84,89 \times 2,53(160-44,5)$$

$$Q_1 = 24806 \text{ W}$$

$$\dot{m} = Q_v \cdot \rho$$

\dot{m} = flujo másico de aceite Kg/seg

$Q_v = 4,17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$ flujo volumétrico de aceite

$\rho = 873,63 \text{ Kg/m}^3$ densidad del aceite a 44,5 °C

$$\dot{m} = 4,17 \times 10^{-3} \times 873,63$$

$$\dot{m} = 3,643 \text{ Kg/seg}$$

$$Q_2 = \dot{m} C \Delta T ; \Delta T = T_o - T_i$$

Q_2 = calor absorbido por el aceite

$C = 1980 \text{ J/Kg}$ calor específico a 44,5 °C

$T_i = 44 \text{ °C}$ Temp. del aceite antes del serpentín

$T_o = 45 \text{ °C}$ Temp. del aceite después del serpentín

$$Q_2 = 3,643 \times 1980(45-44)$$

$$Q_2 = 7213 \text{ W} \quad Q_1/Q_2 = 24806/7213 = 3.44$$

Q_1 debe ser igual a Q_2 pero Q_1 es aproximadamente tres veces mayor que Q_2 , esto significa que para igualarse ΔT deberá ser tres veces mayor, es decir 3,44 °C; pero U_f no variará grandemente al recalcularlo para el nuevo ΔT porque las propiedades del aceite no variarán grandemente, así que:

56

$$\Delta T = (T_o - T_i) = 3,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Con lo cual } Q_2 = mC\Delta T = 3,643 \times 1980 \times 3,44 = 24.813 \text{ W}$$

$$\text{Así comprobamos que } U_f = 84,89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.5 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA PARTE LATERAL (UL)

Para calcular el calor entregado por el serpentín lateral desde el vapor al aceite, es necesario utilizar el coeficiente global de transferencia de calor lateral, el cual lo definimos de la siguiente manera:

$$Q_1 = U_1 A_1 (T_v - T)$$

donde Q_1 = calor transferido desde el vapor en el serpentín lateral al aceite

$$U_1 = \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A_1 = Area de la pared lateral del tanque abrazada por el serpentín lateral.

T_v = Temperatura del vapor

T = Temperatura del aceite

$$U_t A_t = U_1 A_1 + U_f A_f$$

$$U_1 A_1 = U_t A_t - U_f A_f$$

$$U_f A_f = 84,89 \times 2,53 = 214,77$$

$$U_1 A_1 = 574,8 - 214,77$$

$$U_1 A_1 = 360,03 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$U_1 = 360,03/A_1 = 360,03/11,06$$

$$U_1 = 32,55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

El porcentaje de aporte para el calentamiento brindado por la parte lateral es:

$$(360,03)/574,8 \times 100 = 63\%$$

y el serpentín del fondo aporta con el 27%

La transferencia de calor en la parte lateral la visualizamos como transferencia de calor desde el vapor en un tubo hacia el exterior a través de una superficie extendida, en la Fig. 6 podemos observar claramente esta apreciación. Para el análisis se ha tomado un módulo, tal como se ve en la Figura. En el podemos observar como la plancha de metal que conforma la pared del recipiente se comporta como una aleta de el serpentín lateral.

Teniendo en consideración las apreciaciones anteriores tendremos.

$$Q_1 = U_1 A_1 (T_v - T)$$

Siendo Q_1 = calor transferido por el módulo al aceite
Wattios

U_1 = coeficiente global de transferencia de calor entre el vapor y el aceite $\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

T_v = Temperatura del vapor $^\circ\text{C}$

T = Temperatura del aceite °C

De este modo:

$$U_1 A_o = \frac{1}{R_{ext} + R_{cont} + R_{tubo} + R_{inc} + R_{int}} \quad E-6$$

donde: $A_o = P \times l$

$P = 0,175$ m ancho del módulo

R_{ext} = Resistencia térmica debido a convección con el aceite °C/W

R_{cont} = Resistencia de contacto entre el tubo y la pared del tanque °C/W

R_{tubo} = Resistencia térmica de la pared del tubo °C/W

R_{inc} = Resistencia térmica debido a incrustaciones en el interior del tubo °C/W

R_{int} = Resistencia térmica debido a convección entre el vapor y el tubo °C/W.

$$U_1 A_o = \frac{1}{\frac{1}{A_o h_a} + \frac{x_b}{K_b (B \times l)} + \frac{e}{K (D_i + D_o) \pi \times l} + \frac{1}{H_{inc} \pi D_i \times l} + \frac{1}{H_i \pi D_i \times l}}$$

Donde:

n_t = eficiencia total de la aleta

K_b = conductividad térmica de la soldadura
45 W/m °C

K = conductividad térmica del tubo y de la
pared del tanque 45 W/m °C

$1/H_{inc}$ = $8,80 \times 10^{-5}$ m²°C/W resistencia térmica
de las incrustaciones

D_i = diámetro interior del serpentín
0,03505 m

D_o = diámetro exterior del serpentín 0,04216 m

e = espesor del tubo 0,007 m

X_b = espesor de la junta soldada m

H_i = coeficiente convectivo en el interior del
tubo

B = Ancho de soldadura 0,035 m

por definición de eficiencia de la aleta

$$A_o n_t = (A_o - A_f) + A_f n_f$$

$$A_o n_t = (B \times 1) + 2 L n_f$$

En donde A_f = Area de la aleta

n_f = eficiencia de la aleta

L = 0,07 m longitud de la aleta

Así:

$$R_{ext} = \frac{1}{[(B \times 1) + 2 L n_f \times 1] H_a}$$

reemplazando en E-6

$$U_1 A_o = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{(B \times 1) + 2L n_f \times 1} + R_{cont} + R_{tubo} + R_{inc} + R_{int}}}} \quad E-7$$

La eficiencia de una aleta de sección transversal rectangular con convección en un lado y con el otro lado y el extremo adiabáticos es:

$$n_f = \frac{\text{Tanh}(mL)}{mL} \quad m^2 = Ha/K.t$$

$$Ha = m^2 \cdot K.t$$

t = espesor de la pared del tanque

reemplazando:

$$U_1 A_o = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{[Bm^2 \times 1 + 2mt \text{tanh}(mL)] K.t} + \frac{X_b}{K_b (B \times 1)} + \frac{e}{K(D_i + D_o) \pi \times 1}} + \frac{1}{H_{inc} \pi D_i \times 1} + \frac{1}{H_i \pi D_i \times 1}}}} \quad E-8$$

reemplazando valores en la ecuación:





$$32,55 \times 0,175 = \frac{1}{\frac{1}{[0,035 \times m^2 + 2m \tanh(m \times 0,07)] 45 \times 0,006} + \text{BIBLIOTECA}}$$

$$+ \frac{0,007}{45(0,035)} + \frac{0,007}{45(0,038)\pi} + \frac{0,080 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,035} + \frac{1}{17300\pi \times 0,035}$$

Resolviendo la ecuación anterior por tanteo, encontramos:

$$m = 12,18 \quad 1/\text{metro}$$

$$H_a = m^2 \times K \times t = (12,18)^2 \times 45 \times 0,006$$

$$H_a = 40$$

$$n_f = [\tanh(mL)]/mL = 0,81$$

$$n_f = 0,81$$

Veamos los valores de las resistencias en la ecuación

$$U_1 = \frac{1/A_0}{R_{ext} + R_{cont} + R_{tubo} + R_{inc} + R_{int}}$$

$$U_1 = \frac{1/A_0}{(168,46 + 4,44 + 1,12 + 0,80 + 0,5) \times 10^{-3}}$$

En porcentajes respecto de la resistencia total

$$U1 = \frac{1/Ao}{96.09\% + 2,53\% + 0,64\% + 0,46\% + 0,28\%}$$

Observamos que las resistencias térmicas desde el vapor hasta llegar a la pared del tanque son despreciables, no así la resistencia debido a convección que es la que gobierna la transferencia de calor.

Si revisamos la tabla 1 veremos que la temperatura cae bruscamente desde el tubo del serpentín lateral a la pared del tanque; el promedio de temperaturas en el tubo es de 150 °C mientras que la pared del tanque presenta una temperatura promedio de 60 °C.

Una explicación a esta caída brusca de temperaturas es que no existe buen contacto entre el tubo y la pared. Debido a que la parte del tanque en la que se encuentra el serpentín está cubierta con aislante, y no fue permitido retirarlo, el mal contacto fue constatado mediante conversación con un operario que participó en una de las reparaciones al tanque efectuada hace 2 o 3 años, en la cual se retiró el aislante del tanque para cambiar el serpentín, el operario manifestó que efectivamente, el serpentín no estaba soldado continuamente a la pared y que en muchas zonas el serpentín no estaba en contacto con la

pared del tanque.

Con estos antecedentes ya no podremos calcular el valor de h_a mediante la ecuación E-8 debido a que desconocemos el valor de la resistencia de contacto. El valor de h_a lo hallaremos de otra manera en la sección siguiente.

3.5.1 Cálculo del Coeficiente Convectivo en la Pared Interior del Tanque h_a

Tomemos la fórmula de distribución de temperatura en la aleta.

$$\frac{T(x) - T_a}{T_r - T_a} = \frac{\text{Cosh}[m(L - x)]}{\text{Cosh}(mL)} \quad \text{E-9}$$

Esta fórmula corresponde a una aleta recta aislada por un lado, con convección por el otro lado y con el extremo de la aleta adiabático.

$T(x)$ = Temperatura en la aleta a una distancia x desde la raíz ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = Temperatura del aceite ($^{\circ}\text{C}$)

T_r = Temperatura de la raíz de la aleta ($^{\circ}\text{C}$)

x = Distancia desde la raíz de la aleta (m)

L = Longitud de la aleta (m)



BIBLIOTECA

$$m = \sqrt{\frac{h_a}{K \cdot t}}$$

Para esta fórmula conocemos todos los valores excepto m , m puede ser despejado por tanteo para obtener luego el valor de h_a . Los valores de $T(x)$, T_r y T_a se los midió experimentalmente y los hallamos en la tabla 1.

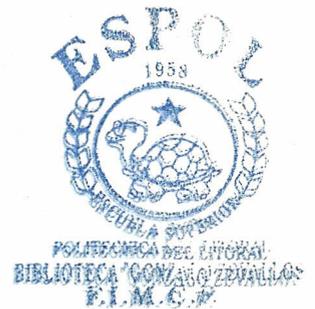
Así por ejemplo para $x = 0,035$ m

$$T(x) = 41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_a = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_r = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 0,07 \text{ m}$$



Reemplazando en E-9

$$\frac{41 - 31}{49 - 31} = \frac{\cosh [m(0,07 - 0,035)]}{\cosh [m(0,07)]}$$

Resolviendo la ecuación por tanteo encontramos

$$m = 21 \text{ 1/metros}$$

Sabemos que

$$h_a = m^2 K \cdot t = (21)^2 \times 45 \times 0,006$$

$$h_a = 119,07 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la tabla 5 podemos ver los valores de h_a obtenidos para algunos valores de temperatura

del aceite en el proceso de calentamiento.

Vemos en la tabla 5 que el coeficiente h_a casi no varía en el proceso de calentamiento y podemos tener un valor promedio el cual es $h_a = 104 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ siendo m promedio igual a $19,62 \text{ 1/metro}$.

Con el valor de $h_a = 104 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ podemos calcular mediante E-9 la distribución de temperatura en la aleta en función de x , estos valores se encuentran en la tabla 6 para algunos valores de temperatura del aceite que fueron medidos experimentalmente.

En la Fig. 7 están graficados de los valores calculados los valores calculados en la tabla 6. Los datos experimentales de la temperatura de la aleta se los puede ver en la tabla 1 en las columnas 9, 10 y 11 transcribiendolos de aquella tabla tenemos:

TEMPERATURAS EXPERIMENTALES EN LA ALETA

| Temp. aceite $^\circ\text{C}$ | T_r $^\circ\text{C}$ | $T(0,035)$ $^\circ\text{C}$ | $T(0,07)$ $^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 31 | 49 | 41 | 40 |
| 41 | 59 | 51 | 50 |
| 50 | 63 | 56 | 55 |
| 54 | 64 | 60 | 59 |
| 59 | 73 | 67 | 66 |

Comparando estos valores experimentales de la temperatura en la aleta con los de la tabla 6 vemos que son muy parecidos, lo cual indica que el valor calculado de $h_a = 104 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ es muy cercano al real.

Entonces la eficiencia de la aleta n_f será:

$$n_f = [t_{\text{amh}}(mL)]/mL$$

$$n_f = [t_{\text{amh}}(19,62 \times 0,07)]/(19,62 \times 0,07)$$

$$n_f = 0,64$$

3.5.2 Cálculo de la Resistencia de Contacto del Serpentin Lateral

Reemplacemos el valor de $n_f = 0,64$ 1/metro en la ecuación E-7

$$U_1 = \frac{1/0,175}{1 + R_{\text{cont}} + [(0,035 \times 1) + 2 \times 0,07 \times 0,64 \times 1]104 + 1,12 \times 10^{-3} + 0,8 \times 10^{-3} + 0,5 \times 10^{-3}}$$

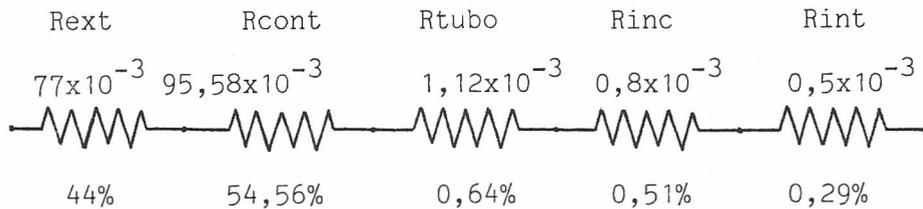
E-10

$$32,55 = \frac{1/0,175}{77 \times 10^{-3} + R_{\text{cont}} + 2,42 \times 10^{-3}}$$

$$R_{\text{cont}} = 95,58 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Del denominador de la ecuación E-10 podemos extraer las resistencias térmicas y obtenemos el siguiente:

Circuito térmico (todas las resistencias en $^{\circ}\text{C}/\text{W}$)



Podemos apreciar que actualmente y debido a que no existe buen contacto entre el serpentín y la pared del tanque, la resistencia de contacto representa el 54,56% de la caída de temperatura entre el vapor y el aceite.

Esta resistencia lógicamente debe ser disminuida mejorando el contacto entre la pared y el serpentín.

3.6 CALCULO DE LA CANTIDAD DE CONDENSADO EN LOS SERPENTINES

Serpentín del Fondo

$$U_f = 84,89 \text{ W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$A_f = 2,53 \text{ m}^2$$

$$Q_f = U_f \cdot A_f (T_{\text{vapor}} - T_{\text{aceite}}) =$$

$$Q_f = 84,89 \times 2,53 (160 - 44)$$

$$Q_f = 24,806 \text{ KJ/seg} =$$

donde Q_1 = flujo promedio de calor entregado por el serpentín al aceite

$$Q_1 = X \cdot h_{fg} \cdot m$$

X = título de vapor

h_{fg} = 2081,07 KJ/Kg entalpía de condensación a 160 °C

m = flujo de vapor Kg/seg.

$$m = \frac{Q}{x \cdot h_{fg}} = \frac{24,806}{0,89 \times 2081,07}$$

$$m = 13,393 \text{ Kg/seg} = 48 \text{ Kg/hr}$$

Serpentín lateral

$$U_1 = 32,55 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = U_1 A_1 (T_v - T_a)$$

$$Q_1 = 32,35 \times 11,06 \times (160 - 44)$$

$$Q_1 = 41,503 \text{ KJ/seg.}$$

donde Q_1 es el flujo de calor promedio entregado por el serpentín.

$$m = \frac{Q_1}{x \cdot h_{fg}} = \frac{41,500}{0,89 \times 2081,07}$$



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLIO"
E.I.M.C.P.

$$m = 80,67 \text{ Kg/hr}$$

3.7 CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL UL SI EL SERPENTIN ESTUVIERA CONTINUAMENTE SOLDADO A LA PARED DEL TANQUE

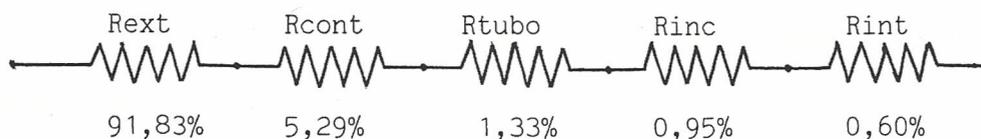
De la ecuación E-7

$$U1 A_o = \frac{1}{\frac{1}{(b \times 1) + 2Lnf \times 1} Ha + R_{cont} + R_{tubo} + R_{inc} + R_{int}}$$

$$U1 A_o = \frac{1}{\frac{1}{(0,035 \times 1) + 2 \times 0,07 \times 0,64 \times 11104} + 4.44 \times 10^{-3} + 1.12 \times 10^{-3} + 0,8 \times 10^{-3} + 0,5 \times 10^{-3}}$$

$$U1 = \frac{1/0.175}{0.077 + 6.86 \times 10^{-3}} = 68 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Circuito Térmico:



Cálculo del Tiempo de Calentamiento

Calculemos el tiempo que demoraría el aceite en calentarse si el serpentín lateral estuviera soldado continuamente a la pared del tanque.

$$U_1 A_1 = 68 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \times 11,06 \text{ m}^2 = 752 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$U_t A_t = U_1 A_1 + U_f A_f$$

$$U_t A_t = 752 + 214,77$$

$$U_t A_t = 966,8 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

De la ecuación E-4

$$\ln[(T_v - T_o)/(T_v - T)] = U_t A_t \theta / MC$$

Despejando θ

$$\theta = (MC/U_t A_t) \ln[(T_v - T_o)/(T_v - T)]$$

$$\theta = (9507 \times 1980 / 966,8) \ln[(160 - 28)/(160 - 60,55)]$$

$$\theta = 5533 \text{ seg.}$$

$$\theta = 92 \text{ min.}$$

Este tiempo en la práctica debe ser un poco mayor ya que no todo el serpentín está separado de la pared del tanque debido a que hay puntos en los cuales el serpentín está soldado a la pared, son estos los puntos en los cuales se sostiene el mismo y en esas zonas no se mejorará apreciablemente la resistencia de contacto, por este motivo la mejora del tiempo que nos da el cálculo es solo aproximada, pero nos da la idea de la proporción en la que va a mejorar la rapidez de

calentamiento si tuvieramos buena junta del serpentín a la pared.

La ecuación E-8 nos dice como varía la transferencia de calor con cada uno de los parámetros intervinientes, calculemos el coeficiente global U1 si el paso del serpentín (la distancia entre espiral y espiral) se redujera a la mitad.

Si $P = 8,5$ cm y lo reemplazamos en la ecuación 8

$$L = (P - B)/2 = (8.5 - 3.5)/2 = 2.5$$

$$L = 2.5 \text{ cm Longitud de la aleta}$$

La eficiencia de la aleta sería:

$$nf = \frac{\text{Tanh}(mL)}{mL}$$

$$nf = \frac{\text{Tanh}(19,62 \times 0,025)}{19,62 \times 0,025}$$

$$nf = 0.92$$

$$A1 = \frac{1}{\frac{1}{[Bm^2 \times 1 + 2m \text{tanh}(mL)] K \cdot t} + \frac{x_b}{K_b (B \times 1)} + \frac{e}{K (D_i + D_o) \pi \times 1} + \frac{1}{2}}$$



$$+ \frac{1}{H_{inc} \pi D_i \times 1} + \frac{1}{H_i \pi D_i \times 1}$$

$$U_1 = \frac{1/0.085}{0,1182 + 6,86 \times 10^{-3}}$$

$$U_1 = 94$$

$$U_1 A_1 = 1254,41$$

Con lo cual realizando los cálculos respectivos el tiempo de calentamiento será 71 min.

3.8 CALCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO SI EL TANQUE ESTUVIERA COMPLETAMENTE AISLADO

De la Ecuación 4

$$\ln \frac{T_v - T_o}{T_v - T} = \frac{U_t A_t \theta}{MC}$$

Despejamos θ pero calentaremos el aceite desde 28 °C hasta 60 °C.

$$\text{Así: } \ln = \frac{160 - 28}{160 - 60} = \frac{574,8}{9507 \times 1980} \theta$$

$$\theta = 9.092 \text{ seg.}$$

$$\theta = 151,5 \text{ min.}$$



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
E.I.M.C.P

tiempo que tarda actualmente $\theta = 155$ min.

tiempo ahorrado $155 - 151,5 = 4,5$ min.

3.9 RESULTADOS Y ANALISIS

Las temperaturas en diversos puntos del tanque durante el proceso de calentamiento están presentados en la tabla 1, los coeficientes combinados de convección y radiación para las zonas del tanque donde se pierde la mayor cantidad de calor al ambiente se los aprecia en la tabla 2, así como el flujo de calor perdido durante el proceso de calentamiento.

El calentamiento de los 9.507 Kg de aceite demora 155 min. el calor perdido al ambiente durante ese periodo, es en promedio 16.750 KJ representando esta energía tan solo el 3% de la energía entregada al sistema. Así de la energía entregada por el vapor al condensarse se aprovecha para calentamiento del aceite el 97%.

El tiempo ahorrado en calentar el aceite si redujeramos las pérdidas de calor a cero, es decir, si aislamos todo el recipiente sería de 4,5 minutos.

La ecuación E-2 define con exactitud el comportamiento del sistema ya que con ella se calcula casi exactamente los valores de temperatura del aceite, lo

cual se ven en la Fig. 5, de allí que el aceite verdaderamente se comporta como un cuerpo de resistencia interna despreciable.

Los valores promedio de los coeficientes globales de transferencia de calor para el calentador tal como funciona actualmente son $U_1 A_1 = 360,03 \text{ W/}^\circ\text{C}$ para el serpentín lateral y $U_f A_f = 214,77 \text{ W/}^\circ\text{C}$ para el serpentín del fondo. El serpentín lateral aporta para el calentamiento con el 63% de la energía transferida y el serpentín del fondo con el 27%.

Los circuitos de resistencias térmicas para ambos serpentines indican que la resistencia gobernante es la debida a convección del aceite.

La resistencia de contacto del serpentín lateral actualmente representa el 54% de la caída de temperatura desde el vapor del aceite, cuando si hubiera buen contacto su valor no debería exceder el orden del 6%.

El valor de la resistencia de contacto del serpentín lateral si estuviera continuamente soldado al tanque sería de $4,44 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C}$ representa un 5,29% de la resistencia total, con lo que el coeficiente global de transferencia de calor $U_1 A_1$ se incrementa a $752 \text{ W/}^\circ\text{C}$,

reduciendo el tiempo de calentamiento a 92 min., es decir, se reduce el tiempo en un 40%, pero este resultado es solo aproximado ya que el serpentín lateral está sujeto al tanque por medio de ganchos en unos puntos y soldado en otros y en estas zonas soldadas la transferencia de calor no mejorará apreciablemente.

La eficiencia de la aleta es 0,64, lo cual quiere decir que las paredes del tanque abrazadas por el serpentín se convierten en una superficie extendida de calentamiento con una eficiencia del 64%. Si reducimos el paso del serpentín lateral estando soldado continuamente, el coeficiente de transferencia de calor se incrementa a $U_{IA1} = 1254,41 \text{ W/}^\circ\text{C}$ reduciéndose el tiempo de calentamiento a 71 min., es decir, el 23% con respecto a los 92 min. que demoraba con el paso actual.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del valor obtenido para las pérdidas de calor por las paredes sin aislar del tanque que representa solo un 3% de la energía suministrada por el vapor y los 3.5 minutos en que disminuiría el tiempo de calentamiento de la tanda de aceite vemos que no es recomendable el aislar el resto del tanque.

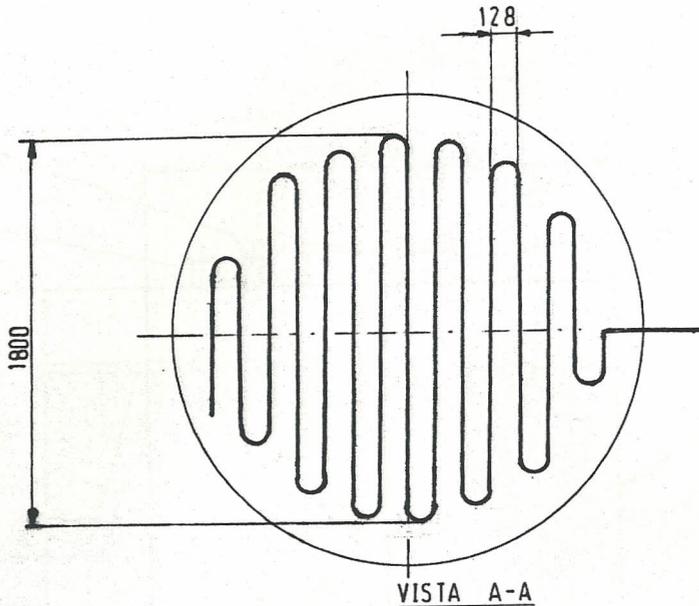
El sistema actualmente es eficiente ya que casi toda la energía de condensación del vapor es aprovechado pero no es rápido.

La rapidez de calentamiento puede ser incrementada soldando de manera continua el serpentín a la pared del tanque para que exista la mínima resistencia térmica de contacto posible, si esto se realiza reduciríamos considerablemente el tiempo de calentamiento (aproximadamente en 40%) .

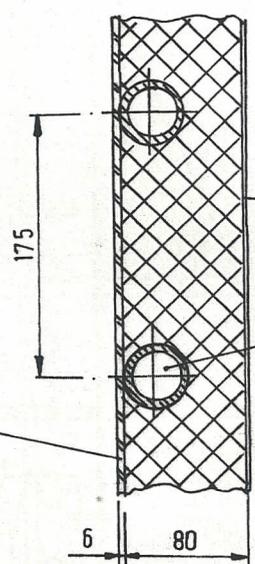
También puede ser reducido el tiempo de calentamiento disminuyendo la separación de las espirales (paso) del serpentín lateral, así si redujeramos el paso del serpentín a la mitad, redujeramos en un 23% el tiempo de calentamiento.

APENDICE





SERPENTIN DEL FONDO
(ϕ 1 1/4" IPS LONG. 20.840 mm)



ALUMINIO (1mm)

4

TUBO ϕ 1 1/4" IPS
 $\phi_{ext} = 42,16$ mm
 $\phi_{int.} = 35,05$ mm

PARED DEL TANQUE

(DIM. MM)

DETALLE -C E 1:5

| Cant | Nombre | Dibujo Norma | Material | Pos. No | Nº del Modelo / semiproducto | Peso Kg/pieza | Observaciones |
|------|------------------------------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------------|---------------|------------------------|
| 1 | Manhole (entrada para hombre) | | acero | 1 | plancha de 6mm, ϕ 600mm | | |
| 1 | Ventilación | | acero | 2 | tubo ϕ 6" | | |
| 1 | Entrada de aceite | | acero | 3 | tubo ϕ 3" | | |
| 1 | Serpentin lateral | | acero | 4 | tubo ϕ 1 1/4" IPS | | 8 espi., long. 55280mm |
| 1 | Conexión de termometro | | | 5 | tubo ϕ 3/4" | | |
| 2 | Trampas de vapor | | | 6 | Sarco, ϕ 1 1/4" | | Modelo FT-125 |
| 1 | Bomba | | | 7 | 5Hp, 15 m ³ /h, ϕ 3" | | |
| 1 | Aislante | | lana vidrio | 8 | espesor 80mm | | |
| 1 | Serpentin del fondo | | acero | 9 | tubo ϕ 1 1/4" IPS | | |
| 1 | Valvula de vapor (serp. del fondo) | | | 10 | ϕ 1 1/4" | | |
| 1 | Tabera | | | 11 | | | |
| 1 | Valvula de vapor (serp. lateral) | | | 12 | ϕ 1 1/4" | | |

ACABADO PESO
1600Kg

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA:

Fecha Nombre
Dibujo 2-1-90 E. C. R.
Revisó 2-1-90 E. C. R.
Aprob.

CALENTADOR MEZCLADOR

HOJA Nº

ESPOL

FIGURA 1

ISO-E

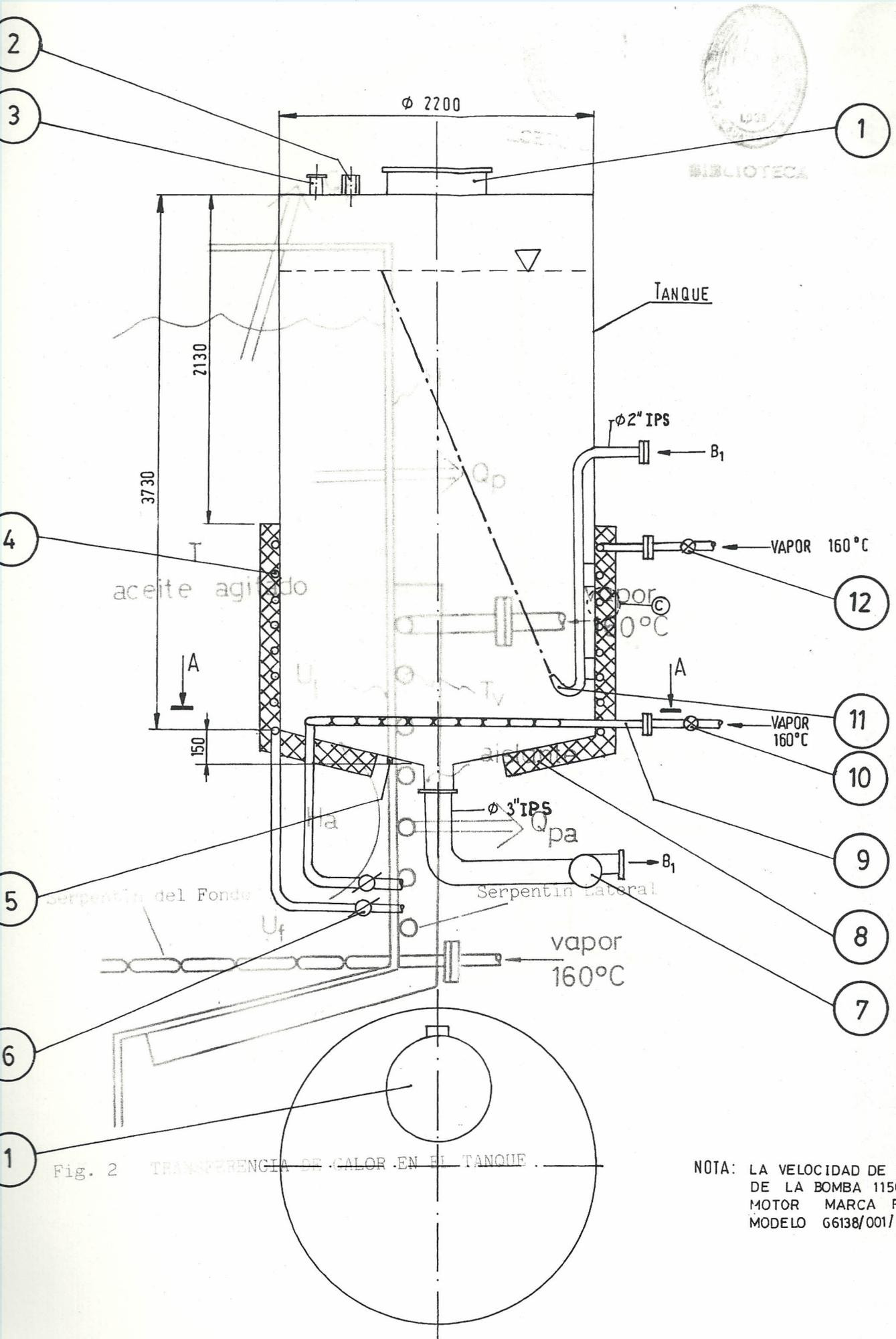


Fig. 2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL TANQUE

NOTA: LA VELOCIDAD DE OPERACION
 DE LA BOMBA 1150 R.P.M
 MOTOR MARCA PLENTY
 MODELO G6138/001/COS



BIBLIOTECA

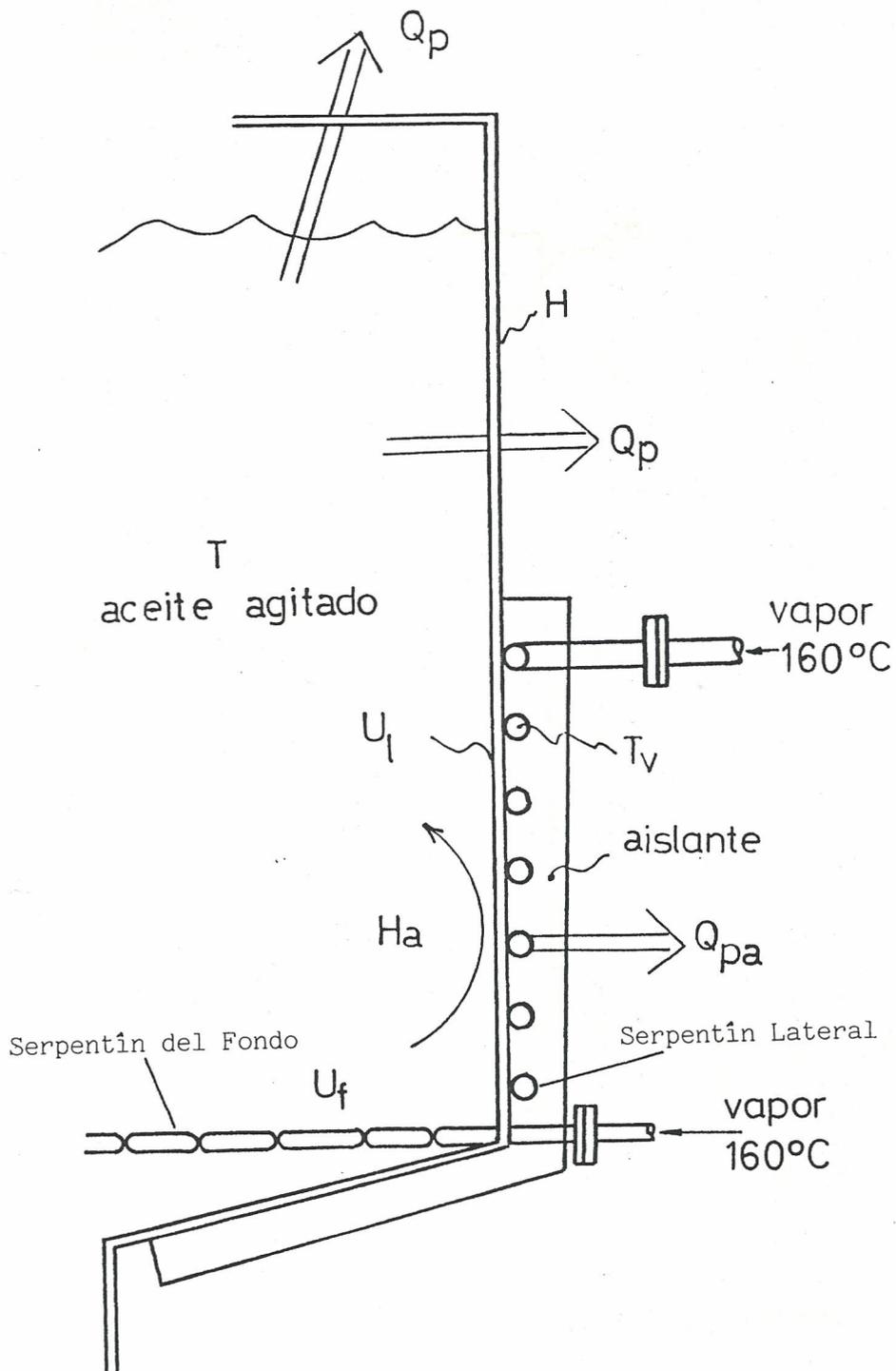


Fig. 2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL TANQUE



UNIVERSIDAD DEL GUAYAS
BIBLIOTECA "GONZALO ZAMUDIO"
P.O. BOX 10.000



BIBLIOTECA

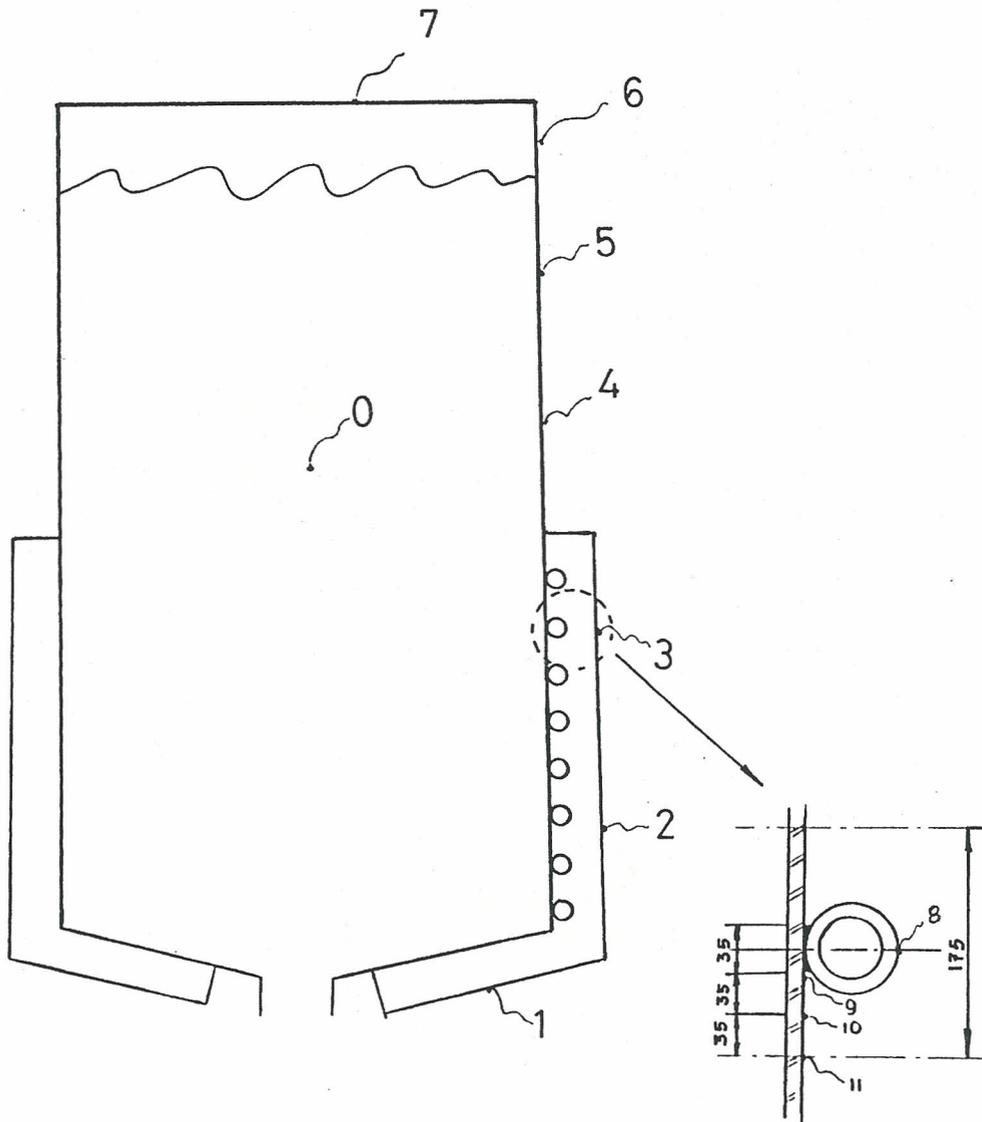


FIG. 3 PUNTOS EN LOS QUE SE MIDIO LA TEMPERATURA



BIBLIOTECA

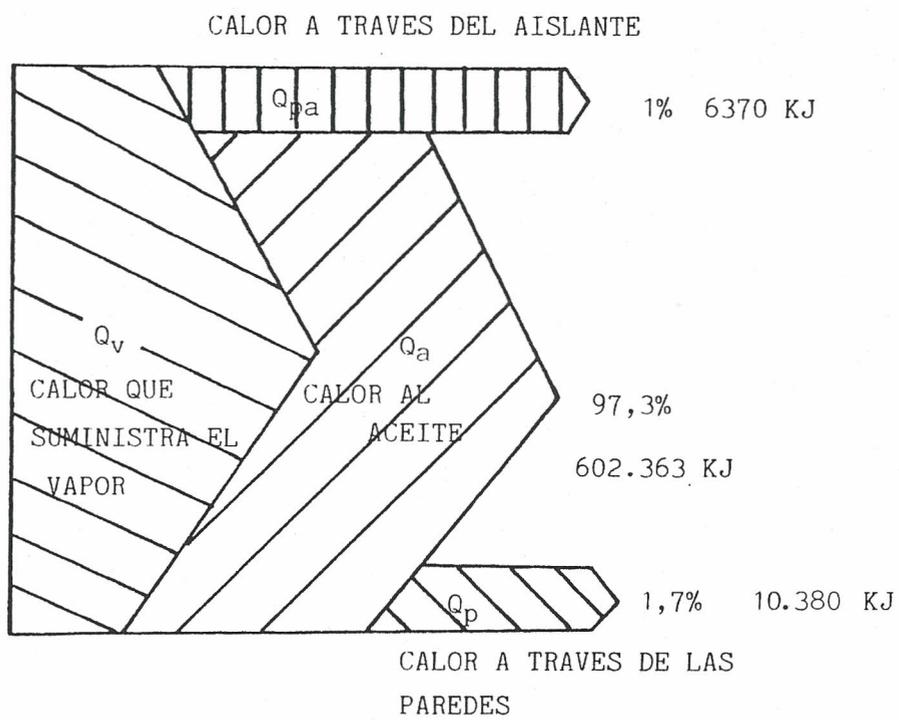


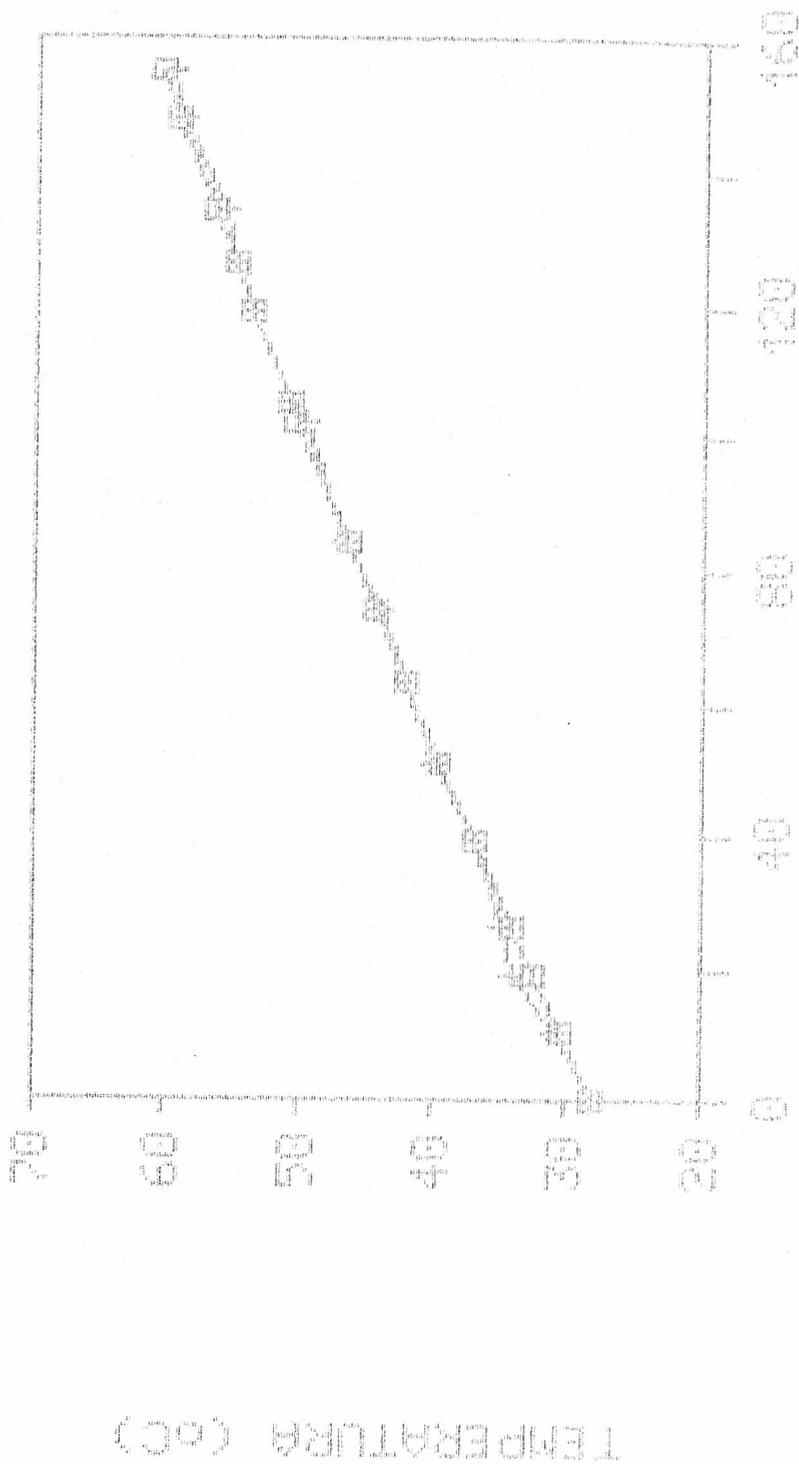
FIG. 4 DIAGRAMA DE SANKEY





BIBLIOTECA

FIGURA 5
TEMPERATURA DEL MUESTRO VS TIEMPO



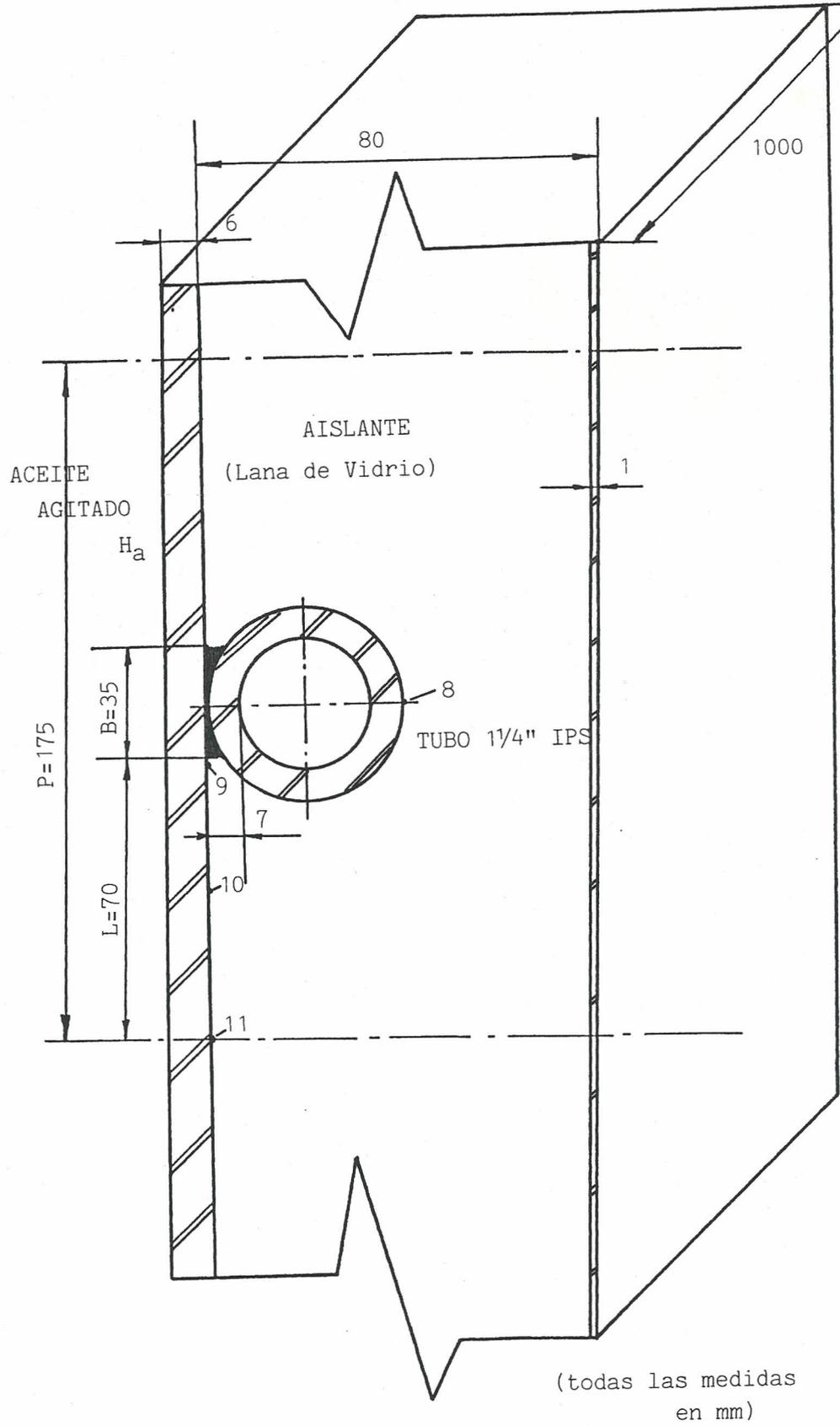
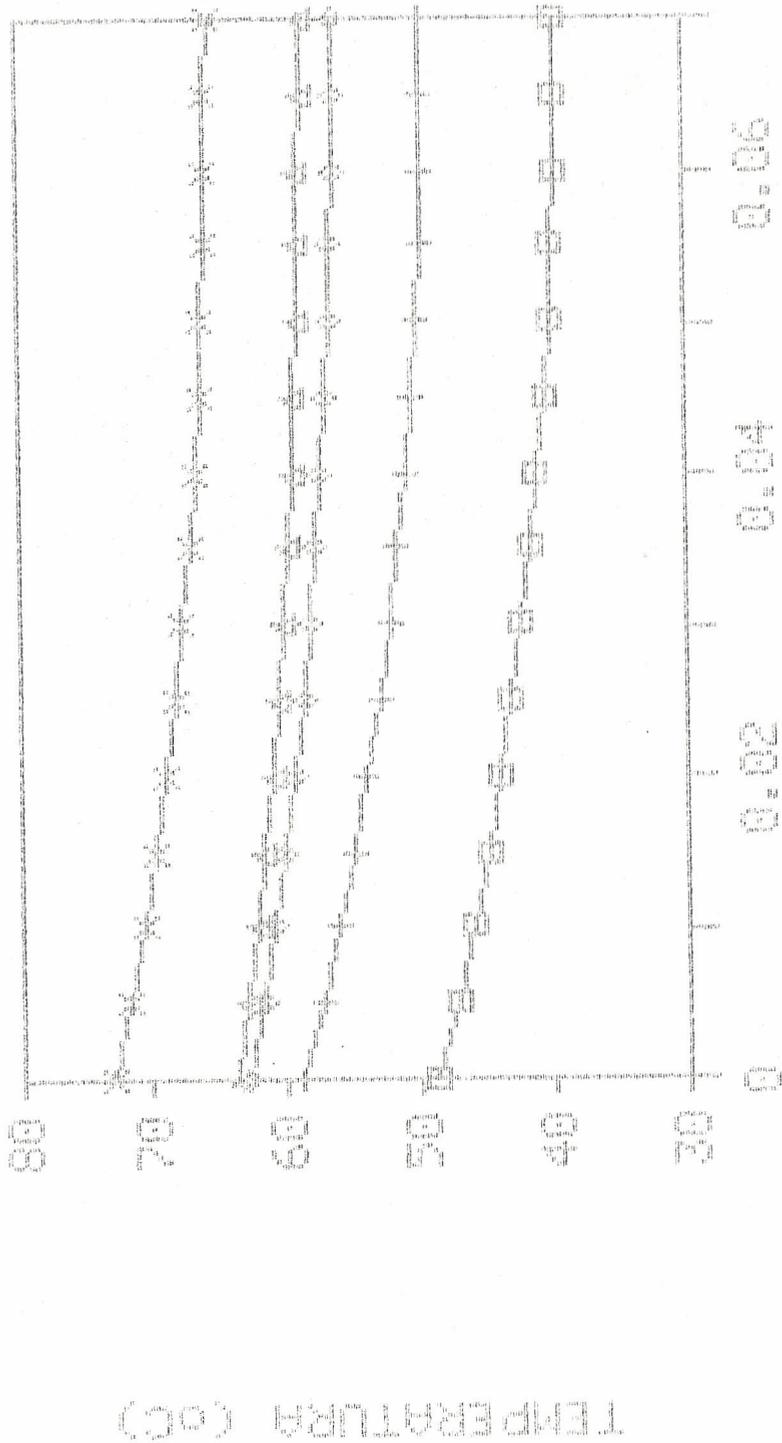


FIG. 6 MODULO PARA EL ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

FIGURA 7
TEMPERATURA EN LA ALETA



BIBLIOTECA



X DISTANCIA (m) Ta=31 Ta=41 Ta=50 Ta=54 Ta=59



TABLA 1

TEMPERATURAS EN EL TANQUE (EN GRADOS CENTIGRADOS)

| TIEMPO MIN. | AISLANTE SIN AISLANTE | | | | | | AGUJEROS | | | | |
|----------------|-----------------------|----|---------|----|------|----|------------------|---------|---------|----|----|
| | FONDO | | LATERAL | | TAPA | | PLANCHA INTERIOR | | LATERAL | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8(TUBO) | 9 | 10 | 11 |
| 0 | 28 | 28 | | 28 | 28 | 28 | | 145 | | | |
| 11 | 31 | 28 | 30 | 29 | 28 | 28 | 28 | | 49 | 41 | 40 |
| 19 | 34 | | 32 | 31 | 28 | 28 | 28 | 153 | | | |
| 26 | 35 | 28 | | 35 | 32 | 28 | 28 | 146 | | 45 | 45 |
| 39 | 37 | | 31 | 33 | 39 | 28 | 29 | 142 | | 46 | 46 |
| 51 | 40 | | | 38 | 35 | 28 | 29 | | | | |
| 63 | 42 | 28 | | 34 | 39 | 29 | 30 | 148 | 59 | 51 | 50 |
| 74 | 44 | | | 40 | 38 | 30 | 30 | | | | |
| 84 | 47 | | | 41 | 40 | 31 | 31 | 156 | | 52 | 51 |
| 102 | 50 | | | 43 | 42 | 32 | 32 | | 63 | 56 | 55 |

REPRODUCIDA

TABLA 1
(CONTINUACION)

TEMPERATURAS EN EL TANQUE (EN GRADOS CENTIGRADOS)

| TIEMPO MIN. | TEMP. ACEITE °C | A I S L A N T E | | | | | | S I N A I S L A N T E | | | | A B U J E R O S | | | | | | |
|----------------|-----------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|------|-----------------------|----|----|----|-----------------|----|----|---------|---|----|----|
| | | FONDO | LATERAL | LATERAL | LATERAL | LATERAL | TAPA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8(TUBO) | 9 | 10 | 11 |
| 105 | 51 | 29 | | | | | | 44 | 43 | 32 | 32 | | | | | | | |
| | | | 29 | 38 | | | | | | | | | | | | | | |
| 119 | 54 | | | | | | | 44 | 43 | 33 | 33 | 153 | 64 | 60 | 59 | | | |
| 126 | 55 | | | | | | | 44 | 42 | 33 | 33 | 158 | | 62 | 61 | | | |
| 134 | 56 | | | | | | | 47 | 44 | 34 | 34 | | | | | | | |
| 148 | 59 | 31 | | | | | | 50 | 47 | 36 | 35 | 145 | 73 | 67 | 66 | | | |
| 155 | 60 | | | | | | | 52 | 49 | 37 | 35 | | | | | | | |





BIBLIOTECA

T A B L A 2

CALOR TRANSFERIDO POR LA PARED LATERAL SIN AISLAR Y POR LA TAPA DEL TANQUE

| TIEMPO MINUTOS | TEMPERAT. lateral | TEMPERAT. tapa | Coefte. Hc | Coefte. Hc | Coefte. Hr | Coefte. Hr | Coefte. H | Coefte. H | Coefte. combinado | Coefte. combinado | Calor perdido | Calor perdido | Calor perdido |
|-------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|
| oC | oC | oC | lateral W/m ² oC | tapa W/m ² oC | lateral W/m ² oC | tapa W/m ² oC | lateral W/m ² oC | tapa W/m ² oC | lateral W/m ² oC | tapa W/m ² oC | lateral W | tapa W | total W |
| 0 | 28 | 28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11 | 31 | 28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | 34 | 31 | 1.37 | 0.00 | 5.88 | 0.00 | 7.25 | 0.00 | 0.00 | 321.03 | 0.00 | 0.00 | 321.03 |
| 26 | 35 | 32 | 1.50 | 0.00 | 5.92 | 0.00 | 7.42 | 0.00 | 0.00 | 438.08 | 0.00 | 0.00 | 438.08 |
| 39 | 37 | 34 | 1.72 | 1.43 | 5.96 | 5.78 | 7.68 | 7.21 | 7.21 | 680.14 | 27.40 | 27.40 | 707.54 |
| 51 | 40 | 34 | 1.72 | 1.43 | 5.96 | 5.78 | 7.68 | 7.21 | 7.21 | 680.14 | 27.40 | 27.40 | 707.54 |
| 63 | 42 | 34 | 1.72 | 1.80 | 5.96 | 5.92 | 7.68 | 7.72 | 7.72 | 680.14 | 58.68 | 58.68 | 738.83 |
| 74 | 44 | 35 | 1.82 | 1.80 | 6.01 | 5.92 | 7.83 | 7.72 | 7.72 | 809.00 | 58.68 | 58.68 | 867.68 |
| 84 | 47 | 36 | 1.90 | 2.06 | 6.04 | 5.88 | 7.94 | 7.94 | 7.94 | 937.56 | 90.54 | 90.54 | 1028.10 |

| T K | ρ kg/m ³ | c_p kJ/kg·K | $\mu \cdot 10^2$ N·s/m ² | $\nu \cdot 10^6$ m ² /s | $k \cdot 10^3$ W/m·K | $\alpha \cdot 10^7$ m ² /s | Pr | $\beta \cdot 10^3$ K ⁻¹ |
|---------------------|-----------------------------|------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|--|--------|---------------------------------------|
| Engine Oil (unused) | | | | | | | | |
| 273 | 899.1 | 1.796 | 385 | 4,280 | 147 | 0.910 | 47,000 | 0.70 |
| 280 | 895.3 | 1.827 | 217 | 2,430 | 144 | 0.880 | 27,500 | 0.70 |
| 290 | 890.0 | 1.868 | 99.9 | 1,120 | 145 | 0.872 | 12,900 | 0.70 |
| 300 | 884.1 | 1.909 | 48.6 | 550 | 145 | 0.859 | 6,400 | 0.70 |
| 310 | 877.9 | 1.951 | 25.3 | 288 | 145 | 0.847 | 3,400 | 0.70 |
| 320 | 871.8 | 1.993 | 14.1 | 161 | 143 | 0.823 | 1,965 | 0.70 |
| 330 | 865.8 | 2.035 | 8.36 | 96.6 | 141 | 0.800 | 1,205 | 0.70 |
| 340 | 859.9 | 2.076 | 5.31 | 61.7 | 139 | 0.779 | 793 | 0.70 |
| 350 | 853.9 | 2.118 | 3.56 | 41.7 | 138 | 0.763 | 546 | 0.70 |
| 360 | 847.8 | 2.161 | 2.52 | 29.7 | 138 | 0.753 | 395 | 0.70 |
| 370 | 841.8 | 2.206 | 1.86 | 22.0 | 137 | 0.738 | 300 | 0.70 |
| 380 | 836.0 | 2.250 | 1.41 | 16.9 | 136 | 0.723 | 233 | 0.70 |
| 390 | 830.6 | 2.294 | 1.10 | 13.3 | 135 | 0.709 | 187 | 0.70 |
| 400 | 825.1 | 2.337 | 0.874 | 10.6 | 134 | 0.695 | 152 | 0.70 |
| 410 | 818.9 | 2.381 | 0.698 | 8.52 | 133 | 0.682 | 125 | 0.70 |
| 420 | 812.1 | 2.427 | 0.564 | 6.94 | 133 | 0.675 | 103 | 0.70 |
| 430 | 806.5 | 2.471 | 0.470 | 5.83 | 132 | 0.662 | 88 | 0.70 |

TABLA 3 PROPIEDADES TERMOFISICAS DEL ACEITE





BIBLIOTECA

T A B L A 4

TEMPERATURA DEL ACEITE EN FUNCION DEL TIEMPO

| Tiempo (min.) | Temperatura calculada (oC) | Temperatura experimental (oC) |
|------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 0 | 28.00 | 28 |
| 10 | 30.39 | 31 |
| 19 | 32.51 | 34 |
| 26 | 34.13 | 35 |
| 39 | 37.09 | 37 |
| 51 | 39.76 | 40 |
| 63 | 42.37 | 42 |
| 74 | 44.72 | 44 |
| 84 | 46.81 | 47 |
| 102 | 50.48 | 50 |
| 105 | 51.08 | 51 |
| 119 | 53.83 | 54 |
| 126 | 55.18 | 55 |
| 134 | 56.71 | 56 |
| 148 | 59.32 | 59 |
| 155 | 60.60 | 60 |





T A B L A 5

COEFICIENTE CONVECTIVO DEL ACEITE PARA VARIAS TEMPERATURAS

| X (m) | T(x) (oC) | Ta (oC) | Tr (oC) | L (m) | m (1/m) | Ha (W/m ² oC) | promedio Ha (W/m ² oC) |
|----------|--------------|------------|------------|----------|------------|-----------------------------|---|
| 0.035 | 41 | 31 | 49 | 0.07 | 21.00 | 119.07 | 107.25 |
| 0.07 | 40 | 31 | 49 | 0.07 | 18.80 | 95.43 | |
| 0.035 | 51 | 41 | 59 | 0.07 | 20.99 | 118.96 | 107.19 |
| 0.07 | 50 | 41 | 59 | 0.07 | 18.80 | 95.43 | |
| 0.035 | 56 | 50 | 63 | 0.07 | 25.50 | 175.57 | 159.2 |
| 0.07 | 55 | 50 | 63 | 0.07 | 23.00 | 142.83 | |
| 0.035 | 60 | 54 | 64 | 0.07 | 19.30 | 100.57 | 98 |
| 0.07 | 59 | 54 | 64 | 0.07 | 18.80 | 95.43 | |
| 0.035 | 67 | 59 | 73 | 0.07 | 20.50 | 113.47 | 104 |
| 0.07 | 66 | 59 | 73 | 0.07 | 18.80 | 95.43 | |
| | | | | | | promedio | |
| | | | | | | Ha | 104 |



T A B L A 6

TEMPERATURA EN LA ALETA EN FUNCION DE LA DISTANCIA Y LA TEMPERATURA DEL ACEITE

| T(x)-Ta | Ta=31 (oC) Tr=49 | Ta=41 (oC) Tr=59 | Ta=50 (oC) Tr=63 | Ta=54 (oC) Ta=64 | Ta=59 (oC) Tr=73 | X (m) |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| 1 | 49.00 | 59.00 | 63.00 | 64.00 | 73.00 | 0 |
| 0.92 | 47.53 | 57.53 | 61.94 | 63.18 | 71.86 | 0.005 |
| 0.85 | 46.22 | 56.22 | 60.99 | 62.46 | 70.84 | 0.01 |
| 0.78 | 45.06 | 55.06 | 60.15 | 61.81 | 69.93 | 0.015 |
| 0.72 | 44.03 | 54.03 | 59.41 | 61.24 | 69.13 | 0.02 |
| 0.67 | 43.13 | 53.13 | 58.76 | 60.74 | 68.43 | 0.025 |
| 0.63 | 42.34 | 52.34 | 58.19 | 60.30 | 67.82 | 0.03 |
| 0.59 | 41.67 | 51.67 | 57.70 | 59.93 | 67.30 | 0.035 |
| 0.56 | 41.09 | 51.09 | 57.29 | 59.61 | 66.85 | 0.04 |
| 0.53 | 40.62 | 50.62 | 56.94 | 59.34 | 66.48 | 0.045 |
| 0.51 | 40.23 | 50.23 | 56.67 | 59.13 | 66.18 | 0.05 |
| 0.50 | 39.94 | 49.94 | 56.46 | 58.97 | 65.95 | 0.055 |
| 0.48 | 39.73 | 49.73 | 56.30 | 58.85 | 65.79 | 0.06 |
| 0.48 | 39.61 | 49.61 | 56.22 | 58.78 | 65.69 | 0.065 |
| 0.48 | 39.56 | 49.56 | 56.19 | 58.76 | 65.66 | 0.07 |

Ta = Temperatura del aceite

Tr = Temperatura de la raiz



BIBLIOGRAFIA

1. KREITH F., Principios de Transferencia de Calor. International Texbook Company. Pensilvania. EUA 1968
2. J.F. HOLMAN, Heat Transfer Fifth edition 1981
3. DONALD Q. KERN, Procesos de Transferencia de calor CECSA, Mexico, 1980
4. V. GANAPATHY, Applied Heat Transfer, Penn Well Books Tulsa, Oklahoma 1982
5. INCROPERA/DE WITT Principles of Heat Transfer
6. ANGEL VARGAS ZUNIGA, Calderas Industriales y Marinas, Editorial Series VZ 1984
7. JAMES Y. OLDSHUE, Ph.D, Fluid Mixing Technology Chemical Engineering McGraw-Hill Publications
8. FRANK KREITH/JAN F. KREIDER, Principles of Solar Engineering 1978
9. COLLIER, Convective Boiling And Condensation, Second Edition
10. PERRY J., Chemical Engineer's Handbook. McGraw-Hill Chemical Engineering Series. London 1973
11. MC. ADAMS WILLIAM H., Transmisión de Calor
12. KEENAN - KAYE, Gas Tables Wiley Sons. Inc. NY. 1945

13. FOX & MC DONALD, Introduction to Fluid Mechanics
2nd. edition John Willey & Sons. Inc.
14. DAVID BOLONA MORGNER, Tesis de Grado "Diseño de
un Sistema de Almacenamiento para Aceites y
Grasas no Minerales, 1985, Guayaquil-Ecuador.
15. Shell Aditives, Reference Handbook 1983
16. Mobil Boletín Técnico 1982
17. SHELL, Instalations and Reports 1985
18. MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico McGraw-Hill,
Colombia 1982



UNIVERSIDAD DEL TUTORAL
CHIMBORAZO - ECUADOR