



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA LA VERIFICACION DEL
ENFRIAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA TIPO
COLUMNAS RADIADORES TIPO OBLEA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A:
HORACIO ELIZALDE GARCIA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACION
P R E S E N T A:
MARIO VALERA FRAUSTO

ASESOR: ING. RAUL CRUZ ARRIETA



FES Aragón

SAN JUAN DE ARAGON ESTADO DE MEXICO

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION

JUSTIFICACION

OBJETIVO

CAPITULO 1

CONSTITUCION BASICA DE TRANSFORMADORES

1.1 CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES -----	1
1.2 CARACTERISTICAS DE UN TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS -----	2
1.3 CARACTERISTICAS DE UN TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO -----	6
1.4 COMPONENTES DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA -----	8
1.4.1 DEVANADOS -----	8
1.4.2 AISLAMIENTOS -----	11
1.4.3 NÚCLEO -----	12
1.4.4 TANQUE -----	14
1.4.5 RADIADORES Y ENFRIADORES -----	16
1.4.6 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA TRANSFORMADORES -----	19
1.4.6.1 MEDIO REFRIGERANTE -----	19
1.4.6.2 COMBINACIONES DE ENFRIAMIENTO -----	21

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO

2.1 CONCEPTOS ELECTRICOS -----	26
2.1.1 DIFERENCIA DE POTENCIAL O TENSIÓN -----	26
2.1.2 CORRIENTE ELÉCTRICA -----	27

2.1.3	RESISTENCIA ELÉCTRICA	27
2.1.4	LEY DE OHM	28
2.1.5	POTENCIA ELÉCTRICA	28
2.1.6	FACTOR DE POTENCIA	31
2.1.7	IMPEDANCIA	31
2.1.8	REACTANCIA	32
2.1.9	INDUCTANCIA	32
2.2	CONCEPTOS MAGNETICOS	33
2.2.1	LEY DE FARADAY	33
2.2.2	LEY DE OERSTED	34
2.2.3	LEY DE BIO-SAVART	35
2.2.4	TENSIÓN MAGNÉTICA O FUERZA MAGNETOMOTRIZ	35
2.2.5	PERMEABILIDAD MAGNÉTICA	36
2.2.6	RELUCTANCIA.	38
2.2.7	FLUJO MAGNÉTICO	38
2.2.8	INDUCCIÓN MAGNÉTICA	39
2.2.9	INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO	39
2.2.10	SCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.	40
2.2.11	CURVAS DE MAGNETIZACIÓN	40
2.3	CONCEPTOS TERMICOS	42
2.3.1	TEMPERATURA	42
2.3.2	CALOR	43
2.3.3	CALOR ESPECIFICO	43
2.3.4	TRANSFERENCIA DE CALOR	44

2.3.5 CONDUCCION	45
2.3.6 TIPOS DE REGIMEN DE FLUJO	47
2.3.7 CONDUCTIVIDAD TERMICA	48
2.3.8 RESISTENCIA TERMICA	48
2.3.9 CONVECCION	49
2.3.10 NUMEROS ADIMENSIONALES.	53
2.3.11 RADIACION	60
2.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR	63
2.4.1 DIFERENCIA MEDIA LOGARITMICA DE TEMPERATURAS	65
2.4.2 CLASIFICACION DE LOS INERCAMBIADORES	68
2.4.3 INTERCAMBIADOR DE PLACAS	70
2.5 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL TRANSFORMADOR	74
2.5.1 PÉRDIDAS GENERADAS EN EL TRANSFORMADOR	75

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION

PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO

3.1 REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA	78
3.2 LISTADO DE ENTRADAS DEL PROGRAMA	78
3.3 DESARROLLO DEL PROGRAMA	80

CAPITULO 4

VALIDACION DEL PROGRAMA

4.1 CARATULA DE ENTRAD -----	112
4.2 CALACULO DE ENFRIAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR-----	114
4.3 HOJAS DE ENTRADA Y SALIDA LLENAS -----	117
4.4 PRUEBA DE TEMPERATURA -----	122
4.5 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO--	124

CONCLUSIONES

BIBLIGRAFIA

INTRODUCCION

El uso de la electricidad, como cualquier otro servicio, esta ya tan asociado a la vida cotidiana que se pierde de vista todo el complejo sistema que nos permite disfrutar de este tan útil recurso, un dispositivo sin el cual no seria posible contar con el fluido eléctrico, tal y como lo conocemos, es el transformador. A mas de cien años de instalado el primer transformador, este noble aparato sigue siendo pieza clave en el proceso de transmisión y distribución de la energía eléctrica, El presente trabajo desarrolla un programa para el calculo del enfriamiento de un transformador de potencia, el calculo suele ser demasiado iterativo resultando muy tedioso y no exento por lo mismo de fallas en las operación de de calculo, además de ocupar mucho tiempo del diseñador eléctrico, al desarrollar un programa que realice todo el trabajo de calculo pesado el diseñador pude dedicar mas tiempo al estudio de las diferentes configuraciones de enfriamiento para encontrara el mas optimo,

El presente trabajo lo hemos estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo uno explicamos la configuración básica de los transformadores resaltando la párete del enfriamiento, este capítulo pretende familiarizar con los componentes de los que se hablara en los siguientes capítulo.

En el capítulo dos se describen los elementos teóricos eléctricos y térmicos que nos ayudan a comprender como se da la relación de las pérdidas eléctricas con la cantidad de calor que se debe retirar del transformador así como la forma en que deberá de retirarse ese calor que puede dañar al transformador.

En el capítulo tres se desarrolla el programa con ayuda de visual Basic, ya que resulta muy practico y amigable para el usuario, en este capítulo se da el listado de las variables que el diseñador tiene que integrar, también se mencionan las de los resultaos.

En el capítulo cuatro se da un ejemplo de calculo de enfriamiento y se comparan los resultados del calculo con los de la prueba de temperatura, es decir los resultados teóricos quedaran validados por la pruebe de temperatura que se realiza como parte del control de calidad en el producto.

Finalmente expresamos nuestras conclusiones con unas observaciones muy particulares del presente trabajo

JUSTIFICACION

Con este trabajo se muestra la multidisciplinad de la ingeniería, en este caso dos ramas de la misma que son el área mecánica y el área computacional, en este desarrollo se muestra como la teoría de las aulas es empleada para dar soluciones a casos prácticos, también puede servir de antecedente para algún profesionalista o estudiante interesado en el tema, ya que este tema se ha seleccionado por se muy especializado y se relaciona con el actual trabajo que tenemos

OBJETIVO

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un programa en ambiente Windows que permita tener una mayor rapidez en calculo del enfriamiento de transformadores de potencia que trabajen con radiadores tipo oblea y sean de tipo columnas, al mismo tiempo que se pretende mostrar la fusión de dos ramas de la ingeniería que son la computacional y la mecánica, todo lo anterior basado en los conceptos básicos que se adquieren en la escuela y se usan según la experiencia del profesional.



CAPITULO 1

CONSTITUCIÓN BÁSICA DE TRANSFORMADORES

1. 1 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

Cuando se piensa en los transformadores no puede dejar de resaltarse su importancia en todo tipo de proceso, sin exagerar puede decirse que la vida moderna depende de el, solo hace falta ver el caos que se presenta cuando uno de estos aparatos falla dejando colonias enteras sin el fluido, paralizando el trafico, comercios sin sistemas de alarmas por mencionar algunos, su aplicación es tan grande que actualmente se requiere de una clasificación o clasificaciones que pongan orden.

No puede definirse una estricta clasificación, ya que cada uno de ellos tienen diferentes características y por tal razón se distribuyen en diferentes grupos, estos se ordenan de acuerdo a los factores que los identifican ver tabla 1.1.



POR EL NÚMERO DE FASES	Monofásicos
	Trifásicos
POR SU LOCALIZACIÓN	Interior
	Intemperie
POR SU CAPACIDAD	De distribución (Hasta 530 kVA)
	De potencia (Mayores de 500 kVA).
POR SU APLICACIÓN	Elevador
	Reductor
	De instrumentos
	De tierras
	De Regulador
POR SU TIPO DE PRESERVACIÓN DE ACEITE	Con tanque conservador
	Sin tanque conservador
	Con respiración libre o sellados con gas
POR EL TIPO DE CONEXIÓN	Delta-Estrella
	Estrella-Delta
	Estrella-Estrella
	Delta-Delta
	Estrella-Estrella-Delta
	Zig-Zag
	Delta abierta
POR EL TIPO DE NÚCLEO	Acorazado (Shell)
	Columnas (core)

Tabla 1.1 Clasificación de los Transformadores

1.2 CARACTERÍSTICAS DE UN TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS

En el transformador tipo *Columna* las bobinas son de forma cilíndrica y éstas se colocan en forma concéntrica al circuito magnético (núcleo); el aislamiento principal se encuentra formado por tubos de devanado, espaciadores radiales y verticales así como de hojas de cartón comprimido, para aislar una fase de otra o de la conexión a tierra. “En este tipo de transformador se montan las bobinas en las piernas del núcleo y éstas rodean al núcleo, donde generalmente primero se monta la bobina de más bajo voltaje más cerca del núcleo”.

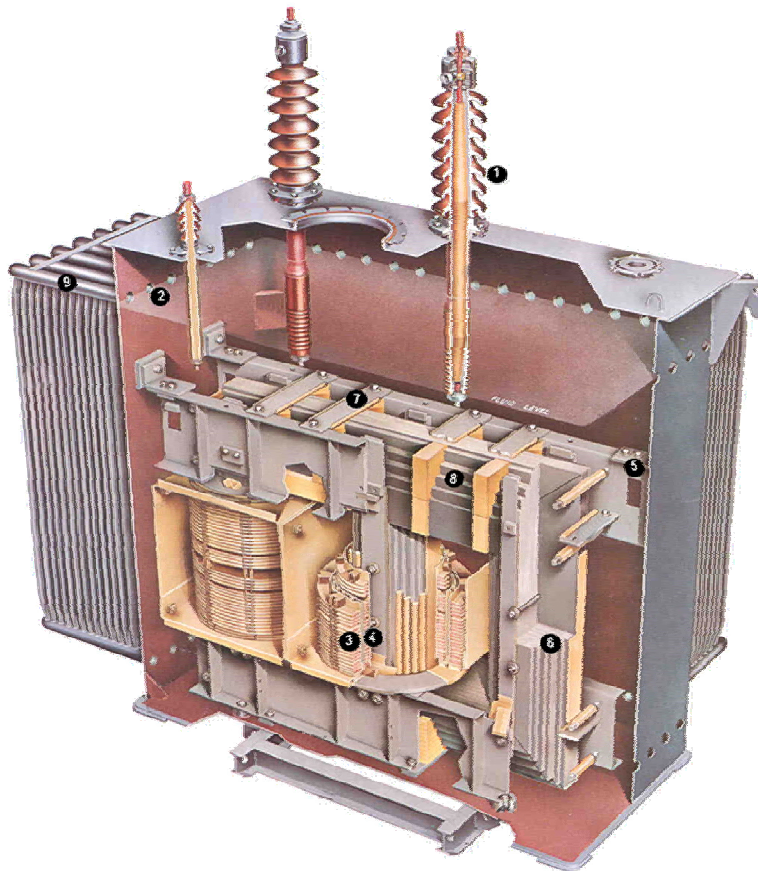


Por lo regular el diseño del tanque se realiza en una sola parte, el yugo superior va soportado a través de placas de sujeción, placas seguro, refuerzos laterales superiores e inferiores que conservan en su lugar al conjunto núcleo-bobina (ver figura 1.2). Las fuerzas generadas por las corrientes de falla tienden a separar los devanados de alta y baja tensión.

La fuerza que se crea sobre la parte exterior del devanado de alta tensión jala y pone en tensión a sus conductores, y la fuerza en el devanado interior o baja tensión, actúa a la compresión del devanado transmitiéndole los esfuerzos al tubo de devanado.

Estos esfuerzos se incrementan con la capacidad del transformador; por eso es de vital importancia las propiedades mecánicas de los tubos de devanado, los espaciadores radiales y verticales.

También existe una fuerza adicional que tiende a jalar los devanados en dirección vertical, esto sucede cuando hay desbalanceo de acoplamiento en el centrado de los devanados. Para transformadores arriba de 10 MVA se requieren varios conductores en paralelo para soportar la corriente en los devanados; para este tipo de construcción pueden llegar a presentarse oscilaciones mayores al 100% de su valor inicial.



- | | |
|---|---|
| 1. Boquilla de alta tensión. | 6. Núcleo (pierna de una de las fases). |
| 2. Ductos para conexión a radiadores. | 7. Bastidores. |
| 3. Bobina de alta tensión. | 8. Yugo superior. |
| 4. Bobina de baja tensión. | 9. Radiadores. |
| 5. Fijación del bastidor al tanque del transformador. | |

Figura 1.2 Transformador tipo columna (Core)

Al disminuir el área de los conductores de las bobinas se reducirá el tamaño y peso; no obstante, las pérdidas se incrementarán y se requerirán grandes bancos de radiadores que repercutirán en el costo del equipo. El diseño deberá alcanzar un balance apropiado y esto se puede lograr por medio de la utilización de un



programa de computadora para realizar un cálculo preciso de la distribución de temperatura dentro de las bobinas.

Las bobinas de los transformadores deben permanecer rígidas durante toda la vida útil de la unidad, si este desea sobrevivir bajo las condiciones repetitivas de corto circuito, las cuales son típicas cuando el sistema opera en campo; estas corrientes generan grandes fuerzas verticales en los devanados. Una dificultad que se presenta es de mantener rígidas las bobinas; este problema ha sido resuelto con el paso de los años por medio del uso de cartón prensado (pressboard) de alta densidad, mejorando la estabilización mecánica del aislamiento por medio de técnicas especiales, y sobre todo por medio de la pretensión mecánica de los devanados, durante la fase de ensamble, hasta una fuerza igual a la experimentada bajo condiciones de corto circuito. Este balance de las fuerzas generadas eléctricamente por medio de las técnicas de pretensión y de las distintas fuerzas, las cuales se presentan durante el levantamiento, embarque o esfuerzos térmicos son estudiadas cuidadosamente utilizando modernas técnicas computacionales. Como ya dijimos, un elemento importante en los aislamientos es el óptimo uso de cartón prensado (pressboard) entre los ductos de aceite. El aceite dieléctrico tiene la característica de tener una mayor rigidez dieléctrica (KV/mm) en un ducto pequeño que en un ducto de gran tamaño. Un diseño balanceado toma ventaja de estar optimizando los ductos de aceite, de tal forma que se tengan ductos pequeños en las zonas donde los esfuerzos eléctricos son críticos (partes vivas a tierra, etcétera). El resultado es una máxima capacidad de rigidez dieléctrica en un mínimo espacio.

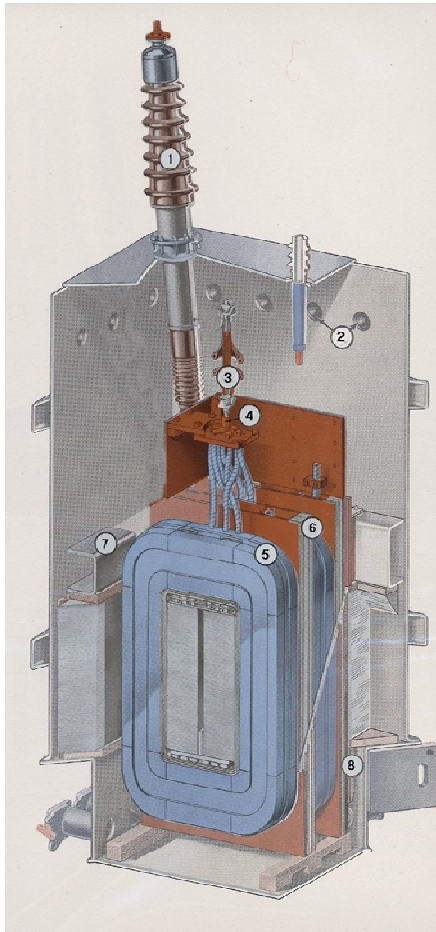


1.3 CARACTERÍSTICAS DE UN TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

Este tipo de transformador presenta como característica que el núcleo es el que envuelve a las bobinas. “Los diseños tipo *Acorazado* son realizados con devanados rectangulares ajustados en forma, las cuales consisten en una serie de bobinas tipo galleta inter-conectadas. Los devanados y el paquete de aislamientos son montados verticalmente en la sección inferior del tanque”. El núcleo es posicionado verticalmente alrededor de los devanados actuando como un escudo protector de los mismos. La sección superior del tanque se ajusta de tal forma que la unidad ensamblada tenga un soporte mecánico para los devanados, estos tipos de devanados se fabrican de forma independiente enrollándolos de tal forma que - como ya se indicó- se les llama *galleta*. Varios de estas galletas se agrupan y se unen una a una para formar la bobina. Se puede apreciar además de las bobinas, cómo este tipo de transformadores está constituido por dos tanques: uno en la parte inferior y otro en la parte superior (ver figura 1.3). El calor generado por el núcleo y las bobinas es disipado por la circulación de aceite. El flujo de aceite desde la parte inferior hasta la superior es mantenido gracias a la diferencia en los gradientes de temperatura. La adición de bombas y ventiladores para enfriamiento forzado incrementa el flujo de aceite a través del núcleo y las bobinas, mientras que el flujo de aire es a través de las paredes externas de los radiadores. En cualquier paso de enfriamiento el aceite circula por los radiadores donde es enfriado antes de volver a entrar por la parte inferior del tanque. Algunas de las ventajas que presenta el transformador tipo acorazado son: alta resistencia mecánica, baja impedancia y



mejor regulación. Como se mencionó antes, en este tipo de transformador el núcleo envuelve a las bobinas y el aislamiento principal está formado por hojas de cartón comprimido para aislar una fase de otra o de la conexión a tierra.



1. Boquilla de alta tensión.
2. Ductos de conexión para radiadores.
3. Flecha del mecanismo del cambiador de derivaciones.
4. Cambiador de derivaciones.
5. Bobinas de alta tensión.
6. Bobinas de baja tensión.
7. Refuerzos del tanque.
8. Acuñaamiento entre grupo de bobinas y pared del tanque.

Figura 1.3 Transformador tipo acorazado (Shell)



1.4. COMPONENTES DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Los componentes de un transformador varían de acuerdo a su campo de aplicación, pero básicamente todos cuentan con los elementos y accesorios que se describen a continuación. En esta parte se pretende resaltar el sistema de enfriamiento y sistema eléctrico que son los que se relacionan con el tema de este trabajo.

1.4.1 DEVANADOS

Su función, como circuito eléctrico, es recibir un voltaje y una corriente para devolverlos transformados por inducción a diferentes valores. Son fabricados con conductores aislados eléctricamente y enrollados sobre moldes. Por su baja resistencia eléctrica y bajo costo, el conductor más empleado es el cobre (Cu), en forma de alambre o de solera. En transformadores pequeños se emplea también el aluminio (Al) en forma de lámina.

Para baja corriente, se utiliza el alambre o la solera individual, mientras que para alta corriente se aplica la lámina o grupos de soleras paralelas, aisladas individualmente para minimizar las pérdidas.

Existe un flujo disperso que no sigue la trayectoria del núcleo sino que baña a los conductores de los devanados. No todos los conductores reciben la misma cantidad de flujo disperso, esto hace que haya diferencia de voltaje entre un conductor y otro.



Cuando estos conductores son paralelos (de un mismo grupo), se establece una corriente entre ellos produciendo pérdidas.

La forma de evitar que se genere esa corriente, es logrando que todos los conductores del grupo sean bañados por la misma cantidad de flujo y esto se hace realizando transposiciones, para que cada conductor ocupe todas las posiciones posibles en el grupo a lo largo del devanado.

Para ayudar a disipar el calor generado por las pérdidas, dentro de la fabricación del devanado se colocan aislamientos que sirven de ductos, ya sea para circulación de aire o de líquido refrigerante. De acuerdo al voltaje y corriente que se manejen, los devanados pueden construirse en tres formas básicas: devanado *rectangular*, devanado *continúo* y devanado tipo *galleta*.

Cualquiera que sea el tipo de devanado, durante su fabricación es sumamente importante evitar la humedad, las partículas contaminantes y cualquier daño que pueda ocurrir al aislamiento o al conductor. De no ser así, se pone en peligro la vida del transformador. Los tres tipos de devanados más utilizados en el área industrial se describen continuación:

- **Devanado rectangular.** Este se forma sobre un molde rectangular donde se enrollan los conductores formando capas, aisladas una de otra, para a su vez formar grupos de baja tensión o de alta tensión. Se utilizan en transformadores de poca capacidad.
- **Devanado continúo.** Se forman con uno, dos o más conductores paralelos y existen varias modalidades de este devanado, puede estar formado por capas



(helicoidal o espiral) o por discos paralelos (continuo o hisercap). Se emplea en transformadores de mediana y gran capacidad. En la figura 1.4 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de devanado, donde se observan las conexiones de las guías que van conectadas al cambiador de derivaciones.

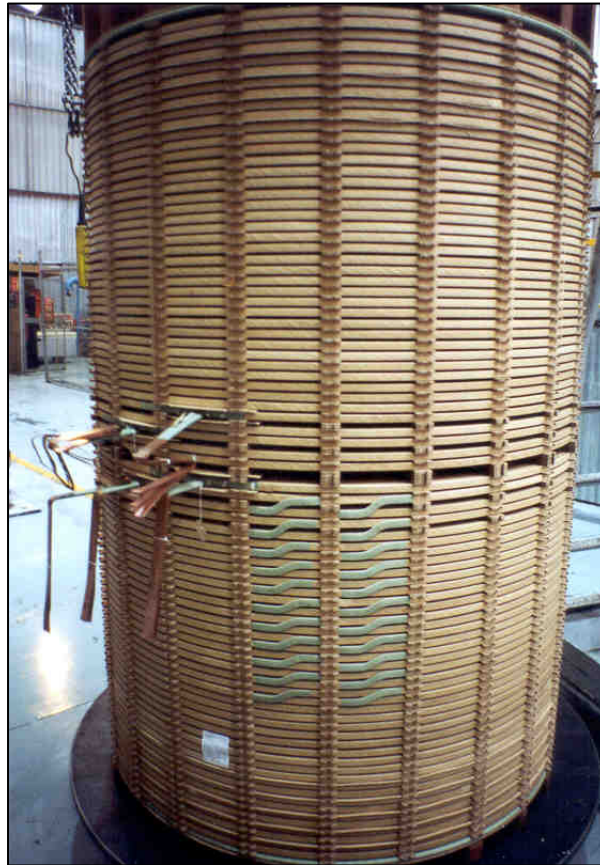


Figura 1.4 Devanado tipo continuo

- **Devanado tipo galleta.** Formadas con uno, dos o más conductores paralelos, se construyen las bobinas sobre una mesa giratoria para después interconectarse formando grupos. Se utilizan para transformadores de gran



capacidad. En la figura 1.4.1 se muestra la fabricación de este tipo de devanado.



Figura 1.4.1 Devanado tipo galleta

1.4.2 AISLAMIENTOS

Los aislamientos forman la estructura más importante del transformador, ya que la vida útil de éste depende en alto grado del estado que guarde su sistema aislante. Estos elementos tienen la función de impedir el contacto eléctrico entre partes conductoras, entre devanados, el núcleo u otras partes metálicas que se encuentren en contacto con tierra. Los aislamientos pueden ser sólidos o líquidos, asumiendo que los sólidos proporcionan soporte mecánico a los devanados y los líquidos funcionan como medio refrigerante.



Existen dos categorías de aislamientos -menores y mayores-, quedando mencionado en ambas el líquido refrigerante.

- **Aislamientos menores.** Son aquellos que se colocan entre conductores de una misma vuelta, entre vueltas adyacentes, entre grupos (secciones o capas) de un mismo devanado y en guías de conexiones internas. Algunos de los materiales que componen estos aislamientos son: cintas para forro (papel kraft, papel crepé, algodón, fibra de vidrio); tiras, hojas o paquetes de cartón comprimido, esmaltes, barnices y recubrimientos epóxicos.
- **Aislamientos mayores.** Son los que van colocados entre grupos de alta tensión y grupos de baja tensión en una misma fase, entre bobinas de diferente fase, entre bobinas y núcleo o entre bobinas y cualquier parte en contacto con tierra. Algunos materiales para esta categoría son: hojas o cilindros de cartón comprimido o micarta, resina epóxica y collares de micarta.

1.4.3 NÚCLEO

Tiene como función conducir el flujo magnético generado por los devanados, confinándolo dentro de una trayectoria cerrada formando el circuito magnético. El material empleado actualmente para los núcleos se conoce como acero al silicio de grano orientado. El silicio le permite conducir con mayor facilidad el flujo y la orientación del grano permite que este circule en una sola dirección, reduciendo la dispersión que produce pérdidas.



Las líneas de flujo producen a su alrededor pequeñas corrientes que son indeseables, ya que son generadoras de pérdidas. Para reducir estas corrientes, el núcleo se construye con láminas muy delgadas de 0.009" a 0.011" aisladas por ambos lados con una capa muy fina de un recubrimiento aislante. Es importante manejar con cuidado la laminación que formará el núcleo, ésta es muy sensible a los esfuerzos mecánicos los cuáles afectan sus propiedades incrementando las pérdidas. Los esfuerzos referidos son producidos por el manejo y corte de laminación así como por el enrollado y formado de núcleos.

En los transformadores pequeños, estos esfuerzos se alivian sometiendo los núcleos ya formados a un proceso de recocido dentro de un horno a altas temperaturas. Por medio de este proceso es posible recuperar las propiedades alteradas por los esfuerzos. Al respecto, se conocen tres tipos básicos de construcción de núcleos:

- **Núcleo enrollado.** Se forma por una tira continua de laminación que es devanada en espiral y en cada vuelta se hace un corte para permitir el ensamble con la bobina. Los cortes se hacen en puntos alternados de modo que la unión en una vuelta no coincida con la siguiente. Para cada bobina se utilizan 2 piezas de núcleo.
- **Núcleo a tope 90° y traslapado.** Fue utilizado en los transformadores antiguos antes de descubrir el acero de grano orientado. Se forma con láminas de dos longitudes diferentes cortadas en forma rectangular. Cada capa de laminación se traslapa.



- **Núcleo a tope 45° y traslapado.** Su construcción es similar a la anterior, sólo que las láminas tienen cortes a 45° para aprovechar la ventaja del grano orientado; cada capa de laminación se traslapa con la siguiente.

El paso final en la construcción de núcleos es la sujeción. Obviamente, si las laminaciones están flojas se tendrán ruidos y vibraciones que a la larga pueden hacer fallar al transformador. Todos los núcleos de los transformadores están sujetos por estructuras metálicas llamadas bastidores, y tiene la función de contener mecánicamente la laminación, ver figura 1.4.3



Figura 1.4.3 Núcleo y bastidores de un transformador

1.4.4 TANQUE

Es la envoltura del transformador, generalmente construido con lamina de acero en formas diferentes (cilíndrico, rectangular, oval, etcétera.). Funge como



recipiente para el conjunto núcleo-bobinas y el medio refrigerante, proporcionando protección mecánica, protección contra agentes contaminantes y además una superficie de disipación para transferir hacia el ambiente el calor cedido por el medio refrigerante. Con una previa limpieza mediante abrasivos (chorro de arena o perdigón) o productos químicos (fosfatizado) y el uso de recubrimientos especiales, el tanque es protegido contra la corrosión. El color y las condiciones de pintura influyen en la disipación adecuada del calor, por lo que deben tomarse las precauciones necesarias para evitar su deterioro. Adecuados a su tamaño y aplicación, el tanque cuenta con aditamentos adecuados para maniobras de izaje, deslizamiento y transporte, así como para el llenado y drenado del líquido. Está diseñado para soportar alto vacío y presiones de hasta 15 psi. En la figura 1.4.4 se aprecia el tanque para un transformador tipo shell monofásico fabricado de forma especial.



Figura 1.4.4 Tanque de un transformador



1.4.5 RADIADORES Y ENFRIADORES

Cuando el área del tanque no es suficiente para lograr la disipación térmica deseada, es entonces cuando se agrega área utilizando radiadores, que son grupos de tubos o aletas de acero, unidas a dos cabezales que se conectan al tanque ya sea soldándolos o por medio de válvulas de acoplamiento para hacerlos desmontables. Para acelerar la disipación de calor, la lámina de los radiadores es de un espesor mucho menor al de las paredes del tanque (ver figura 1.5).



Figura 1.5 Radiadores y ventiladores

Los ventiladores tienen la función de forzar el aire a través de los radiadores o intercambiadores; son parte del sistema de refrigeración del transformador (ver figura 1.5). Estos dispositivos son accionados en forma manual o automática, a



través del equipo de control que recibe la señal del indicador de temperatura, proveniente del líquido o del devanado.

Cuando se requiere disipar una mayor cantidad de calor de la que los radiadores son capaces de disipar, se ocupan los enfriadores que son prácticamente intercambiadores de calor, un enfriador esta compuesto por una batería de tubos con aros disipadores soldados e integrados a ventiladores, algunos incluyen bombas para lograr un flujo mayor de aceite (ver figura 1.5.1).

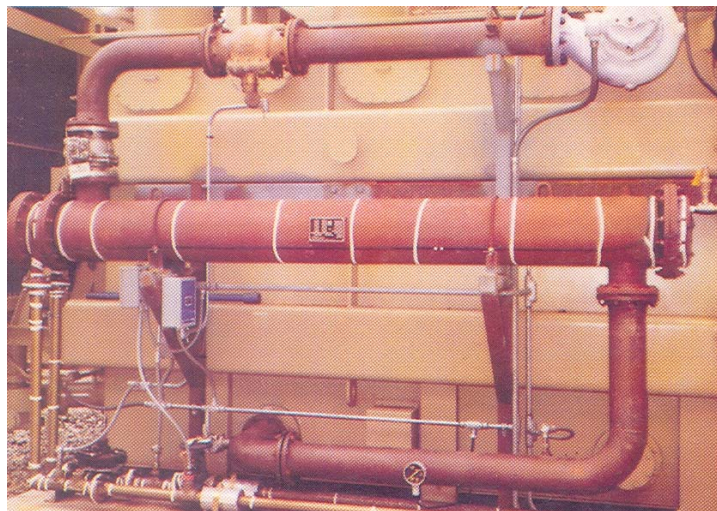


Figura 1.5.1 Enfriadores

La bomba tiene la función de forzar la circulación del aceite que se encuentra dentro del transformador a fin de crear un efecto refrigerante mayor. De acuerdo al tipo de enfriamiento del que esté constituido el transformador, el aparato puede estar formado por unidades o grupos (bancos) de motoventiladores, por enfriadores o por intercambiadores de calor.



Estos dispositivos son accionados en forma manual o automática, por medio del equipo de control que recibe la señal del indicador de temperatura, proveniente del líquido refrigerante o del devanado. (ver figura 1.5.2).



Figura 1.5.2 Bomba

La bomba se acompaña de un Indicador de flujo que se encuentra instalado en la tubería de succión o de descarga de la bomba de aceite del transformador, . (ver figura 1.5.3).

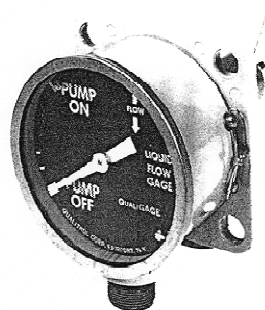


Figura 1.5.3 Indicador de flujo



1.4.6 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA TRANSFORMADORES

Para retirar el calor dentro de un transformador se requiere de un sistema de enfriamiento en la tabla 1.2 puede verse las diferentes formas y combinaciones principales que se ocupan para este fin, así como su designación

POR EL TIPO DE ENFRIAMIENTO	
OA	Sumergido en aceite con enfriamiento natural
OA/FA	Sumergido en aceite con enfriamiento de aire forzado
OA/FA/FOA	Sumergido en aceite con circulación de aceite y ventilación forzada
FOA	Sumergido en aceite con enfriamiento de aceite y aire forzados
OW	Sumergido en aceite con enfriamiento de agua
EOW	Sumergido en aceite con enfriamiento de aceite y agua forzados
AA	Tipo seco con enfriamiento propio
AFA	Tipo seco con enfriamiento por aire forzado
AA/FA	Tipo seco con enfriamiento natural con enfriamiento forzado

Tabla 1.2 Tipos de enfriamiento para transformadores

1.4.6.1 MEDIO REFRIGERANTE

El calor generado por la carga, las pérdidas en el devanado y el núcleo, pueden hacer que el sistema aislante se degrada al estar expuesto a la temperatura por períodos prolongados de tiempo, de ahí la necesidad de tener un elemento que retarde dicha degradación. El medio refrigerante, puede ser un gas (aire o hexafluoruro de azufre) ó algún líquido (aceite mineral), silicona líquida, etc.). Los transformadores que utilizan gas como medio refrigerante se llaman de tipo seco, mientras que los que emplean líquido se denominan sumergidos en líquido. En estos últimos, el líquido caliente tiende a fluir hacía la parte superior,



provocando que el líquido más frío caiga hacia el fondo. De esta manera se establece una circulación natural (convección) a lo largo del ensamble núcleo-bobinas y a través de los ductos diseñados para tal efecto transmitiendo de esta manera el calor hacia las paredes del tanque. (ver figura 1.6.)

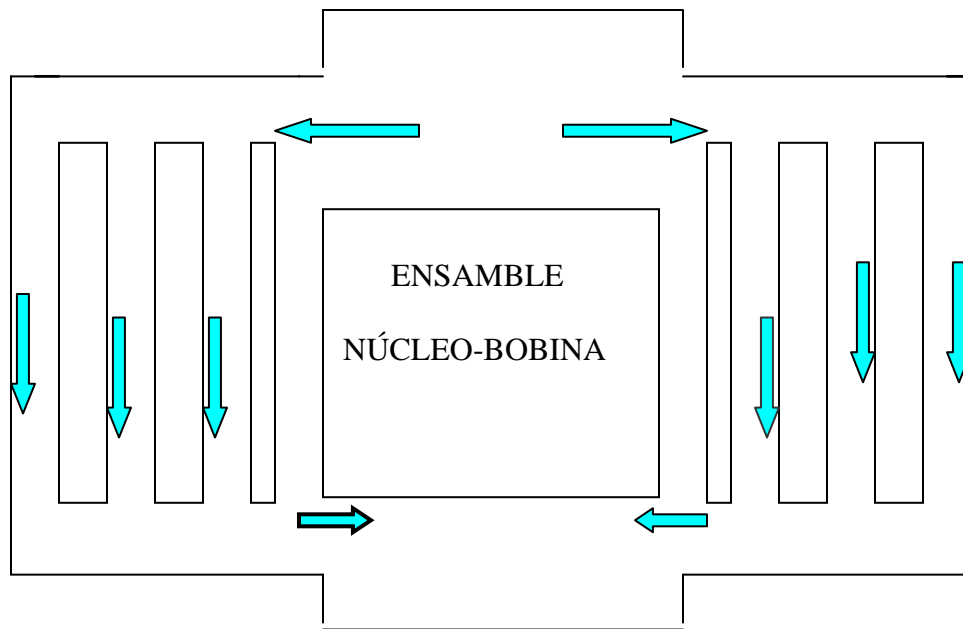


Figura 1.6 Circulación del líquido refrigerante

La selección del medio refrigerante depende de la aplicación propia del transformador. Por lo general, los transformadores tipo seco, y los sumergidos en líquido diferente al aceite mineral se utilizan en instalaciones interiores.

Por sus ventajas térmicas, dieléctricas y por su bajo costo, el líquido refrigerante más empleado en transformadores es el aceite mineral. Sin embargo, el uso de aceite mineral implica riesgo de incendio o explosión, por lo que se han desarrollado otros compuestos que, para ciertas aplicaciones, son más adecuados, como los hidrocarburos de alto peso molecular y los silicones.



1.4.6.2 COMBINACIONES DE ENFRIAMIENTO

El enfriamiento natural se aplica cuando el transformador va a estar alimentando cargas que aún siendo variables, no rebasarán la capacidad del aparato, se designa por OA(*enfriamiento natural*), El enfriamiento ocurre por circulación natural del aceite en contacto con las paredes del tanque. Éstas pueden ser listas o con radiadores acoplados a ellas

El enfriamiento forzado se designa por FA (*aire forzado*) y se aplica cuando se sabe que el transformador estará sujeto a sobrecargas cortas, pero periódicas, que deben ser soportadas por el aparato sin afectar su funcionamiento normal. El enfriamiento forzado permite aumentar la disipación de calor, aumentando a la vez los kVA de salida del transformador. Este enfriamiento requiere de equipo accesorio al transformador ya mencionados en los apartados anteriores. El arranque y paro de dicho equipo está gobernado por la variación de temperatura del líquido o del devanado, a través de controles que permiten la operación manual o automática.

A la combinación de los dos anteriores se le designa OA/FA (*enfriamiento natural / aire forzado*). Es básicamente una unidad OA a la que se le ha agregado un sistema de circulación forzada de aire a base de moto ventiladores. La capacidad base se incrementa hasta en un 15,25 ó 33%.(ver figura 1.6.1.)

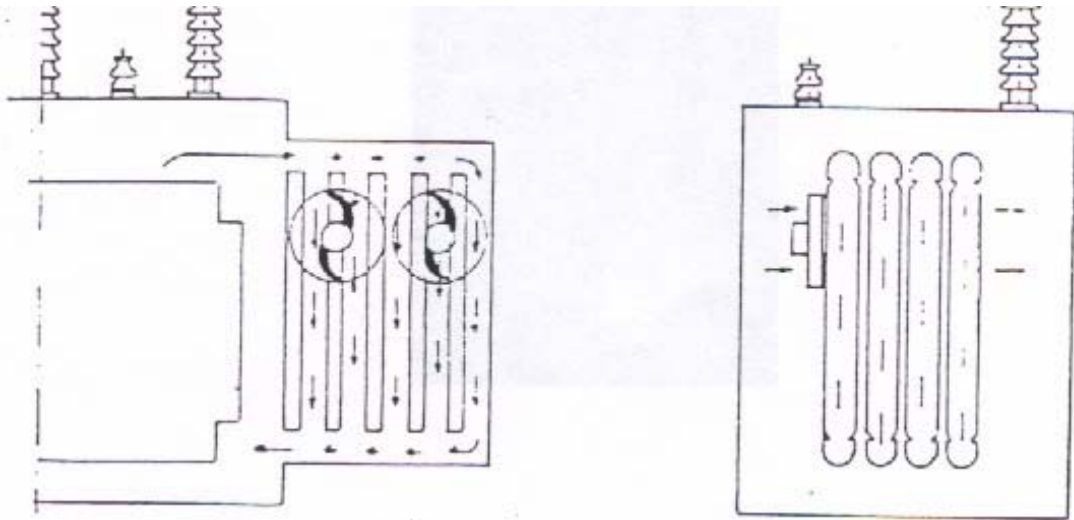


Figura 1.6.1 Enfriamiento OA/FA

Cuando se habla de un sistema OA/FA/FA (*enfriamiento natural / aire forzado / aire forzado*). Es similar al OA/AF, pero con 2 pasos de ventilación forzada. Proporciona un aumento en la capacidad base de 33% en el primer paso y 66% en el segundo paso.

Si la combinación de enfriamiento se designa por OA/FA/FOA (*enfriamiento natural / aire forzado / aceite forzado*). Es similar al OA/FA/FA, solo que en el segundo paso el enfriamiento se realiza por circulación forzada de aceite mediante bombas. El aumento en capacidad base es de 33% en el primer paso y 66% en el segundo paso, cuando se emplean bombas se cuenta adicionalmente con un control de tiempo que activa las bombas secuencial mente, evitando de esta forma que dentro del transformador se de un movimiento muy violento del aceite que puede activando el sensor de movimiento sacando de servicio al transformador. (ver figura 1.6.2.)

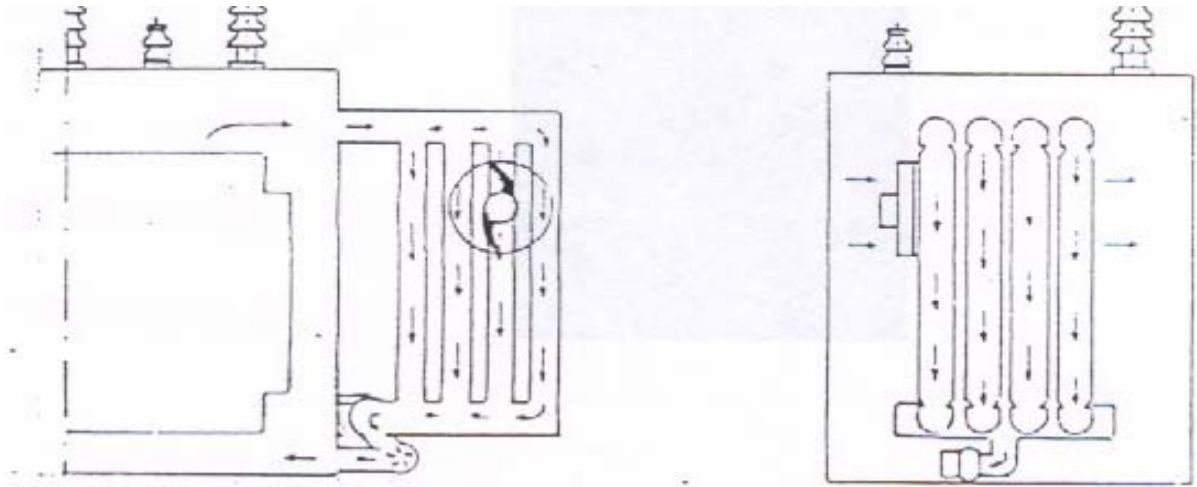


Figura 1.6.2 Enfriamiento OA/FA/FOA

Si se da OA/FOA/FOA (*enfriamiento natural / aire y aceite forzados / aire y aceite forzados*). El régimen de OA es aumento empleado motoventiladores y bombas, simultáneamente, en 2 pasos. El aumento de capacidad es de 33% en el primer paso y 66% en el segundo paso. (ver figura 1.6.3.)

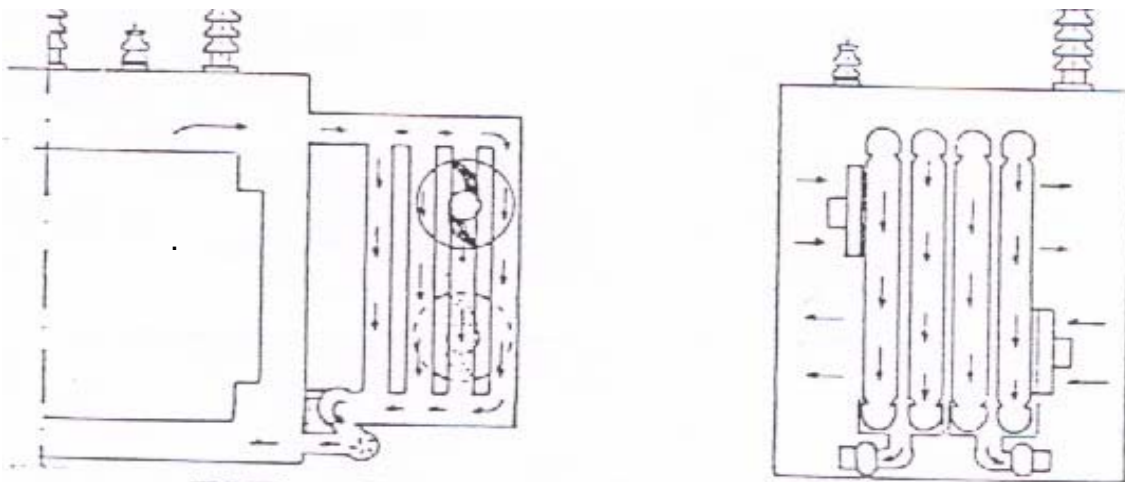


Figura 1.6.3 Enfriamiento OA/FOA/FOA



FOA (*aceite y aire forzados*). El enfriamiento se lleva a cabo por circulación forzada de aceite, mediante bombas, a través de cambiadores de calor enfriados por aire forzado. No hay incremento de capacidad base, su diseño es para trabajo continuo del sistema de enfriamiento a cualquier nivel de carga normal. (ver figura 1.6.4.)

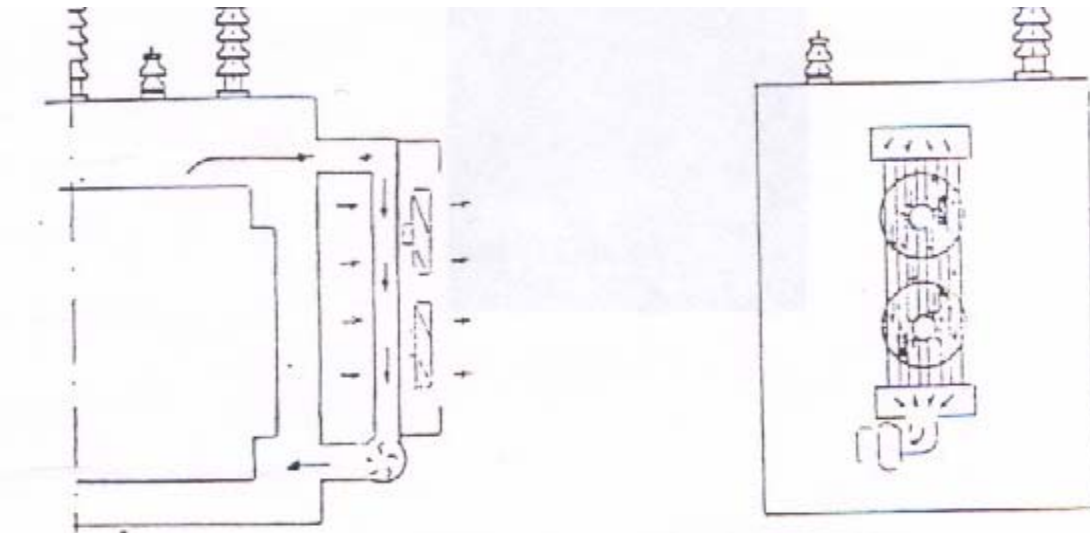


Figura 1.6.4 Enfriamiento FOA

Otro tipo no tan común como los anteriores es el OW (*enfriamiento con agua*). En este caso, el enfriamiento ocurre por convección natural del aceite a través de cambiadores de calor enfriados por agua, este enfriamiento se aplica cuando se requiere que el excedente de calor sea retirado de forma más rápida, es muy común usarlo en transformadores de gran capacidad o sobretodo en los tipo horno que son vitales para la industria siderúrgica. (ver figura 1.6.5.)

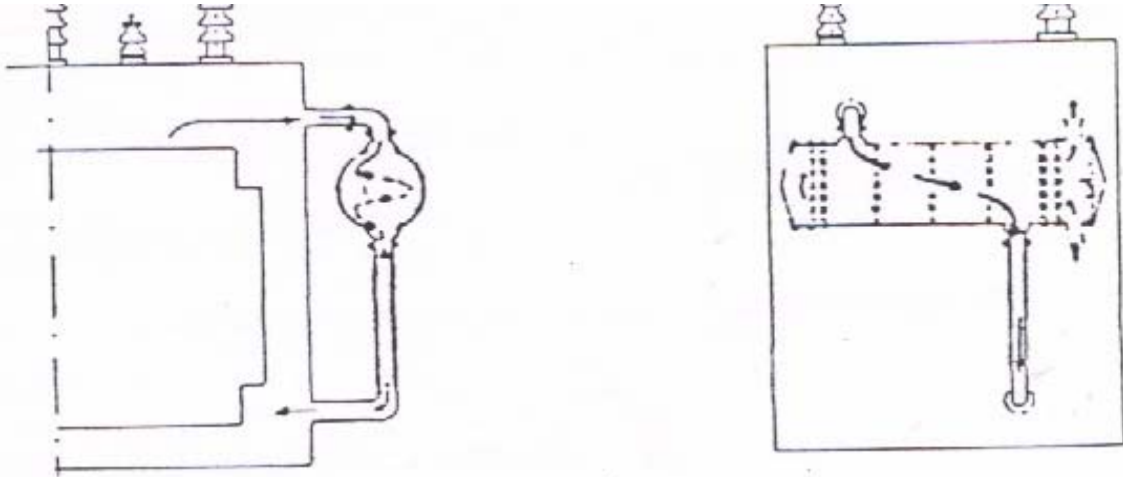


Figura 1.6.5 Enfriamiento OW

AA (*enfriamiento natural*). El enfriamiento ocurre por la circulación natural del aire sobre el conjunto núcleo-bobinas. (ver figura 1.6.6.)

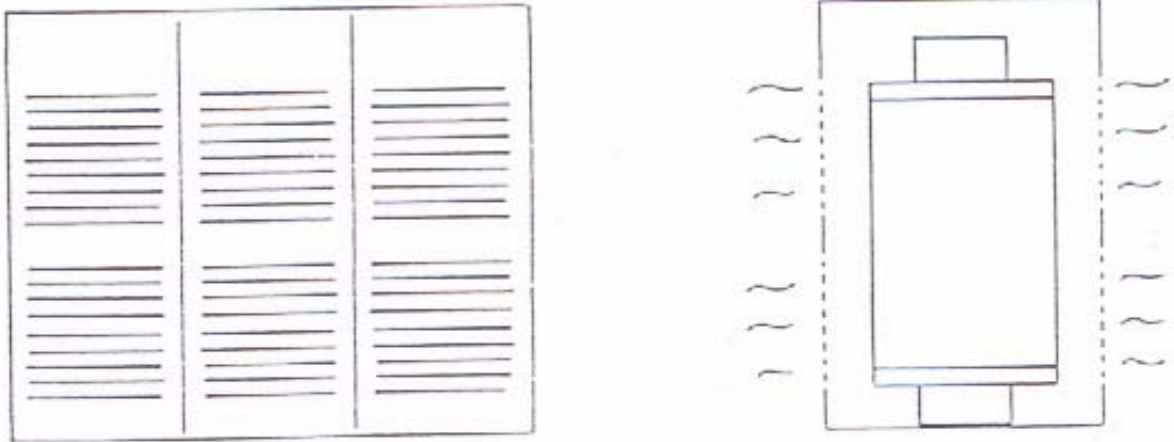


Figura 1.6.6 Enfriamiento AA



CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO

2. 1 CONCEPTOS ELÉCTRICOS

Todo proceso de análisis requiere de conocimientos previos en este trabajo los mas sobresalientes podemos dividirlos en tres categorías que son conceptos eléctricos, magnéticos, y de transferencia de calor .

2.1.1 DIFERENCIA DE POTENCIAL O TENSIÓN.

La diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga positiva realizado por fuerzas eléctricas, para mover una carga de prueba desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial.

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1)$$

La unidad de diferencia de potencial o tensión son los **Volts (V)**.



2.1.2 CORRIENTE ELÉCTRICA

Es la cantidad de carga eléctrica que atraviesa la sección transversal de un conductor por unidad de tiempo:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (2)$$

La unidad de intensidad de corriente eléctrica es el **Ampere (A)**.

2.1.3 RESISTENCIA ELÉCTRICA.

Es una característica intrínseca de los materiales de oponerse al paso de la corriente eléctrica, cuando se le somete a una diferencia de potencial o tensión.

La unidad de la resistencia eléctrica es el **Ohm (Ω)**.

$$R = \rho g \frac{l}{s} \quad (3)$$

Donde: **R**= Resistencia, (Ω)
 ρ = Resistividad, (Ω -m)
 l= Longitud, (m)
 s= Sección transversal, (m^2)



2.1.4 LEY DE OHM.

Diversos materiales presentan una relación lineal entre voltaje e intensidad de corriente eléctrica; la resistencia eléctrica de dichos materiales es constante dentro de amplios intervalos de voltaje.

A la relación entre estas cantidades se le denomina *Ley de Ohm*, y se expresa de la siguiente forma:

$$V = I g R \quad (4)$$

Donde: **V=** Tensión o voltaje, (Volts)

I= Corriente, (Amp.)

R= Resistencia, (Ω)

2.1.5 POTENCIA ELÉCTRICA.

“Cuando se presenta una diferencia de potencial (voltaje) se mantiene a través de un resistor, la potencia o tasa a la cual se consume la energía proporcionada es:

$$P = V g I \quad (5)$$



La rapidez de la energía disipada en un resistor se puede expresar con las siguientes ecuaciones:

$$P = RgI^2 \quad (6)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

Donde: **P**= Potencia, (Watts)

I= Corriente, (Amp.)

R= Resistencia, (Ω)

V= Tensión, (Volts)

La unidad de la potencia es el **Watt (W)**.

La potencia activa o potencia real es:

$$P = I g V \cos \theta \quad (8)$$

Donde $\cos \theta$ se denomina *factor de potencia*.

Los diferentes dispositivos eléctricos convierten energía eléctrica en otras formas de energía como: lumínica, térmica, química, mecánica, entre otras.

Los motores, transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético requieren **potencia activa (P)** para efectuar un trabajo útil. El resultado de la potencia activa es representado en **Watts (W)**.



La **potencia reactiva (Q)** es utilizada para la generación del campo magnético, almacenaje del campo eléctrico que en sí, no produce ningún trabajo. La potencia reactiva esta 90° desfasada de la potencia activa. El valor de la potencia reactiva es expresada en **Volt-Ampere-Reactivo (VAR)**. El producto de la corriente y la tensión se le denomina **potencia aparente (S)**, la cual también es la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva. El valor de la potencia aparente es expresada en **Volt-Ampere (VA)**. En la tabla 2.1 las ecuaciones de potencia.

<p style="text-align: center;">Potencia activa (en W)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monofásica (fase-neutro): $P = U_0 \cdot I \cdot \cos\theta$ • Bifásica (entre fases): $P = U \cdot I \cdot \cos\theta$ • Trifásica (tres fases + neutro): $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\theta$ 	<p style="text-align: center;">Potencia reactiva (en VAR)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monofásica (fase-neutro): $Q = U_0 \cdot I \cdot \sen\theta$ • Bifásica (entre fases): $Q = U \cdot I \cdot \sen\theta$ • Trifásica (tres fases + neutro): $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sen\theta$
<p style="text-align: center;">Potencia aparente (en VA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Monofásica (fase-neutro): $S = U_0 \cdot I$ • Bifásica (entre fases): $S = U \cdot I$ • Trifásica (tres fases + neutro): $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ 	<p>$U_0 =$ Tensión entre fase y neutro $U =$ Tensión entre fases</p>

Tabla 2.1 Ecuaciones de potencia



2.1.6 FACTOR DE POTENCIA.

Se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. “Adquiere valores entre 0 y 1. Depende de las características del circuito eléctrico al cual se suministra la corriente, y es un parámetro importante en instalaciones que consumen mucha potencia eléctrica. Un factor de potencia próximo a 1 indica que la potencia absorbida se transforma prácticamente en trabajo y pérdidas por calentamiento, optimizando el consumo.

$$F = \frac{P(W)}{S(VA)} = \cos \theta \quad (9)$$

Donde: **F**= Factor de Potencia, ($\cos \theta$)

P= Potencia Activa, (Watts)

S= Potencia Aparente, (VA)

2.1.7 IMPEDANCIA.

Es la oposición que presenta un circuito al paso de la corriente alterna. Es un valor vectorial compuesto en su parte real por un valor de resistencia y en su parte imaginaria por un valor de reactancia;

se calcula de la siguiente forma:



$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (10)$$

Donde: **Z**= Impedancia, (Ω)

R= Resistencia, (Ω)

X= Reactancia, (Ω)

2.1.8 REACTANCIA.

En sistemas de corriente alterna, la reactancia inductiva se opone al cambio del sentido de la corriente y se calcula de la siguiente manera:

$$X_L = 2\pi fL \quad (11)$$

Donde: **X_L** = Reactancia inductiva, (Ω)

π = Constante

f= Frecuencia del sistema de C.A., (Hz)

L= Inductancia, (Henrios)

2.1.9 INDUCTANCIA.

Se denomina *inductancia* (**L**), a la relación entre la cantidad de flujo magnético,

Φ que lo atraviesa y la corriente (**I**), que circula por ella:



$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (12)$$

La unidad de la inductancia es el **Henrios (H)**.

El flujo que aparece en esta definición es el flujo producido por la corriente (**I**) exclusivamente. No deben incluirse flujos producidos por otras corrientes ni por imanes situados cerca ni por ondas electromagnéticas. La inductancia es un valor intrínseco de las bobinas, que depende del diámetro y el número de espiras.

2.2 CONCEPTOS MAGNÉTICOS.

2.2.1 LEY DE FARADAY.

“La fuerza electromotriz (**f.e.m.**) inducida en un circuito, es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa, caso que se presenta en el generador de energía eléctrica; la ecuación es la siguiente:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta f} \quad (13)$$

Donde: \mathcal{E} = Fuerza electromotriz, (Volts)

$\Delta\Phi$ = Variación del flujo magnético, (Wb)

Δf = Intervalo de tiempo, (seg)



De acuerdo con esta ecuación, la magnitud de la (f.e.m.) inducida coincide con lo que varía el flujo magnético por unidad de tiempo. La presencia de la fuerza electromotriz en la ley de Faraday en lugar de la intensidad de corriente (ambas son proporcionales entre sí), resalta una característica de la inducción, para comprender su capacidad de sustituir a un generador, es decir, para producir los mismos efectos que éste, en un circuito eléctrico. El signo negativo define el hecho, de que aumentos ($\Delta\Phi > 0$) y disminuciones ($\Delta\Phi < 0$) de flujo magnético producen corrientes inducidas de sentidos opuestos. Si no existe variación con el tiempo del flujo magnético que atraviesa un circuito, el fenómeno de la inducción electromagnética no se presenta.

2.2.2 LEY DE OERSTED.

Establece que en todo conductor que sea circulado por una corriente eléctrica, se formará un campo magnético asociado en forma de anillos concéntricos y perpendiculares al conductor a lo largo de este. Es por eso que toda corriente eléctrica lleva asociada un campo magnético, en el cual si se coloca una brújula o un imán junto a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, el imán tenderá a colocarse en posición normal -o sea perpendicular al conductor-. El flujo magnético depende del sentido de la corriente eléctrica y se representa en forma de círculos planos, helicoidales rodeando al conductor. Con esta ley se comprueba la relación existente entre la electricidad y el magnetismo.



2.2.3 LEY DE BIO-SAVART.

La intensidad del campo magnético que se genera en los anillos es mayor cerca del conductor y decrece al aumentar la distancia de los anillos respecto al conductor.

Esta ley establece una relación cuantitativa entre la corriente eléctrica y la intensidad del campo magnético que ésta produce, por lo que se permite calcular las fuerzas que se generan entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos; es decir, el campo magnético producido por una corriente eléctrica tiene una intensidad que depende del valor de la misma, puesto que si no circula corriente alguna, no habrá campo magnético, si la corriente va creciendo paulatinamente, también crecerá la intensidad del campo magnético asociado, de modo que la intensidad del campo magnético en un punto tal, será directamente proporcional a la intensidad de la corriente. Biot y Savart, dedujeron que dicho campo variara en forma inversamente proporcional a la distancia del conductor.

2.2.4 TENSIÓN MAGNÉTICA O FUERZA MAGNETOMOTRIZ.

Esta se puede expresar en forma abreviada como ***f.m.m.*** Es la que tiende a producir la corriente de flujo en el circuito magnético. La unidad de la *f.m.m* es el **Ampere-Vuelta.**



$$f.m.m = N g I \quad (14)$$

Donde: **f.m.m** = Fuerza magnetomotriz, (Amp.-vuelta)
N= Número de espiras del elemento inductor, (vueltas)
I= Corriente, (Amp.)

2.2.5 PERMEABILIDAD MAGNÉTICA.

Se define a la permeabilidad de un medio como la medida de la capacidad para establecer líneas de flujo magnético. “Cuanto más grande sea la permeabilidad del medio, mayor será el número de líneas de flujo que pasarán por la unidad de área”.

El grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético se le denomina *permeabilidad absoluta* y se representa por el símbolo (μ). La permeabilidad del espacio libre (el vacío) se denota mediante (μ_0) y tiene la siguiente magnitud:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs / Am}$$

Los materiales magnéticos se clasifican conforme a sus permeabilidades comparadas con la del espacio vacío. La razón de la permeabilidad de un material con la correspondiente para el vacío se llama *permeabilidad relativa* (μ_r) y está expresada por la siguiente ecuación:



$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (15)$$

La permeabilidad relativa de un material es una medida de su capacidad para cambiar la densidad de flujo de un campo respecto a su valor en el vacío.

Los materiales pueden clasificarse de acuerdo a su permeabilidad relativa.

Los que se encuentren ligeramente menores a la unidad tienen la propiedad de poder ser repelidos débilmente por un imán potente. Este tipo de materiales se les conoce como **diamagnéticos**.

Los materiales que presentan una permeabilidad mayor que la del vacío se denominan **paramagnéticos**. Dichos materiales son atraídos débilmente por un imán poderoso.

Dentro de los pocos materiales, como el hierro, cobalto, níquel, acero y aleaciones de estos elementos presentan permeabilidades extremadamente altas superiores a la unidad. Estos elementos son atraídos fuertemente por un imán y se dice que son **ferromagnéticos**.



2.2.6 RELUCTANCIA.

Es la oposición al paso del magnetismo; la reluctancia es el equivalente de la resistencia en una corriente eléctrica y su unidad es el **(Amp./Wb)**.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \quad (16)$$

Donde: **R** = Reluctancia, (Amp/Wb)
 μ_r = Permeabilidad relativa
 μ_0 = Permeabilidad en el vacío
 A = Área de la sección, (m²)

2.2.7 FLUJO MAGNÉTICO.

Está representado por líneas de fuerza magnética. El número total de líneas de fuerza creadas por un campo magnético se le denomina flujo magnético y su unidad es el **Weber (Wb)**.

$$\Phi = \frac{f.m.m}{\mathfrak{R}} \quad (17)$$

Donde: **Φ** = Flujo magnético, (Wb)



2.2.8 INDUCCIÓN MAGNÉTICA.

Es el número de líneas de flujo en una región de un campo magnético, que pasan a través de una sección de área perpendicular al flujo. La unidad de la densidad de flujo será **Webers por metro cuadrado (Wb/m²)**, y se redefine como **Tesla (T)**.

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (18)$$

Donde: **B** = Inducción magnética, (Wb/m²)

2.2.9 INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO.

La densidad de flujo en cualquier punto de un campo magnético se ve muy afectada por la naturaleza del medio o por la naturaleza de algún material que se coloque entre el polo y el objeto. Por esta razón es conveniente definir un nuevo vector de campo magnético, la intensidad del campo magnético (**H**), que no depende de la naturaleza del medio. El número de líneas establecidas por unidad de área es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético (**H**). La unidad de la intensidad del campo magnético es el **Ampere/metro**.

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (19)$$

Donde: **H** = Intensidad del campo magnético, (Amp./m)



2.2.10 SCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.

Se puede definir como la medida de la facilidad que presenta un material hacer magnetizado por un campo magnético. La *susceptibilidad magnética* se representa por la variable (**X**), y es un valor absoluto.

$$X = \frac{M}{H} \quad (19)$$

Donde: **X**= Susceptibilidad magnética, (adimensional)

M = Magnetización del material, (Amp./m).

H= Intensidad del campo magnético externo aplicado, (Amp./m)

“Si **X** es positivo, el material se llama *paramagnético* o *ferromagnético*, y el campo magnético se fortalece por la presencia del material. Si **X** es negativa, el material es *diamagnético*, y el campo magnético se debilita en presencia del material”.

2.2.11 CURVAS DE MAGNETIZACIÓN.

La característica magnética de un material, depende de su historia magnética previa, propiedad llamada "*histéresis*", que es el retraso de magnetización con respecto a la intensidad del campo magnético. Un material magnético se desmagnetiza, sometiéndolo a un campo alterno de amplitud máxima, continuamente decreciente hasta cero. Este proceso efectivamente destruye



toda historia magnética previa. Cuando la f.m.m. es gradualmente aumentada, la inducción magnética (**B**) aumentará según la curva 0-1 de la figura 3.2, llegando al valor de **B_m**, cuando la intensidad de campo (**H**) aplicado es **H_m**. Esta curva se llama "**Curva ascendente de magnetización**".

Si posteriormente es alcanzado el punto 1, la intensidad de campo es gradualmente disminuida, la inducción magnética caerá según la curva 1-2, alcanzando el valor **B_r** en **H=0**. Esta inducción magnética **B_r**, retenida por el material, luego de haber sido magnetizado es llamada "**Inducción residual**" o "**Retentividad**".

El ciclo es continuado aumentando (**H**) en sentido opuesto, provocando una disminución del flujo, según la curva 2-3. El valor magnético de **H_c**, necesario para llevar a la inducción magnética a cero, es llamado "**Fuerza coercitiva**".

El ciclo se completa con la disminución de (**H**) hasta **-H_m** y luego variándolo hasta **+H_m**, produciendo una variación de la densidad de flujo según la curva 3-4, el punto 7 generalmente no coincidirá con el 1, siendo un poco inferior. Si el campo magnético es variado cíclicamente de **+H_m** a **-H_m** y viceversa ambos puntos, gradualmente llegarán a coincidir, formando lo que se denomina, un "**Lazo de histéresis normal o simétrico**". El lugar geométrico, de las extremidades de lazos de histéresis de distinta amplitud, se le conoce como "**Curva normal de magnetización**".

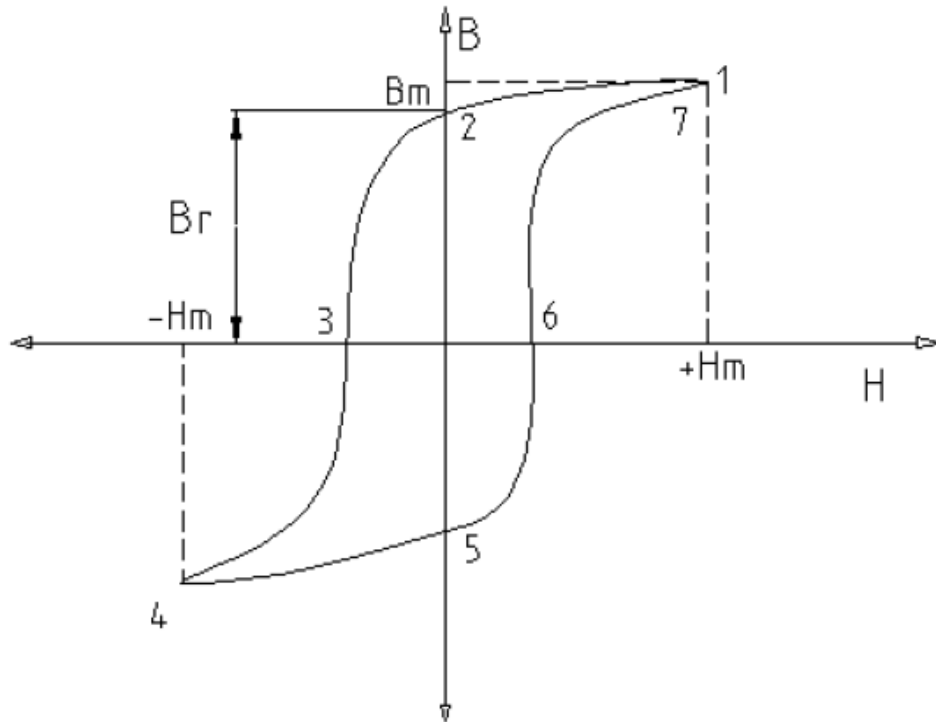


Figura 2.2.1 Curva normal de Magnetización

2.3 CONCEPTOS TÉRMICOS.

2.3.1 TEMPERATURA.

Es una medida de la capacidad de transferir calor, o sea que cuanto más temperatura tenga un objeto es mayor su capacidad de intercambiar calor con el medio que lo rodea, siempre y cuando la temperatura del medio sea distinta, por lo tanto, la temperatura es una propiedad de los cuerpos, que no se pueden disociar de la materia.



2.3.2 CALOR.

El calor lo definimos como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperaturas. De ello se deduce que no hay ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura. Queda implícito el hecho de que un cuerpo no contiene calor, sino que denominamos con este término a la energía, en cuanto cruza los límites; el calor es un fenómeno transitorio, y por lo tanto, no es una función de estado.

Existen dos variantes que son el *calor sensible*, que va asociado a cambios de temperatura, y el *calor latente*, que va asociado a efectos caloríficos propios de reacciones químicas, cambios de fase, etcétera, en los que la temperatura permanece constante.

2.3.3 CALOR ESPECÍFICO.

Cuando calentamos o enfriamos una sustancia se necesita una cierta cantidad de calor para elevar o disminuir su temperatura en 1°C. Otras sustancias requieren una cantidad diferente, mayor o menor. Se denomina calor específico a la cantidad de calor necesario para elevar en una unidad (por ejemplo 1°C) la temperatura de la unidad de masa (por ejemplo 1 gramo) de la sustancia en cuestión. Esta cantidad es la misma para calentamiento o enfriamiento. Es una propiedad específica de la sustancia -o sea que depende de su composición- la cual podemos expresar de la siguiente manera:



$$C_p = \frac{Q}{m\Delta t} \Rightarrow Q = mC_p\Delta t \quad (20)$$

Donde: **C_p**= Calor específico, (BTU/lb·°F)

Q= Calor, (BTU)

m= Masa, (lb)

Δt= Diferencia de temperatura, (°F)

Esta ecuación nos permite calcular la cantidad de calor (**Q**) requerida para producir la modificación de la temperatura de una masa (**m**) de sustancia de calor específico (**C_p**) en una cantidad (**Δt**), siempre que no se origine un cambio de fase. Los valores de calor específico se informan en unidades de calor divididas por unidades de masa y divididas por unidades de temperatura.

2.3.4 TRANSFERENCIA DE CALOR.

La Ingeniería térmica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia y de la metodología para calcular la velocidad con que éstos se producen, para así diseñar los componentes y sistemas en los que tiene lugar una transferencia de calor.

La ciencia de la transferencia de calor esta relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor, de lo cual podemos mencionar tres principios fundamentales:



- El primer principio nos permite realizar balances de energía en un sistema, cuantificando la energía acumulada partir de las energías entrantes y salientes y de la energía térmica generada por conversión de otras formas de energía tales como: química, eléctrica, electromagnética y nuclear.
- El segundo principio especifica el sentido de la transferencia de calor, indicándonos que el flujo de calor se produce en el sentido de las temperaturas decrecientes.
- Por último, la transferencia de calor nos brinda reglas experimentales adicionales muy simples que permiten cuantificar la velocidad, con la cual ocurre la transferencia de calor en términos del grado de desequilibrio térmico.

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres; estas son: *conducción, convección y radiación*.

2.3.5 CONDUCCIÓN.

La conducción es una forma de transferencia térmica según la cual, el calor viaja desde una región de temperatura elevada a otra de menor temperatura, pudiendo aparecer en los sólidos, en los líquidos y en los gases. “Para el caso de los líquidos y gases, la conducción se encuentra normalmente en combinación con la convección; la conducción pura tiene lugar, fundamentalmente, en los sólidos opacos”.



En todos los procesos de transporte (flujo de calor, electricidad, fluidos, etcétera.) se encuentra que la cantidad de lo que fluye es inversamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia. En el caso de flujo de calor se debe a la rigidez de las moléculas que obstaculizan la vibración o presencia de huecos en el material. Para todos los casos se puede plantear la ecuación generalizada:

$$\textit{Intensidad de flujo} = \frac{\textit{Potencial}}{\textit{Resistencia}} \quad (21)$$

En 1822 Fourier realizó estudios acerca de los fenómenos de transferencia de calor (ver figura 2.3.1) y estableció la siguiente ecuación:

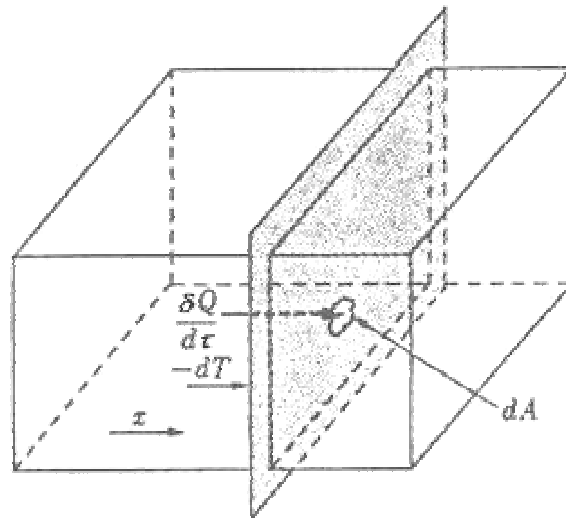


Figura 2.3.1 Esquema de transferencia de calor



$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (22)$$

Donde: **Q** = Calor transmitido por conducción
 t= Tiempo
 X= Espesor del material
 A= Área normal al flujo calorífico
 K= Conductividad térmica
 T= Temperatura

2.3.6 TIPOS DE RÉGIMEN DE FLUJO DE CALOR.

Se distinguen dos tipos de régimen de flujo de calor; en las situaciones en que la distribución de temperaturas es uniforme e invariable en el tiempo, el flujo será *estable*, en tanto que si la distribución de temperaturas es variable con el tiempo, el flujo será *transitorio*. Estos dos tipos de régimen tienen su importancia en el arranque y parada de los equipos, así como en los casos en los que se presentan variaciones importantes y relativamente bruscas en las condiciones de operación.



2.3.7 CONDUCTIVIDAD TERMICA.

El coeficiente de conductividad térmica (**k**) expresa la cantidad o flujo de calor que pasa a través de la unidad de superficie de una muestra del material, de extensión infinita, caras planoparalelas y espesor, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad, en condiciones estacionarias.

2.3.8 RESISTENCIA TÉRMICA.

Uno de los factores que origina error en la determinación de la conductividad térmica, es la naturaleza de la unión formada entre la fuente de calor y el fluido o espécimen sólido que hace contacto con él y transmite el calor. Con frecuencia aparecen fenómenos de intercambio de calor a través de paredes compuestas por dos o más materiales distintos (ver figura 2.3.2).

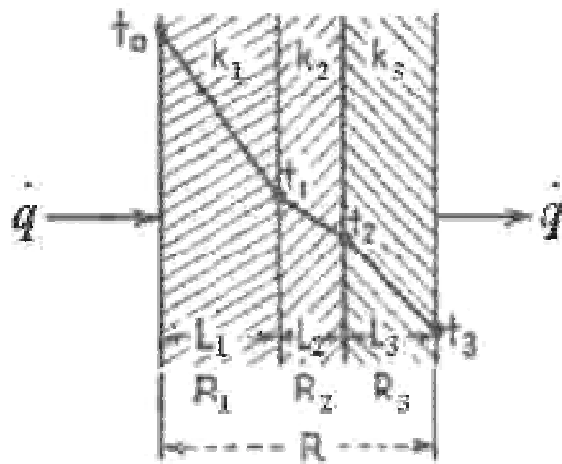


Figura 2.3.2 Resistencia térmica



2.3.9 CONVECCIÓN.

Es el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido con movimiento masivo de éste. “En la convección existe movimiento del fluido a nivel macroscópico mientras que en la conducción existe movimiento a nivel microscópico, atómico o molecular, entendiendo como nivel macroscópico movimiento de volúmenes relativamente grandes del fluido”(ver figura 2.3.3.)

La velocidad de transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la velocidad de transferencia de calor. La convección se clasifica de acuerdo al siguiente diagrama:

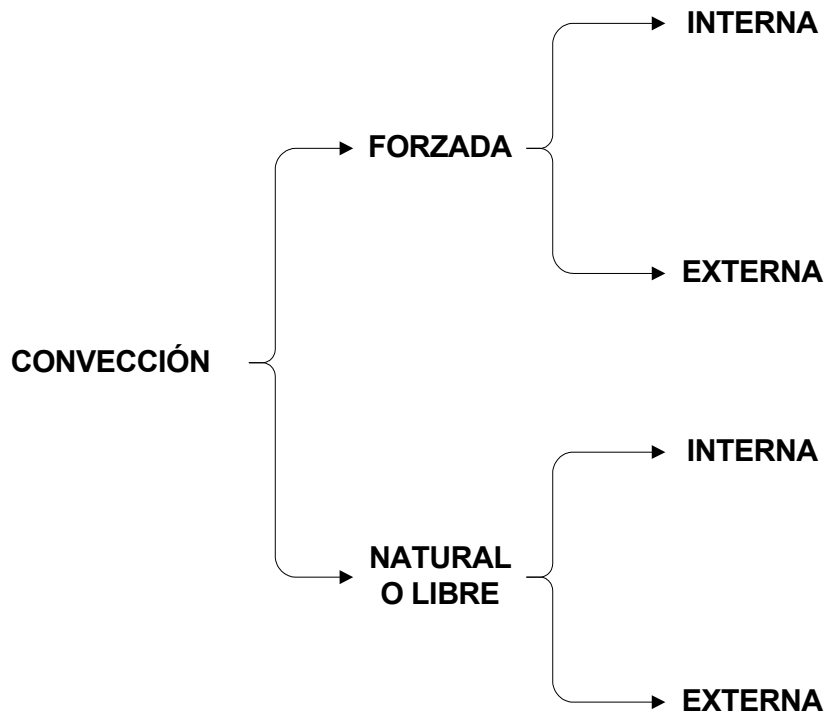


Figura 2.3.3. Clasificación de la convección



Convección forzada. Se presenta cuando el movimiento del fluido es a través de dispositivos mecánicos (impulsor, bomba, ventilador, etcétera).

Convección natural. Se origina por efecto de la gravedad sobre zonas del fluido que tienen distintas densidades, causadas por diferencias de temperatura entre las mismas.

El calificativo interno y externo se refiere al confinamiento del flujo. Si la circulación del fluido se realiza a través de un espacio cerrado; por ejemplo la tubería, se dice que el flujo es interno; por el contrario si el flujo no se encuentra confinado se le da el adjetivo de externo; por ejemplo el flujo de aire impulsado por un ventilador. El coeficiente de película es una zona existente alrededor de un cuerpo que se desplaza por un fluido, en la cual la velocidad del fluido respecto al cuerpo varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente exterior.

Dependiendo de cómo se mueva el fluido en su interior, la capa límite puede ser laminar o turbulenta, aunque normalmente dentro de la capa límite pueden coexistir zonas de flujo laminar y de flujo turbulento. El número de Reynolds se encarga del estudio de la variación de velocidades del flujo, más adelante nos abocaremos a este asunto y los parámetros para determinar el tipo de flujo.

En la figura 2.3.4 se muestra la forma como es el comportamiento de estos dos tipos de flujo.

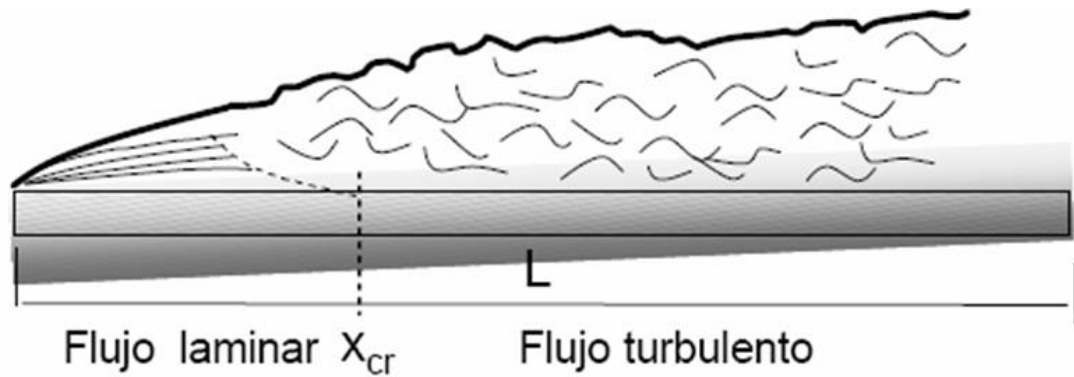


Figura 2.3.4 Comportamiento del flujo laminar y turbulento

El mecanismo de convección se representa a través de la ecuación de Newton, misma que se expresa a continuación:

$$Q = hgA\Delta T \quad (23)$$

- Donde:
- $Q =$ Velocidad de transferencia de calor por conducción, (BTU/hr)
 - $h =$ Coeficiente de película, (BTU/hr pie² °F)
 - $A =$ Área normal al flujo calorífico, (pie²)
 - $\Delta T =$ Diferencia de temperatura, (°F)



El coeficiente de película del fluido (**h**) se debe de evaluar por las siguientes razones:

- 1) El valor de coeficiente (**k**) depende del fluido y de la temperatura media de la capa laminar, que a su vez depende de su espesor.
- 2) El espesor de la capa laminar es extremadamente difícil de estimar.

El espesor de la capa laminar depende de varios factores: como de la viscosidad del fluido y de su velocidad, puesto que a altas velocidades el espesor es menor que a bajas velocidades; de la rugosidad de la superficie; de su disposición geométrica, es decir, si está vertical u horizontal, si el fluido corre de abajo hacia arriba, de arriba hacia abajo o cruzado; de si el fluido se calienta o se enfría, o hierve o se condensa; en fin, de gran variedad de posibilidades.

El problema es muy complejo y escapa del análisis teórico, por lo que solamente contamos con correlaciones experimentales que permiten estimar un valor aproximado.

Nuestra principal herramienta para tal fin es el análisis dimensional. Provee una base que permite analizar el problema y predecir la forma que tendrá el modelo matemático que lo describe.



2.3.10. NÚMEROS ADIMENSIONALES.

Los números adimensionales más importantes que se han determinado son:

- Número de Prandtl.
- Número de Reynolds.
- Número de Grashof.
- Número de Nusselt.

A continuación se describirán cada uno de estos puntos:

a) Número de Prandtl.

Relaciona la difusividad de cantidad de movimiento y la difusividad térmica. Expresa la relación entre la velocidad y la distribución de temperatura en el seno del fluido. El número de Prandtl es un número adimensional, que involucra a la viscosidad cinemática del fluido con su difusividad térmica:

$$Pr = \frac{\mu g C_p}{k} \quad (24)$$

- Donde:
- Pr** = Número de Prandtl
 - C_p** = Calor específico, (BTU/lb °F)
 - μ** = Viscosidad dinámica, (lb/pie seg)
 - k** = Conductividad térmica, (BTU/pie hr °F)



En la tabla 2.3. se presentan valores del número de Prandtl para diversos fluidos.

Fluido	Pr
Metales líquidos	
Sodio	0.011
Mercurio	0.0196
Bismuto	0.0142
Gases	
Aire	0.70
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.75
Monóxido de carbono (CO)	0.73
Helio	0.68
Hidrogeno	0.70
Agua	4.6
Fluidos viscosos	
Aceite de motor	3400
Glicerina	3060

Tabla 2.3 Valores del número de Prandtl para diversos fluidos

En la tabla anterior se percibe que los metales líquidos poseen un número de Prandtl muy bajo; los gases presentan la particularidad de tener un número de Prandtl en el entorno de 0.7, el agua, valores intermedios y finalmente los valores mayores del número de Prandtl lo presentan los fluidos viscosos.



b) Número de Reynolds.

Relaciona las fuerzas de inercia y las viscosas. Determina la naturaleza del flujo, laminar o turbulento bajo los parámetros que se muestran en la tabla 2.3.1

Re<500	Flujo laminar
500<Re<2000	Flujo de transición
2000<Re	Flujo turbulento

Tabla 2.3.2 Parámetros del número de Reynolds

El *flujo laminar* se caracteriza porque las partículas se mueven siguiendo trayectorias separadas perfectamente definidas (no necesariamente paralelas), sin existir mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas.

En un *flujo turbulento* las partículas se mueven con trayectorias muy erráticas, sin seguir un orden establecido, presentando diversas componentes de la velocidad en direcciones transversales entre sí, que originan un mezclado intenso de las partículas. En la figura 2.3.5 se muestra el comportamiento de estos dos flujos.

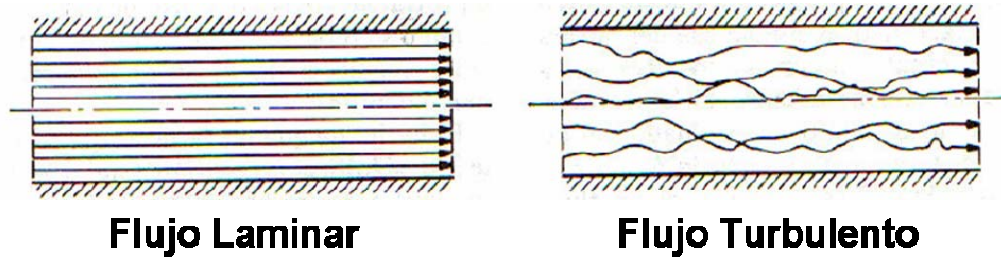


Figura 2.3.5 Comportamiento del flujo laminar y flujo turbulento

Un número de Reynolds grande indica una superioridad marcada de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas viscosas (flujo turbulento), condiciones bajo las cuales la viscosidad tiene escasa importancia. Por el contrario, si el número de Reynolds presenta un valor muy bajo, entonces las fuerzas viscosas son las que rigen el desempeño del flujo (flujo laminar). Mediante la expresión que se muestra a continuación podemos determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{VgD}{\nu} \quad (25)$$

Donde: **Re** = Número de Reynolds

V= Velocidad de flujo, (pies/seg)

D= Diámetro o diámetro equivalente o magnitud longitudinal,
(pie)

ν = Viscosidad cinemática, (pie^2/seg)



El número de Reynolds es un valor exclusivo utilizado para caracterizar el flujo que se genera en tuberías, para poder aplicarlo a un flujo en un canal abierto es necesario realizar algunas adecuaciones. Para ello es factible considerar en lugar del diámetro de la tubería, el radio hidráulico (R_H) de la sección en la cual fluye el gasto:

$$Re = \frac{VgR_H}{\nu} \quad (26)$$

Para calcular el radio hidráulico, se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_H = \frac{A}{P} \quad (27)$$

Donde: R_H = Radio hidráulico, (pie)

A = Área hidráulica de la sección, (pie²)

P = Perímetro mojado de la sección, (pie)

El número de Reynolds es un parámetro fundamental para determinar las pérdidas por fricción que se generan en conductos a presión, así como también para modelar el comportamiento del flujo.



c) Número de Grashof.

Relaciona las fuerzas ascendentes y las fuerzas viscosas del fluido; este número se utiliza principalmente en la convección natural y viene dado por:

$$Gr = \frac{D^3 g \beta \Delta T}{\nu^2} \quad (28)$$

Donde: **Gr** = Número de Grashof

D= Diámetro o diámetro equivalente o magnitud longitudinal,
(pie)

β = Coeficiente de dilatación térmica, (1/°F).
En gases ideales: $\beta = 1/T$

g= Gravedad, (32 pie/seg²)

Δt = Diferencia de temperatura, (°F)

Cuanto mayor sea el número de Grashof, mayor será el movimiento libre del fluido.

d) Número de Nusselt.

Es el gradiente adimensional de temperatura en la superficie; expresa la transmisión de calor entre el fluido y la pared. “El número de Nusselt corresponde al coeficiente de transferencia de calor por convección adimensional, y se determina realizando una equivalencia entre el calor que se



transmite por conducción y el determinado por convección, quedando la siguiente ecuación”:

$$Nu = \frac{hgD}{k} \quad (29)$$

Donde: **Nu**= Número de Nusselt

h= Coeficiente de película, (BTU/hr pie² °F)

La expresión que a continuación se muestra, se utiliza para definir el número de Nusselt de tubos no circulares:

$$Nu = \frac{hgD_{hid}}{k} \quad (30)$$

Donde: **D_{hid}** = Diámetro hidráulico, (pie)

El diámetro hidráulico esta definido por la siguiente ecuación:

$$D_{hid} = \frac{4Ac}{p} \quad (31)$$

Donde: **Ac** = Área de la sección transversal del tubo, (pie²)

p= Perímetro de la sección transversal, (pie)

Cuanto mayor es el número de Nusselt más eficaz es la convección. El número de Nusselt se emplea tanto en convección forzada como natural.



En general el estudio de la convección pretende determinar (**h**), o bien en forma adimensional, el número de Nusselt.

2.3.11. RADIACIÓN.

El fenómeno de la radiación térmica se refiere a la propagación de la energía interna que posee una sustancia gaseosa, líquida o sólida. Esta propagación se efectúa por medio de ondas electromagnéticas (o fotones) que se transmiten en el vacío a la velocidad de las interacciones de la energía. Es conveniente recordar que el fotón es una partícula de materia que posee energía, cantidad de movimiento y masa electromagnética. “La radiación electromagnética suele clasificarse en función de su longitud de onda”.

La radiación calorífica emitida por cuerpos a baja temperatura corresponde a la zona infrarroja del espectro electromagnético. A mayores temperaturas la radiación se hace visible, y con temperaturas altas la emisión se enriquece en una proporción creciente ultravioleta. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, a la velocidad de la luz y no sufre disminución en el vacío.



La ley de Stefan-Boltzman establece que la radiación total de un cuerpo negro perfecto es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

La constante 0.173×10^{-8} BTU/(hr °R⁴ pie²) se conoce como la constante de Stefan-Boltzman designada comúnmente por (σ). Esta ley se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$Q = \sigma g A_s g T_s^4 \quad (32)$$

- Donde:
- $Q =$ Velocidad de emisión de la parte más calida hacia la más fría, (BTU/hr)
 - $\sigma =$ Constante de Stefan-Boltzmann, (BTU/hr °R⁴ pie²)
 - $A_s =$ Área superficial, (pie²)
 - $T_s =$ Temperatura absoluta, (°R)

La emisividad es la energía emitida depende de la cantidad de la superficie, porque las cantidades de energía emitida varían aunque el material sea el mismo. Una superficie ideal emitirá o recibirá energía radiante de cualquier longitud de onda y en su totalidad en función únicamente de su temperatura. Aun cuerpo de tales características se le llama emisor ideal. Un emisor ideal es también un absorbedor ideal, ya que sí es capaz de emitir, igualmente podrá absorber en las mismas condiciones. Es por eso que a un emisor ideal se le conoce como *cuerpo negro*; se le designa ese nombre por la propiedad óptica



de un cuerpo que se ilumina con luz blanca, es decir, integrada por radiaciones de todas las longitudes de onda. Si el cuerpo es negro significa que absorbe todas las longitudes de onda de la luz que recibe, sin emitir nada. En la práctica se llega a afectar a las superficies reales por un factor de corrección que mide la desviación de su comportamiento respecto de la idealidad representada por el cuerpo negro. A este factor se le llama *emisividad*. La radiación emitida por una superficie real se expresa como:

$$Q = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (33)$$

Donde: $\epsilon =$ Emisividad, (adimensional)

Las emisividades de los materiales que cubren un determinado rango se muestran en la tabla 2.3.3

MATERIAL	EMISIVIDAD (ϵ)
Aluminio pulido	0.05
Acero pulido	0.30
Acero oxidado	0.70
Ladrillo	0.85
Vidrio	0.94
Pintura blanca	0.85
Pintura negra mate	0.97

Tabla 2.3.3 Emisividad de algunos materiales¹

Las emisividades son influidas por el acabado o pulido de las superficies y aumentan con la temperatura.



2.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Se pueden describir de un modo muy elemental, como un equipo en el que dos corrientes a distintas temperaturas fluyen sin mezclarse, con objeto de enfriar una de ellas o calentar la otra o ambas cosas a la vez. Un esquema muy elemental de un intercambiador de calor sumamente primitivo puede ser el de la figura 2.4.

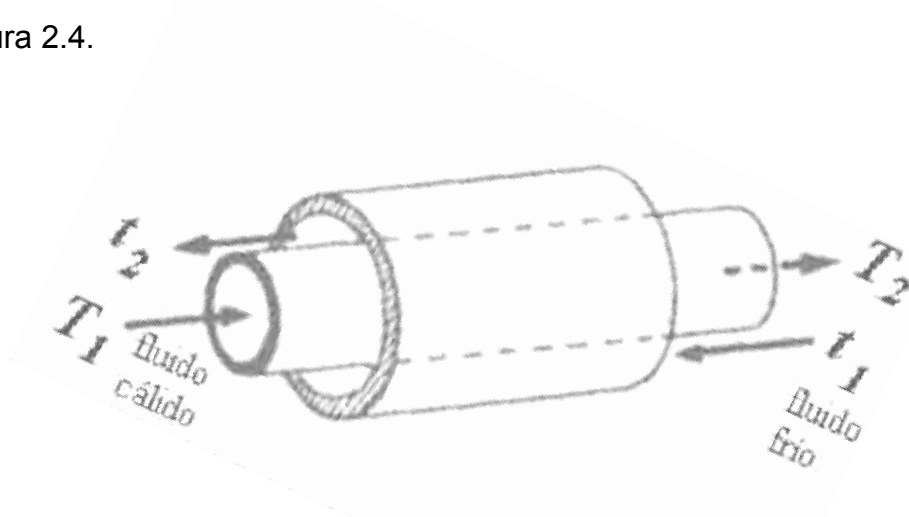


Figura 2.4 Intercambiador clásico t_1 y t_2 = Temperaturas de entrada y salida del fluido frío T_1 y T_2 = Temperaturas de entrada y salida del fluido caliente

En este tipo de intercambiador son posibles dos configuraciones en cuanto a la dirección del flujo de los fluidos: contraflujo y flujo paralelo. En la configuración en *flujo paralelo* los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. En la configuración de *contraflujo* los fluidos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos. En un intercambiador de calor en flujo paralelo, la temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.



En un intercambiador de calor en contraflujo, la temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. El caso límite se tiene cuando la temperatura de salida del fluido frío es igual a la temperatura de entrada del fluido caliente.

En la siguiente figura 2.4.1 se muestran esquemas de las dos configuraciones, así como la evolución de la temperatura de los fluidos en cada una de ellas:

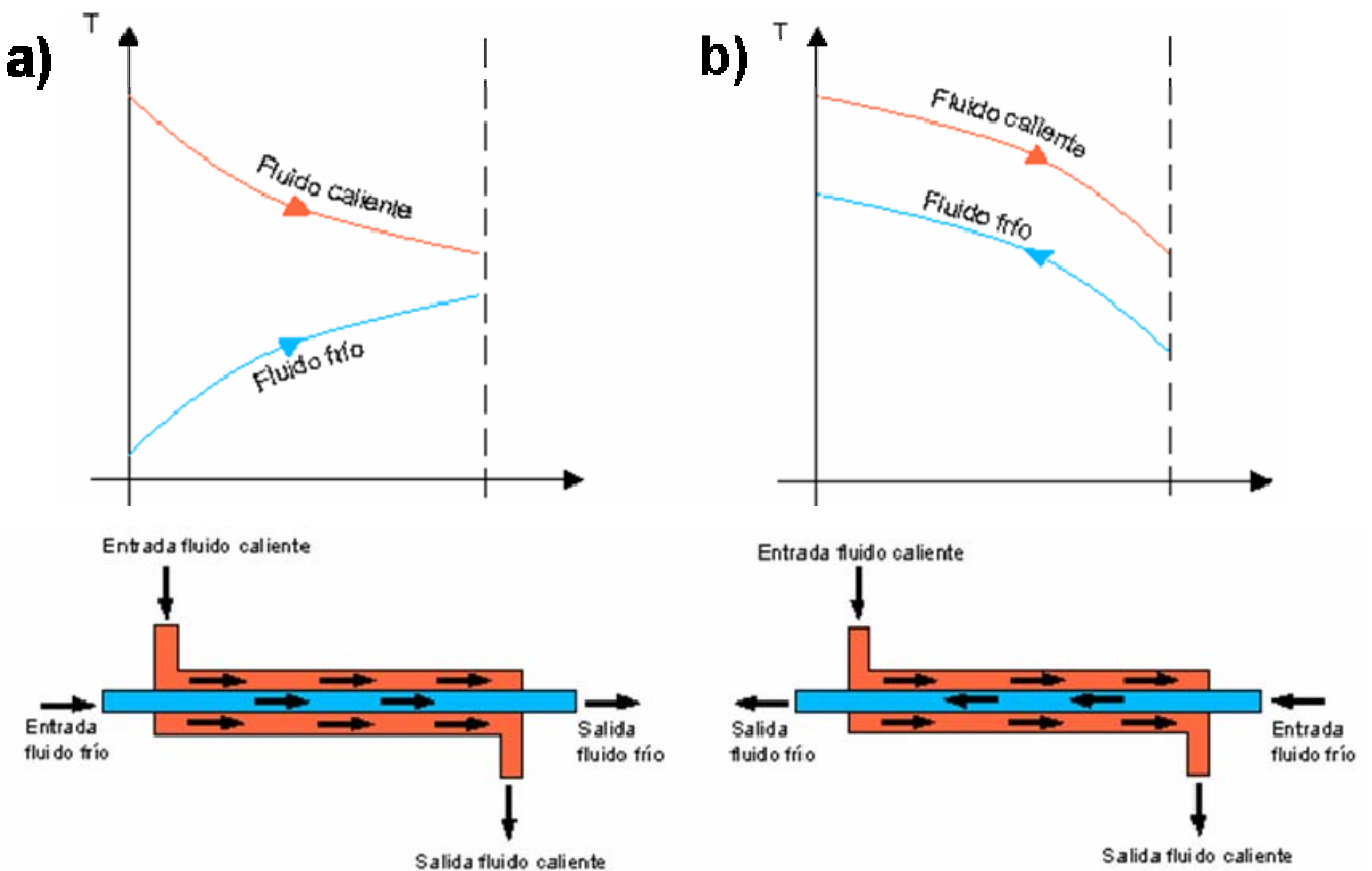


Figura 2.4.1 Esquema de configuración del flujo en intercambiadores;
a) Flujo paralelo, b) Contraflujo



2.4.1 DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS.

Es evidente que la diferencia de temperaturas (Δt) depende de la disposición de los tubos, del número de pasos, de la geometría, entre otras. Por otra parte el coeficiente total de transferencia de calor depende, de los coeficientes de transferencia de calor por convección (h), de las propiedades físicas de los fluidos, y como éstas dependen de la temperatura, tenemos que el coeficiente total de transferencia (U) es variable a lo largo del intercambiador. Por ambas razones, para simplificar el cálculo, se definen dos valores medios de la diferencia de temperaturas y del coeficiente global de transferencia de calor, de forma que la cantidad de calor transferida sea la potencia térmica (Q). Si la diferencia media de temperaturas es adecuada, la variación del coeficiente total de transferencia de calor es pequeña.

Considerando un intercambiador de flujo paralelo de un paso por la tubería y un paso por carcasa, analicemos las siguientes hipótesis:

- El coeficiente total de transferencia (U) es constante a través del cambiador.
- No existe cambio de fase.
- Si hubiera cambio de fase en uno de los fluidos tendría lugar en todo el cambiador.
- Los calores específicos y el flujo de masa de ambos fluidos son constantes.
- No hay pérdidas de calor al ambiente.
- No existe conducción del calor a lo largo de las tuberías.



- En cualquier sección transversal del cambiador cada uno de los fluidos puede caracterizarse por una sola temperatura.

Se utilizarán los subíndices **(c)** y **(f)** que representan al fluido caliente y al fluido frío respectivamente, 1 será la entrada y 2 la salida del fluido. Se admite que las temperaturas de los fluidos son conocidas, tanto a la entrada como a la salida.

Las diferencias de temperaturas que se tomarán en cada uno de los extremos son:

$$\Delta t_1 = t_{ce} - t_{fe} \quad (36)$$

$$\Delta t_2 = t_{cs} - t_{fs} \quad (37)$$

A lo largo de una longitud diferencial, de área superficial **(dA)**, el calor intercambiado entre los dos fluidos puede expresarse de las tres formas siguientes:

$$dQ = U g dA g \Delta t \quad (38)$$

$$dQ = m_c g_{pc} g dt_c \quad (39)$$

$$dQ = m_f g_{pf} g dt_f \quad (40)$$

(Δt) representa la diferencia entre las temperaturas de los dos fluidos a lo largo de **(dA)**, mientras que **(dt_c)** y **(dt_f)** son los valores de los cambios experimentados por las temperaturas del fluido caliente y del fluido frío. Las ecuaciones anteriores, indican una relación lineal entre **(Q)** y **(t)**, siendo **(m)** y



(C_p) constantes. Esto significa que la diferencia entre las temperaturas del fluido, (Δt), es una función lineal de (Q), variando entre (Δt_1) en un extremo del cambiador y (Δt_2) en el otro. En este caso se cumple la siguiente proporción:

$$\frac{d(\Delta t)}{dQ} = \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{Q} \quad (41)$$

Y teniendo en cuenta;

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{Ug(\Delta t_2 - \Delta t_1)}{Q} dA \quad (42)$$

Integrando desde un extremo del cambiador ($A=0$, $\Delta t = \Delta t_1$) al otro ($A=A$, $\Delta t = \Delta t_2$), obtenemos la expresión:

$$\ln \Delta t_1 - \ln \Delta t_2 = UgA \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{Q} \quad (43)$$

Y despejando Q ,

$$Q = UgA \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (44)$$

Definiendo como diferencia media logarítmica, la siguiente expresión:

$$\Delta t_{total} = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (45)$$



Las siguientes expresiones se toman para contraflujo:

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 \quad (46)$$

$$\Delta t_2 = T_1 - t_2 \quad (47)$$

Las siguientes expresiones se toman para flujo paralelo:

$$\Delta t_1 = T_2 - t_2 \quad (48)$$

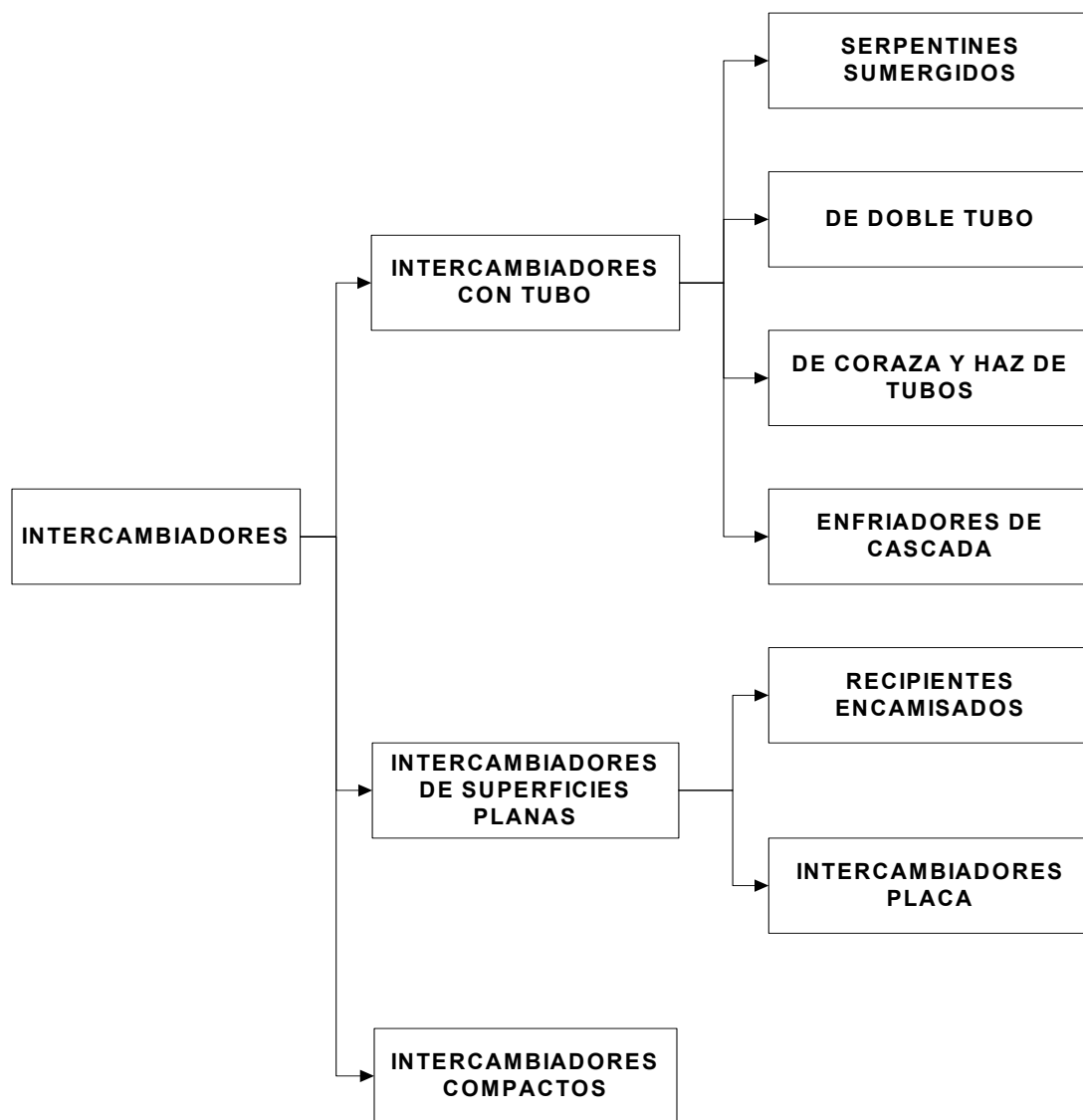
$$\Delta t_2 = T_1 - t_2 \quad (49)$$

2.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES.

El intercambiador es uno de los equipos más frecuentes. Prácticamente no hay industria en donde no se encuentre un intercambiador de calor debido a que la operación de enfriamiento o calentamiento es inherente a todo proceso que maneje energía en cualquiera de sus formas.

Existe mucha variación de diseños en los equipos de intercambiador de calor. En ciertas ramas de la industria se han desarrollado intercambiadores muy especializados para ciertas aplicaciones puntuales.

Tratar todos los tipos sería imposible, por la cantidad y la variedad de ellos que se puede encontrar. En forma muy general, podemos clasificarlos según su tipo de superficie en:



Cuadro sinóptico 2.4 Clasificación de los intercambiadores

Para nuestro estudio nos enfocaremos a los intercambiadores de calor de placas, ya que por su configuración la relacionamos con los radiadores tipo oblea.



2.4.3 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS.

El intercambiador de placas se empezó a utilizar para el tratamiento y la pasteurización de la leche. En un principio este tipo de intercambiador se usó para satisfacer la necesidad de contar con un equipo de fácil limpieza, sin irregularidades, ni rincones donde se pudieran albergar bacterias, requisito básico de sanidad para esta industria. Con el transcurso del tiempo se reconoció que las características de esos primeros diseños se podrían aplicar a otras industrias que manejan líquidos, ya sea como parte del proceso o en los servicios de enfriamiento de una planta. De esta manera el intercambiador de calor de placas se ha introducido en múltiples aplicaciones industriales.

En la industria moderna, el intercambiador de calor de placas ha desplazado al tradicional de multitubular, por dos razones principales:

1. El coeficiente de transferencia de calor es mayor, lo que permite construir equipos más compactos y con menor tiempo de residencia de los fluidos.
2. Son fácilmente desmontables, con lo cual se puede proceder a su limpieza con mayor rapidez. Algunos modelos de intercambiadores de placas no se pueden desmontar debido a que las placas están soldadas.

a) Componentes del intercambiador de placas.

Un intercambiador de placas consiste en una pila de placas de metal, corrugadas, que se mantienen unidas mediante presión en un bastidor y selladas por medio de una junta, de manera que se forman una serie de pasillos



interconectados a través de los cuales se hacen circular los fluidos de trabajo. Estos fluidos son impulsados mediante bombas. Un intercambiador de placas típico se compone de dos secciones principales:

- El bastidor, cuyos componentes son de acero al carbono, con excepción de aquellos que tienen contacto con los fluidos como pueden ser las conexiones de entrada y salida. En las esquinas del bastidor se encuentran las conexiones para permitir la entrada y salida de los fluidos. Tiene la misión de mantener la pila de placas unidas, proporcionando un buen sellado y formando una estructura rígida mediante una serie de barras horizontales que soportan las placas. (ver la figura 2.4.2)

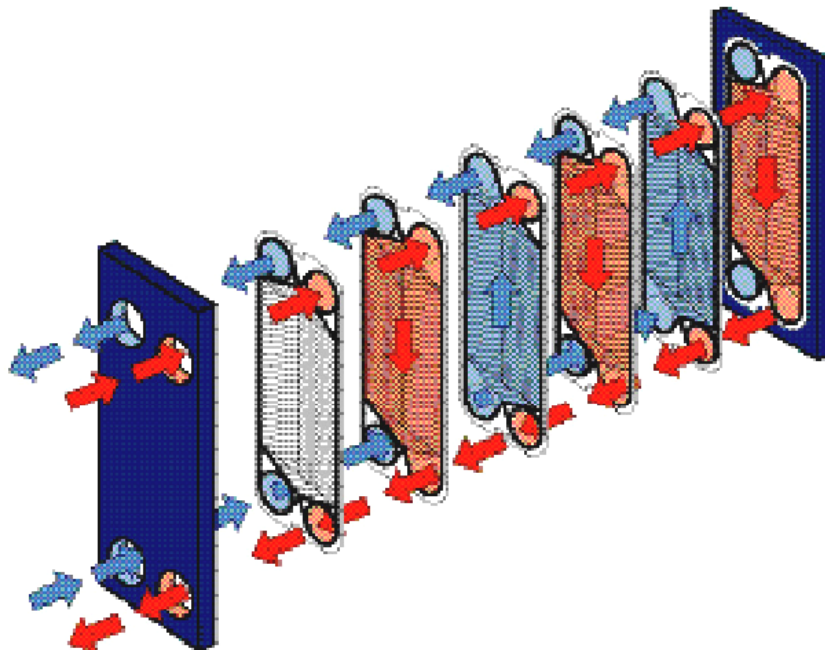


Figura 2.4.2 Componentes del intercambiador de placas



- Las placas de transferencia de calor se fabrican prensando láminas delgadas de gran variedad de aleaciones y metales, resistentes a la corrosión. El más usado es el acero inoxidable aunque en función de los fluidos a tratar y de sus propiedades pueden ser más adecuados unos metales (o aleaciones) que otros Este aumento de la superficie varía mucho en función de la forma de las corrugaciones.

Con la corrugación de las placas y el aumento de la turbulencia se consigue una mejor transferencia del calor (coeficientes de transmisión mucho mayores que en el caso de carcasa-tubo). Existen varias formas para las corrugaciones pero pueden diferenciarse dos grandes grupos: tipo *intermating* y tipo *chevron*, (ver figura 2.4.3).

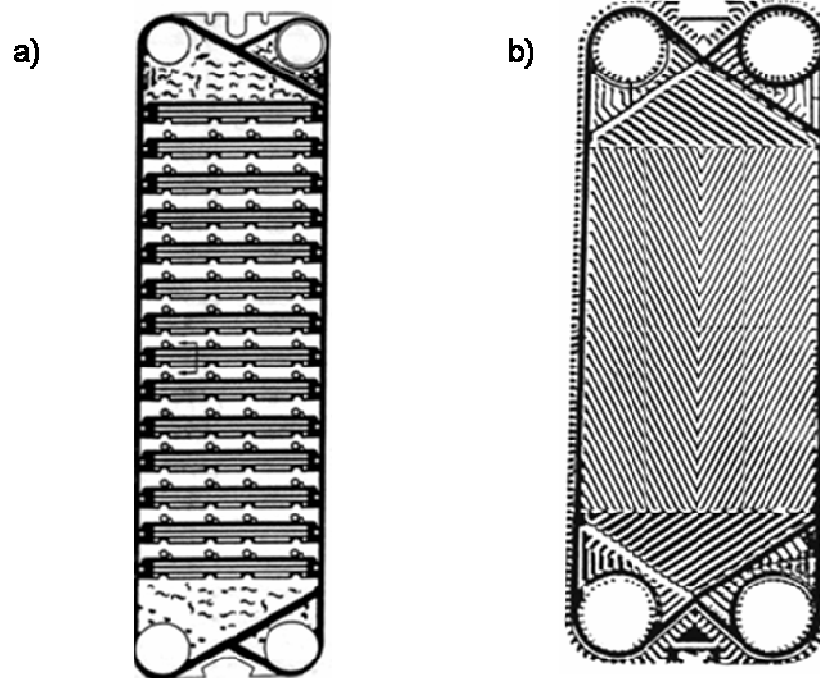


Figura 2.4.3 Tipos de placas: a) Corrugaciones tipo intermating, b) Corrugaciones tipo chevron



b) Funcionamiento del intercambiador de placas.

Los fluidos frío y caliente se introducen por los orificios de conexión y circulan por los canales que se forman entre placas de manera alternativa. Un fluido es conducido por los canales impares mientras que el otro es conducido por los canales pares. Los dos fluidos se encuentran así separados, sin poderse mezclar, por una delgada placa a través de la cual se produce la transferencia de calor. “La distribución de los fluidos por sus canales correspondientes se hace mediante una serie de juntas en los canales impares, que no permiten la entrada del fluido que ha de circular por los pares, y en los pares que no permite la entrada del de los impares”. Generalmente, aunque existen múltiples configuraciones, el flujo de ambos fluidos se hace en contracorriente, como se muestra en la figura 2.4.4.

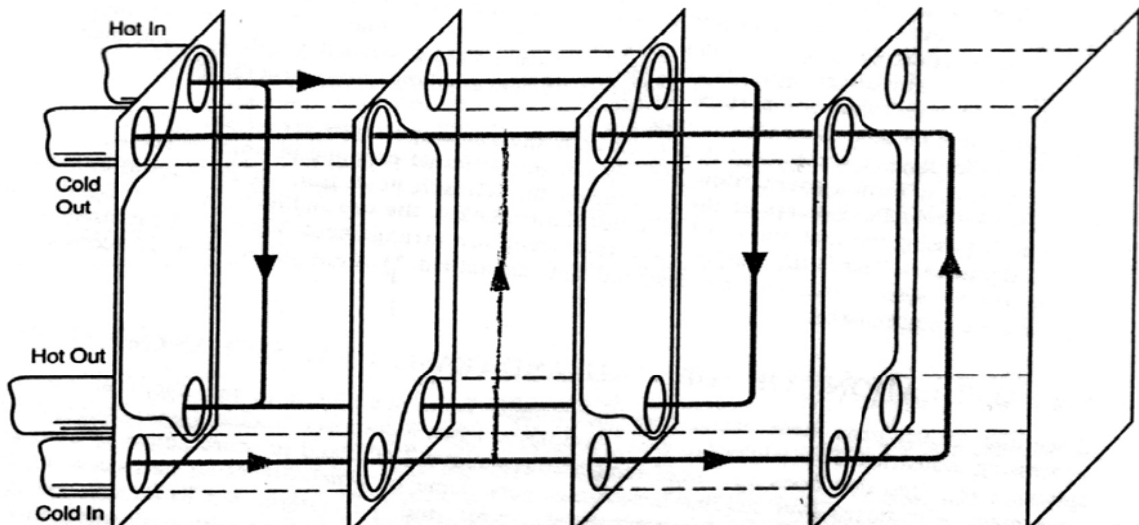


Figura 2.4.4 Configuración del flujo en intercambiadores de calor tipo placas



Las corrugaciones forman los correspondientes canales entre placas, cuyos bordes se apoyan por presión unos sobre otros o bien están soldadas entre ellas, ya que por estas circulan los fluidos. La forma que tienen las corrugaciones generan turbulencias que mejoran la transferencia de calor. Para lograr un mejor intercambio de calor, estas placas se construyen con materiales de baja resistencia térmica.

2.5 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL TRANSFORMADOR.

Al aplicar un voltaje alterno (V_1) al devanado primario, circula por este una corriente (I_1) que genera un flujo magnético alterno Φ . Este flujo al viajar a través del núcleo, enlaza al devanado secundario induciendo en este un voltaje (V_2), que puede ser aprovechado conectándole una carga que demandará una corriente (I_2).

El voltaje inducido guarda una relación directa con el número de vueltas del devanado, esto es, “si en el secundario tenemos más vueltas que en el primario, estaremos elevando el voltaje, y si por el contrario tenemos menos vueltas en el secundario que en el primario, estaremos reduciendo el voltaje. A esto se le conoce como *relación de transformación*”.



En la figura 2.5. se aprecia el desarrollo que presenta el funcionamiento del transformador.

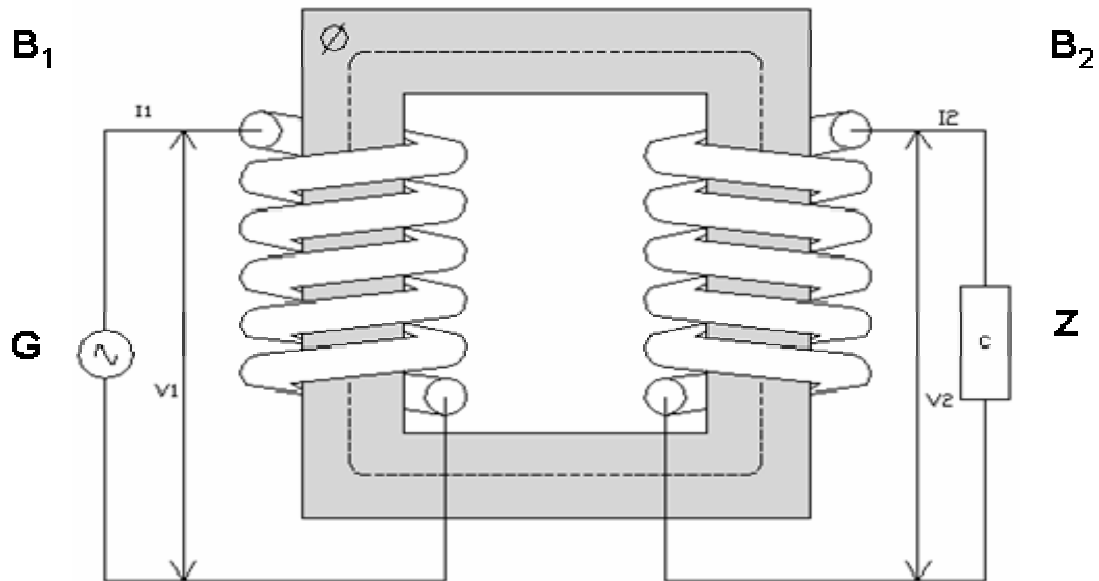


Figura 2.5 Principio de funcionamiento

2.5.1 PÉRDIDAS GENERADAS EN EL TRANSFORMADOR.

Estas las podemos clasificar de la siguiente manera:

- Pérdidas por efecto Joule (I^2R).
- Pérdidas por corrientes de Eddy.
- Pérdidas por histéresis.
- Pérdidas por corrientes Foucault.

A continuación se describirá brevemente cada uno de estos puntos:



a) Pérdidas por efecto Joule (I^2R).

Podemos describir el movimiento de los electrones en un conductor como una serie de movimientos acelerados, cada uno de los cuales termina con un choque contra alguna de las partículas fijas del conductor. Los electrones ganan energía cinética durante las trayectorias libres entre choques y ceden a las partículas fijas en cada choque, la misma cantidad de energía que habían ganado. La energía adquirida por las partículas fijas (que son fijas solo en el sentido de que su posición media no cambia) aumenta la amplitud de su vibración, es decir, se convierte en calor. Para deducir la cantidad de calor desarrollada en un conductor por unidad de tiempo, hallaremos primero la expresión general de la potencia suministrada a una parte cualquiera de un circuito eléctrico. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste experimenta un aumento de temperatura. Este efecto se denomina “*Efecto Joule*”. Es posible calcular la cantidad de calor que puede producir una corriente eléctrica en cierto tiempo, por medio de la ley de Joule. El trabajo realizado se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$Q = W = VgI(t) \quad (51)$$

Donde: **W=** Trabajo realizado, (watts)

V= Voltaje, (volts)

I= Corriente, (amperes)

t = Tiempo, (segundos)



La ley de Joule enuncia que: *"El calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente, con lo cual tenemos:*

$$Q = I^2(t)gR \quad (52)$$

Donde: **Q**= Calor, (watts)
 I= Corriente, (amperes)
 t = Tiempo, (segundos)
 R = Resistencia, (ohms)



CAPITULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO

3.1 REQUERIMIENTOS DEL PROGRAMA

Dentro de los requerimientos del programa se encuentran el que se desarrolle en visual Basic ya que este se encuentra en cualquier computadora que cuente con Excel, además que sea lo suficientemente fácil de manejar para que se puedan hacer todas las iteraciones necesarias para encontrara un enfriamiento optimo, en esta parte se muerta el programa , cabe mencionar que se han omitido las partes que son claves en la tecnología de la empresa para la que se desarrollo el programa.

3.2 LISTADO DE ENTRADAS DEL PROGRAMA

OT = Worksheets(1).Cells(9, 3)	TGHS = Worksheets(1).Cells(22, 4)
Fecha = Worksheets(1).Cells(9, 5)	TAMB = Worksheets(1).Cells(23, 4)
Nombre = Worksheets(1).Cells(9, 7)	WHC = Worksheets(1).Cells(26, 4)
TL = Worksheets(1).Cells(12, 4)	DIS(1) = Worksheets(1).Cells(27, 4)

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



TA = Worksheets(1).Cells(13, 4)	DIS(2) = Worksheets(1).Cells(28, 4)
ADNA = Worksheets(1).Cells(14, 4)	DIS(3) = Worksheets(1).Cells(29, 4)
TH = Worksheets(1).Cells(15, 4)	DIS(4) = Worksheets(1).Cells(30, 4)
CAIRE = Worksheets(1).Cells(16, 4)	VDNB = Worksheets(1).Cells(31, 4)
ALES = Worksheets(1).Cells(17, 4)	DIST(1) = Worksheets(1).Cells(12, 9)
ISPA = Worksheets(1).Cells(18, 4)	DIST(2) = Worksheets(1).Cells(13, 9)
ASNM = Worksheets(1).Cells(19, 4)	DIST(3) = Worksheets(1).Cells(14, 9)
TGAR = Worksheets(1).Cells(21, 4)	DIST(4) = Worksheets(1).Cells(15, 9)
PNL = Worksheets(1).Cells(16, 9)	RKVA(1) = Worksheets(1).Cells(17, 9)
RKVA(2) = Worksheets(1).Cells(18, 9)	WHCFA(1) = Worksheets(1).Cells(19, 9)
WHCFA(2) = Worksheets(1).Cells(20, 9)	GRAFA(1) = Worksheets(1).Cells(21, 9)
GRAFA(2) = Worksheets(1).Cells(22, 9)	GRAFB(1) = Worksheets(1).Cells(23, 9)
GRAFB(2) = Worksheets(1).Cells(24, 9)	CLCL(1) = Worksheets(1).Cells(26, 9)
PIES = Worksheets(1).Cells(27, 9)	IAT = Worksheets(1).Cells(28, 9)
IBT = Worksheets(1).Cells(29, 9)	NALE = Worksheets(1).Cells(30, 9)
KTAN = Worksheets(1).Cells(31, 9)	IVEN = Worksheets(1).Cells(32, 9)
IGUAR = Worksheets(1).Cells(33, 9)	GRAIAT = Worksheets(1).Cells(24, 4)
GRAIBT = Worksheets(1).Cells(25, 4)	



3.3 DESARROLLO DEL PROGRAMA

Sub calculo()

Dim TN(4), EVOL(3), WRE(3), WPR(3), TCAL(3), ELEF(3), TF(3), HS(3)

Dim ACTE(3), PESO(2), COTO(2), RRX(3, 6), VENT(3, 3, 6), HIP(4), AN CAB(4)

Dim MAX(6), ARFA(6), AROA(6), ELEVF(2), WCCFA(2), WCRFA(2), WCFA(2)

Dim WRFA(2), K1F(2), K2F(2), WROA(2), WRRFA(2), ARFAT(2), AROAT(2)

Dim WOAF(2), WPRFA(2), WTFA(2), ELEFF(2), TFFA(2), HSFA(2), TCALFA(2)

Dim LOCAB(4), Z1(5), RR(2, 6)

Dim NumeroDeCiclos As Integer

Dim OT, Fecha, Nombre, TL, TA, ADNA, TH, CAIRE, ALES, ISPA, ASN M As Variant

Dim TGAR, TGHS, TAMB, GRAIAT, GRAIBT, WHC, DIS(4), VDNB, DIST(4), PNL As Variant

Dim RKVA(2), WHCFA(2), GRAFA(2), GRAFB(2), CLCL(2), PIES, IAT, IBT, NALE As Variant

Dim KTAN, IVEN, IGUAR As Variant

ActiveWorkbook.PrecisionAsDisplayed = Tru

' | **CALCULO DE LA LONGITUD DE LOS RADIADORES** |

IRR1 = Int((ADNA - 15) / 12)

If ISPA = 2 Then

IRR1 = Int((ADNA - 20#) / 12#)

End If

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



If PIES = 0 Then

 PIES = IRR1

End If

PIES1 = PIES

B = PIES * 12# + 6#

PE = ADNA - B - 2#

If ISPA = 2 Then

 PE = ADNA - B - 7#

End If

If PE < 7 Then

 PE = 7#

End If

PE1 = PE

HB = B / 2# + PE - ALES / 2#

For I = 1 To 2

 EVOL(I) = 0

 WRE(I) = 0#

 WPR(I) = 0#

 TCAL(I) = 0#

 ELEF(I) = 0#

 TF(I) = 0#

 HS(I) = 0#

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



ACTE(I) = 0#

PESO(I) = 0#

COTO(I) = 0#

RRX(I, 5) = 0#

RRX(I, 6) = 0#

VENT(1, 1, I + 4) = 0#

VENT(1, 2, I + 4) = 0#

VENT(2, 1, I + 4) = 0#

VENT(2, 2, I + 4) = 0#

For kl = 1 To 4

RRX(I, kl) = 0#

VENT(1, I, kl) = 0#

VENT(2, I, kl) = 0#

HIP(kl) = 0#

ANCAB(kl) = TN(kl)

Next kl

Next I

If KTAN = 2 Then

ANCAB(1) = 3.1415927 * TA / 2#

End If

If KTAN = 2 Then

ANCAB(3) = 3.1415927 * TA / 2#

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



End If

' | **INICIA CICLO PARA CALCULO DE ENFRIAMIENTO** |

For I = 1 To IS1

PIES = PIES1

LB16:

' CONTINUE

For J = 1 To 2

MAX(4 + J) = 0

ARFA(4 + J) = 0#

AROA(4 + J) = 0#

ELEV(F) = 0#

WCCFA(J) = 0#

WCRFA(J) = 0#

WCFA(J) = 0#

WRFA(J) = 0#

K1F(J) = 0#

K2F(J) = 0#

WROA(J) = 0#

WRRFA(J) = 0#

ARFAT(J) = 0#

AROAT(J) = 0#

WOAF(J) = 0#

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



WPRFA(J) = 0#

WTFA(J) = 0#

ELEFF(J) = 0#

TFFA(J) = 0#

HSFA(J) = 0#

TCALFA(J) = 0#

Next J

For kl = 1 To 4

LOCAB(kl) = 0#

MAX(kl) = 0

ARFA(kl) = 0#

AROA(kl) = 0#

Z1(kl) = 0#

Next kl

Z1(5) = 0#

NB = 0#

If NALE >= 23 Then

GoTo LB3

End If

AREA1 = 4095# * PIES + 833#

PESO1 = 75# * PIES - 10#

ACTE1 = 3.5 * PIES + 4#

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



coto1 = 3477.2 * PIES + 46292.109

GoTo LB4

LB3:

If NALE = 30 Then

 GoTo LB5

End If

AREA1 = 6279# * PIES + 1196#

PESO1 = 100# * PIES + 95#

ACTE1 = 5.5 * PIES + 8#

coto1 = 5291.6455 * PIES + 60345.373

GoTo LB4

LB5:

AREA1 = 8190# * PIES + 1514#

PESO1 = 130# * PIES + 145#

ACTE1 = 7.5 * PIES + 11.5

coto1 = 6916.7455 * PIES + 72409.109

' | ASIGNACION DE VALORES K1 & K2 |

LB4:

If ELEV > 40 Then

 GoTo LB6



End If

$$K1 = CLCL(I) * 0.0765 / 57.375 + 0.0399375 / 3.375$$

$$K2 = CLCL(I) * 0.00867 / 57.375 + 0.004425 / 3.375$$

GoTo LB7

LB6:

$$K1 = CLCL(I) * 0.1394 / 57.375 + 0.0739 / 3.375$$

$$K2 = CLCL(I) * 0.01037 / 57.375 + 0.0053575 / 3.375$$

' | CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE RADIACION Y CONVECCION |

LB7:

$$WCC = 0.0044 * ELEV - 0.0432$$

$$WCR = 0.00635 * ELEV - 0.0602$$

$$WRAD = K2 * ELEV - K1 - 2.6 * K2$$

' | SELECCION DE LOS PANELES DISPONIBLES PARA ENFRIAMIENTO |

LB8:

' CONTINUE

For J = 1 To 6

$$VENT(I, 1, J) = 0\#$$

$$VENT(I, 2, J) = 0\#$$

$$ARFA(J) = 0\#$$

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



```
AROAJ) = 0#  
  
Next J  
  
If DIS(4) >= 1 And RRX(I, 4) <= 0 Then  
  
    GoTo LB10  
  
End If  
  
If DIS(1) >= 1 And RRX(I, 1) <= 0 Then  
  
    GoTo LB11  
  
End If  
  
If DIS(3) >= 1 And RRX(I, 3) <= 0 Then  
  
    GoTo LB12  
  
End If  
  
If DIS(2) >= 1 And RRX(I, 2) <= 0 Then  
  
    GoTo LB13  
  
End If  
  
If ISPA = 1 Then  
  
    GoTo LB14  
  
End If  
  
PE = PE + 1#  
  
PE1 = PE  
  
HB = B / 2# + PE - ALES / 2#  
  
If PE <= 30 Then  
  
    GoTo LB15
```

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



End If

If PIES > 13 Then

GoTo LB14

End If

PIES = PIES + 1#

B = PIES * 12# + 6#

PE = 7#

PE1 = PE

HB = B / 2# + PE - ALES / 2#

LB15:

' CONTINUE

For J = 1 To 6

VENT(I, 1, J) = 0#

VENT(I, 2, J) = 0#

ARFA(J) = 0#

RRX(I, J) = 0#

AROA(J) = 0#

Next J

GoTo LB16

LB14:

' WRITE(0 ,24)CLCL(I)

' WRITE(KSAL,24)CLCL(I)

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



' 24 FORMAT(//3X,'ENFRIAMIENTO NO SATISFECHO CON SEPARACION DE CABEZALE

'1 S DE ',F7.3,' PULG.)

VATT = 0#

GoTo LB17

LB10:

kl = 4

GoTo LB18

LB11:

kl = 1

GoTo LB18

LB12:

kl = 3

GoTo LB18

LB13:

kl = 2

' | **CALCULO DE LA EVOLVENTE DE ENFRIAMIENTO** |

HIP(1) = Sqr((LOCAB(1) + Z1(4)) ^ 2 + (LOCAB(4) + Z1(1)) ^ 2)

If KTAN = 2 And RRX(I, 1) <= 0 And RRX(I, 4) <> 0 Then

HIP(1) = Sqr(Z1(4) ^ 2 + (LOCAB(4) + TN(1) / 2#) ^ 2) - AN CAB(1) / 2

End If

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



$$\text{HIP}(2) = \text{Sqr}((\text{LOCAB}(2) + \text{Z1}(1)) ^ 2 + (\text{LOCAB}(1) + \text{Z1}(5)) ^ 2)$$

If $\text{KTAN} = 2$ And $\text{RRX}(I, 1) \leq 0$ And $\text{RRX}(I, 2) <> 0$ Then

$$\text{HIP}(2) = \text{Sqr}(\text{Z1}(5) ^ 2 + (\text{LOCAB}(2) + \text{TN}(1) / 2\#) ^ 2) - \text{ANCAB}(1) / 2$$

End If

$$\text{HIP}(3) = \text{Sqr}((\text{LOCAB}(3) + \text{Z1}(2)) ^ 2 + (\text{LOCAB}(2) + \text{Z1}(3)) ^ 2)$$

If $\text{KTAN} = 2$ And $\text{RRX}(I, 3) \leq 0$ And $\text{RRX}(I, 2) <> 0$ Then

$$\text{HIP}(3) = \text{Sqr}(\text{Z1}(2) ^ 2 + (\text{LOCAB}(2) + \text{TN}(3) / 2\#) ^ 2) - \text{ANCAB}(3) / 2$$

End If

$$\text{HIP}(4) = \text{Sqr}((\text{LOCAB}(4) + \text{Z1}(3)) ^ 2 + (\text{LOCAB}(3) + \text{Z1}(4)) ^ 2)$$

If $\text{KTAN} = 2$ And $\text{RRX}(I, 3) \leq 0$ And $\text{RRX}(I, 4) <> 0$ Then

$$\text{HIP}(4) = \text{Sqr}(\text{Z1}(4) ^ 2 + (\text{LOCAB}(4) + \text{TN}(3) / 2\#) ^ 2) - \text{ANCAB}(3) / 2$$

End If

$$\text{EVOL}(I) = \text{HIP}(1) + \text{HIP}(2) + \text{HIP}(3) + \text{HIP}(4) + \text{ANCAB}(1) + \text{ANCAB}(2) + \text{ANCAB}(3) + \text{ANCAB}(4)$$

' | **CALCULO DE LOS WATTS A DISIPAR Y LOS DISIPADOS** |

$$\text{AR} = \text{EVOL}(I) * \text{ADNA}$$

If $\text{ISPA} = 2$ And $\text{KTAN} = 1$ Then

$$\text{AR} = \text{AR} + \text{TL} * \text{TA}$$

End If

If $\text{ISPA} = 2$ And $\text{KTAN} = 2$ Then

$$\text{AR} = \text{AR} + \text{TN}(2) * \text{TA} + 3.1415927 * \text{TA} ^ 2 / 4$$

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



End If

$$WC = AC * WCC$$

$$WR = AR * WCR$$

$$WRE(I) = WHC - WC - WR$$

$$WPR(I) = (RRX(I, 1) + RRX(I, 2) + RRX(I, 3) + RRX(I, 4) + RRX(I, 5) + RRX(I, 6) + 1.2 * NB) *$$

$$WRAD * AREA1$$

$$WT = WC + WR + WPR(I)$$

If WRE(I) > WPR(I) Then

GoTo LB8

End If

' | CALCULO DE TEMPERATURAS |

$$A1 = AREA1 * (RRX(I, 1) + RRX(I, 2) + RRX(I, 3) + RRX(I, 4) + RRX(I, 5) + RRX(I, 6) + 1.2 * NB)$$

$$A2 = 0.0044 * AC + 0.00635 * AR + K2 * A1$$

$$A3 = WHC + 0.032 * AC + 0.0437 * AR + K1 * A1$$

$$JJ = 0$$

LB22:

$$ELEF(I) = A3 / A2 + 2.6$$

If ELEF(I) > ELEV Then

GoTo LB8

End If

If JJ = 1 Then

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



GoTo LB23

End If

If ELEV > 40 And ELEF(I) <= 40 Then

GoTo LB24

End If

GoTo LB23

LB24:

JJ = 1

$A2 = A2 + A1 * (CLCL(I) * 0.00867 / 57.375 + 0.004425 / 3.375 - K2)$

$A3 = A3 + A1 * (CLCL(I) * 0.0765 / 57.375 + 0.0399375 / 3.375 - K1)$

GoTo LB22

LB23:

$TF(I) = ELEF(I) + 0.178 * Sqr(WHC / HB)$

$HS(I) = TF(I) + ALFA$

$TCAL(I) = ELEF(I) + ALFA$

If HS(I) > TGHS Then

GoTo LB8

End If



' | CALCULO DEL PESO, VOLUMEN DE ACEITE Y COSTO DEL ENFRIAMIENTO |

$$\text{ACTE}(I) = \text{ACTE1} * (\text{RRX}(I, 1) + \text{RRX}(I, 2) + \text{RRX}(I, 3) + \text{RRX}(I, 4) + \text{RRX}(I, 5) + \text{RRX}(I, 6))$$

$$\text{PESO}(I) = \text{PESO1} * (\text{RRX}(I, 1) + \text{RRX}(I, 2) + \text{RRX}(I, 3) + \text{RRX}(I, 4) + \text{RRX}(I, 5) + \text{RRX}(I, 6))$$

$$\text{COTO}(I) = \text{coto1} * (\text{RRX}(I, 1) + \text{RRX}(I, 2) + \text{RRX}(I, 3) + \text{RRX}(I, 4) + \text{RRX}(I, 5) + \text{RRX}(I, 6)) +$$
$$\text{ACTE}(I) * \text{COACE} * 3.78533$$

If WHCFA(1) <= 0 And WHCFA(2) <= 0 Then

GoTo LB25

End If

' | DETERMINACION DEL ORDEN EN QUE SE IRAN ASIGNANDO LOS
VENTILADORES |

' | A CADA BANCO DE RADIADORES |

For kl = 1 To 6

$$\text{AROA}(kl) = \text{RRX}(I, kl) * \text{AREA1}$$

$$\text{RR}(I, kl) = \text{RRX}(I, kl)$$

Next kl

For kl = 1 To 6

$$\text{JJ} = 1$$

$$\text{GRAND} = \text{RR}(I, 1)$$

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



For J = 2 To 6

 If GRAND > RR(I, J) Then

 GoTo LB26

 End If

 GRAND = RR(I, J)

 JJ = J

LB26:

 CONTINUE

Next J

MAX(kl) = JJ

RR(I, JJ) = 0#

Next kl

J = 6

For kl = 1 To 6

 If RRX(I, kl) > 0 Then

 GoTo LB27

 End If

 MAX(J) = kl

 J = J - 1

LB27:

 CONTINUE

Next kl



' | INICIA CICLO PARA CALCULAR FA1 Y FA2 |

For kl = 1 To 2

If WHCFA(kl) <= 0 Then

GoTo LB28

End If

**' CALCULO DE LA ELEVACION DE TEMPERATURA PROMEDIO MAXIMA DEL
ACEITE**

If GRAFA(kl) <= 0 Then

GRAFA(kl) = GRAIAT * RKVA(kl) ^ 1.6

End If

If GRAFB(kl) <= 0 Then

GRAFB(kl) = GRAIBT * RKVA(kl) ^ 1.6

End If

ALFAF = 2.5 * GRAFA(kl)

If IAT = 2 Then

ALFAF = 7.76 + 1.45 * GRAFA(kl)

End If

If IAT = 3 Or IAT = 4 Then

ALFAF = 6.5 + 1.36 * GRAFA(kl)

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



End If

If IAT = 5 Then

$$\text{ALFAF} = 13.5 + 0.3 * \text{GRAFA}(\text{kl})$$

End If

$$\text{ALFBT} = 2.5 * \text{GRAFB}(\text{kl})$$

If IBT = 2 Then

$$\text{ALFBT} = 7.76 + 1.45 * \text{GRAFB}(\text{kl})$$

End If

If IBT = 3 Then

$$\text{ALFBT} = 6.5 + 1.36 * \text{GRAFB}(\text{kl})$$

End If

If IBT = 4 Then

$$\text{ALFBT} = 1.7 * \text{GRAFB}(\text{kl})$$

End If

If IBT = 5 Then

$$\text{ALFBT} = 13.5 + 0.3 * \text{GRAFB}(\text{kl})$$

End If

If ALFBT > ALFAF Then

$$\text{ALFAF} = \text{ALFBT}$$

End If

$$\text{ELEV}(\text{kl}) = \text{TGAR} - \text{ALFAF}$$

If ASNM > 1000 Then

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



```
ELEV(kl) = ELEV(kl) - ELEV(kl) * (ASNM - 1000#) * 0.00006

End If

If ASNM > 1000 Then

    ALFAF = TGAR - ELEV(kl)

End If

If FS = 0 Then

    GoTo LB29

End If

ELEV(kl) = ELEV(kl) - FS

ALFAF = TGAR - ELEV(kl)
```

' CALCULO DE LOS WATTS DISIPADOS POR CONVECCION Y RADIACION EN

FA

LB29:

```
WCCFA(kl) = 0.00516 * ELEV(kl) - 0.055

WCRFA(kl) = 0.0076 * ELEV(kl) - 0.077

WRRFA(kl) = (0.011 * ELEV(kl) - 0.05) * GUAR

If IVEN = 2 Then

    WRRFA(kl) = (0.013 * ELEV(kl) - 0.06) * GUAR

End If

WCFA(kl) = AC * WCCFA(kl)
```

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



$$WRFA(kl) = AR * WCRFA(kl)$$

' ASIGNACION DE VALORES K1 Y K2

If ELEV(kl) > 35.4 Then

GoTo LB30

End If

$$K1F(kl) = CLCL(l) * 0.0765 / 57.375 + 0.0399375 / 3.375$$

$$K2F(kl) = CLCL(l) * 0.01037 / 57.375 + 0.00532375 / 3.375$$

GoTo LB31

LB30:

$$K1F(kl) = CLCL(l) * 0.1394 / 57.375 + 0.0739 / 3.375$$

$$K2F(kl) = CLCL(l) * 0.01241 / 57.375 + 0.00638875 / 3.375$$

LB31:

$$WROA(kl) = K2F(kl) * ELEV(kl) - (4.4 * K2F(kl) + K1F(kl))$$

' ASIGNACION DE VENTILADORES A CADA BANCO DE RADIADORES

LB32:

CONTINUE

For J = 1 To 6

If RRX(l, MAX(J)) <= 0 Then

GoTo LB33

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



End If

VENT(I, kl, MAX(J)) = VENT(I, kl, MAX(J)) + 1#

A2 = 1#

If NALE = 23 Then

A2 = 18 / 23

End If

If NALE = 30 Then

A2 = 0.5

End If

' CALCULO DE LOS WATTS DISIPADOS Y REQUERIDOS POR VENTILADORES

WOAF(kl) = WROA(kl) * AROAT(kl)

WREFA = WHCFA(kl) - WCFA(kl) - WRFA(kl) - WOAF(kl)

WPRFA(kl) = ARFAT(kl) * WRRFA(kl)

WTFA(kl) = WPRFA(kl) + WCFA(kl) + WRFA(kl) + WOAF(kl)

If WREFA > WPRFA(kl) Then

GoTo LB33

End If



' CALCULO DE TEMPERATURAS FINALES FA

A2 = 0#

For JJ = 1 To 6

A2 = (1.1 - 0.025 * RRX(I, JJ)) * ARFA(JJ) + A2

Next JJ

If IVEN = 1 Then

A2 = A2 * 0.011 * GUAR

End If

If IVEN = 2 Then

A2 = A2 * 0.0132 * GUAR

End If

JJ = 0

A3 = WHCFA(kl) + 0.032 * AC + 0.0437 * AR + K1F(kl) * AROAT(kl)

A4 = 0.00516 * AC + 0.0076 * AR + K2F(kl) * AROAT(kl) + A2

LB34:

ELEFF(kl) = A3 / A4 + 4.4

If ELEFF(kl) > ELEVF(kl) Then

GoTo LB33

End If

If JJ = 1 Then

GoTo LB35

End If

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



If $ELEV_F(kl) > 35.4$ And $ELEFF(kl) \leq 35.4$ Then

GoTo LB36

End If

GoTo LB35

LB36:

JJ = 1

$A3 = A3 + AROAT(kl) * (CLCL(l) * 0.0765 / 57.375 + 0.0399375 / 3.375 - K1F(kl))$

$A4 = A4 + AROAT(kl) * (CLCL(l) * 0.01037 / 57.375 + 0.00532375 / 3.375 - K2F(kl))$

GoTo LB34

LB35:

If $kl = 1$ Then

$TFFA(kl) = ELEFF(kl) + 0.1605 * Sqr(WHCFA(kl) / HB) - 1.3$

End If

If $kl = 2$ Then

$TFFA(kl) = ELEFF(kl) + 0.143 * Sqr(WHCFA(kl) / HB) - 2.6$

End If

$HSFA(kl) = TFFA(kl) + ALFAF$

$TCALFA(kl) = ELEFF(kl) + ALFAF$

If $HSFA(kl) \leq TGHS$ Then

GoTo LB28

End If



LB33:

Next J

If VENT(I, kl, MAX(1)) < VEMAX Then

GoTo LB32

End If

PE = PE1

HB = B / 2# + PE - ALES / 2#

GoTo LB8

LB28:

Next kl

Sep

' CALCULO DE LA ALTURA DEL TANQUE

LB25:

If ISPA = 2 Then

TH1 = ADNA

End If

VATT = TN(2) * TA * ADNA / 231# - VDNB + ACTE(I)

If KTAN = 2 Then

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



VATT = VATT + TA ^ 2 * 3.1415927 / 4# * ADNA / 231

End If

COTO(I) = COTO(I) + (VATT - ACTE(I)) * COACE * 3.78533

If ISPA = 2 Then

 GoTo LB17

End If

CAIR = VATT * 231# * 0.1 / (TL * TA)

If CAIR < CAIRE Then

 CAIR = CAIRE

End If

TH1 = ADNA + CAIR

If TH1 < TH Then

 TH1 = TH

End If

' ESCRITURA DE DATOS FINALES

LB17:

Worksheets(2).Cells(6, 4) = " Cálculo de Enfriamiento para O.T. " + OT

Worksheets(2).Cells(7, 4) = " Altura Sobre el Nivel del Mar" + Str(ASNM)

' Worksheets(2).Cells(8, 4) = " Requerido por: " + Nombre + " Fecha: " + Fecha

If KTAN = 1 Then

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



```
Worksheets(2).Cells(9, 5) = "    Tanque Rectangular"

End If

If KTAN = 2 Then

    Worksheets(2).Cells(9, 5) = "    Tanque Ovalado"

End If

Worksheets(2).Cells(16, 1) = CLCL(I)

Worksheets(2).Cells(16, 2) = NALE

Worksheets(2).Cells(16, 3) = PIES

Worksheets(2).Cells(16, 4) = B

For kl = 1 To 4

    Worksheets(2).Cells(16, 4 + kl) = RRX(I, kl)

Next kl

Worksheets(2).Cells(16, 9) = PESO(I)

Worksheets(2).Cells(16, 10) = ACTE(I)

Worksheets(2).Cells(16, 11) = PE

Worksheets(2).Cells(17, 6) = RRX(I, 5)

Worksheets(2).Cells(17, 8) = RRX(I, 6)

For J = 1 To 2

    If WHCFA(J) <= 0 Then

        GoTo LB42

    End If

    If IVEN = 1 Then
```

**DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION
PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO**



Worksheets(2).Cells(19, 1) = "VENTILADORES ESTANDAR PARA FA" + Mid(Str(J), 2, 4)

Worksheets(2).Cells(19, "e") = VENT(I, J, 1)

Worksheets(2).Cells(19, "f") = VENT(I, J, 2)

Worksheets(2).Cells(19, "g") = VENT(I, J, 3)

Worksheets(2).Cells(19, "h") = VENT(I, J, 4)

End If

If IVEN = 2 Then

Worksheets(2).Cells(19, 1) = "VENTILADORES ALTA EFICIENCIA FA" + Mid(Str(J), 2, 4)

Worksheets(2).Cells(19, "e") = VENT(I, J, 1)

Worksheets(2).Cells(19, "f") = VENT(I, J, 2)

Worksheets(2).Cells(19, "g") = VENT(I, J, 3)

Worksheets(2).Cells(19, "h") = VENT(I, J, 4)

End If

If IGUAR = 1 Then

Worksheets(2).Cells(20, 1) = "CON GUARDA ESTANDAR"

Worksheets(2).Cells(20, "F") = VENT(I, J, 5)

Worksheets(2).Cells(20, "H") = VENT(I, J, 6)

End If

If IGUAR = 2 Then

Worksheets(2).Cells(20, 1) = "CON GUARDA OSHA"

Worksheets(2).Cells(20, "F") = VENT(I, J, 5)

Worksheets(2).Cells(20, "H") = VENT(I, J, 6)

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



End If

LB42:

Next J

Worksheets(2).Cells(22, "i") = "OA"

Worksheets(2).Cells(22, "j") = "FA1"

Worksheets(2).Cells(22, "k") = "FA2"

Worksheets(2).Cells(23, "A") = "ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL DEVANADO GARANTIZADA:"

Worksheets(2).Cells(23, "I") = TGAR

Worksheets(2).Cells(23, "J") = TGAR

Worksheets(2).Cells(23, "K") = TGAR

Worksheets(2).Cells(24, "A") = "ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL DEVANADO CALCULADA:"

Worksheets(2).Cells(24, "I") = TCAL(I)

Worksheets(2).Cells(24, "J") = TCALFA(1)

Worksheets(2).Cells(24, "K") = TCALFA(2)

Worksheets(2).Cells(25, "A") = "ELEVACION DE TEMP. DEL HOT-SPOT DEL DEVANADO MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(25, "I") = TGHS

Worksheets(2).Cells(25, "J") = TGHS

Worksheets(2).Cells(25, "K") = TGHS

Worksheets(2).Cells(26, "A") = "ELEVACION DE TEMP. DEL HOT-SPOT DEL DEVANADO CALCULADA:"

Worksheets(2).Cells(26, "I") = HS(I)

Worksheets(2).Cells(26, "J") = HSFA(1)

Worksheets(2).Cells(26, "K") = HSFA(2)

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



Worksheets(2).Cells(27, "A") = "ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL ACEITE MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(27, "I") = ELEV

Worksheets(2).Cells(27, "J") = ELEV(1)

Worksheets(2).Cells(27, "K") = ELEV(2)

Worksheets(2).Cells(28, "A") = "ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL ACEITE CALCULADA:"

Worksheets(2).Cells(28, "I") = ELEV(I)

Worksheets(2).Cells(28, "J") = ELEV(1)

Worksheets(2).Cells(28, "K") = ELEV(2)

Worksheets(2).Cells(29, "A") = "ELEVACION DE TEMP. DEL ACEITE SUPERIOR CALCULADA:"

Worksheets(2).Cells(29, "I") = TF(I)

Worksheets(2).Cells(29, "J") = TFFA(1)

Worksheets(2).Cells(29, "K") = TFFA(2)

Worksheets(2).Cells(30, "A") = "MAXIMO GRADIENTE CALCULADO EN HOJA DE CALCULO A.T.:"

Worksheets(2).Cells(30, "I") = GRAIAT

Worksheets(2).Cells(30, "J") = GRAFA(1)

Worksheets(2).Cells(30, "K") = GRAFA(2)

Worksheets(2).Cells(31, "A") = "MAXIMO GRADIENTE CALCULADO EN HOJA DE CALCULO B.T.:"

Worksheets(2).Cells(31, "I") = GRAIBT

Worksheets(2).Cells(31, "J") = GRAFB(1)

Worksheets(2).Cells(31, "K") = GRAFB(2)

Worksheets(2).Cells(33, "A") = "COEF. DE CONVECCION A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(33, "I") = WCC

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



Worksheets(2).Cells(33, "J") = WCCFA(1)

Worksheets(2).Cells(33, "K") = WCCFA(2)

Worksheets(2).Cells(34, "A") = "COEF. DE RADIACION A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(34, "I") = WCR

Worksheets(2).Cells(34, "J") = WCRFA(1)

Worksheets(2).Cells(34, "K") = WCRFA(2)

Worksheets(2).Cells(35, "A") = "COEF. DE RADIADORES A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(35, "I") = WRAD

Worksheets(2).Cells(35, "J") = WROA(1)

Worksheets(2).Cells(35, "K") = WROA(2)

Worksheets(2).Cells(36, "A") = "COEF. VENTILADORES A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:"

Worksheets(2).Cells(36, "J") = WRRFA(1)

Worksheets(2).Cells(36, "K") = WRRFA(2)

Worksheets(2).Cells(38, "A") = "WATTS DISIPADOS POR CONVECCION A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:"

Worksheets(2).Cells(38, "I") = WC

Worksheets(2).Cells(38, "J") = WCFA(1)

Worksheets(2).Cells(38, "K") = WCFA(2)

Worksheets(2).Cells(39, "A") = "WATTS DISIPADOS POR RADIACION A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:"

Worksheets(2).Cells(39, "I") = WR

Worksheets(2).Cells(39, "J") = WRFA(1)

Worksheets(2).Cells(39, "K") = WRFA(2)

Worksheets(2).Cells(40, "A") = "WATTS DISIPADOS POR RADIADORES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:"

Worksheets(2).Cells(40, "I") = WPR(I)

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



Worksheets(2).Cells(40, "J") = WOAF(1)

Worksheets(2).Cells(40, "K") = WOAF(2)

Worksheets(2).Cells(41, "A") = "WATTS DISIPADOS VENTILADORES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:"

Worksheets(2).Cells(41, "J") = WPRFA(1)

Worksheets(2).Cells(41, "K") = WPRFA(2)

Worksheets(2).Cells(42, "A") = "WATTS DISIPADOS TOTALES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:"

Worksheets(2).Cells(42, "I") = WT

Worksheets(2).Cells(42, "J") = WTFA(1)

Worksheets(2).Cells(42, "K") = WTFA(2)

Worksheets(2).Cells(43, "A") = "WATTS EN PRUEBA DE TEMPERATURA:"

Worksheets(2).Cells(43, "I") = WHC

Worksheets(2).Cells(43, "J") = WHCFA(1)

Worksheets(2).Cells(43, "K") = WHCFA(2)

Worksheets(2).Cells(45, "A") = "VALOR DE K1:"

Worksheets(2).Cells(45, "I") = K1

Worksheets(2).Cells(45, "J") = K1F(1)

Worksheets(2).Cells(45, "K") = K1F(2)

Worksheets(2).Cells(46, "A") = "VALOR DE K2:"

Worksheets(2).Cells(46, "I") = K2

Worksheets(2).Cells(46, "J") = K2F(1)

Worksheets(2).Cells(46, "K") = K2F(2)

Worksheets(2).Cells(47, "A") = "AREA DE RADIADORES EN ENFRIAMIENTO OA:"

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



Worksheets(2).Cells(47, "J") = AROAT(1)

Worksheets(2).Cells(47, "K") = AROAT(2)

Worksheets(2).Cells(48, "A") = "AREA DE RADIADORES EN ENFRIAMIENTO FA:"

Worksheets(2).Cells(48, "J") = ARFAT(1)

Worksheets(2).Cells(48, "K") = ARFAT(2)

Worksheets(2).Cells(51, "C") = "TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO:"

Worksheets(2).Cells(51, "H") = TAMB

Worksheets(2).Cells(52, "C") = "ENVOLVENTE:"

Worksheets(2).Cells(52, "H") = EVOL(I)

Worksheets(2).Cells(53, "C") = "AREA DE CONVECCION:"

Worksheets(2).Cells(53, "H") = AC

Worksheets(2).Cells(54, "C") = "AREA DE RADIACION:"

Worksheets(2).Cells(54, "H") = AR

Worksheets(2).Cells(55, "C") = "LARGO INTERIOR DEL TANQUE:"

Worksheets(2).Cells(55, "H") = TL

Worksheets(2).Cells(56, "C") = "ANCHO INTERIOR DEL TANQUE:"

Worksheets(2).Cells(56, "H") = TA

Worksheets(2).Cells(57, "C") = "ALTURA NIVEL DE ACEITE:"

Worksheets(2).Cells(57, "H") = ADNA

Worksheets(2).Cells(58, "C") = "ALTURA DEL TANQUE:"

Worksheets(2).Cells(58, "H") = TH1

Worksheets(2).Cells(59, "C") = "CABEZAL TERMICO:"

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE VERIFICACION PARA EL ANÁLISIS DE ENFRIAMIENTO



Worksheets(2).Cells(59, "H") = HB

Worksheets(2).Cells(60, "C") = "VOL. TOTAL DE ACTE. (SIN ACTE. EN TNQUE. EXP.):"

Worksheets(2).Cells(60, "H") = VATT

Worksheets(2).Cells(60, "I") = "GAL."

Worksheets(2).Cells(61, "C") = "COSTO APROX. DEL ACEITE + RADIADORES:"

Worksheets(2).Cells(61, "H") = COTO(I)

Worksheets(2).Cells(75, "A") = "AUTORIZO ING. _____"

Next I

End Sub

Private Sub CommandButton1_Click()

 calculo

End Sub



CAPITULO 4

VALIDACION DEL PROGRAMA

4.1 CARATULA DE ENTRADA

En la figura 4.1 se muestra la carátula de entrada en la que se deberán de integrar los principales datos que llenan las variables requeridas, el formato de esta carátula es el de una hoja de Excel, en la que se han dejado la identificación de cada celda facilitando las relaciones de las variables presentadas en el capítulo anterior, aunque se supone que esta hoja debe ser llenada por el ingeniero eléctrico que pretende calcular el enfriamiento y el conoce todos los valores, es pertinente realizar los siguientes comentarios:

1.- El enfriamiento inicial será el que propone el programa de desarrollo eléctrico y con el presente programa se verificara si es correcto o en un caso determinado se adecuara.

2.- Los radiadores con los que calcula el programa eléctrico son diferentes a los que se usaran finalmente el presente programa ya los considera.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	Cálculo de Radiadores								
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9		O.T.		Fecha		Ingeniero			
10									
11									
12	Largo Interior del Tanque					Espacio Mínimo Pared-válvula W			
13	Acho Interior del Tanque					Espacio Mínimo Pared-válvula X			
14	Altura del Nivel de Aceite					Espacio Mínimo Pared-válvula Y			
15	Altura del Tanque					Espacio Mínimo Pared-válvula Z			
16	Altura Mínima de la Cámara de Aire					Espacio Instrumentos en Panel X			
17	Altura de la Estructura					Relación de Capacidades FA1/OA			
18	Sistema de Preservación de Aceite					Relación de Capacidades FA2/OA			
19	Altura de Operación					Pérdidas Tot. Prueba Temp FA1			
20	Elevación de Temp. Promedio					Pérdidas Tot. Prueba Temp FA2			
21	del Devanado Garantizada					Gradiente Calculado A.T. FA1			
22	Elev. Temp. HS Garantizada					Gradiente Calculado A.T. FA2			
23	Temp. Ambiente Promedio					Gradiente Calculado B.T. FA1			
24	Gradiente Calculado OA en A.T.					Gradiente Calculado B.T. FA2			
25	Gradiente Calculado OA en B.T.					Separación entre Línea de Centros			
26	Pérdidas Tot. Prueba Temp. OA					de Radiadores contiguos			
27	Panel W Disponible para Enf.					Altura de Radiadores			
28	Panel X Disponible para Enf.					Tipo de Devanado A.T.			
29	Panel Y Disponible para Enf.					Tipo de Devanado B.T.			
30	Panel Z Disponible para Enf.					Número de Aletas por Radiador			
31	Volúmen Desplazado					Tipo de Tanque			
32						Tipo de Ventilador			
33			EJECUTAR			Tipo de Guarda del Ventilador			
34									

Figura 4.1 Carátula de entrada



4.2 CALCULO DE ENFRIAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

En las siguientes tablas se muestran los datos de un transformador al que se pretende calcular el enfriamiento con el programa desarrollado en el capítulo 3, la elevación de temperatura en los devanados a plena carga garantizada es de 55 °C a 1000 metros sobre el nivel del mar (M.S.N.M.).

DEVANADO	CONEXIONES	TENSIÓN EN VOLTS	CAPACIDAD EN MVA, EN OA/FA/FA	Frecuencia Hz
Alta Tensión	Delta	115 000	18 / 24 /30	60
Baja Tensión	Estrella	13 800	18 / 24 /30	

TIPO DE MATERIAL DE LOS DEVANADOS Y NÚCLEO		NIVELES BÁSICOS DE IMPULSO	
Alta Tensión (A.T.)	Cobre	Alta Tensión (A.T.)	550 KV
Baja Tensión (B.T.)	Cobre	Baja Tensión (B.T.)	110 KV
Núcleo Acero al Silicio Grano Orientado		Neutro	110 KV
I M P E D A N C I A			
Z% 9.00% @ 18 MVA			

Tabla 4.1 Datos electricos

CONTENIDO DE ACEITE EN LTS. A 25 °C	
Tanque	18,231
Radiadores	1,941
Tanque Conservador	568
Cantidad requerida para cubrir Devanados	17,181
Total	20,740

Tabla 4.2 Contenido de Aceite



C O N E X I O N E S			
DEVANADO	VOLTS	AMPERES	
		OA	FA@65 C
ALTA TENSIÓN (EN DELTA)	117 875	88.20	
	115 000	90.40	
	112 125	92.70	
	109 250	95.10	
	106 375	97.7	
BAJA TENSIÓN (EN ESTRELLA)	13 800	753.1	

Tabla 4.3 Conexión de los Devanados

D I M E N S I O N E S D E L T A N Q U E (plg)	
Largo Interior del Tanque	142
Ancho Interior del Tanque	72
Altura del Tanque	151
Altura de la Estructura	110.625
Altura del Nivel de Aceite	151

Tabla 4.4 Dimensiones del Tanque

R A D I A D O R E S (plg)	
Separación entre línea de centros de Radiadores ¹	17
Altura de Radiadores	120
Altura de Radiadores – Válvula	126
Diámetro para enfriamiento	18
Espacio mínimo entre la pared del tanque y la válvula	20

Tabla 4.4 Especificaciones de Radiadores propuestos

¹ La experiencia ha mostrado que este tipo de separación es el más indicado.



G R A D I E N T E S	
Máximo gradiente en OA en alta tensión (α_{OAAT})	1.866
Máximo gradiente en OA en baja tensión (α_{OABT})	2.109

Tabla 4.5 Gradientes en OA

D I Á M E T R O S D E L A B O B I N A (plg)			
ALTA TENSIÓN (A.T)		BAJA TENSIÓN (B.T.)	
EXTERIOR	INTERIOR	EXTERIOR	INTERIOR
40.0572	30.2500	26.8164	20.2500

Tabla 4.6 Especificaciones de la bobina

N Ú M E R O D E V U E L T A S D E L D E V A N A D O	
ALTA TENSIÓN (A.T)	BAJA TENSIÓN (B.T.)
3018	113

Tabla 4.7 Especificaciones del devanado

C O N D U C T O R			
ALTA TENSIÓN (A.T)		BAJA TENSIÓN (B.T.)	
Área del conductor	0.03904 plg ²	Área del conductor	0.81823 plg ²
No. de cintas	2	No. de cintas	48
Espesor de las cintas	0.040	Espesor de las cintas	0.053
Ancho de las cintas	0.497	Ancho de las cintas	0.351

Tabla 4.8 Especificaciones del conductor



Pérdidas	Valor (watts)
Pérdidas del núcleo	16,187
Pérdidas de Eddy	3540
Pérdidas $(I^2 R)_{A.T.}$	16,801.82
Pérdidas $(I^2 R)_{B.T.}$	14,330.60
Pérdidas en el tanque	3460
Pérdidas en las orillas del núcleo	1783
Pérdidas en bastidores	356
Pérdidas por corrientes parásitas del núcleo	425
Pérdidas en los anillos de presión que soportan las bobinas	37
Pérdidas en los cables a conexión de bobinas	843
Sumatoria de las pérdidas	57,763.42
Factor de seguridad	1.05
<u>Pérdidas eléctricas totales (W)</u>	<u>60,652</u>

Tabla 4.9 Resumen de pérdidas eléctricas totales en OA

4.3 HOJAS DE ENTRADA Y SALIDAS LLENAS

En la figura 4.2 se muestra la configuración del enfriamiento requerido, para este caso la configuración nos marca que en el panel ANSI 3 se requieren dos bancos de radiadores cada uno de 3 y en cada banco 3 ventiladores, este sistema es verificado llenado la hoja 4.3, estos datos son llenados a las condiciones mas criticas que son cuando el transformador trabaje a 65 c. En las figuras 4.4 se muestra la hoja de salida



con los resultados del calculo de enfriamiento, en esta se puede ver marcada en amarillo la temperatura de elevación promedio del devanado.

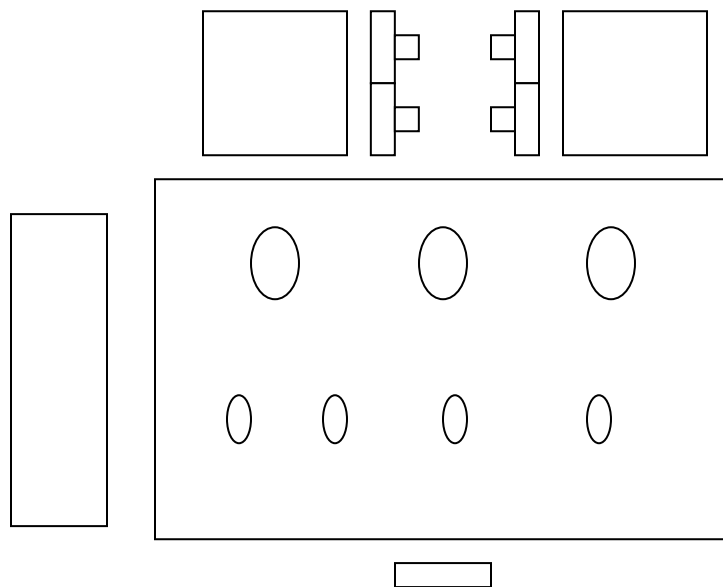


Figura 4.2 Configuración de enfriamiento

En la hoja de salida también se puede ver el calculo de elevación de temperatura para el devanado en todas las capacidades a las que deberá trabajar el transformador, la primera correspondiente a OA(18 MVA) corresponde a una elevación de 41.74 c , la segunda FA1(24 MV) tiene 53.32 c y la tercera a FA2(30 MVA) 56.58 c, al compara estos resultados con los de la garantía se puede observar como ninguno sobrepasa los 65 c permitidos, y que incluso se tiene una diferencia muy grande, pero de acuerdo a la variabilidad de la planta este valor es adecuado.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	Cálculo de Radiadores								
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9		O.T.		Fecha		Ingeniero			
10									
11									
12	Largo Interio del Tanque			142		Espacio Mínimo Pared-válvula W			0
13	Acho Interior del Tanque			72		Espacio Mínimo Pared-válvula X			0
14	Altura del Nivel de Aceite			151		Espacio Mínimo Pared-válvula Y			0
15	Altura del Tanque			151		Espacio Mínimo Pared-válvula Z			20
16	Altura Mínima de la Cámara de Aire			0		Espacio Instrumentos en Panel X			0
17	Altura de la Estructura			110.625		Relación de Capacidades FA1/OA			1.33
18	Sistema de Preservación de Aceite			2		Relación de Capacidades FA2/OA			1.66
19	Altura de Operación			1000		Pérdidas Tot. Prueba Temp FA1			113903
20	Elevación de Temp. Promedio					Pérdidas Tot. Prueba Temp FA2			168100
21	del Devanado Garantizada			58		Gradiente Calculado A.T. FA1			0
22	Elev. Temp. HS Garantizada			85		Gradiente Calculado A.T. FA2			0
23	Temp. Ambiente Promedio			30		Gradiente Calculado B.T. FA1			0
24	Gradiente Calculado OA en A.T.			1.866		Gradiente Calculado B.T. FA2			0
25	Gradiente Calculado OA en B.T.			2.109		Separación entre Línea de Centros			
26	Pérdidas Tot. Prueba Temp. OA			71750		de Radiadores contiguos			17
27	Panel W Disponible para Enf.			0		Altura de Radiadores			10
28	Panel X Disponible para Enf.			0		Tipo de Devanado A.T.			4
29	Panel Y Disponible para Enf.			0		Tipo de Devanado B.T.			2
30	Panel Z Disponible para Enf.			1		Número de Aletas por Radiador			30
31	Volúmen Desplazado			1417		Tipo de Tanque			1
32						Tipo de Ventilador			1
33			EJECUTAR			Tipo de Guarda del Ventilador			1
34									

Figura 4.3 Carátula de entrada llenada

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA LA VERIFICACIÓN DEL ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO COLUMNAS Y RADIADORES TIPO OBLEA.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1				nombre empresa							
2				Ingeniería de Transformadores de Potencia							
3				Cálculo de Enfriamiento para O.T.							
4				Altura Sobre el Nivel del Mar -----							
5				Requerido por:		Fecha:					
6				Cálculo Tanque		Altura Sobre el Nivel del Mar 1000					
7											
8											
9	SEPARACION	NUMERO	ALTURA	ALTURA	Tanque Rectangular			PESO	VOL. ACEITE	DIM. -P-	
10	ENTRE	DE	RADIADORES	RADIADORES				RADIADORES	RADIADORES	ENFRIAM.	
11	RADIADORES	ALETAS	PIES	CL A CL VALVS.	W	X	Y	Z	LB	GRAL.	PULG.
12											
13	17.00	30.00	10.00	126.00	0.00	0.00	0.00	3.00	8670.00	519.00	18.00
14						0.00		3.00			
15											
16	VENTILADORES ESTANDAR PARA FA1				0.00	0.00	0.00	0.00			
17	CON GUARDA ESTANDAR							1.00			
18	VENTILADORES ESTANDAR PARA FA2										
19	CON GUARDA ESTANDAR				0.00	0.00	0.00	3.00			
20								3.00			
21											
22	ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL DEVANADO GARANTIZADA:								OA	FA1	FA2
23	ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL DEVANADO GARANTIZADA:								58.00	58.00	58.00
24	ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL DEVANADO CALCULADA:								41.74	53.31	56.58
25	ELEVACION DE TEMP. DEL HOT-SPOT DEL DEVANADO MAXIMA:								85.00	85.00	85.00
26	ELEVACION DE TEMP. DEL HOT-SPOT DEL DEVANADO CALCULADA:								51.16	62.70	65.55
27	ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL ACEITE MAXIMA:								46.76	45.41	43.36
28	ELEVACION DE TEMP. PROMEDIO DEL ACEITE CALCULADA:								30.50	40.72	41.94
29	ELEVACION DE TEMP. DEL ACEITE SUPERIOR CALCULADA:								39.91	50.11	50.91
30	MAXIMO GRADIENTE CALCULADO EN HOJA DE CALCULO A.T.:								1.87	2.94	4.19
31	MAXIMO GRADIENTE CALCULADO EN HOJA DE CALCULO B.T.:								2.10	3.32	4.74
32											
33	COEF. DE CONVECCION A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:								0.16	0.17	0.16
34	COEF. DE RADIACION A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:								0.23	0.26	0.25
35	COEF. DE RADIADORES A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:								0.14	0.16	0.15
36	COEF. VENTILADORES A ELEVACION TEMP. PROM. ACTE. MAXIMA:									0.44	0.42
37											
38	WATTS DISIPADOS POR CONVECCION A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:								13454.32	15257.10	14355.30
39	WATTS DISIPADOS POR RADIACION A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:								24758.40	24758.40	23316.90
40	WATTS DISIPADOS POR RADIADORES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:								99907.00	76845.20	44261.60
41	WATTS DISIPADOS VENTILADORES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:								0.00	15937.00	90815.80
42	WATTS DISIPADOS TOTALES A ELEV. TEMP. PROM. ACEITE MAX.:								135593.20	132797.80	172749.60
43	WATTS EN PRUEBA DE TEMPERATURA:								71750.00	113903.00	168100.00
44											
45	VALOR DE K1:								0.06	0.06	0.06
46	VALOR DE K2:								0.00	0.01	0.01
47	AREA DE RADIADORES EN ENFRIAMIENTO OA:									465033.05	287778.30
48	AREA DE RADIADORES EN ENFRIAMIENTO FA:									35450.95	212705.7
49	TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO:								30.00		
50	ENVOLVENTE:								543.76		
51	AREA DE CONVECCION:								85076.00		
52	AREA DE RADIACION:								92332.32		
53	LARGO INTERIOR DEL TANQUE:								142.00		
54	ANCHO INTERIOR DEL TANQUE:								72.00		
55	ALTURA NIVEL DE ACEITE:								151.00		
56	ALTURA DEL TANQUE:								151.00	GAL.	
57	CABEZAL TERMICO:								25.69		
58	VOL. TOTAL DE ACTE. (SIN ACTE. EN TNQUE. EXP.):								5785.221	GAL.	
59	AUTORIZO ING.										

Figura 4.4 Carátula de salida para prueba OA



En la tabla 4.10 se muestra un resumen de los datos concentrados en la hoja de resultados, esta tabla nos permite realizar el comparativo de los resultados calculados, con los obtenidos en la prueba de temperatura, cabe aclarar que estos resultados son los finales después de varias iteraciones, por ejemplo en unas se tubo que ir variando la distancia que limita el uso del panel ANSI 3 hasta llegar a 20 con lo que se pueden colocar los dos bancos de radiadores con sus 3 radiadores cada uno.

RESULTADOS DE LA CANTIDAD DE ENFRIAMIENTO REQUERIDO A 52 °C	
CONCEPTO	VALOR
Elevaciones de temperatura	
Elevación de temp. promedio del devanado garantizada	58.00
Elevación de temp. promedio del devanado calculada	41.74
Elevación de temp. del hot-spot del devanado calculada	51.15
Elevación de temp. del aceite máxima	46.76
Elevación de temp. promedio del aceite calculada	30.50
Elevación de temp. del aceite superior calculada	39.91
Coefficientes	
Coefficiente de convección a elevación temp. prom. acte. máxima	0.162
Coefficiente de radiación a elevación temp. prom. acte. máxima	0.236
Coefficiente de radiadores a elevación temp. prom. acte. máxima	0.143
Watts disipados	
Watts disipados por convección a elev. temp. prom. acte. máxima	13,829
Watts disipados por radiación a elev. temp. prom. acte. máxima	21,858
Watts disipados por radiadores a elev. temp. prom. acte. máxima	99,907
Watts disipados totales a elev. temp. prom. acte. máxima	135,593

Tabla 4.10 Resumen de resultados a una temperatura de 58 °C para garantizar 65°C



4.4 PRUEBA DE TEMPERATURA

Existen varios métodos para realizar las pruebas de elevación de temperatura tanto para Transformadores. Sin embargo, el método de corto circuito (método de carga simulada) es el más comúnmente utilizado para transformadores de gran capacidad sumergidos en aceite aislante. Este consiste en poner en corto circuito uno de los devanados y hacer circular en el otro devanado una corriente suficiente a frecuencia nominal, para producir las pérdidas totales para la conexión y capacidad correspondiente. Los transformadores deben ser probados en la combinación de conexiones y posición del cambiador o cambiadores que den las elevaciones de temperatura más altas de los devanados. Esto generalmente involucrará aquellas conexiones y posiciones que resulten en las pérdidas más altas.

Toda prueba de elevación de temperatura debe llevarse a cabo bajo condiciones normales (o equivalentes a las normales) de los medios de enfriamiento, por lo que el transformador debe estar completamente ensamblado con todos sus accesorios tales como indicadores de temperatura, transformadores de corriente, y lleno de aceite aislante al nivel apropiado. La prueba debe realizarse en un área de prueba que este libre de corrientes de aire. Para transformadores de potencia enfriados por aire, la temperatura ambiente debe considerarse como aquella del aire circundante, la cual no debe ser menor de 10 °C ni mayor de 40 °C.



La temperatura ambiente promedio debe ser determinada por medio de tres o más termopares o termómetros colocados en recipientes adecuados, llenados con aceite aislante, distribuidos uniformemente alrededor del transformador en prueba y localizados aproximadamente a la mitad de la altura del transformador y a una distancia de 1 a 2 metros del mismo. Los recipientes deben protegerse de las corrientes de aire y del calor radiante del transformador bajo prueba o de otras fuentes externas. Cuando la constante de tiempo del transformador bajo prueba es igual o menor a 2 horas, la constante de tiempo de los recipientes debe estar entre el 50 % y el 150 % de la del transformador. Si la constante de tiempo del transformador es mayor a 2 horas entonces la de los recipientes debe estar dentro de 1 hora de aquella del transformador. Una forma de determinar si los recipientes son adecuados, es colocándolos súbitamente en otro ambiente cuya temperatura difiera en 10°C de la temperatura indicada por los mismos; estos deben mostrar una variación de 6°C en un periodo no menor que 2 horas.

La elevación de temperatura del aceite aislante es la diferencia entre la temperatura del aceite y la temperatura del ambiente. Se considera que se ha alcanzado la elevación de temperatura final del aceite sobre la temperatura ambiente, cuando la elevación de temperatura no varía más de 2.5 % o 1 °C, lo que sea mayor, en un periodo consecutivo de 3 horas. Se permite reducir el tiempo requerido para la prueba por medio del uso de sobrecargas iniciales, enfriamiento restringido o por cualquier método apropiado. La elevación de temperatura del aceite aislante se determina en la forma siguiente.



4.5 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL DEVANADO

Inmediatamente después de obtener la temperatura de estabilización, tal como se describió se debe ajustar las corrientes de los devanados a sus valores nominales, manteniéndolos constantes durante 1 hora. Inmediatamente después se desconecta el transformador de la fuente de energía, se abre el cortocircuito y se mide la resistencia en caliente de los devanados. La temperatura promedio de un devanado se determina por medio del método de la resistencia, y de la curva de enfriamiento, el cual consiste en lo siguiente:

- a. Después de efectuar el corte, se debe tomar una serie de al menos cuatro lecturas de la resistencia en una fase de cada devanado, tal como se realizo para la medición de la resistencia en frío y registrar el tiempo desde el instante del corte para cada lectura.
- b. La primer lectura de la resistencia en caliente debe tomarse tan pronto como sea posible después del corte, pero no antes de que se estabilice la corriente en el circuito de medición ni después de los primeros 4 minutos.
- c. Se debe trazar una grafica con los datos resistencia/tiempo obtenidos y la curva resultante debe extrapolarse para obtener la resistencia del devanado en el instante del corte (resistencia en caliente en el tiempo cero).



- d. Para las mediciones de la resistencia en caliente durante la prueba de temperatura de transformadores con enfriamiento por aire forzado, se debe suspender la operación de los ventiladores al mismo tiempo que se quita la carga; para el caso de transformadores con circulación forzada de aceite, las bombas del aceite pueden ser apagadas o dejadas funcionando durante dichas mediciones.
- e. La temperatura promedio del devanado en el instante del corte se determina por medio de la ecuación siguiente:

$$T_{PD} = \left(\frac{R_C}{R_O} \right) (T_K + T_O) - T_K$$

En donde:

TPD = Temperatura promedio del devanado (en °C) en el instante del corte.

TO = Temperatura (°C) a la cual se midió la resistencia del devanado en frío.

RC = Resistencia del devanado en caliente (en Ω).

RO = Resistencia del devanado en frío (en Ω), medida a la temperatura To.

TK = 234.5 °C (para el cobre) y 225.0 °C (para el aluminio)

- f. Después de tomar la serie de lecturas de la resistencia en caliente en una fase, se debe continuar la prueba de temperatura, a corriente nominal en los devanados, durante un periodo de 1 hora y tomar lecturas de la resistencia en caliente en otra fase. Lo anterior, debe repetirse hasta que se tomen todas las series de lecturas de resistencia requeridas.



En la figura 4.5 se muestra la prueba de temperatura realizada mediante el procedimiento anteriormente explicado.

16. PRUEBA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DE LOS DEV. A 60 Hz.

Normas Aplicada : NMX - J - 169, IEEE57.12.90.

Método de Prueba : De la curva de enfriamiento de la resistencia.

Instructivo : IACT - 220

Instrumentos Utilizados: Series:

Puente de Resistencias 149 144

TETTEX

Termómetro 10336

Lectura	Tiempo 1/60	Datos Principales para el devanado de baja tensión. (X1 - X2).			
		0.007877	0.00	Numero de lecturas de resistencia	11
0.0078341	2.24	Lectura de la resistencia en frío	0.006612	Temperatura media del aceite	56.2
0.0078277	2.54	Temperatura del devanado en frío	20.75	Gradiente aceite - devanado	13.4
0.0078218	3.24	Constante del devanado	234.5	Elev. amb. - dev. a 2240 m s.n.m	43.1
0.0078165	3.54	Elevación ambiente-aceite	29.72	Elev. amb. - dev. corr. por altitud	41.7
0.0078110	4.24	Tipo de enfriamiento	OA	Elev. garantizada amb. - dev.	65.0
0.0078056	4.54	Altitud de operación del transf.	1000	Resultado : SATISFACTORIO	
0.0078005	5.24	Temp. del aceite cabezal superior	62.4		
0.0077952	5.54	Temp. del aceite cabezal inferior	49.3		
0.0077891	6.24	Temperatura superior del aceite	62.7		
0.0077847	6.54				
0.0077799	7.24				

GRAFICA DEL CORTE

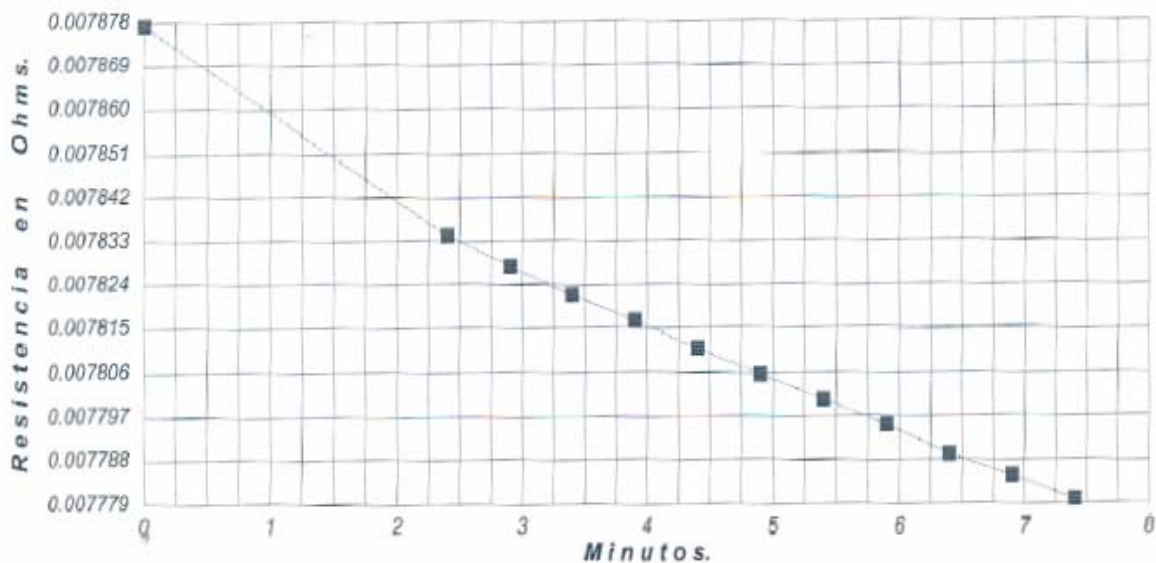


Figura 4.5 Resultado de prueba de temperatura



CONCLUSIONES

Conclusiones.

Con este trabajo se demuestra como la ingeniería es multidisciplinaria ya que trabajamos dos partes de las mismas que son la computacional y la mecánica, por otro lado a los dos integrantes que realizamos el presente trabajo ganamos en conocimiento aportado uno del otro.

Al desarrollar este programa se ha reducido tremendamente el tiempo de cálculo del sistema de enfriamiento de un transformador, pues permite realizar todas las interacciones necesarias para llegar a la mejor de estas configuraciones, el buen funcionamiento de este programa fue comprobado al realizar una prueba de temperatura y ver como el valor calculado se acerca al valor medido de 41.7°C , por lo que podemos ver que este dato es muy semejante al que obtuvimos en la memoria de cálculo siendo la elevación de temperatura garantizada de 65°C ., como regla de diseño se debe de tomar en cuenta la variabilidad de fabricación con la que cuente la planta en este caso se consideró que la temperatura garantizada es de 65°C , pero por imperfecciones en la manufactura del transformador, se utilizó una temperatura más baja (58°C), para asegurar que no se ha llegado alcanzar la temperatura garantizada.

Con este trabajo también se puede mostrar uno de los fundamentos más importantes de la ingeniería, en donde el ingeniero materializa los conceptos abstractos para producirlos y manipularlos en la realidad.

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA LA VERIFICACIÓN DEL ENFRIAMIENTO DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO COLUMNAS Y RADIADORES TIPO OBLEA.

Esta investigación puede ser de utilidad a la comunidad de la FES Aragón o persona interesada en la materia, las cuales podrán ver que para hacer ingeniería no se requiere de grandes recursos, solo basta el conocimiento e interés.



BIBLIOGRÁFICA

BIBLIOGRAFIA.

Libros consultados.

1. Cengel Yunus A., Boles Michael A., Termodinámica tomo I, 2a. Edición, México, Ed. Mc Graw Hill, 1996, 429 pp.
2. Cengel Yunus A., Transferencia de calor, 2a. Edición, México, Ed. Mc Graw Hill, 2004, 783 pp.
3. Ditman. Heat & thermodynamics, 7a. Edición, Estados Unidos, Ed. Prentice Hall, 2003, 156 pp.
4. Escobar Marco Antonio, Alatorre Mario. Medición de susceptibilidad magnética de los materiales, México, Centro Nacional de Metrología CENAM, 2005, 18 pp.
5. General Electric Series Pittsfield Mass, Transformer engineering, 2a. Edición, Estados Unidos, Ed. Mc Graw Hill, 1951, 500 pp.
6. Harper Enríquez, Curso de transformadores y motores de inducción, 4a. Edición, México, Ed. Limusa, 2005, 568 pp.
7. Holman J. P., Transferencia de calor, 8a. Edición, España, Ed. Mc Graw Hill, 1998, 478 pp.
8. Huang Francis F., Ingeniería termodinámica. Fundamentos y aplicaciones, 2a. Edición y 2a. Reimpresión, México, Ed. CECSA, 1999, 859 pp.
9. Incropera Frank P., De Witt David P., Fundamentos de transferencia de calor, 4a. Edición, México, Ed. Prentice Hall, 1996, 886 pp.
10. Izquierdo Millán Marcelo, Ingeniería térmica. Intercambiadores de calor de placas, Madrid, Univ. Carlos III, Depto. Ingeniería Térmica y de Fluidos, 2002, 23 pp.

11. Izquierdo Millán Marcelo. Manual de intercambiadores de calor, Madrid Univ. Carlos III, Departamento de ingeniería térmica y de fluidos, 2001, 29 pp.
12. Jones J. B., Dugan R. E., Ingeniería termodinámica, 1a. Edición, México, Ed. Prentice Hall, 1997, 993 pp.
13. Kosow Irving L., Maquinas eléctricas y transformadores, 2a. Edición, México, Ed. Prentice Hall, 1993, 693 pp.
14. Kukarnies S.V., Marcel Dekker, Transformer engineering desing and practice, 2a. Edición, Madrid, Ed. Hewitt G.F., 2004, 467 pp.
15. Obert & Young, Elementos de termodinámica y transmisión de calor, 2a. Edición, México, Ed. Limusa, 2001, 923 pp.
16. Q. Kern Donald, Procesos de transferencia de calor, Trigésima reimpresión, México, Ed. CECSA, 1998, 957 pp.
17. Ras Enrique, Transformadores de potencia de medida y de protección, 7a. Edición, Colombia, Ed. Alfa-Omega, 1998, 283 pp.
18. Rodríguez Jorge A., Introducción a la termodinámica, 6a. Edición, Buenos Aires, Ed. Mc Graw Hill, 2000, 706 pp.
19. Serrano Domínguez Víctor, García Arana Graciela, Electricidad y magnetismo, 1a. Edición, México, Ed. Prentice Hall, 2001, 543 pp.
20. Tippens Paúl E., Física. Conceptos y aplicaciones, 6a. Edición, México, Mc Graw Hill, 2001, 925 pp.
21. V. Richardson Donald, Caisse Jr. Arthur J., Maquinas eléctricas rotativas y transformadores, 4a. Edición, México, Ed. Prentice Hall, 1997, 723 pp.

Manuales de instalación, mantenimiento y operación.

22. Asea Brown Boveri. Manual de instrucciones. Instalación y mantenimiento de boquillas, IL-44-668, Suecia, 2001, 12 pp.
23. Comem. Manual de servicio. Deshidratador de aire, 5410 IS, Italia, 2000, 14 pp.
24. Comem. Manual de servicio. Relevador detector de gases (Buccholz), 54 100 L2, Italia, 2000, 15 pp.
25. Industrias IEM, S.A. de C.V. Curso de transformadores de potencia, México, Revisión 3, 2001, 217 pp.
26. Industrias IEM, S.A. de C.V. Manual de instalación. Bolsa cops, IEM 48 500, México, 2000, 6 pp.
27. Industrias IEM, S.A. de C.V. Manual de instalación y mantenimiento de radiadores tipo oblea, IEM 238-24A, México, 2000, 5 pp.
28. Reinhausen Manufacturing, INC. Instrucciones de funcionamiento. Accionamiento a motor, MR 0791, Alemania, 2000, 27 pp.
29. Reinhausen Manufacturing, INC. Manual de instrucciones. Cambiador de derivaciones con carga tipo inductivo, MR 7002, Alemania, 2000, 41 pp.
30. Reinhausen Manufacturing, INC. Manual de instrucciones. Cambiador de derivaciones con carga tipo resistivo, MR 0792, Alemania, 2000, 16 pp.
31. Reinhausen Manufacturing, INC. Manual de instrucciones. Cambiador de derivaciones sin carga, MR 48-064, Alemania, 2000, 20 pp.
32. Reinhausen Manufacturing, INC. Manual de servicio. Regulador de tensión, MR VC-100E, Alemania, 2000, 41 pp.

Revistas consultadas.

33. Coltman John W. El transformador. Enero Edición, Estados Unidos, Ed. IEEE Industry applications magazine, 2002, 22pp.
34. Jeszensky Sándor. Historia de los transformadores. Diciembre Edición, Estados Unidos, Ed. IEEE Power engineering review, 2000, 30 pp.

Páginas de Internet.

35. Eliezer Braun, Desarrollo de las máquinas eléctricas. El Transformador, <http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/122/htm/electr.htm>, 1998, México.
36. Multinet Ltda. Empresa de electricidad y telecomunicaciones, Faraday. La inducción electromagnética, <http://www.electricidad.cl/images/media>, 2000, Santiago de Chile.