



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE CIENCIAS

ESFUERZOS TERMO-ELASTOPLASTICOS EN TUBERIAS  
DE GENERADORES DE VAPOR

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
FISICO

PRESENTA

FERNANDO REYES CERVANTES

MEXICO, D.F. MAYO DE 1988



## **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 está 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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## CONTENIDO

### RESUMEN

### I INTRODUCCION

### II PROBLEMATICA DE MATERIALES EN EL SECTOR ELECTRICO

2.1 Sector eléctrico en México

2.2 Descripción de un generador de vapor. Tipos de 300Mw

2.3 Descripción de una Central Termoeléctrica (CTE)

2.4 Estadística de fallas en Centrales Termoeléctricas (CTE's)

2.4.1 Ciclo de los gases

2.4.2 Ciclo agua-vapor

2.5 Materiales de tubería en CTE's

2.6 Código 'ASME' como criterio de selección de tubería

2.7 Corrosión en alta temperatura

2.8 Termofluencia

2.8.1 Mecanismos de deformación plástica

2.8.2 Endurecimiento por deformación

2.8.3 Curva de termofluencia

### III MODELACION EN COMPUTADORA DE UN GENERADOR DE VAPOR

3.1 Introducción

3.2 Archivo gráfico de cada Banco

3.2.1 Determinación de los Puntos Importantes

3.2.2 Arreglo básico de tubería

3.3 Captura de la información del archivo gráfico

3.3.1 Captura de las coordenadas planas(X,Y) de  
de los puntos importantes de un banco

3.3.2 Captura de la información complementaria del  
archivo gráfico

3.4 Despliegue gráfico

3.4.1 Despliegue gráfico de un banco

3.4.2 Despliegue gráfico para recuperar información  
tridimensional del banco

3.5 Discusión de resultados

#### IV MODELO TERMO-ELASTOPLASTICO PARA EL ANALISIS DE

##### ESFUERZOS EN TUBERIA

4.1 Elasticidad

4.1.1 Tensor de esfuerzos

4.1.2 Tensor de deformación

4.1.3 Ley de Hook generalizada

4.1.4 Ecuación de equilibrio

4.1.5 Ecuaciones de compatibilidad

4.1.6 Comportamiento elástico de un tubo sometido  
a presión interna y externa

4.2 Plasticidad

4.2.1 Componente hidrostática y desviadora del tensor  
de esfuerzos

4.2.2 Esfuerzo equivalente o eficaz

4.2.3 Ecuaciones de Prandtl-Reuss

4.3 Termo-elastoplasticidad

4.4 Análisis de resultados

## V APLICACION DE LOS MODELOS EN LA DETERMINACION DE LA VIDA RESIDUAL EN TUBERIAS DE GENERADOR DE VAPOR

5.1 Introducción

5.2 Modelo de vida residual

5.3 Aplicación del modelo integrado

## VI CONCLUSIONES

## RESUMEN

Se mostró la importancia nacional de la generación de energía eléctrica por centrales termoeléctricas (CTE's). Se destacó el papel de la tubería como causante relativo mayor de indisponibilidad en el generador de vapor (GV) de una CTE. Se hizo una descripción de los fenómenos de corrosión y termofluencia, los cuales se les consideró como causantes principales de falla en tuberías de GV's.

Con objeto de contar con una herramienta que permita el entendimiento del efecto de estos fenómenos en la operación de un GV, se desarrolló:

a) Un sistema computacional de captura/despligue de información gráfica de diseño (tubería) de un GV.

b) Una rutina empírica de cálculo de vida residual de un punto cualquiera de la tubería de un GV (esta rutina forma parte del sistema anterior).

c) Un modelo que simula el cambio con el tiempo de los esfuerzos en tubería de un GV y cuya evolución puede conducir a una rutina de cálculo de vida con una base teórica que reemplaza a la anterior.

Se hizo un ejemplo de aplicación del sistema descrito en los puntos a y b, al diseño de las unidades 3 y 4 de la CTE de Manzanillo, en él se exhibieron las zonas más sensibles al fenómeno corrosión-termofluencia.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION



## I INTRODUCCION

La industria eléctrica en México es, después de la del petróleo, la segunda más importante del país. Su inversión en equipo instalado excede los 20,000 millones de dolares y es un servicio estratégico de alta importancia. En el punto 2.1 del presente trabajo se da una descripción general del sistema eléctrico mexicano y se pone de relieve que la generación termoeléctrica es, por mucho, el modo más importante de generación de energía eléctrica. En 2.2 se da la descripción de una unidad termoeléctrica típica, y en 2.3 se describe los conceptos de operación de un generador de vapor. En 2.4 se da la estadística de fallas de las CTE's (Centrales Termoeléctricas) y se observa claramente que el generador de vapor, y dentro de éste la tubería, es el causante mayor relativo de indisponibilidad del equipo. Tomando en cuenta que una falla de tubería en una unidad de 300 Mw cuesta por arriba del millón de dólares en energía no generada, es clara la importancia que tiene para el país el evitar su ocurrencia. Para entender las causas de falla en tubería, en 2.5 se analizan los materiales de que esta constituida, es decir, los aceros. En 2.6 se describe el uso del código "ASME" (American Society of Mechanical Engineers) como criterio de selección de tubería, el cual es universalmente aceptado y, de no estar la corrosión de por medio, garantiza que la tubería de generador de vapor va a cumplir su misión a lo largo de toda su vida de diseño. En 2.7 se describe el

problemas de corrosión acelerada que ocurre en zonas de la tubería con mayor temperatura de metal, causada por sales contenidas de azufre, sodio y venadio de los combustibles mexicanos provenientes de mezclas de crudo maya. Es precisamente este problema de corrosión el causante de que el espesor de la tubería descienda por debajo del valor mínimo requerido por 'ASME' conduciendo eventualmente a la falla por termofluencia y al paro forzoso de la unidad de generación. En 2.9 se da una descripción general del problema de termofluencia, por esta razón es imprescindible construir modelos matemáticos de simulación para estimar la vida útil remanente de materiales sujetos a corrosión termofluencia, y de esta manera evitar fallos a través de programas de mantenimiento adecuados a los pronósticos. Todo lo anterior expone claramente la problemática de materiales en el sector eléctrico y la importancia de modelar la termofluencia en presencia de corrosión, para así estimar la vida útil de la tubería y evitar fallas costosas. Ahora bien, como un generador de vapor típico posee más de 100 km de tubería, y la presión y temperatura varían de manera continua a lo largo de ésta, es forzoso primero modelar en computadora el generador de vapor, para lo cual se desarrolló un método de captura/despliegue de información gráfica de diseño, tal como espesores, diámetros, longitudes, materiales, etc de la tubería de los diferentes bancos que forman el generador de vapor. Asimismo, se presentan resultados del análisis térmico obtenidos por otros autores, que fueron utilizados para realizar interpolaciones de las condiciones físicas de operación en un punto cualquiera de la

tubería.

Una vez obtenidas la velocidad de corrosión, las condiciones de presión, temperatura y las características geométricas y de materiales de la tubería a través de la simulación gráfica, se requiere de un modelo para el análisis de los esfuerzos mecánicos y térmicos. En 4.1 se dan los resultados que se obtendría de usar la teoría de elasticidad clásica. La característica más importante de este modelo es que concluye que el esfuerzo mínimo de tensión se localiza en el interior del tubo, mientras que el exterior del tubo está sujeto a un esfuerzo de tensión menor. Esto implicaría que el tubo debe fallar en su parte interna, lo cual bajo ninguna circunstancia se ajusta a la observación de que las fallas se inician en la superficie externa. En 4.2 se exponen algunos conceptos de plasticidad necesarios para abordar el modelo termo-elastoplástico. En 4.3 se desarrolla este modelo de análisis de esfuerzos, en el cual se describe cómo la termofluencia relaja los esfuerzos y los modifica hasta llegar a un estado en el que el exterior se encuentra bajo tensión y el interior bajo compresión. Asimismo, se observa que la fórmulas de esfuerzos obtenidas se aproximan a las de la formulación de ASME en el límite de tubería delgada, siendo en este límite de poca espesor donde la formulación ASME ha encontrado verificación experimental. Por lo tanto el modelo termo-elastoplástico aquí desarrollado representa una herramienta muy poderosa para el análisis de esfuerzos, ya que permite calcular el efecto de esfuerzos térmicos, estructurales, etc., lo cual no es posible en la formulación empírica de ASME.

Finalmente, en el capítulo 5 del presente trabajo se desarrolla un modelo de interacción corrosión-termodinámica, que permite estimar la vida remanente de elementos de tubería, el cual será acoplado como una subrutina del programa de despliegue gráfico del punto 3. Abi mismo se presenta un ejemplo de aplicación del modelo integrado en la determinación de la vida residual en tuberías de un generador de vapor de 300 Mw de construcción japonesa.

## CAPITULO II

### PROBLEMATICA DE MATERIALES EN EL SECTOR ELECTRICO

## 2.1 SECTOR ELECTRICO EN MEXICO

La producción de energía eléctrica en México, se ha generado durante los últimos años, en su mayor parte (62%), a través de Centrales Termoeléctricas (véase tabla I), las cuales tienen uno o más generadores de vapor que usan el aceite residual del petróleo como combustible.

Tipo de Planta	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Hidroeléctricas	6 550.0	6 550.0	6 550.0	7 446.0	7 732.0	7 814.0
Geotérmicas	205.0	425.0	645.0	645.0	645.0	645.0
Carboeléctricas	600.0	600.0	600.0	900.0	1 200.0	1 200.0
Nucleares	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Termoeléctricas	11 695.0	12 647.0	13 264.0	13 724.0	14 473.0	15 925.0
Total	19 050.0	20 302.0	21 059.0	23 735.0	24 040.0	25 584.0

TABLA I Capacidad instalada/esperada de energía eléctrica en Megawatts (M).

Como puede verse hay una tendencia a diversificar en el futuro las fuentes de energía. En la actualidad existen en México dos opciones para este propósito. La primera, trata del desarrollo de fuentes de energía, como carbón, de amplio uso en otros países, pero cuyo potencial no ha sido plenamente aprovechado en el nuestro.

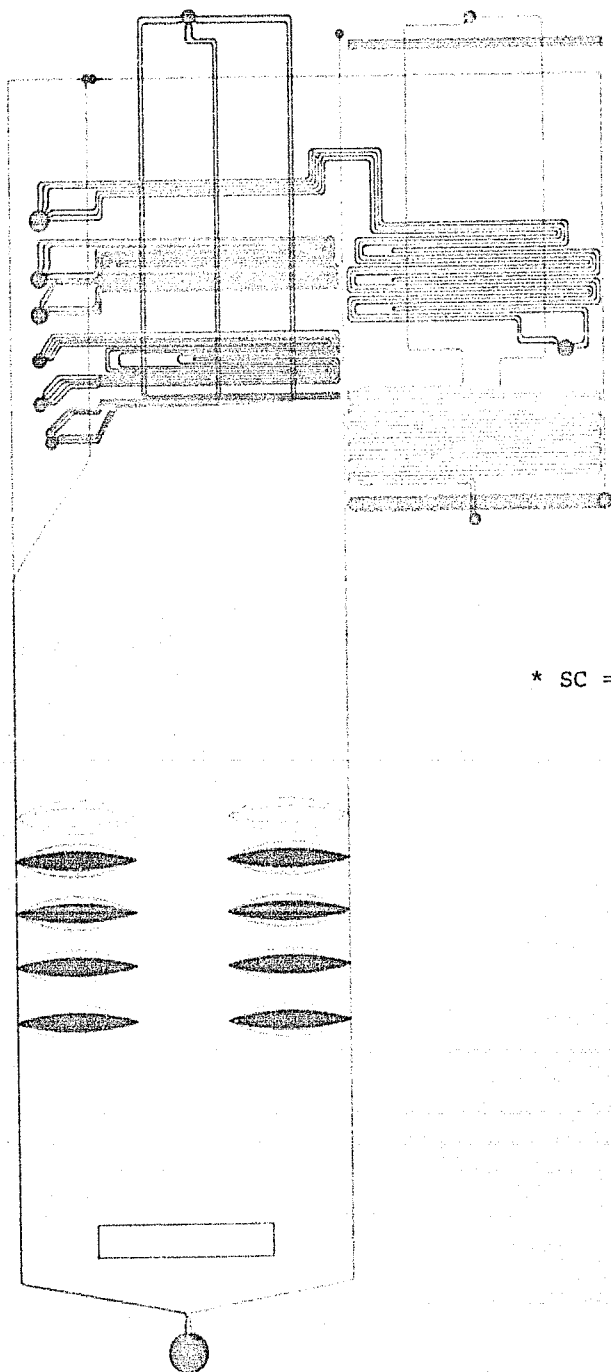
La segunda opción comprende el desarrollo de fuentes de energía, como la nuclear, con baja explotación en otros países, que aunque representan una alternativa disponible a largo plazo, tienen un alto costo de aprendizaje y asimilación tecnológica.

Asimismo, estarían comprendidas fuentes de energía tales como la geotérmica, que probablemente no representaría más del 5% de la oferta nacional de electricidad.

Otras fuentes potenciales de electricidad como la solar, eólica y mini-hidroeléctricas, difícilmente tendrán una participación significativa en lo que resta del siglo.

## 2.2 DESCRIPCION DE UN GENERADOR DE VAPOR TIPICO DE 300 MW








Para ilustrar este punto, se considera una unidad MITSUBISHI DE 300 MW (21, figura 2.1).



BANCOS\*

GEN. DE VAPOR MITSUBISHI

CTE. MANZANILLO, U. 3-4

-  SC DE TEMP. INTER.
-  SC DE ALTA TEMP.
-  RECALENTADOR
-  ECONOMIZADOR
-  SC BAJA TEMP.
-  PARED DE AGUA
-  PARED VAPOR FRIO

\* SC = SOBRECALENTADOR

FIGURA 2.1

Como puede verse, en este diseño específico hay siete secciones de tubería ilustradas con un color diferente, cada una de las cuales representa una unidad intercambiadora de calor denominada banco.

El dibujo muestra una vista lateral de cada banco. En cada uno de ellos las líneas de tubería conectan dos círculos que representan la secciones transversales de tubos de diámetro mucho mayor, llamados cabezales, cuyo eje es perpendicular al plano del dibujo.

A lo largo de los cabezales, los tubos del banco se van insertando, en grupos, formando planos perpendiculares al eje del cabezal, llamados hileras. Estos pueden permanecer sin alterarse en todo el banco, o cambiar a través de dobleces o entrelazadas de los tubos de hileras adyacentes. Esto muestra el concepto de arreglo tridimensional de tubería.

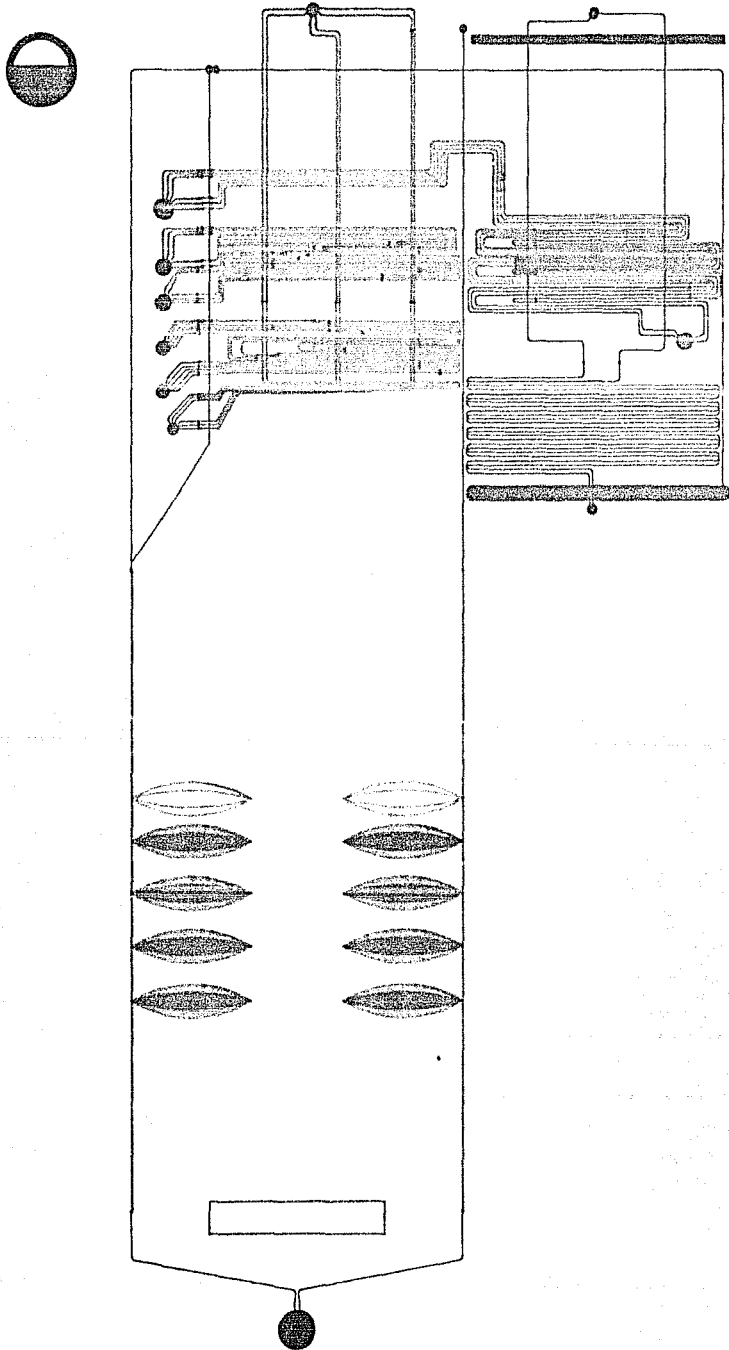
La pared de agua, cubre el interior de las cuatro paredes de la cavidad que alberga los bancos de las etapas de sobrecalentamiento (baja temperatura, temperatura intermedia y alta temperatura) y la etapa de alta temperatura del recalentador. Además en su parte inferior forma las fronteras del hogar, donde se realiza la combustión de combustóleo, inyectado por los 4 niveles de quemadores situados en las 4 esquinas de la cavidad (en la figura se ilustra las flamas con zonas achuradas de café y, en su centro, rojo).

Las paredes de vapor frío revisten la segunda cavidad que contiene la etapa de baja temperatura del recalentador y el banco llamado economizador. Ambas cavidades descritas se comunican en la parte superior a través de los tubos de la pared de agua, que se acomodan (cortina de pared de agua) dejando un paso para los gases de combustión.

Por último, el círculo con interior parcialmente pintado de azul, en la esquina superior izquierda, representa la sección transversal de un depósito cilíndrico, con eje perpendicular al plano del dibujo. Dicho depósito, llamado domo, contiene agua (de agua) y vapor de agua a temperatura de saturación. El domo está conectado con las paredes de agua y con las paredes de vapor frío (no se muestra en la figura 1.1 los ductos que lo hacen). Por simplicidad, tampoco se muestran los precalentadores regenerativo y de aire-vapor.

Para tener una idea de las dimensiones reales que este generador tiene, podemos imaginarlo como un edificio de siete niveles con una base de 10m X 11m. La totalidad de los bancos forman una área de calefacción de 2.5 hectáreas con una longitud de 115 Km de tubería. A lo largo de cada tubo el espesor, diámetro externo o material, puede cambiar como se ilustra en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 (Los materiales están especificados según la norma ASME).



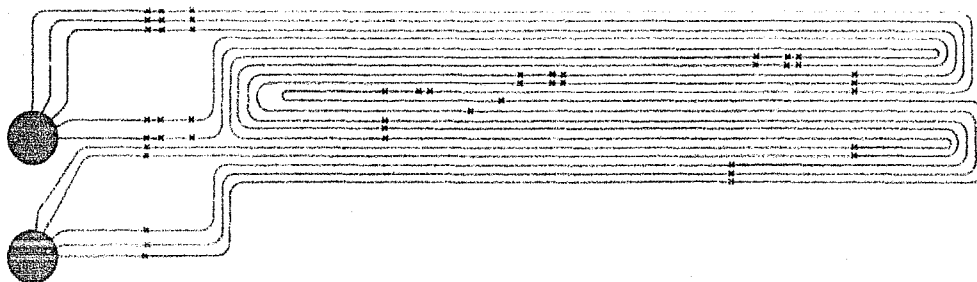


MATERIALES

GEN. DE VAPOR MITSUBISHI  
 CTE. MANZANILLO, U. 3-4

- SA213-T12
- SA213-T22
- SA213-TP347H
- SA213-TP304H
- SA213-TP321H
- SA209-T1
- ACERO AL CARBON

FIGURA 2.2



MATERIALES

SC. ALTA TEMP. MITSUBISHI

CTE. MANZANILLO, U. 3-4

■ SA213-T12

■ SA213-T22

■ SA213-TP347H

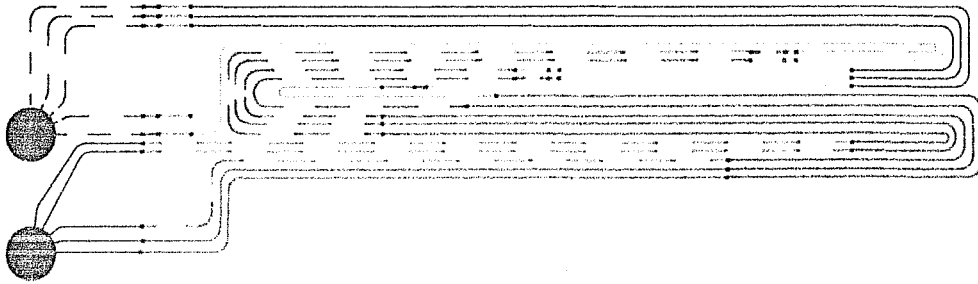
■ SA213-TP304H

■ SA213-TP321H

■ SA209-T1

■ ACERO AL CARBON

figura 2.3



ESPESORES

SC. ALTA TEMP. MITSUBISHI

CTE. MANZANILLO, U. 3-4

—— 4.9 mm	----- 10.9 mm
—— 7.4 mm	-- -- 10.5 mm
—— 8.6 mm	-- -- 9.4 mm
—— 8.9 mm	-- -- 9.8 mm
—— 9.3 mm	-- -- 8.4 mm
5.4 mm	-- -- 9.7 mm
—— 10.4 mm	10.1 mm

FIGURA 2.4

## 2.3 DESCRIPCION DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA(CTE)

La CTE tiene por objeto producir energía eléctrica, en base a la energía química liberada en la combustión de las sustancias denominadas genéricamente como combustibles fósiles: gas, carbón mineral y aceite residual del petróleo (combustóleo). En el generador de vapor tomado como ejemplo, se quemará combustóleo[3].

Por su disposición física y relación de funciones se puede hablar de tres sistemas, que componen cada unidad de una CTE: El generador de vapor, el turbogenerador y los auxiliares(ver fig. 2.5).

El generador de vapor descrito en la sección anterior tiene como finalidad producir vapor de potencia( que moverá la turbina) a partir del agua de alimentación. Para realizar esto, dentro de él se lleva a cabo el quemado del combustóleo y los subsiguientes procesos de transferencia de calor descritos más adelante.

El turbogenerador está compuesto de la turbina, el generador eléctrico y el condensador de vapor, localizados en la casa de máquinas.

Los equipos auxiliares (por ejemplo los calentadores de baja y alta presión) son todos aquellos involucrados en la tarea de regresar el agua al generador de vapor, en las condiciones de temperatura y presión requeridas por el economizador (250°C y 180 Kg/cm<sup>2</sup>)

Mostraremos brevemente la operación de una CTE donde se aprecia la interacción de todos los sistemas. Para ello describiremos los ciclos de Gases y de Agua-Vapor.

**2.3.1 CICLO DE LOS GASES[4].-** En la figura 2.6 se indica con flechas amarillas el ciclo de los gases. A carga ECR (Economical Continuous Rate) se quemará combustóleo a razón de 67.67 Ton/hr en el hogar del generador de vapor, para ello se ocupa 4.5 ton/hr de vapor agua extraído de la turbina y 974.0 ton/hr de aire precalentado a 310.4°C (en la figura se señalan las demás condiciones de cada flujo; hay un código de colores, en la esquina superior izquierda, que indica el significado de cada número). La reacción química de combustión da lugar a un flujo continuo de calor de 777.0 MW que junto con los demás flujos caloríficos entrantes al hogar (combustóleo, vapor de atomización, gases recirculados y aire precalentado) y menos las pérdidas en el hogar, produce un flujo máximo de calor disponible (HRA) de 887.9 MW.

Como resultado de la reacción se producen 1316.0 ton/hr de gases( cuya composición química se muestra). Los gases se elevan e inician su recorrido por los bancos de tubería donde van entregando paulatinamente su energía y, consecuentemente, disminuyendo su temperatura( en la figura 2.6 se han indicado la distribución de

# CENTRAL TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL

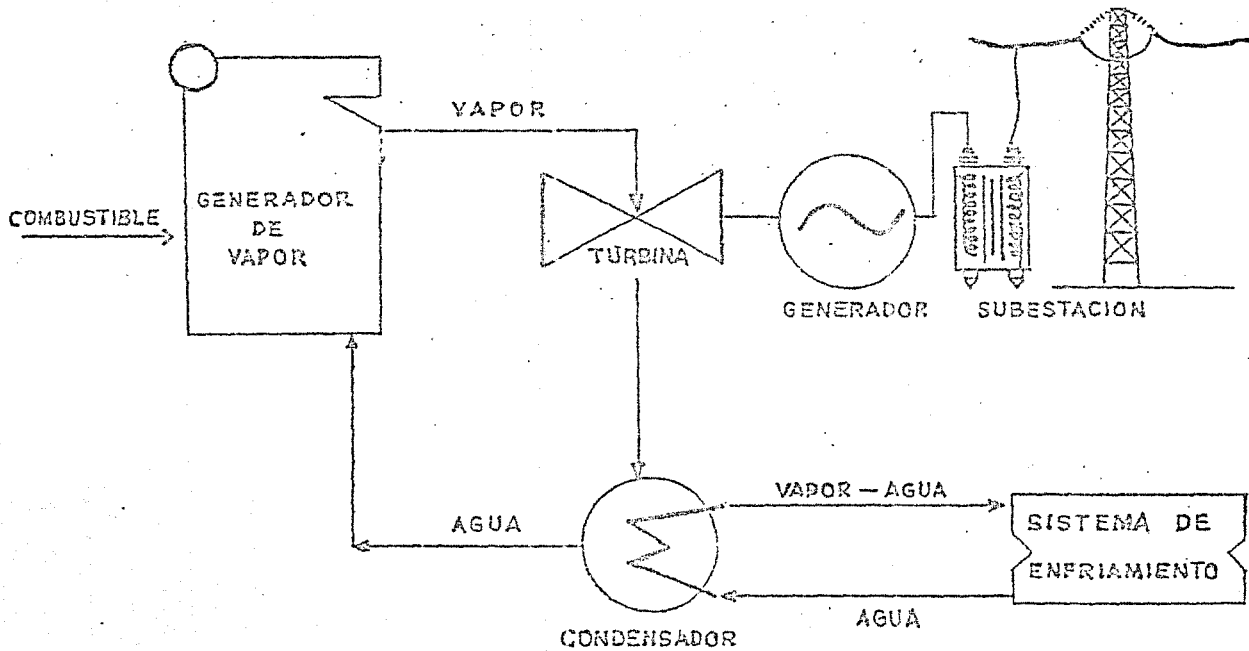
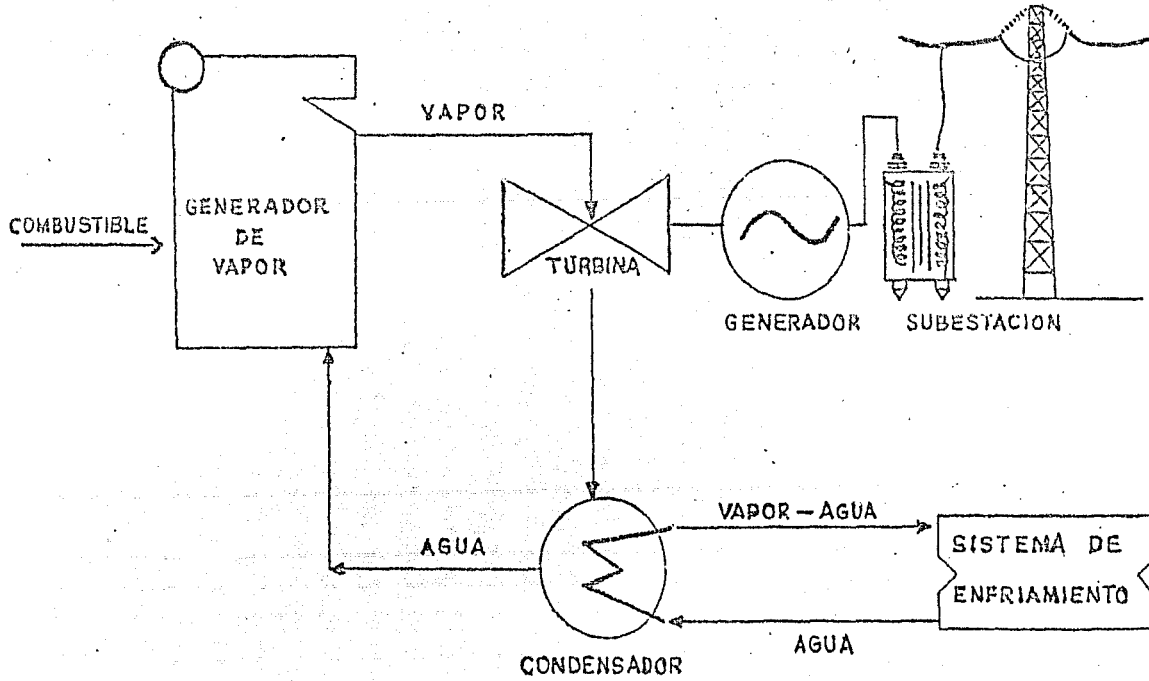


FIGURA 2.5

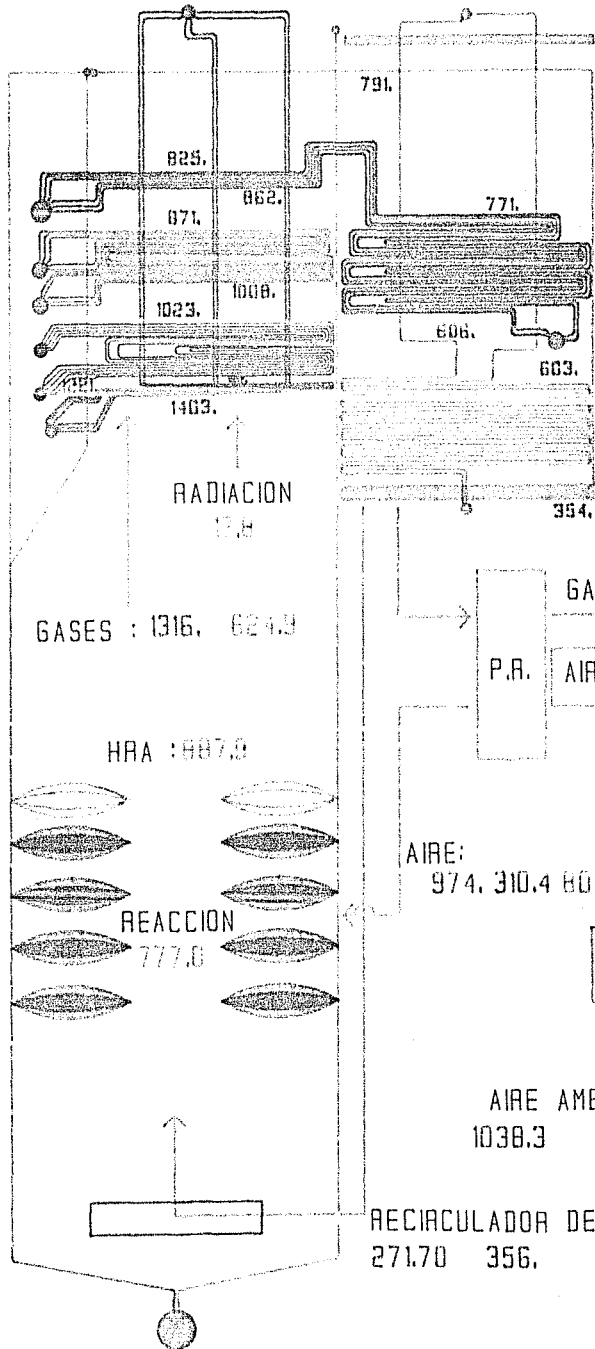
# CENTRAL TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL





CARGA : ECR

- GASTO (ton/hr)
- TEMPERATURA (C)
- PRESION (kg/cm<sup>2</sup>)
- FLUJO ENT. (MW)
- CALOR ABS. (MW)



	TON/HR	% VOL.
CO <sub>2</sub> :	266,	13.4
H <sub>2</sub> O :	105,	12.9
AIRE :	57,	4.4
SO <sub>2</sub> :	6,	0.2
N <sub>2</sub> :	867,	68.4
GASES I. :	15,	0.8

GASES : 1316, 624.9

GASES: 1044, 147.9 33.2

109, 143.8

AIRE FUGAS: 64.57 73.0 0.880

HRA : 887.0

AIRE: 974, 310.4 80.4

AIRE: 1038.3 73.0 14.1

COMBUSTOLEO →  
67.67 125, 18.0 3.8

VAPOR DE ATOMIZACION →  
4.50 184, 10.5 0.2

REACCION  
777.0

PERDIDAS RADIATIVAS  
0.7 HOGAR/ 0.7 TIROS

GASES  
GEN. DE VAPOR MITSUBISHI  
CTE. MANZANILLO, U. 3-4

RECIRCULADOR DE GASES:  
271.70 356, 27.6

AIRE AMBIENTE:  
1038.3 27, 0.41

FIGURA 2.6

temperaturas de los gases a través los bancos con números de calor azul). Al llegar al techo (pared de vapor frío), el flujo de gases da vuelta, cruza la cortina de tobes de pared de hogar, descendiendo para continuar atravesando los demás bancos y sale por debajo del economizador. Posteriormente el flujo se divide en dos partes, uno que es recirculado por abajo del hogar y otro que atraviesa el precalentador de aire regenerativo (P.A.R) donde, como ya dijimos se precalienta el aire para la combustión. El gas que es ocupado por el precalentador es expulsado al medio ambiente a través de la chimenea.

**2.3.2 CICLO AGUA-VAPOR(4).-** Empezamos por el domo (figura 2.7), cuyas funciones son las de coleccionar, separar y distribuir las fases líquido-vapor del agua saturada a 350°C que en él se encuentra. El líquido del domo se recircula continuamente por las paredes del hogar donde absorbe calor principalmente en forma radiativa, transformándose parcialmente en agua. El vapor del domo así obtenido, es enviado sucesivamente a los etapas de sobrecalentamiento: pared de vapor frío (entrada:1 y salida:2; absorbe calor en forma convectiva), sobrecalentador de baja temperatura (3 y 4; radiativo en la primera etapa y convectivo después), sobrecalentador de intermedia (5 y 6; convectivo) y sobrecalentador de alta temperatura (7 y 8; convectivo).

Como puede verse, en los números señalados cerca de cada cabezal, la temperatura va gradualmente subiendo hasta alcanzar la máxima, 541.1°C, a la salida del sobrecalentador de alta (8). La temperatura se eleva en todas las etapas excepto en los pasos 4 a 5 y 6 a 7. En el primero se atempera con un flujo de  $+28.9/2=14.45$  ton/hr. En el segundo se vuelve a atemperar con  $+14.45$  ton/hr y además se extrae  $-58.4$  ton/hr. Esto explica las variaciones del gasto entre bancos en los pasos señalados. Todo con objeto de mantener constante la temperatura señalada (cabezal (8)).

Del cabezal (8), el vapor sobrecalentado y con una presión 172 Kg/cm<sup>2</sup>, es conducido a la turbina de alta presión (A.P.). Esta recibe 802.8 ton/hr de vapor que hace girar el eje del generador eléctrico para producir la corriente eléctrica.

El vapor sale de la turbina de A.P. a 369.1°C y 38.9 kg/cm<sup>2</sup> de presión, en virtud de que ya transfirió una parte de su energía, y es enviado a las etapas de recalentamiento (baja y alta temperatura; entrada 9 y salida 10) donde se vuelve a elevar su temperatura a 540°C.

Del recalentador el vapor se envía, en forma consecutiva, a las etapas de presión intermedia y baja de la turbina. Alrededor de 600 ton/hr de vapor salen de la turbina de baja presión (el resto es vapor de extracción), a una temperatura de 38°C y con una presión absoluta de 0.07 Kg/cm<sup>2</sup>, con destino al condensador.



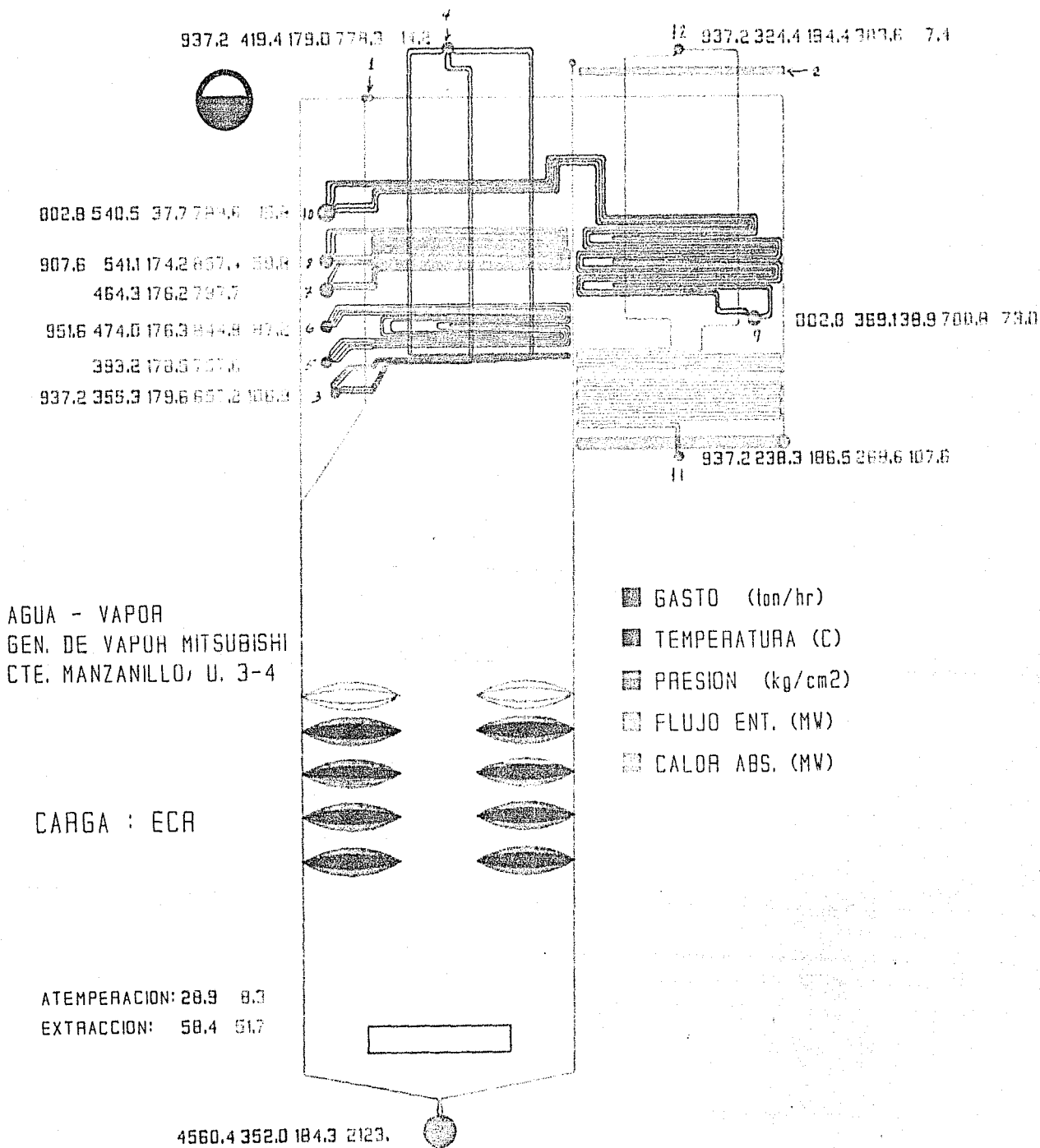


FIGURA 2.7

En el condensador, formado de tubos que conducen agua de enfriamiento a temperatura ambiente, el vapor es vertido, condensado y posteriormente recibido en su forma de líquido, en el pozo caliente. Las etapas siguientes para completar el ciclo tienen como finalidad: controlar la calidad del agua y eliminar impurezas; aumentar la presión hasta rebasar ligeramente la del domo, y por último, aprovechar el calor que todavía llevan los gases de combustión antes de salir por la chimenea, de tal manera que se le eleve un poco la temperatura al agua, al momento de reingresar al domo. Este último paso, se lleva a cabo principalmente en el economizador, donde el agua eleva su temperatura de 233.3°C(entrada:11) a 234.4°C(salida:12).

## 2.4 ESTADISTICA DE FALLAS

La indisponibilidad de una CTE se mide por el cociente de la energía no generada ( MW hr) por falla (salida de servicio) o decremento (disminución en la potencia de la unidad), entre la energía total no generada de la muestra, o entre la energía que debía producirse de acuerdo a la potencia de placa durante un cierto tiempo, resultando en cada caso un porcentaje. El primero llamado relativo y el segundo absoluto.

En la tabla II se muestra la distribución de la indisponibilidad relativa por equipo, para cada grupo de generación, obtenida de una muestra de eventos ocurridos durante 1980 a 1985. En ella se puede ver que el equipo que introduce mayor indisponibilidad es el generador de vapor.

En la tabla III se detallan los conceptos que producen la indisponibilidad en el generador de vapor. En ella se observa que la causa más importante de falla es la tubería.

En la tabla IV se muestra la indisponibilidad absoluta del generador de vapor y en ella se observa que la tubería ocasiona el más alto porcentaje global, 4.65%, lo que produce una pérdida de capacidad instalada de  $(4.65/100) \times 10824.5 = 502.5$  MW ( el segundo factor es la capacidad instalada termoeléctrica). Como aproximadamente cada MW instalado cuesta un millón de dolares, esto quiere decir que se requieren \$502.5 Millones de dolares en equipo nuevo para recuperar la energía no generada. Las tablas de la III a la IV, fueron obtenidas de ESI

POTENCIA DE PLACA(MW):	37-40	75-80	150-158	300	GLOBAL
GENERADOR DE VAPOR	68.34	44.91	49.71	55.30	52.57
TURBOGENERADOR	9.91	39.40	13.60	22.22	23.75
AUXILIARES	9.37	15.32	36.02	20.11	21.72
OTROS	12.38	0.37	0.67	2.36	1.97

TABLA II. PORCENTAJES RELATIVOS, POR EQUIPO, PARA DIFERENTES GRUPOS

DE GENERACION.

POTENCIA DE PLACA(MW):	37-40	75-80	150-152	300	GLOBAL
TUBERIA	21.99	23.02	13.58	34.73	28.03
PRECALENTADORES	16.61	6.53	13.21	6.11	7.85
COMBUSTION	6.11	4.69	7.69	5.33	5.66
VENTILADORES	10.39	3.15	8.36	4.00	4.87
ENSUCIAMIENTO/LIMPIEZA					
DE CALDERA	8.70	3.90	4.82	2.12	2.99
OTROS GENERADOR DE VAPOR	2.52	2.51	0.94	0.50	1.06
MISCLANEOS DEL GENERADOR					
DE VAPOR	0.32	0.01	0.14	1.52	0.92
COLECTORES/DISTRIBUIDORES					
DEL CICLO AGUA-VAPOR	0.66	0.77	0.28	0.64	0.60
VALVULAS	1.02	1.22	0.47	0.34	0.59

TABLA III. PORCENTAJES RELATIVOS, EN EL GENERADOR DE VAPOR, PARA DIFERENTES GRUPOS DE GENERACION.

POTENCIA DE PLACA(MW):	37-40	75-80	150-152	300	GLOBAL
TUBERIA	1.59	3.85	1.71	6.95	4.65
PRECALENTADORES	1.20	1.09	1.66	1.22	1.30
COMBUSTION	0.44	0.78	0.97	1.07	0.94
VENTILADORES	0.75	0.53	1.08	0.80	0.81
ENSUCIAMIENTO/LIMPIEZA					
DE CALDERA	0.63	0.48	0.61	0.42	0.50
OTROS GENERADOR DE VAPOR	0.12	0.42	0.12	0.10	0.17
MISCLANEOS DEL GENERADOR					
DE VAPOR	0.02	0.002	0.02	0.30	0.15
COLECTORES/DISTRIBUIDORES					
DEL CICLO AGUA-VAPOR	0.05	0.13	0.04	0.13	0.10
VALVULAS	0.07	0.22	0.06	0.07	0.10

TABLA IV. PORCENTAJES ABSOLUTOS EN EL GENERADOR DE VAPOR, PARA DIFERENTES GRUPOS DE GENERACION.

## 2.5 MATERIALES DE TUBERIA EN CTE'S

Dentro del problema de la indisponibilidad de CTE's, la causa más relevante, según hemos visto, la constituye la falla en tubería. Para entender el problema comenzaremos por describir los materiales que forman esa tubería.

La figura 2.2 muestra la distribución de materiales en los bancos del generador Mitsubishi. Todos son aceros, que van desde aceros al carbono, pasando por aceros de baja aleación ferríticos, hasta aceros inoxidables austeníticos.

Un acero es una aleación que tiene al hierro como su componente mayoritario, al carbono (de 0.1% a 2.0%) y otros elementos minoritarios [61].

El hierro es un metal alotrópico que tiene dos fases sólidas importantes desde el punto de vista metalúrgico, la fase alfa con estructura bcc y la fase gamma con estructura fcc. Ambas fases dispersan al carbono en sus intersticios, formando soluciones sólidas intersticiales llamadas austenita (matriz de hierro gamma) y ferrita (matriz de hierro alfa), que van a estar presentes dependiendo del intervalo de temperatura (figura 2.8).

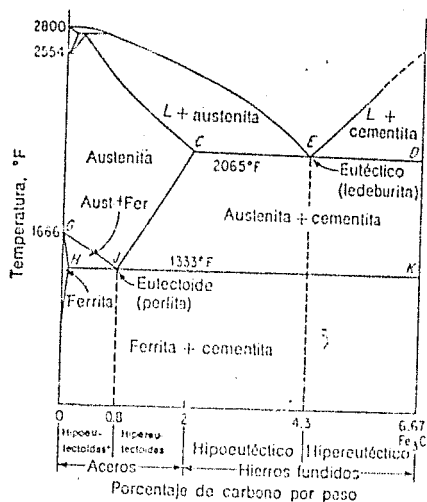


Figura 2.8 Diagrama de equilibrio hierro-carbono de hierro marcado con los nombres comunes para las estructuras.

Según la figura 2.8, a temperatura ambiente, la constitución del acero va a variar dependiendo del contenido de carbono. Tomemos como referencia la concentración 0.8% de C, punto eutectoide, donde tenemos una estructura (llamada perlita) en base a ferrita que dispersa delgadas laminillas de carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C), llamado comúnmente cementita. Para concentraciones menores (aceros hipoeutectoides), la estructura cristalina va a tener granos de ferrita y perlita. A concentraciones mayores (aceros hipereutectoides), la estructura esta formada de granos de perlita separados por una red de cementita.

La ferrita es la estructura más suave presente en la figura 2.8. Contrariamente la cementita es la estructura más dura de baja resistencia tensil, pero de alta resistencia compresiva. De tal manera que la ferrita, aumenta su resistencia mecánica en la perlita debido a las laminillas de cementita.

Cuando un tercer elemento se añade al acero, el diagrama binario hierro-carburo de hierro no es ya una representación de condiciones de equilibrio, la presencia de éste nuevo elemento cambiará el intervalo crítico, la posición del punto eutectoide y la localización de las fases alfa, gamma y delta. De los elementos aleantes, solo el níquel y el manganeso reducen la temperatura eutectoide[7]. Aumentar las cantidades de níquel y manganeso puede disminuir la temperatura crítica lo suficiente para evitar la transformación de la austenita durante el enfriamiento lento; se conocen como elementos estabilizadores de la austenita. Por tanto, la austenita se retendrá a temperatura ambiente. Esta situación se presenta en los aceros austeníticos inoxidables.

## 2.6 CODIGO 'ASME' COMO CRITERIO DE SELECCION DE TUBERIA

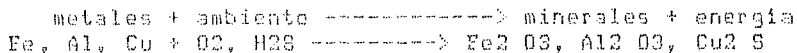
El material de la tubería se encuentra por una parte sometido a la presión interior del tubo, que origina en cada punto de este una distribución de esfuerzos y por otra a la alta temperatura exterior de los gases de combustión. Tomando en cuenta estos dos factores (resistencia mecánica en alta temperatura), se han establecido criterios empíricos que si se cumplen garantizan la operación confiable de los elementos de tubería durante su vida de diseño (100000 hr)

A continuación se muestra una tabla (V)[8] que exhibe el esfuerzo máximo permitido por 'ASME' (American Society for Mechanical Engineer) a que puede someterse un tubo en función de la temperatura y tipo de acero. Además se da una fórmula para encontrar el espesor mínimo conociendo el esfuerzo máximo, la presión y el diámetro externo.

Por último hay que aclarar que este criterio toma en cuenta únicamente la resistencia mecánica a alta temperatura. Un factor no tomado en cuenta es la degradación microestructural acumulada durante la operación.

## 2.7 CORROSION EN ALTA TEMPERATURA

La corrosión la podemos definir como la destrucción o deterioro de un material, debido a la reacción química con su medio ambiente[9]



	°C	HASTA 371	399	427	454	482	510	538	566	593	621	649
NORMA ASME	°F	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
SA-192	11.5	10.6	9.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA210-A1	14.4	13.0	10.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA210-C	16.6	14.8	12.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA209-T1	13.8	13.8	13.5	13.2	-	-	-	-	-	-	-	-
SA213-T2	14.2	13.9	13.5	13.1	12.8	9.2	5.9	-	-	-	-	-
SA213-T5	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	
SA213-T9	13.7	13.2	12.8	12.1	11.4	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	
SA213-T11	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.5	4.0	2.5	1.2	
SA213-T12	15.0	15.0	14.8	14.2	13.1	11.0	7.5	5.0	2.8	1.6	1.0	
SA213-T22	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	3.0	1.6	
SA213-TP304H	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	
SA213-TP321H	15.8	15.7	15.5	15.4	15.3	15.2	14.0	11.7	9.1	6.9	5.4	
SA213-TP347H	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.4	14.1	13.0	10.5	7.9	
SA515-Gr70	16.6	14.8	12.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ESFUERZO MAXIMO PERMISIBLE (ASME 1980: SECCION 8, DIVISION 1)  
 (Miles de libras por pulgada cuadrada = 70.306967 Kg/cm<sup>2</sup>)

FORMULAS DE ESPESOR MINIMO DE PARED DE TUBO (ASME: SECCION 1, PWT-10, PG-27.2.1)

$$e = \frac{PD}{2S+P} + 0.005 D$$

$$S = \frac{1.005Di + 1.01 e}{1.98 e - 0.01 Di} p$$

e = espesor mínimo de pared del tubo  
 D = diámetro externo (menor a 5 pulg)

$$e = \frac{1.005P + 0.01S}{1.98S - 1.01P} Di$$

$$S = \frac{PD}{2e - 0.01D} - \frac{P}{2}$$

Di = diámetro interno  
 P = presión interna

e = espesor mínimo permisible por ASME

De lo anterior se desprende que la oxidación y la corrosión son procesos que ocurren espontáneamente en la naturaleza, ya que la liberación de energía en general, indica una menor energía libre de los compuestos con respecto a los metales puros. Así pues, las estructuras metálicas creadas por el hombre son termodinámicamente inestables y se conservan gracias a que la velocidad de reacción química con su medio ambiente, es suficientemente baja. Pero cuando la temperatura es elevada y el ambiente lo forma un medio agresivo, la velocidad de corrosión es significativa. Esto es lo que ocurre con los componentes metálicos de los generadores de vapor nacionales que operan en un ambiente altamente corrosivo, resultado de la acción química de los gases de combustión y la escoria depositada sobre ellos. Estos elementos son producidos durante la combustión de un combustible que es una mezcla de los crudos Maya e Itmo con elevado contenido de vanadio y azufre. Su efecto sobre los segmentos de tubería a alta temperatura de metal (temperatura en la superficie exterior del tubo) es un desgaste de la superficie metálica, conocida como corrosión a alta temperatura, que eventualmente conduce a la falla del equipo.

En general la corrosión depende en forma exponencial de la temperatura de metal, siendo pequeña a 540°C, considerable a 580°C y ya definitivamente catastrófica en los 630°C. La corrosión también depende, aunque relativamente en menor grado, de la temperatura de gases, exceso de aire y el tipo de acero. En los procesos comunes de oxidación, los materiales ferríticos, como el SA213-T22 (2.25Cr-1.5Mo), dejan de ser operables en temperaturas alrededor de los 600°C, mientras que los austeníticos inoxidables como el 304H (16Cr-0Ni) tienen un límite de uso en aire de 850°C; en cambio, en procesos de sulfidación como los encontrados en economizador o precalentador, los aceros inoxidables son solo marginalmente superiores a los ferríticos, teniendo ambas velocidades de corrosión catastróficas a los 630°C. Lo anterior se debe a que mientras el cromo incrementa la resistencia a la corrosión de los aceros (contenidos superiores al 12%), el níquel forma un sulfuro de bajo punto de fusión que tiende a incrementar la velocidad de corrosión; de hecho existen diversas condiciones de temperatura de metal y de gases en las que los aceros ferríticos se comportan mejor que los austeníticos inoxidables. Lo anterior significa que los aceros inoxidables se ven también afectados por la corrosión y que pueden no ser la solución al entrar como sustitutos de aceros ferríticos; de hecho, la selección del uso de aceros inoxidables se hace por su mayor resistencia mecánica en altas temperaturas y raras vez por mayor resistencia a la corrosión[4].

## 2.8 TERMOFLUENCIA

Termofluencia es el proceso de deformación plástica, dependiente del tiempo, que sufre un material sujeto a esfuerzos. Por su misma definición, la termofluencia se identifica verificando si el material sujeto a esfuerzos ha sufrido una deformación plástica (que no se elimina al suprimir el esfuerzo) con el

transcurso del tiempo. La termofluencia es un proceso térmicamente activado, y como tal, se acelera al aumentar la temperatura. Asimismo, el proceso de termofluencia se ve incrementado al aumentar el nivel de esfuerzos aplicados(10).

La termofluencia y la corrosión en alta temperatura son los modos de falla más importantes tanto en el sobrecalentador como en el recalentador. Por razones de diseño, la temperatura exterior del metal es, generalmente, mayor en el recalentador que en el sobrecalentador, en tanto que en éste último es más elevada la presión que ejerce el vapor. Por estas razones, la termofluencia es más relevante en los sobrecalentadores y la corrosión, en recalentadores; éste es un hecho corroborado ampliamente por la Comisión Federal de Electricidad.

Los tubos sujetos a la termofluencia se abomban y adelgazan paulatinamente hasta que se destruyen( termofluencia rápida), o se deforman ligeramente produciendo una abertura de labio mediano (termofluencia lenta).

Los sobrecalentamientos son causa también de falla por termofluencia de los tubos de pared de agua. Se deben a un excesivo flujo de calor ocasionado ya sea porque las superficies metálicas se encuentran muy cerca de la zona de flama, o bien, a una circulación inadecuada del líquido( que en este caso actúa como refrigerante del material) en el interior de los tubos.

Ahora describiremos brevemente los mecanismos a través de los cuales se realiza la deformación plástica, y con ello el flujo plástico a alta temperatura.

### 2.8.1 MECANISMOS DE DEFORMACION PLASTICA

El principal mecanismo en la deformación plástica de materiales cristalinos, es el deslizamiento sobre planos compactos y a lo largo de direcciones compactas. El maclado puede contribuir a la deformación cuando cuando el deslizamiento es restringido. A altas temperaturas y bajas velocidades de deformación, los materiales policristalinos pueden también deformarse por deslizamiento de los límites de grano o por fluencia difusiva. En lo que sigue se hará una breve revisión del primer mecanismo mencionado que es el más importante(11).

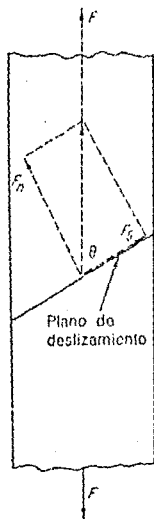
Un cristal, dependiendo del tipo de red, tiene planos cristalográficos en los que los átomos se encuentran lo más junto posible, llamados planos compactos. La distancia de los átomos de dos de estos planos es más grande que la distancia entre átomos del mismo plano, de tal suerte que el deslizamiento relativo entre planos adyacentes compactos requiere un mínimo de energía, más aún si se realiza en una dirección compacta contenida en ese plano (ambos plano y dirección se denominan sistema de deslizamiento). A pesar de eso, cálculos moderados estiman que la energía es cientos



de veces mayor que la requerida en realidad.

La explicación está en el concepto de dislocación, que permite propagar el pulso de deslizamiento entre planos adyacentes compactos de manera localizada y gradual, sin necesidad de mover toda la capa de átomos a la vez y, de esta forma, disminuir la energía requerida.

La manera como se relaciona un esfuerzo axial exterior, con la dirección de deslizamiento de planos adyacentes compactos, se aprecia en la figura 2.9.



Los esfuerzos resultantes son

$$\text{Esfuerzo cortante } S_s = \frac{F \cos \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} \cos \theta \sin \theta = \frac{F}{2A} \sin 2\theta$$

$$\text{Esfuerzo normal } S_n = \frac{F \sin \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} \sin^2 \theta$$

Figura 2.9 Componentes de fuerza sobre un plano de deslizamiento.

Como puede verse el esfuerzo exterior (fuerza por unidad de área) se resuelve sobre la superficie de planos compactos en una componente perpendicular y otra tangencial o de corte (obsérvese que el esfuerzo resultante de corte máximo ocurre en un plano oblicuo a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo axial). Si el esfuerzo de corte se resuelve en una dirección compacta, se obtendrá el esfuerzo de corte que si supera el valor crítico producirá deslizamiento (deformación plástica) en ese sistema de deslizamiento.

Una dislocación es una imperfección de línea de un cristal, que tiene como característica relevante la de deslizar una cantidad uniforme de material (vector de Burgers), cuando cualquiera de sus segmentos se propaga. Esta imperfección presenta dos caracteres extremos (dependiendo de la orientación del segmento de dislocación

con respecto al vector de Burgers), de borde y de tornillo, pero en general muestran un carácter mixto. De tal manera que una línea de dislocación puede exhibir diferentes características a la vez, en cada uno de sus segmentos componentes.

Las componentes de la dislocación que presentan un carácter de tornillo puro, se moverán en cualquier dirección, aún fuera del plano de deslizamiento actual (deslizamiento cruzado). En cambio aquellas que presentan un carácter mixto o de borde, no podrán moverse fuera de su plano de deslizamiento para salvar los obstáculos (precipitados, átomos de impureza o compuestos intermetálicos como la cementita en la ferrita) que se presenten a su paso, a menos que se active térmicamente el mecanismo para escalar (subir o bajar) a otros planos de deslizamiento adyacentes.

Las dislocaciones interactúan a través de sus campos elásticos atrayéndose o repeliéndose dependiendo de la dirección de acercamiento relativo, de manera que tomarán posiciones más holgadas (poligonizar) de equilibrio que disminuyan la energía del cristal. En otros casos las dislocaciones interaccionan aniquilándose entre sí, pudiendo dejar al final una red perfecta, una vacancia o átomos intersticiales.

Cuando una dislocación cruza a otra, crea sobre esta un codo de longitud igual al desplazamiento producido por el vector de Burgers de la primera y viceversa. En ocasiones el codo formado no es compatible con la dirección de movimiento del resto de la dislocación. Si un esfuerzo de corte pone en movimiento al codo descrito el resto de la dislocación permaneciera inmóvil, y el codo será sometido a una tensión longitudinal que lo hará alargarse y cerrarse formando un círculo, de manera que este codo funcionará como fuente de dislocaciones circulares a partir del cual se propagarán los pulcos de deslizamiento (fuente de Frank-Read)

## 2.8.2 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACION

Para describir el mecanismo de endurecimiento de los metales nos vamos a permitir empezar por los monocristales. Como se muestra en la figura 2.10, tenemos 4 etapas

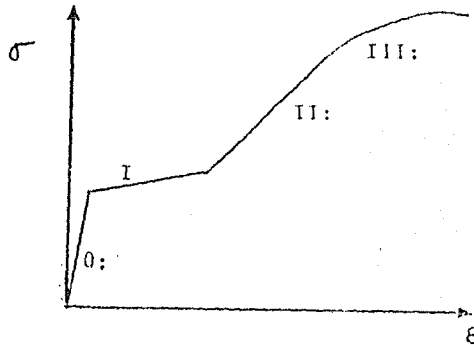


figura 10 : Etapas en la deformación de un monocristal.

i) La etapa 0 es la región elástica, aquí el esfuerzo todavía no llega al necesario para inducir el movimiento continuo de las dislocaciones, o el esfuerzo necesario para activar las fuentes de dislocaciones.

ii) Tan pronto como se alcanza el esfuerzo resuelto de corte crítico para un sistema de deslizamiento, da principio la deformación plástica de la zona I, también conocida como deslizamiento fácil, por el pequeño endurecimiento que muestra.

iii) Tan pronto como el esfuerzo activa otros sistemas de deslizamiento diferentes del primario ya activado, se da lugar a la etapa II, caracterizada por un endurecimiento lineal mucho mayor que el de la etapa I. La razón aparente de este endurecimiento es que las dislocaciones del segundo sistema van a interactuar con las del primario, formando dislocaciones sésiles que van a actuar como obstáculos al deslizamiento de dicho sistema, dejando las dislocaciones prácticamente inmóviles, por lo que sus campos elásticos van a endurecer el cristal. Asimismo, las interacciones entre los sistemas de deslizamiento pueden producir nuevas fuentes de dislocaciones que también van a tener un efecto endurecedor. Finalmente, debe hacerse notar que conforme el esfuerzo se incrementa, todos los restantes sistemas de deslizamiento se activan, contribuyendo al endurecimiento del cristal. Una característica muy importante de esta etapa es que el proceso es a térmico.

iv) Conforme la deformación plástica proceda, los esfuerzos internos y la activación térmica promueven el reagrupamiento de las dislocaciones en subgranos, cuya formación minimiza la energía interna del cristal. En este punto, las dislocaciones se halla tan

próximas unas a otros, que se activan procesos de aniquilación térmicamente activados, dando lugar a un decremento en la velocidad de endurecimiento. Esta etapa III también se conoce como la etapa de endurecimiento parabólico.

Visto ya el comportamiento de monocristales, podemos fácilmente describir el comportamiento de los policristales: i) Dado que la etapa I es característica del deslizamiento en un único sistema primario de deslizamiento, esta etapa no existe en policristales, donde para mantener la continuidad del cristal se requiere deslizamiento en por lo menos cinco sistemas independientes.

ii) Salvo excepciones como el cobre, generalmente la etapa II no muestra un endurecimiento lineal. Diversos autores proponen distinguir esta etapa de la III en términos de la activación térmica, i. e. la etapa es independiente de la temperatura y de la velocidad de deformación, mientras que la etapa III no lo es.

El endurecimiento se produce por el incremento en la tensión de línea de la dislocación, y por el incremento de los esfuerzos internos.

### 2.8.3 CURVA DE TERMOFLUENCIA

La termofluencia presenta cuatro etapas características mostradas en la figura 2.11.

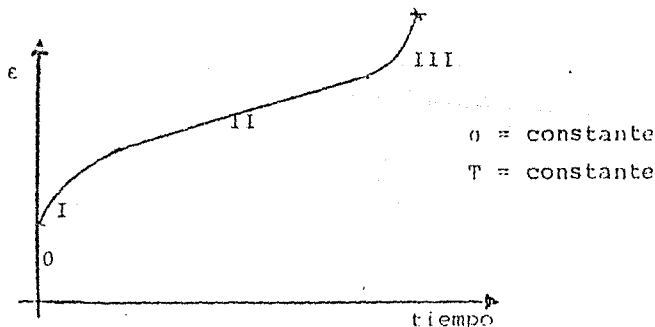


figura 2.11 : Etapas características de la termofluencia.

i) La etapa 0 es la etapa de carga del esfuerzo. La deformación en esta etapa corresponde a la de una prueba de tensión llevada hasta el esfuerzo de referencia.

ii) En la etapa I, conocida como primaria o transitoria, se efectúa el reordenamiento de las dislocaciones en celdas y subgranos. Al material se le aplica un esfuerzo superior al de cedencia, luego se deforma plásticamente, lo que va a ocasionar un incremento en la densidad de dislocaciones y, por ende, un endurecimiento.

La formación de subgranos corresponde a una reacción propia del material para reducir su energía interna y para hacerse más resistente a la deformación. Lo anterior se manifiesta en una reducción en la velocidad de deformación. En sí mismo, este proceso no es un mecanismo de endurecimiento propiamente dicho, ya que el flujo plástico no cesa, sino que es un mecanismo de auto defensa del material para hacerse más resistente al flujo plástico.

iii) Una vez que el material ha formado su microestructura de dislocaciones (dicha microestructura depende del esfuerzo y no de la temperatura pero, sin embargo, el tiempo requerido para obtener dicha microestructura sí depende de la temperatura, por lo que se pone de manifiesto su naturaleza térmicamente activada), se alcanza una velocidad de deformación constante característica del material, del esfuerzo y de la temperatura. Debido a la activación térmica, las dislocaciones van a empezar a ocupar mecanismos (escalamiento a altas temperaturas y deslizamiento cruzado a bajas) para liberar sus componentes ancladas en la red de cada cristal. Estos procesos van a ocasionar un "ablandamiento" del metal, el cual va a responder deformándose hasta restablecer la densidad de dislocaciones propia del esfuerzo aplicado, llegando a un equilibrio entre "ablandamiento" y endurecimiento, mostrando finalmente un régimen estacionario llamado termofluencia caracterizado por una velocidad de deformación constante .

Esta etapa II se conoce como secundaria o de estado estacionario. La característica principal de esta etapa es que la velocidad de termofluencia obtiene su valor mínimo i. e. un material sujeto a dicho estado de esfuerzos y temperatura, por lo menos se va a deformar a dicha velocidad de estado estacionario.

iv) Conforme la deformación procede, se nuclean microcavidades y estas originan un cambio en el patrón de deformación en la etapa terciaria, o de fractura. Las microcavidades crecen por procesos también térmicamente activados y, al coalescer, originan la fractura del material.

## REFERENCIAS CAPITULO DOS

- 1.-Secretaría de energía, minas e industria p. estatal.  
'Programa nacional de energéticos 1984-1990'.  
Primera edición: agosto de 1984.
- 2.-Gerencia de generación y transmisión C.F.E.  
Instructivo del generador de vapor Mitsubishi U-3,4.  
Central termoelectrónica Manzanillo.
- 3.-Horse F.T., Centrales Eléctricas .  
C.E.C.S.A. Capítulos:1,4 y 7
- 4.-Fuentes S.F., Ley K.M., Chacón N.J., Reyes C.F.  
Análisis preventivo de fallas en materiales de caldera,  
Reporte final, 1987.
- 5.-Fuentes S.F., Ley K.M., Chacón N.J., Reyes C.F.  
Desarrollo de un sistema de tipificación y registro de  
fallas de materiales en C.T.E. Reporte final, 1987.
- 6.-Avner S. H. Introducción a la Metalurgia Física.  
Mc.Graw Hill, Capítulo 7 pp.234-251.1966
- 7.-Ibid; Cap.9 p.352
- 8.-ASME Code for Boiler and Pressure Vessels,  
Section I, PWT-10, p 27.2.1, 1980.
- 9.-Martínez V. A., et. al. La corrosión en alta temperatura  
y su efecto en los materiales. Gestión Tecnológica no. 3.  
Mayo 1986.
- 10.-Fuentes S.R. Termofluencia en generadores de vapor.  
Memoria del IV encuentro de investigación metalúrgica.  
1982.
- 11.-Hayden W., Moffatt W.G., Wolff J.  
Propiedades Mecánicas, Limusa-Wiley, Cap.5, 1968.

## CAPITULO III

### MODELACION EN COMPUTADORA DE UN GENERADOR DE VAPOR

### 3.1 INTRODUCCION

Cuando creamos un modelo de algo, creamos un sustituto de esa cosa (una representación). Lo modelamos en la forma más conveniente, la más fácil de usar y analizar. Si el modelo es bueno, responderá a nuestros procedimientos y cuestionamientos en la misma forma que lo haría el original. Al modelar un objeto tratamos de abstraer solo la información esencial para nuestros objetivos, mientras ignoramos la restante. De tal manera que el detalle requerido en un modelo, lo determinará el uso y las operaciones a las que deseamos someterlo[1].

En base a lo expuesto anteriormente, tenemos que establecer los objetivos que motivaron la creación del modelo.

La idea fué tener un medio que permitiera la fácil recuperación, manipulación, modificación y comunicación de la información de diseño del generador U-3,4 Mitsubishi de Manzanillo, a la vez que pudiera ayudar a modelar el conjunto de procesos físicos de transferencia de calor que ocurren en él y, de esta forma, establecer el ambiente físico en el que trabaja cada componente metálica de tubería del generador de vapor.

Para lograr lo anterior se ideó un modelo gráfico por computadora, en base a las modernas técnicas de graficación interactiva.

La razón de utilizar un modelo gráfico reside en nuestro bien desarrollado mecanismo de reconocimiento ojo-cerebro orientado bidimensional y tridimensionalmente, que nos permite percibir y procesar muchos tipos de datos muy rápida y eficientemente, si los datos son presentados gráficamente. De hecho, en muchos procesos de diseño, implementación y construcción, los dibujos son virtualmente indispensables para visualizar y comunicar información.

En la graficación por computadora interactiva, el usuario controla dinámicamente el contenido, formato, tamaño o color de los dibujos sobre una pantalla de despliegue, por medio de dispositivos de interacción tales como tableros, palancas, ratones o joystick. De esta manera la manipulación interactiva del modelo aprovechó las cualidades humanas anteriormente mencionadas y la capacidades de procesamiento de la computadora para lograr un seguimiento puntual de más de 100 Km de tubería, tanto en características de diseño como en operación.

El hardware y software usado, y sus interacciones se pueden resumir en el siguiente esquema.



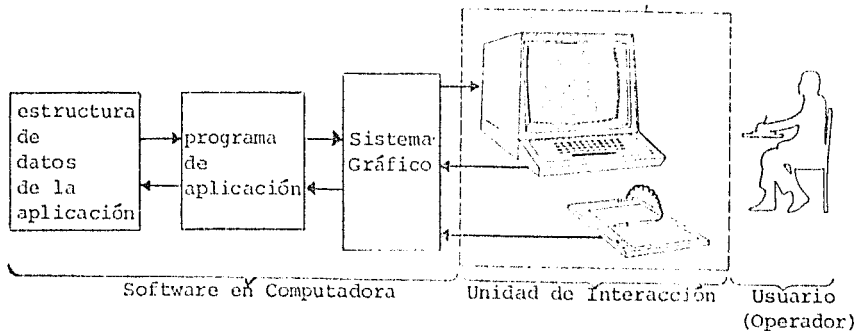


FIGURA 3.1 Modelo del Programador de Gráficas Interactivas

De acuerdo a la figura 3.1, las componentes de hardware usadas fueron una mini-computadora Vax-11/730, que controla una unidad de interacción. Esta a su vez consiste de una componente de salida (la pantalla de despliegue de una terminal gráfica VS-11 Digital, sobre la que los dibujos son mostrados) y una componente de entrada, que consistió de dos dispositivos lógicos, los cuales controlan un tablero de VI-100 para meter textos y un dispositivo localizador (Tableta digitalizadora IB-Sumagraphics y ratón con 4 botones) para encontrar las coordenadas, en un espacio previamente definido, de un punto señalado con el ratón.

El software consistió de tres componentes:

a) Sistema gráfico: Paquete gráfico PAGRA, desarrollado en el instituto de Investigaciones Electricas[2].

b) Programa de aplicación: Paquete de subrutinas (en Fortran) de despliegue desarrollado en el trabajo de esta tesis para implementar el modelo gráfico del Generador de Vapor[3].

c) Estructura de datos de la aplicación: Archivo gráfico generado durante el desarrollo de este modelo.

Descripción funcional de la figura 3.1.- El programa de aplicación, por el momento, solo puede extraer datos del archivo gráfico. Los datos permitirán desplegar dibujos, en la componente de salida de la unidad de interacción, que contienen la información solicitada por el usuario a través de la componente de entrada de la unidad de interacción.

Como mediador entre el programa de aplicación y la unidad de interacción, está el sistema gráfico. Esto evita que el programador de la aplicación tenga que aprender muchas condiciones y parámetros dependientes del dispositivo, así también evita la necesidad de conocer la arquitectura específica de bajo nivel del procesador de despliegue y el sistema coordinado XY de la pantalla física. Esto es lo que permite decir que el paquete Pagra es un sistema gráfico de uso general e independiente del dispositivo de salida.

Mientras que el trazo del dibujo es controlado por las rutinas de salida del sistema gráfico (parte pasivo del paquete), la entrada es controlada por las rutinas correspondientes que pisan los datos de entrada proporcionados por el usuario al programa de aplicación como parte de una secuencia de interacción (parte interactiva). Alternativamente, el programa de aplicación se puede poner a dormir después de haber preguntado (proceso asíncrono). Una rutina de entrada lo despertará cuando un dispositivo de entrada que genera interrupción, tal como un tablero o ratón, es activado por el usuario[4].

Ahora hagamos una breve descripción del modelo. El modelo conceptualizó las líneas de tubería de cada banco como las trayectorias de sus centros en el espacio tridimensional, que van del cabesal de entrada al de salida, siguiendo el flujo de agua o vapor que transportan. El resultado de aplicar esta idea, dió origen a un archivo en computadora de coordenadas y especificaciones de diseño de cada banco (archivo gráfico), un programa de captura de información gráfica y otro de despliegue gráfico.

### 3.2 ARCHIVO GRAFICO DE CADA BANCO

La información de diseño del generador de vapor comprende la disposición espacial relativa de cada segmento de tubería (geometría), el sentido de flujo del vapor o agua, material, espesor y diámetro.

El tipo de información de diseño disponible son planos de cada banco donde puede verse una proyección lateral plana con señalamientos de especificaciones de materiales a lo largo de cada línea de tubería. En las proyecciones se observa únicamente la geometría plana lateral, por conveniencia plano XY, de manera que los tubos de diferentes hiladas (diferente Z) pueden encimarse en una sola línea de tubería de la proyección.

#### 3.2.1 DETERMINACION DE LOS PUNTOS IMPORTANTES

El archivo gráfico fue diseñado de manera tal que pudiera reproducir las proyecciones de las líneas de tubería incluyendo, además, información de la coordenada Z y los señalamientos de especificaciones. Para ello primeramente se determinó los puntos relacionados con la geometría plana de la proyección. Esto se hizo prolongando los tramos rectos antes y después de una curva (con un

lapiz). Los puntos de intersección así encontrados junto con los puntos extremos de cada línea, determinaron los segmentos rectos (o simplemente segmentos) que componen cada línea.

Para incluir las demás características de diseño, se determinaron en el plano los puntos donde ocurría cambio de espesor, material, diámetro externo y dirección de la tubería debido a la tercera coordenada (Z). De esta manera se generaron más segmentos que se agregaban a los anteriores y, al final, cada segmento estaría determinado por la siguiente lista de características.

TABLA I

- a) Coordenada X del punto inicial del segmento
- b) " " Y " " "
- c) " " Z " " "
- d) Material del segmento
- e) Espesor del segmento
- f) diámetro exterior del segmento

La figura 3.2 muestra dos vistas de la misma línea de un banco, en ella los puntos que determinan los segmentos (24 puntos), se señalan con cruces.

En una vista se resalta con colores un cambio de material y en otra un cambio de espesor del tubo. Notese que los puntos sirven tanto para describir la geometría plana, como para denotar cambio de algunas de las especificaciones de la tabla I.

### 3.2.2 ARREGLO BASICO DE TUBERIA

Un arreglo de tubería de un banco consta de más de las cinco líneas mostradas en la figura 3.2. Las restantes como se dijo son parecidas a algunas de ellas y se pueden generar por traslaciones de las mismas en la dirección Z. Esto es el caso más sencillo que se presenta. En general, se determina un arreglo básico de líneas de tubería, capaz de generar todo el banco a través de traslaciones y reflexiones periódicas de sus elementos (a manera semejante como un cristal se genera a partir de traslaciones periódicas, en todo el espacio, de una celda unitaria).

Un caso más complicado se muestra en la figura 3.3 donde se necesitó un arreglo básico de 12 líneas, a las cuales se les aplicó traslaciones y reflexiones para generar todo el banco. Esto debido, como se muestra, a que cada línea no está completamente contenida en un plano  $x=cte$ .

La figura 3.3 muestra la manera en que el recalentador de baja temperatura, usa de un arreglo básico de 3 hileras x 4 camas a otro de 2 hileras x 6 camas en el recalentador de alta temperatura. Este arreglo básico de tubos, sufre una reflexión para generar el conjunto de 12 tubos adyacentes, dando lugar a un paquete de 24 tubos que se repite 18 veces en la dirección Z, para reproducir el

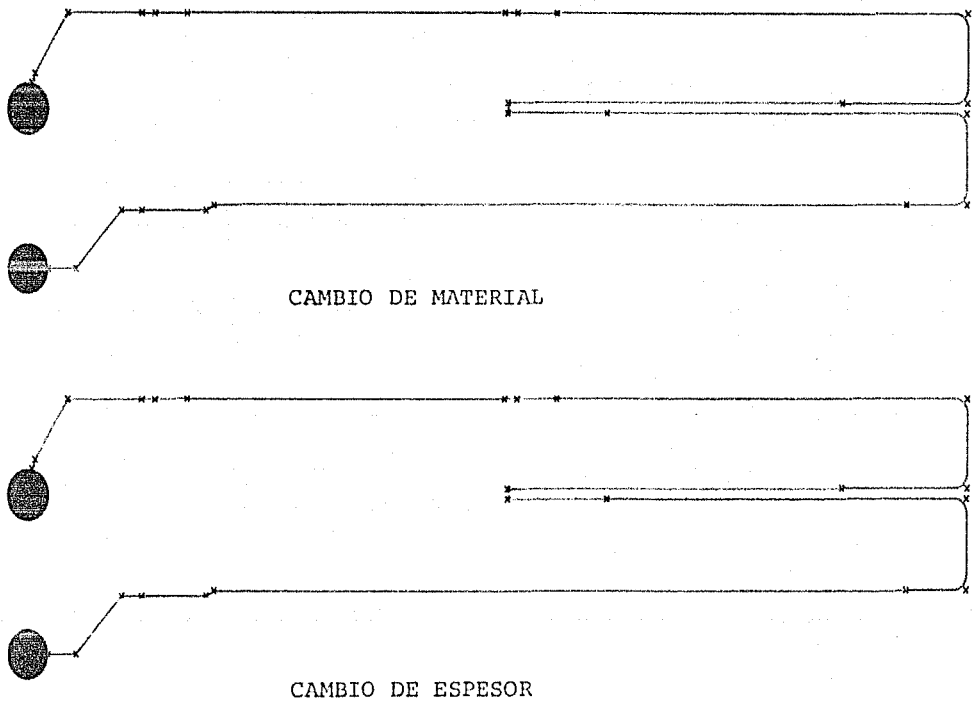
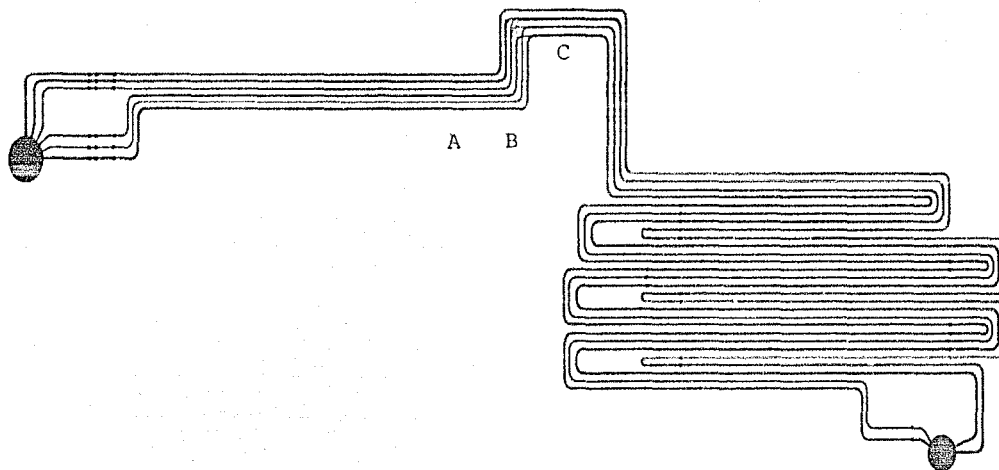


FIGURA 3.2 PUNTOS QUE DETERMINAN UNA LINEA DEL SC DE INTERMEDIA.

VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR ARREGLO BASICO

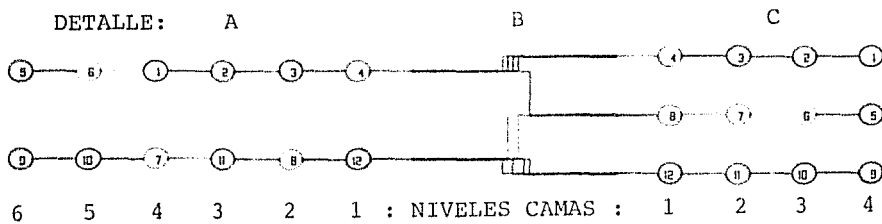


Figura 3.3 RECALENTADOR ALTA/BAJA.

arreglo total del banco, que consta de 18X24=432 líneas de tubería.

Para disponer de información del banco completo se construyó el archivo gráfico llevando un seguimiento de los conceptos de la tabla I en cada línea del arreglo básico, agregando posteriormente información del número de veces que se repite cada línea, periodo de repetición en Z de cada línea, tipo de simetría que presenta el banco y por último cuando hay reflexiones la posición del plano de reflexión.

### 3.3 CAPTURA DE LA INFORMACION DEL ARCHIVO GRAFICO

La información de la geometría y especificaciones de cada banco fué obtenida del plano global del generador de vapor, de planos de detalle del mismo y de observaciones directas en planta. Combinando estas tres fuentes y utilizando los recursos adecuados de cómputo, se pudo generar el archivo gráfico de cada banco (tabla 3.1).

#### 3.3.1 CAPTURA DE LAS COORDENADAS PLANAS(XY) DE LOS PUNTOS IMPORTANTES DE UN BANCO

Después de la determinación de los puntos a capturar en la sección 3.2 se procedió a obtener sus coordenadas planas X y Y con un dispositivo de entrada gráfica (tableta digitalizadora con ratón, figura 3.4) controlada desde un programa interactivo de captura.

El programa de captura fué diseñado de manera que al señalar un punto con el ratón y apretar un botón de éste, se registraban las coordenadas del punto relativas a un sistema coordenado previamente establecido.

El sistema coordenado del dibujo se estableció al empezar el programa cuando éste nos pedía la localización de tres puntos no colineales con sus coordenadas. Como el dispositivo de entrada gráfica maneja sus propias coordenadas relativas, cada uno de los tres puntos señalados tiene asociado dos pares de coordenadas (las del dibujo y las del dispositivo). Por otra parte, con estos tres puntos en cada sistema coordenado, se puede construir dos bases vectoriales, de manera que relacionando ambas bases se pudo establecer la correspondencia de unas coordenadas a las otras.

Una vez establecidas las coordenadas del dibujo, el programa pide el tipo de curva que se va a capturar (figura 3.5)

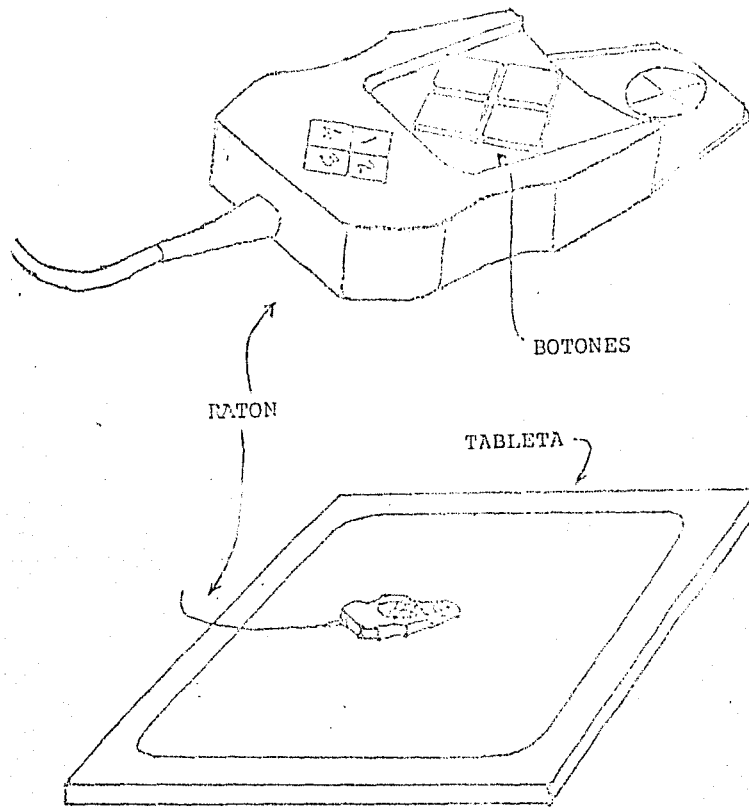


FIGURA 3.4

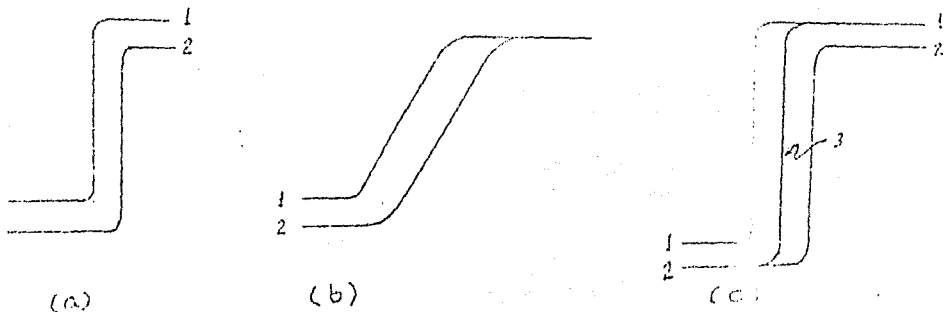


Figura 3.5 Tipo de líneas que forma el menú del programa de captura

- a) Líneas que no tiene segmentos comunes con las previamente capturadas
- b) Línea que tiene segmentos comunes a una previamente capturada
- c) Línea que se forma de segmentos de dos líneas previamente capturadas

Nota: recuerdese que en los segmentos comunes las líneas tienen Z diferente.

De esta forma el programa se prepara para copiar automáticamente las coordenadas de los puntos comunes, evitando así la duplicación de trabajo y asegurando que realmente se está capturando los mismos puntos (esto permite que en el despliegue gráfico las líneas coincidan perfectamente y no difieran ligeramente dando lugar a confusiones)

Cuando el programa captura los puntos se verifica que los segmentos horizontales y los verticales realmente sean capturados como tales, ya que debido al muestreo con el ratón se incurre en ligeras fluctuaciones en sus coordenadas que luego al desplegar las gráficas en pantalla dan origen a un efecto indeseable de escalón sobre dichos segmentos. Además durante la verificación de estos se realiza un promedio sobre la coordenada que flutua para tener un valor más representativo de ella.

### 3.3.2 CAPTURA DE LA INFORMACION COMPLEMENTARIA DEL ARCHIVO GRAFICO



Con el programa anterior únicamente se capturo las coordenadas X y Y de todos los segmentos de todas las líneas del arreglo básico, quedando pendientes los demás conceptos de la tabla 1. Para incorporar estos se tuvo que hacer otro programa, que leyendo cada uno de los puntos anteriores, pidiera la información faltante para crear un nuevo archivo con la información completa. Además al principio, el programa registraba en el archivo gráfico la información necesaria del arreglo básico.

### 3.4 DESPLIEGUE GRAFICO

La información que se vierte aquí trata de la forma como se ocupó el archivo gráfico para reconstruir la apariencia original de cada banco. Así como también la manera como se manipula la información de tal archivo para recuperar gráfica e interactivamente la geometría tridimensional y el diseño.

#### 3.4.1 DESPLIEGUE GRAFICO DE UN BANCO

Como se observa en la figura 3.6 la proyección plana de un banco puede descomponerse como una sucesión de tramos rectos con una curva de amplitud variable.

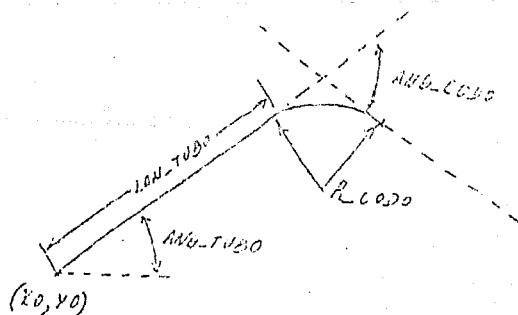


FIGURA 3.6 UNIDADES GEOMETRICAS BASICAS TUBO\_CODO

Esta unidad geométrica es la clave para generar todo el dibujo anterior. Teniendo una rutina que la genere en cualquier punto  $(x_0, y_0)$ , con cualquier orientación ( $ang_{tubo}$ ), con longitud de tubo variable ( $lon_{tubo}$ ), el radio de curvatura del codo

ajustable (radio) y el tamaño de la curva variable (angcodo), podríamos hacer invocaciones sucesivas de ella dándole la información necesario en cada momento, para trazar así una serie de tubos y codos que forman una línea de tubería. Esto es exactamente lo que hace la rutina

TUBOCODO (X0,Y0,ANGTUBO,LONTUBO,RCODO,ANGCODO)

donde los argumentos corresponden a los conceptos previamente referidos ver figura 3.6

Esta rutina tiene además la capacidad de ensamblar las unidades geométricas de manera que la línea generada resulte continua y suave. El trazo de los dibujos lo controló el sistema gráfico, que permitía trazar segmentos de recta tan pequeños como se desearan. De esta forma se pudo dibujar el tubo representado por un segmento y el codo simulado por una serie de segmentos lo suficientemente pequeños para dar la apariencia de continuidad.

El ensamble de unidades geométricas tubocodo se controló desde la rutina

SUAVIZALINEA(NPTOS,X,Y,FUNCION,AUXCAMB) donde

X(NPTOS), Y(NPTOS) son las coordenadas de los puntos que definen la poligonal.

FUNCION nos permite elegir si el control de colores se realiza desde afuera de la rutina, o desde la rutina misma a través del arreglo AUXCAMB(NPTOS).

Esta rutina adapta las unidades geométricas tubocodo a lo largo de la línea poligonal X(NPTOS), Y(NPTOS). Para ello la rutina calcula previamente los valores de los parámetros de tubocodo necesarios al momento de invocarla.

Diagrama de flujo :

LEE INFORMACION DE TODA LA LINEA

↓

↓

CALCULA LA LONGITUD DEL PRIMER SEGMENTO L1

↓

↓

DO I=1, NPTOS-2

↓

↓

↓

CALCULO DE LAS LONGITUDES DE CADA SEGMENTO QUE COMPONE LA LINEA : Li

↓

↓

CALCULA LOS ANGULOS ENTRE SEGMENTOS SUCESIVOS: Ai

↓

↓

DO I=1, NPTOS-1

↓

↓

CALCULA LOS DECREMENTOS DE LONGITUD DE LOS SEGMENTOS CONTIGUOS QUE FORMAN CADA ANGULO:  $D_i$  y  $D_{i+1}$

↓

↓

CALCULO DE LA NUEVA LONGITUD DE CADA SEGMENTO, DESCONTANDO LA PARTE CURVA  $L_i - D_i$

↓

↓

TRAZA EL DIBUJO: TUBOCODO

↓

### 3.4.2 DESPLIEGUE GRAFICO PARA RECUPERAR INFORMACION TRIDIMENSIONAL DEL BANCO

Como se mencionó en la introducción, el archivo gráfico contiene la información necesaria para reconstruir el arreglo tridimensional de tubería de cada banco. Para explicar como se usó, relataremos el protocolo de uno de las rutinas del programa de despliegue llamada CORTE.

La idea que se maneja en esta subrutina fué tener la posibilidad de posicionarse en un punto cualquiera del arreglo tridimensional, de un banco cualquiera, para recuperar información

de diseño y hacer estimaciones de las condiciones de operación.

El uso de los recursos gráficos interactivos fué fundamental. Entre ellos está la posibilidad de dividir el dibujo en unidades independientes llamadas segmentos (del paquete gráfico; no confundirlos con los segmentos de cada línea). Estos pueden crearse previamente o al momento de ocuparlos. Una vez creados, se pueden destruir si se desea. También se puede controlar su visibilidad en la pantalla (apagarlos o prenderlos).

Al empezar el protocolo de la rutina mencionada, el programa pide se seleccione un banco. Este banco ha sido previamente creado y, por lo tanto, simplemente se prenderá el segmento correspondiente (ver fig. 3.7). Después el programa pide que se señale un punto del plano de corte que dividirá en dos al arreglo de tubería del banco seleccionado. Esto se hace interactivamente a través del ratón, controlado por la rutina localizadora.

A continuación el programa busca en el archivo gráfico la información del banco seleccionado, que junto con la coordenada X (cortas verticales) del punto anteriormente encontrado con el ratón, servirá para calcular las intersecciones de las líneas de tubería, con el plano de corte. Hay que aclarar aquí, que como únicamente se tiene codificada, en el archivo gráfico, la información del arreglo básico, serán las intersecciones de éste las que se encontrarán primero, y después, usando la información del tipo de simetría que tiene el banco, a través de reflexiones y translaciones de las intersecciones básicas, se generará la totalidad de intersecciones del banco con el plano de corte.

En el momento de calcular las intersecciones básicas se lleva un contador de estos, que permite a través de arreglos establecer la asociación entre orden de intersección y características de diseño (material, diámetro y espesor). Esto será de utilidad posteriormente, ya que permitirá realizar búsquedas en términos del contador de intersecciones e inmediatamente después, con los arreglos mencionados, determinar las características de diseño.

Las intersecciones calculadas serán mostradas gráficamente en un plano ZY, abajo del diagrama del banco, para lo cual se crea un segmento, el cual contiene una matriz de puntos de diversos colores. La repetición de colores en sentido ascendente corresponderá a las sucesivas intersecciones de una misma línea con el plano de corte. La repetición de un patrón de colores de izquierda a derecha corresponderá, el primero, a las intersecciones del arreglo básico, y los siguientes, a sus translaciones y reflexiones de aquellos, resaltando de esta manera la idea del arreglo básico como generador del arreglo total.

El siguiente paso, en el protocolo de la rutina, es seleccionar con el ratón un punto de la matriz anterior, para de esta forma completar el posicionamiento tridimensional (la coordenada X se



determinó con el plano de corte y las coordenadas Z y V, se determinan en esta consola).

Una vez seleccionado un punto se realiza una búsqueda de las características de diseño correspondientes, usando para ello, como se dijo anteriormente, el contador de intersecciones. La información encontrada será desplegada en una tabla junto con un perfil a escala del tubo seleccionado, cada elemento de la figura 3.7 será almacenada en un segmento por separado.

En la tabla aparece información adicional que especifica las condiciones físicas de operación en ese punto (temperatura de gases de combustión, temperatura de vapor, presión de vapor, temperatura media de metal y velocidad de corrosión. Ver figura 3.7). Los cuales resultan de una modelación [3] que utiliza la información de diseño para determinar la distribución de las variables mencionadas como se muestra en la figura (3.7); en tanto que la velocidad de corrosión ha sido estimada de mediciones de espesores [5]. Estos datos se ocuparon para hacer los interpolaciones al punto en cuestión y llenar de esta manera la tabla anterior. Para esto se calcularon las longitudes de la línea de tubería y se computó las caídas de presión por curvas hasta el punto señalado.

### 3.5 DISCUSION DE RESULTADOS

Se ha desarrollado un sistema computacional que permite capturar y recuperar información de diseño a detalle de un generador de vapor. además, enlucado con un programa de modelación térmica, permite hacer estimaciones de las condiciones de operación en cada punto de la tubería.

En los siguientes capítulos se explorara la forma de modelar el comportamiento de la tubería de un generador de vapor, para posteriormente tratar de hacer estimaciones de tiempo de vida residual. El modelo resultante se codificará en una subrutina que será acoplada al programa de despliegue, de manera que ocupe las condiciones de operación calculadas por éste, para hacer la estimación de la vida residual del punto señalado.

## REFERENCIAS CAPITULO TRES

- 1.-Mortenson M.E. Geometric Modeling. John Wiley and Sons (1985)
- 2.-Leon L.G. Paquete Gráfico (PAGRA). Instituto de Investigaciones Eléctricas (1983).
- 3.-Fuentes S.R.,Ley K.M.,Reyes C.F.,Chacón N.J. Desarrollo de un sistema de tipificación y registro de fallas en Materiales de CTE'S. Reporte final (1987).
- 4.-Foley J.R. Fundamentals of Interactive Computer Graphics. Addison-Wesley (1982)
- 5.-Fuentes S.R.,Ley K.M.,Chacón N.,J.,Reyes C.F. Análisis Preventivo de Fallas en Materiales de Caldera.Reporte final(1987).

## CAPITULO IV

### MODELO TERMO-ELASTOPLASTICO PARA EL ANALISIS DE ESFUERZOS EN TUBERIA



## 4.1 ELASTICIDAD

En éste capítulo se estudia el comportamiento termomecánico de los componentes metálicos de un generador de vapor, específicamente aquellos en cuyos fallos predomina la tracción (tubaría de sobrecalentador, recalentador y pared de agua).

Para el estudio macroscópico de estos componentes, se puede considerar al material de que están compuestos, como un medio continuo, homogéneo e isotrópico.

La experiencia demuestra que los materiales sólidos pueden deformarse cuando se someten a fuerzas externas. Se encuentra, además, que hasta cierto punto (límite elástico), un sólido recobrará sus dimensiones originales, cuando la fuerza se elimina. Esta respuesta del material se conoce como Comportamiento Elástico.

En un gran número de materiales (como es los aceros), se encuentra una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación producida, llamada Elasticidad Lineal. En el caso uniaxial, en el que solamente se aplica una fuerza, la expresión matemática de esta relación (llamada ley de Hooke) es:

$$\sigma = E \epsilon$$

donde:

$$\sigma = \text{esfuerzo uniaxial} = \text{fuerza/área transversal}$$

$$\epsilon = \text{deformación uniaxial} = \frac{\text{cambio de longitud}}{\text{longitud original}}$$

$E$  = módulo de Young, una constante característica de cada material

La expresión de esta ley para sistemas de más de una dimensión, requiere la generalización del concepto de esfuerzo y deformación, lo cual se hace a continuación.

### 4.1.1 TENSOR DE ESFUERZOS

Para definir el tensor de esfuerzos nos ayudaremos de la figura 4.1. Ahí se muestra un cubo de volumen diferencial, encerrando cualquier punto de un medio material.

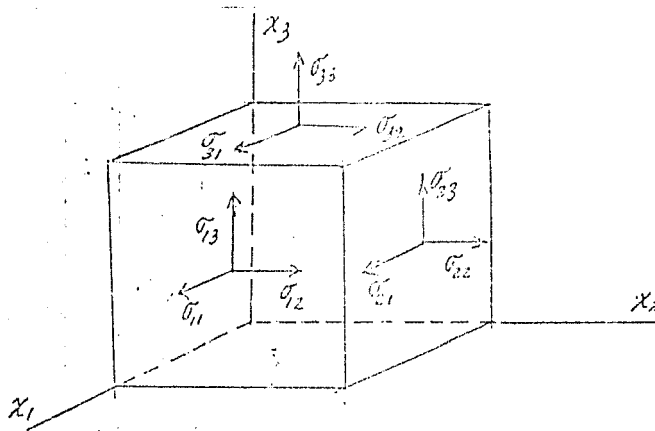


Fig. 4.1 Esfuerzos que actúan sobre un cubo unitario

elemental.  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ : esfuerzos normales;  $\sigma_{ij}$ ,

con  $i$  diferente de  $j$ : esfuerzos tangenciales

En la figura 4.1, la fuerza que actúa sobre cada cara, se ha dividido en tres componentes según los ejes cartesianos. Usando estas componentes y las áreas de las caras, definiremos las componentes del tensor de esfuerzos.

$\sigma_{ij}$  = fuerza que actúa en la dirección  $X_j$ /

área perpendicular al eje  $X_i$  [1]

#### 4.1.2 TENSOR DE DEFORMACION

La deformación se define através de las derivadas del campo vectorial de desplazamiento, que describe el cambio de forma del objeto. Este campo, resulta del mapeo que sufre la configuración original del cuerpo para llevarlo a la configuración final deformada.

Sea  $(u_1, u_2, u_3) : R^3 \rightarrow R^3$  el campo vectorial referido anteriormente.

La deformación será descrita por la expresión Lagrangiana  $E_{ij}$ , la cual podemos expresarla como:

$$e_{ij} = (1/2)(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4.1) \quad \text{donde:}$$

$u_{i,j}$  = la derivada de la componente  $u_i$  con respecto a la coordenada  $X_j$

$\epsilon_{j,i}^0$  = de igual manera, es la derivada en la dirección

$X_i$  de la componente  $\sigma_j$

La interpretación física de la componente  $\epsilon_{ij}$  del tensor de deformación se da a continuación. Para ello consideremos la figura 4.1.

$\epsilon_{ij}$ , es la deformación lineal en la dirección  $X_i$ , semejante a la deformación axial anterior.

$\epsilon_{ij}$ , con  $i$  diferente de  $j$ , está relacionado con el cambio angular  $\epsilon_{ij}$  entre dos elementos lineales diferenciales, en las direcciones  $X_i$  y  $X_j$ , originalmente en ángulo recto. Así como dos lados adyacentes de cualquiera de las caras del cubo de la figura 4.1 [2].

#### 4.1.3 LEY DE HOOK GENERALIZADA

La expresión de la ley de Hook, de esta manera, relaciona dos tensores de segundo orden. En consecuencia la constante de proporcionalidad es tensor de cuarto orden [2], llamada tensor de constantes elásticas.

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (4.2)$$

El tensor de constantes elásticas,  $c_{ijkl}$ , tiene 81 componentes, de las cuales, por consideraciones de simetría e isotropía de los cuerpos, al número se reduce a dos constantes independientes [3], a saber,  $\lambda$  constante de Lamé y  $G$  el módulo de corte, así la relación entre el tensor de esfuerzo y deformación es:

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij}$$

donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker.

La relación inversa a la anterior es:

$$\epsilon_{ij} = (1/E)[(1+\nu)\sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij}] \quad (4.3)$$

donde:

$E$  = módulo de Young

$\nu$  = razón de Poisson

Desglosando la expresión anterior:

$$\begin{aligned}
e_{11} &= (1/E) E \sigma_{11} - \nu (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \\
e_{22} &= (1/E) E \sigma_{22} - \nu (\sigma_{33} + \sigma_{11}) \\
e_{33} &= (1/E) E \sigma_{33} - \nu (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{--- (4.4)} \\
e_{12} &= (1/2G) \sigma_{12} \\
e_{13} &= (1/2G) \sigma_{13} \\
e_{23} &= (1/2G) \sigma_{23}
\end{aligned}$$

Hay que hacer notar que en este desarrollo únicamente se exhiben 6 componentes, tanto del esfuerzo como de la deformación. Esto se debe, a que como ambos tensores son simétricos ( $\sigma_{11} = \sigma_{11}, \sigma_{22} = \sigma_{22}$ ) los demás componentes quedan determinadas en términos de estas.

La relación entre las constantes elásticas anteriores y éstas es:

$$L = \nu E / (1-2\nu)(1+\nu)$$

$$G = E / 2(1+\nu)$$

#### 4.1.4 ECUACION DE EQUILIBRIO

Este es el nombre con que se conoce a la ecuación fundamental de la teoría de la Elasticidad. La cual resulta de aplicar la segunda ley de Newton a una porción cualquiera de material.

Nuestra intención se centra en la expresión de esta ecuación en coordenadas cilíndricas, que es la simetría que presenta la tubería.

Tomemos un elemento diferencial de volumen en coordenadas cilíndricas, el cual se encuentra en equilibrio, figura 4.2

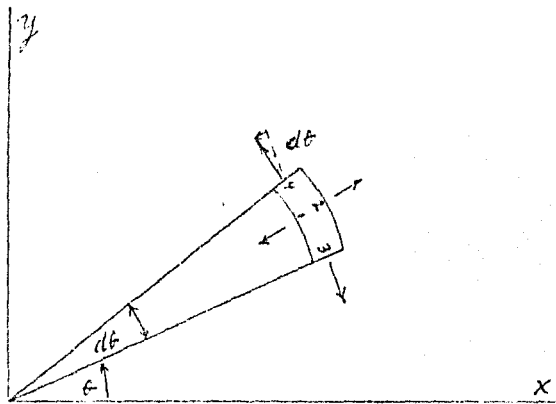


Fig. 4.2 Elemento diferencial de volumen en coordenadas cilíndricas. Su espesor es  $dz$ , que es perpendicular al plano del papel.

Haciendo un Balance de fuerzas en la dirección ' $r$ ' tenemos:

Cara	Area/ $dz$	Esfuerzo en $r$	Fuerza en $r/dz$
1	$r dt$	$\sigma_r$	$-r dt \sigma_r$
2	$(r+dr) dt$	$\sigma_r(r+dr)$	$(r+dr) dt (\sigma_r + \sigma_{r,r} dr)$
3	$dr$	0	0
4	$dr$	$\sigma_\theta (r+dr) dt$	$-dr (\sigma_\theta + \sigma_{\theta,r} dr) dt$

Sumando las fuerzas en la dirección ' $r$ ', despreciando los términos de segundo orden, en cualquier variable, tenemos:

$$r \sigma_{r,r} dr dt + \sigma_r dr dt - \sigma_\theta dr dt = 0$$

como el elemento esta en reposo igualamos a cero. Dividiendo entre  $dr dt$  y agrupando, finalmente queda:

$$\sigma_\theta = [\sigma_r]_{,r} \quad (4.5)$$

que es la ecuación de equilibrio en coordenadas cilíndricas.

#### 4.1.5 ECUACIONES DE COMPATIBILIDAD

La ecuación de equilibrio deducida anteriormente, no es suficiente para encontrar la solución de un problema elástico, se dice en este caso que es Estáticamente Indeterminado y para obtener la solución debe considerarse también la deformación elástica del cuerpo. Esto, se traduce matemáticamente en una relación disponible, más. A continuación deduciremos esa relación.

El hecho de que el tensor de deformación  $\epsilon_{ij}$  provenga de un campo de desplazamiento continuo, implica que durante la deformación, no se van a generar hoyos en el material. Asimismo, esta manera de hacer el mapeo, introduce una serie de relaciones entre las componentes del tensor de deformación, llamadas ecuaciones de compatibilidad.

Deducamos las ecuaciones de compatibilidad para el caso de simetría cilíndrica.

Tomemos un elemento diferencial de área, en coordenadas cilíndricas, figura 4.3. Como puede verse, cuando el material es uniformemente deformado en todas las direcciones radiales, el elemento no cambia de forma ( $\epsilon_{r\theta} = \epsilon_{\theta r} = \epsilon_{rz} = \epsilon_{zr} = 0$ ), únicamente de dimensiones. Esto es lo que ocurre en nuestro caso, de un tubo sometido a diferentes presiones en su interior y exterior. Sea  $(u_r, u_\theta, u_z)$ :  $R_0 \rightarrow R_0$ , el campo vectorial que describe la deformación.

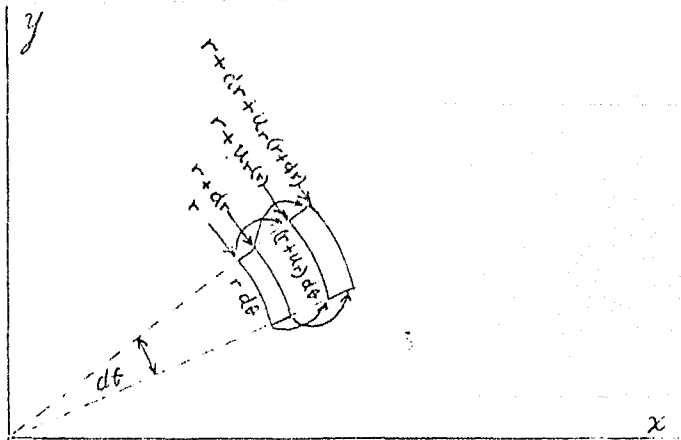


Fig. 4.3 Mapeo que experimenta un elemento diferencial de volumen, durante la deformación de un tubo.

De la definición de deformación lineal:

$$e_i = e_{ii} = \frac{\text{cambio de longitud en la dirección } x_i}{\text{longitud original}}$$

#### DIRECCION RADIAL

$$\text{longitud original} = r \, ds$$

$$\text{longitud final} = (r + u_r) \, ds$$

$$e_r = \frac{(r + u_r) \, ds - r \, ds}{r \, ds}$$

$$= \frac{u_r}{r} \quad \text{-----} \rightarrow (a)$$

#### DIRECCION TANGENCIAL

$$\text{longitud original} = dr$$

$$\text{longitud final} = r + dr + u_r(r + dr) - [r + u_r(r)]$$

$$= u_r(r) + u_{r,r} \, dr + dr - u_r(r)$$

$$= u_{r,r} \, dr + dr$$

$$e_r = \frac{u_{r,r} \, dr + dr - dr}{dr}$$

$$= u_{r,r} \quad \text{-----} \rightarrow (b)$$

#### DIRECCION AXIAL

de igual manera que el caso tangencial

$$e_z = u_{z,z}$$

Combinando (a) y (b) obtenemos:

$$e_r = [u_{r,r} + \frac{u_r}{r}] \quad \text{-----} (4.6)$$

### 4.1.6 COMPORTAMIENTO ELASTICO DE UN TUBO SOMETIDO A PRESION

#### INTERNA Y EXTERNA

Al modelar el comportamiento de la tubería, un primer intento es encontrar el estado de esfuerzos en cada punto de un tubo, cuando se encuentra sometido a diferentes presiones, interior y exterior, en el intervalo elástico (problema cuya solución se conoce, pero que

reproduciremos como introducción al modelo propuesto). Para ello, deduciremos la ecuación diferencial que gobierna, el comportamiento mecánico del tubo mencionado, figura 4.4.

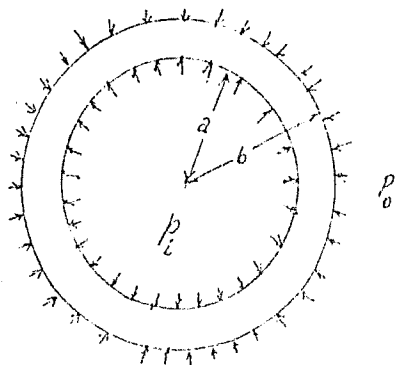


Fig. 4.4 Perfil de un tubo sometido a una diferencia de presión ..

Hay dos formas de simplificar el problema, que conducen a casos extremos: Esfuerzo Plano y Deformación Plano

**Esfuerzo Plano (Plane Stress).** -Este caso se presenta cuando una de las dimensiones del cuerpo es mucho menor que las otras, como en el caso de una placa delgada sometida a fuerzas en su plano (eje X y eje Y). En este caso, no habrá esfuerzos actuando perpendicularmente a la superficie de la placa ( $\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ ). El sistema de esfuerzos consistirá de dos normales  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  y uno de corte  $\sigma_{xy}$

Esta situación se presenta en un tubo, solo cuando el espesor es muy delgado y no está sometido a presiones, por consiguiente no será considerada.

**Deformación Plano (Plane Strain).** -Este otro extremo se presenta, cuando las dimensiones del cuerpo, en la dirección Z, por ejemplo, son muy grandes. El cuerpo debe ser prismático, sometido a fuerzas que son perpendiculares a su eje y no varían a lo largo de él (en este caso cae nuestro problema). En esta forma todas las secciones transversales están en la misma condición (el estado de esfuerzos es independiente de Z y únicamente dependen de "r" y "a"). La simplificación adicional que se hace normalmente, es que los extremos están fijos y, por lo tanto, en cualquier sección transversal  $\epsilon_z = 0$



Como se vió anteriormente, los elementos de volumen no cambian de forma por lo tanto  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ . En base a esta consideración las ecs (4.4) quedan de la siguiente forma:

$$e_r = (1/2G)[(1-\nu)\sigma_r - \nu\sigma_\theta] \quad (c)$$

$$e_\theta = (1/2G)[(1-\nu)\sigma_\theta - \nu\sigma_r] \quad (d)$$

Sustituyendo (4.5) en (c) y en (d), se tiene  $e_r$  y  $e_\theta$  en términos de  $\sigma_r$  únicamente. A su vez sustituyendo estas expresiones en (4.6) obtenemos la siguiente ecuación diferencial para  $\sigma_r$ :

$$\sigma_{r,rr} + (3/r)\sigma_{r,r} = 0$$

La cual debe cumplir las condiciones a la frontera

$$\sigma_r(r=a) = -p_i$$

$$\sigma_r(r=b) = -p_o$$

La solución es:

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{p_i a^2 - p_o b^2}{b^2 - a^2}$$

y de 4.5 se encuentra la componente tangencial:

$$\sigma_{\theta} = - \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{p_i a^2 - p_o b^2}{b^2 - a^2}$$

Tomemos valores típicos de tubería de un sobrecalentador:

$$p_i = 170 \text{ Kg/cm}^2$$

$$p_o = 1 \text{ Kg/cm}^2$$

$$a = 2 \text{ cm}$$

$$b = 3 \text{ cm}$$

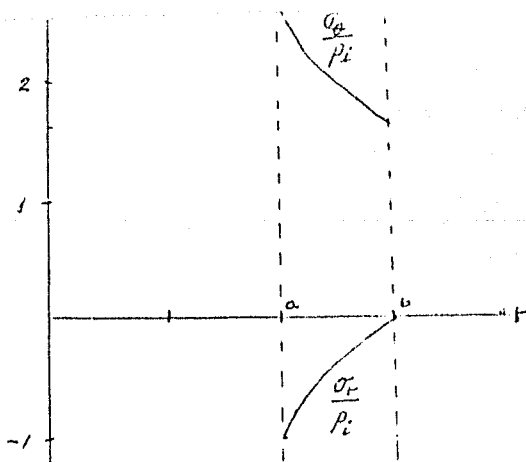


Fig. 4.5 Distribución de esfuerzos a lo largo de la distancia radial de un tubo sometido a una diferencia de presiones.

Como puede verse (figura 4.5)  $\sigma_{\theta}$  siempre es compresivo ( $\sigma < 0$ ) y  $\sigma_r$  es tensivo ( $\sigma > 0$ ). Este último es máximo en la superficie interior del cilindro y representa el máximo esfuerzo del material, para evitar que el tubo se abra y falle.

## 4.2 PLASTICIDAD

Un material, en una prueba de tensión, cuando es sometido a esfuerzos más allá del límite elástico, sufre deformación permanente o plástica. Así el material pasa a un nuevo régimen físico gobernado por ecuaciones y fenómenos diferentes.

En esta sección se expone una serie de conceptos que permiten abordar este tema, de manera semi-empírica, con el fin de entender el modelo termo-elastoplástico de tubería.

### 4.2.1 COMPONENTES HIDROSTATICA Y DESVIADORA DEL TENSOR DE ESFUERZOS

Consideremos la figura 4.6. En ella se muestra un grupo de planos compactos, interceptados por un elemento de volumen. Como puede verse en (a), los esfuerzos de corte, de magnitud adecuada, producirán un desplazamiento entre planos compactos (que se ve facilitado, como se vió, por la presencia de dislocaciones, dando origen a deformación plástica).

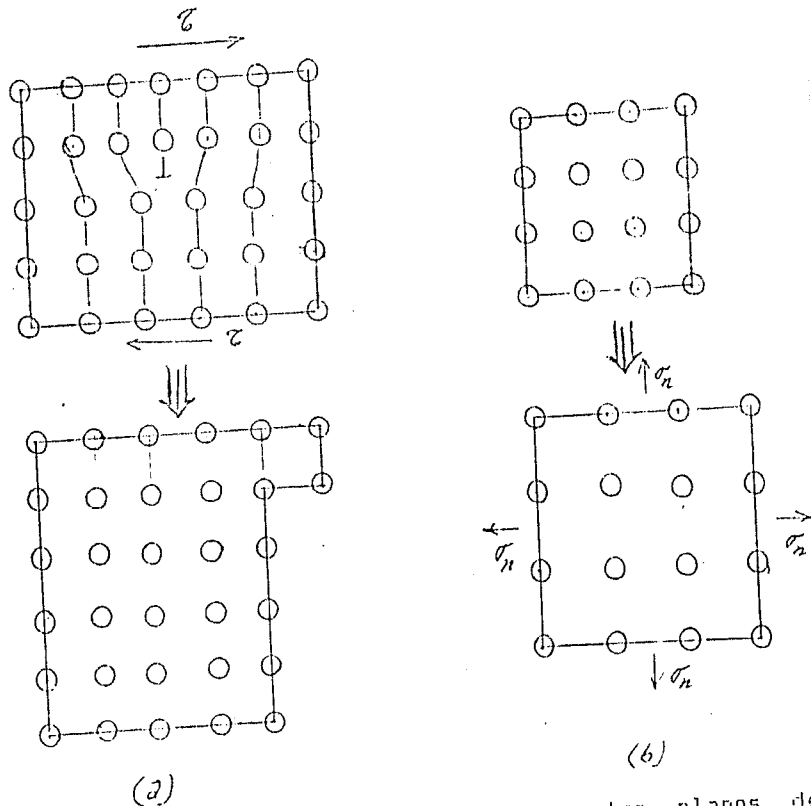


Fig. 4.6 Elementos de volumen, que interceptan planos de átomos, sometidos a diferentes estados de esfuerzo: (a) tangencial puro (b) normales iguales. El efecto que producen varía en cada caso.

En (b), los esfuerzos normales iguales de baja intensidad, (o el promedio en el caso de que sean diferentes), tienden a alargar o acortar las distancias interatómicas, es decir, dilatar ( $\sigma_n > 0$ ) o comprimir ( $\sigma_n < 0$ ) el volumen del elemento. Sin embargo no hay desplazamiento relativo. En el caso de que los esfuerzos normales fueran muy altos, podrían hacer crecer las cavidades del material ( $\sigma_n > 0$ ) o cerrarlas ( $\sigma_n < 0$ ), si es que tiene.

De esta manera podemos dividir al tensor de esfuerzos, de acuerdo al efecto que produce[43].

Componente esférica o hidrostática del tensor de esfuerzo:

$$\sigma_m \delta_{ij}$$

donde  $\sigma_m = (1/3)\sigma_{ii}$ , es el promedio de los esfuerzos normales.

Como se vió anteriormente, para los intervalos de esfuerzo, en operación de la tubería, esta componente únicamente producirá deformación volumétrica elástica.

Componente desviadora del tensor de esfuerzo:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad \text{---(4.7)}$$

Como puede verse, esta expresión elimina de la diagonal el esfuerzo medio, dejando únicamente la parte de la componente normal que produce deformación plástica. Así, la componente desviadora, es la fuerza motriz de la deformación plástica, por lo tanto, cualquier cantidad que involucre deformación plástica, la debe contener.

#### 4.2.2 ESFUERZO EQUIVALENTE O EFICAZ

Establece una relación de equivalencia, en el espacio de estados de esfuerzo del material. Por una parte, esta relación permitirá comparar sistemas de esfuerzo completamente disímiles, como sería el caso de un ensayo de tensión con un ensayo de torsión. Por otra parte, en un mismo sistema, permite comparar estados de esfuerzo elástico, plástico, y plásticos incipientes (criterios de cedencia).

La capacidad de relacionar diferentes tipos de prueba, se aprovecha al momento de generalizar algún resultado experimental uniaxial (por ejemplo), al caso real tridimensional, usando el esfuerzo equivalente[5].

Definimos el esfuerzo equivalente como:

$$\sigma_e = \sqrt{(3/2)S_{ij}^2} \quad (4.2)$$

Este esfuerzo es proporcional al segundo invariante del tensor de esfuerzos desviatoricos (4). La construcción de este esfuerzo, en términos de invariantes, es intencionada, ya que de esta forma, su valor no va depender de la orientación de los ejes coordenados.

#### 4.2.3 ECUACIONES DE PRANDTL-REUSS

En la región plástica, las deformaciones en general, no están unívocamente determinadas por los esfuerzos, sino dependen de la historia completa de la aplicación de la fuerza. Por consiguiente en plasticidad es necesario determinar los diferenciales o incrementos de deformación plástica, durante toda la trayectoria de carga, y luego obtener la deformación total[6].

Prandtl y Reuss estudiaron el comportamiento de un sólido en la región Elástica-Plástica. Para ello supusieron que el incremento de deformación total, tenía dos componentes:

$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p$$

una elástica,  $de_{ij}^e$ , dado por las ecuaciones (4.4) y otra plástica,  $de_{ij}^p$ , encontrado por von Mises años antes.

Encontramos la expresión deducida por v. Mises para el flujo plástico, en estado estacionario, dada una distribución tridimensional de esfuerzos[7].

Consideremos la energía disipada por unidad de tiempo y volumen, en un punto dado de un material, es decir, la potencia disipada, tenemos (5):

$$w = S_{ij} v_{ij}$$

donde  $v_{ij} = de_{ij}/dt$ , velocidad de deformación

Si la potencia disipada varía mientras mantenemos el tensor de velocidad de deformación constante, obtenemos:

$$\delta w = \delta S_{ij} v_{ij}$$

de donde:

$$v_{ij} = d\dot{w}/dS_{ij} \quad (4.9)$$

Si ahora introducimos, como lo hizo v. Mises, la hipótesis que  $\dot{w}$  sea un potencial de flujo, es decir, dependiente solo de una función escalar del tensor desviador de esfuerzos. La función escalar idónea en este caso, es el esfuerzo equivalente.

Desarrollando la diferenciación en (4.9) obtenemos:

$$v_{ij} = \frac{d\dot{w}}{d\sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial S_{ij}} = \frac{d\dot{w}}{d\sigma_e} \frac{1}{2\sigma_e} \frac{\partial \sigma_e^2}{\partial S_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{d\dot{w}}{d\sigma_e} \frac{S_{ij}}{\sigma_e} \quad (4.10)$$

de esta manera vemos que los tensores de velocidad de deformación y esfuerzo, son coaxiales. La coaxialidad de estos tensores, es equivalente a suponer la existencia de un potencial de flujo, pero solo en el caso isotrópico (que es, cuando el esfuerzo equivalente se puede expresar en términos del segundo invariante del esfuerzo desviador).

La expresión encontrada debe reducirse al caso uniaxial dado por la ecuación de Horn y Maertman[2].

$$d\epsilon/dt = A \exp(-Q/RT)$$

donde:

$d\epsilon/dt$  = velocidad de deformación uniaxial, en la etapa secundaria de ternafluencia

$\sigma$  = esfuerzo uniaxial aplicado

$Q$  = energía de activación para auto-difusión del material

$R$  = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta

A, n = constantes características del material

En el caso uniaxial (todas las componentes del tensor de esfuerzos son cero, excepto  $\sigma_{11}$ ) tenemos:

$$S_{11} = 2\sigma_{11}/3, \quad S_{22} = S_{33} = \sigma_{11}/3$$

y de (4.8)  $\sigma_e = \sigma_{11}$

El requisito que la expresión (4.10) se reduzca a (4.11) da:

$$\dot{\nu}_{11} = \frac{3}{2} \frac{d\dot{w}}{d\sigma_e} \frac{2}{3} \frac{\sigma_{11}}{S_{11}} = A \sigma_e^n e^{-Q/RT}$$

de donde:

$$\frac{d\dot{w}}{d\sigma_e} = A \sigma_e^n e^{-Q/RT}$$

así la relación (4.10) toma la forma:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} A \sigma_e^{n-1} e^{-Q/RT} S_{ij} \quad (4.11)$$

### 4.3 TERMO-ELASTOPLASTICIDAD

En esta sección desarrollamos el modelo Termo-elastoplástico, título de este capítulo. En él, hacemos un primer intento, para simular el comportamiento de un tubo sometido a las condiciones de operación, que operan en el interior del generador de vapor, en las zonas de alta temperatura y presión.

A continuación enumeramos los factores tomados en cuenta en la simulación.

1) El metal del tubo, como elemento de un sistema intercambiador de calor, está sometido a un flujo térmico, y de aquí, a un gradiente térmico, que origina dilataciones diferentes de un punto a otro, dando origen a esfuerzos (térmicos) en el metal componente[9].

La deformación lineal, producida a una temperatura dada, es isotrópica y tiene el valor de:  $\alpha \Delta T$

donde:

$\alpha$  = coeficiente de dilatación lineal ( $1/^\circ K$ )

$T$  = diferencia de temperatura con respecto a un punto fijo de referencia.

La distribución de temperaturas en el interior del tubo está dado por [1]:

$$T = T_a + (Fb/k) \ln(r/a) \quad (4.12)$$

donde:

$T$  = temperatura en  $r$  ( $^\circ K$ )

$F$  = flujo de calor ( $W/cm^2$ )

$k$  = conductividad térmica del acero =  $0.31 W/cm^2$

$r$  = distancia desde el eje del cilindro(cm)

2) En las zonas del generador de vapor modeladas, la alta temperatura provoca deformaciones plásticas predominantes, dadas por la ecuación 4.11, de tal forma, que las deformaciones elásticas que producen cambio de volumen (fig. 4.6) son despreciables, y se toma, con buena aproximación, que el cambio de volumen, debido a la deformación plástica, es cero:



$$e_r^p + e_\theta^p + e_z^p = 0 \quad \text{----- (c)}$$

3) Deformación elástica, que es la respuesta del material después de actuar los factores anteriores. Esta dada por la ecuaciones 4.4

Tomando en cuenta estos factores y considerando, como Prandtl-Reuss, la deformación plástica como una componente de la deformación total, las ecuaciones 4.11 toman la forma, para deformaciones pequeñas (incrementales):

$$e_r = (1/E) [E_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha T + e_r^p$$

$$e_\theta = (1/E) [E_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha T + e_\theta^p$$

$$e_z = (1/E) [E_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha T + e_z^p$$

donde  $e_{ij}^p$  se encuentra integrando la ecuación 4.11.

Tomando condiciones de deformación plástica plana :

$$e_z^p = 0 \quad \text{----- (f)}$$

$$\text{así } e_r^p = 0 \text{ y de 4.11 } e_z = 0 \quad \text{----- (g)}$$

$$\text{de donde } \sigma_z = (1/2)(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad \text{----- (h)}$$

de la relación de incompresibilidad (c) y de (f):

$$e_r^p = -e_\theta^p \quad \text{----- (i)}$$

sustituyendo (h) y (i) en (4.13) se tiene:

$$e_r = [(2-\nu)/2E][E_r - 3\nu\sigma_\theta / (2-\nu)] + \alpha T + e_r^p \quad \text{----- (j)}$$

$$e_\theta = [(2-\nu)/2E][E_\theta - 3\nu\sigma_r / (2-\nu)] + \alpha T + e_\theta^p \quad \text{----- (k)}$$

$$e_z = [(2-\nu)/2E][E_z + \sigma_\theta] + \alpha T \quad \text{----- (l)}$$

sustituyendo en las expresiones anteriores  $\sigma_z$  dada por la ecuación de equilibrio 4.5, tendremos  $e_r$  y  $e_\theta$  en términos de  $\sigma_r$ , luego sustituyendo estas expresiones en la ecuación de compatibilidad 4.6, finalmente queda una ecuación en términos de  $\sigma_r$ :

$$\sigma_{r,rr} + (3/r)\sigma_{r,r} + [2E/(2-\nu)r][\alpha T_{,r} + e_{e,r}^p + 2e_r^p/r] = 0$$

donde T esta dada por la ecuación 4.12 y  $e_r^p$  se encuentra de 4.11. Esta ecuación se puede resolver en forma cerrada y queda:

$$\sigma_r(r) = -p_i + A_{xz} \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] - \frac{\alpha E \Delta T}{2-\nu} \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)} - \frac{2E}{2-\nu} \int_0^r e_{\theta}^P(x) \frac{dx}{x}$$

$$\sigma_{\theta}(r) = \sigma_r(r) + 2A_{xz} \frac{a^2}{r^2} - \frac{\alpha E \Delta T}{(2-\nu) \ln(b/a)} - \frac{2E}{2-\nu} e_{\theta}^P(r)$$

$$\sigma_z(r) = \frac{1}{2} (\sigma_{\theta} + \sigma_r)$$

$$\sigma_e(r) = \frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_{\theta} - \sigma_r|$$

donde:

$$A_{xz} = \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[ -p_o + p_i + \frac{\alpha E \Delta T}{2-\nu} + \frac{2E}{2-\nu} \int_a^b e_{\theta}^P(x) \frac{dx}{x} \right]$$

La evaluación de las integrales, se hizo numéricamente por la regla de Simpson, para lo cual se elaboró un programa, cuyo diagrama de flujo, por bloques, se muestra a continuación:

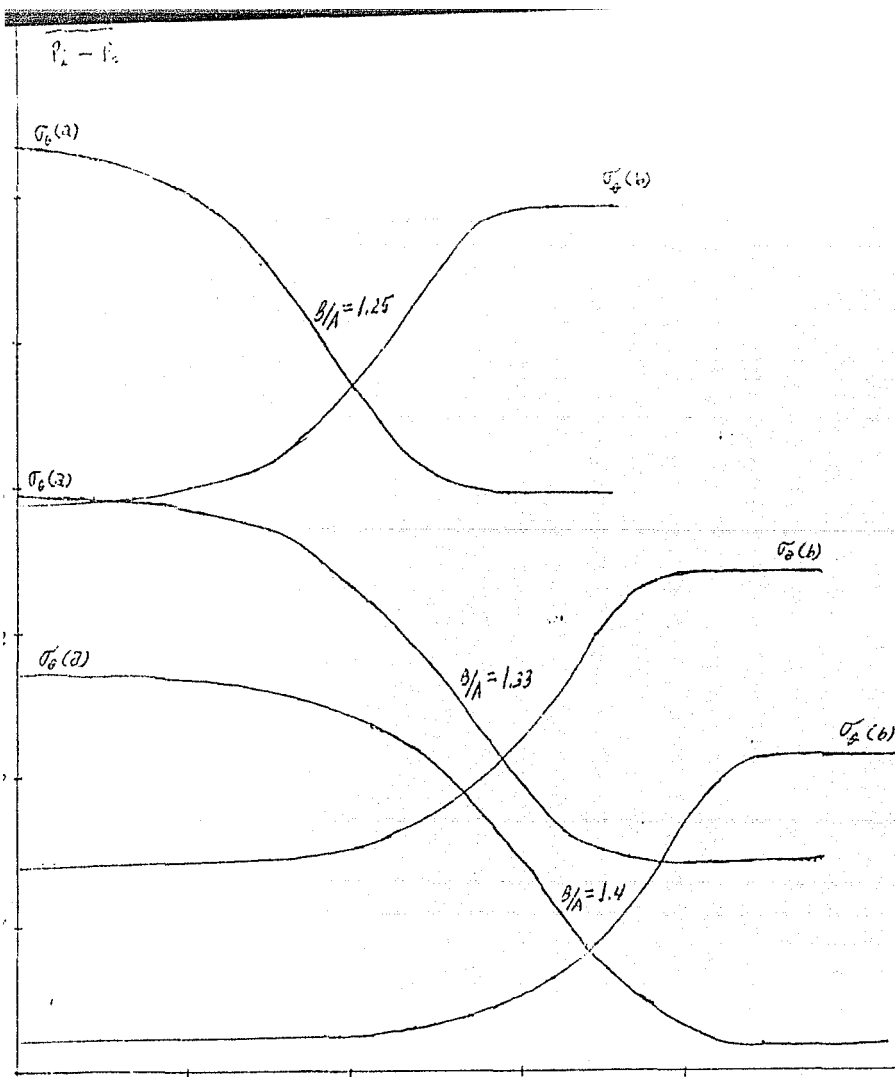
```

1.-LEE FLUJO DE CALOR
|
| V
2.-PARTICION DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL TUBO,
EN ANILLOS DE IGUAL ESPESOR.
|
| V
3.-CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA,
EN LOS ANILLOS DE ACUERDO AL FLUJO DADO.
|
| V
4.-INICIALIZACION DE LA DEFORMACION DE CADA
ANILLO, TOMANDO EL VALOR CERO PARA TODOS.
|
| V
5.-CALCULO DE LAS INTEGRALES INVOLUCRADAS EN LA
+----> DETERMINACION DE LOS ESFUERZOS, PARA CADA ANILLO
| Y SEGUN EL VALOR DE LA DEFORMACION AL TIEMPO "t".
|
|
|
| +-----> DO I=1,NANILLOS
|
|
| V
| 6.-CALCULO DE LOS ESFUERZOS  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 
| EN EL ANILLO I-ESIMO.
|
|
| V
| 7.-CALCULO DEL ESFUERZO EQUIVALENTE
| EN EL ANILLO I-ESIMO
|
|
| V
| 8.-CALCULO DE LA DEFORMACION EN EL ANILLO
| I-ESIMO , AL TIEMPO "t".
|
|
| V
| 9.-IMPRESION DE LOS ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y
| TIEMPO
|
|
| V
| 10.-INCREMENTO EN EL TIEMPO
| t=t+dtiemp
|
+-----+

```

#### 4.4 ANALISIS DE RESULTADOS

En las figuras 4.7 y 4.8, se muestra la evolución de los esfuerzos tangenciales, interior ( $\sigma_a(a)$ ) y exterior ( $\sigma_a(b)$ ) obtenidos mediante el programa descrito. En ambos casos los esfuerzos y el tiempo están normalizados.



Flujo de calor = 0

Temperatura = 650 °C

Presión = 17 MPa = 173.4 kg/cm<sup>2</sup>

N = 9

FIGURA 4.7

$$\text{Log} \left[ t \frac{E C}{2 - \nu} e^{-\frac{C}{2r}} (p_1 - p_0) \right]^{N-1} \cdot 10^8$$

$$\frac{T + f_c}{P_i - P_o}$$

$$A = 1.905 \text{ cm}$$

$$\delta = 2.54 \text{ cm}$$

FLUID = 0

TEMPERATURA = 650°C

PRESION = 17 MPa

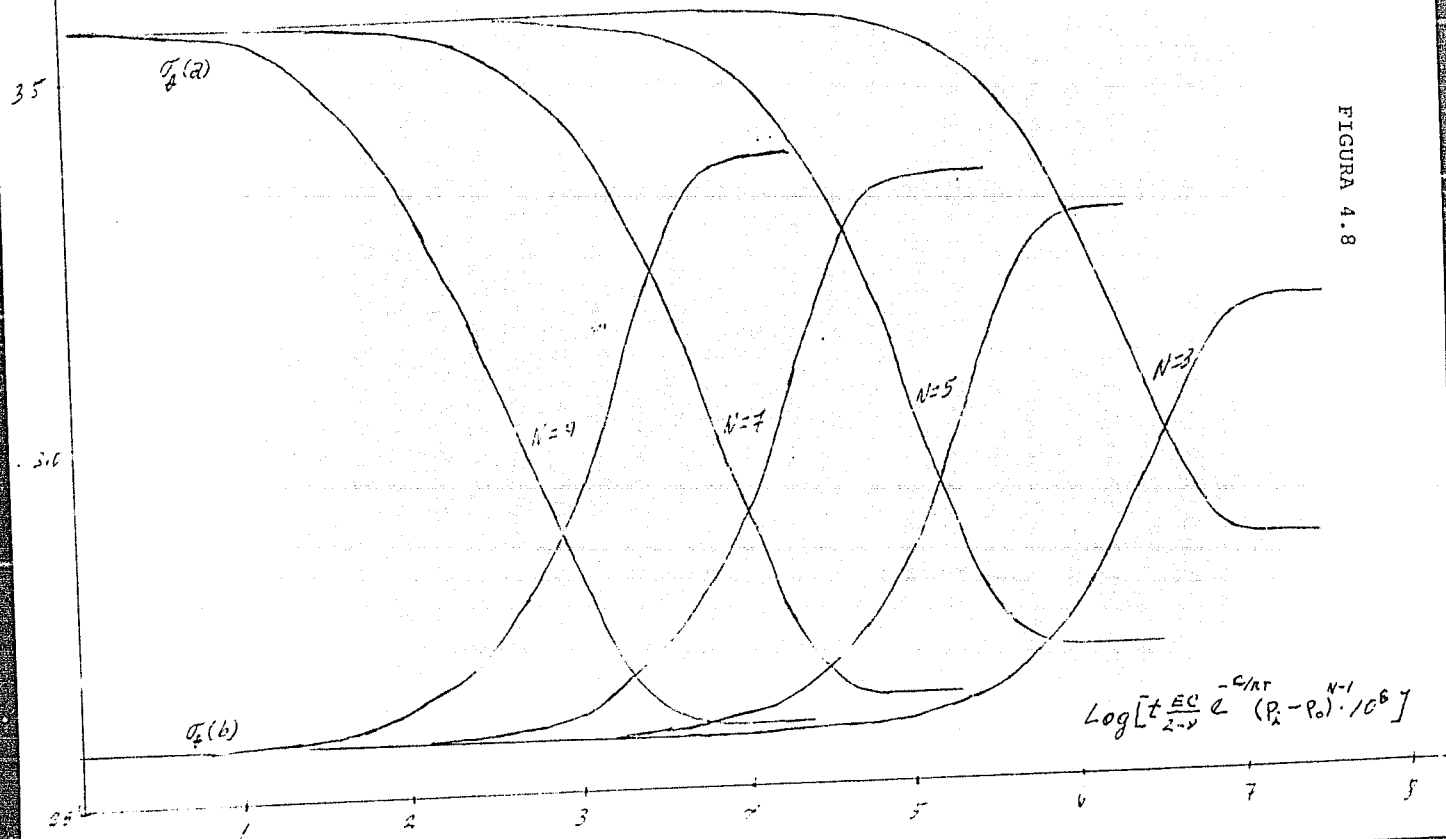


FIGURA 4.8

$$\text{Log} \left[ t \frac{E C}{2 \nu} e^{-C/r} (P_i - P_o) \cdot 10^6 \right]$$

La figura 4.7 muestra como cambian la distribución de esfuerzos en el tubo para varias razones de radios. Como puede verse, el patrón de esfuerzos inicial (elástico) se invierte, quedando el esfuerzo tangencial mayor en la superficie exterior. Esto se repite en todas las razones de radios, diferenciándose en el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario (entre más grueso es el tubo mayor es el tiempo).

La figura 4.8, muestra el efecto de variar el exponente del esfuerzo equivalente en la ecuación de Bern-Weertman. Como puede verse, en todos los casos se repite la inversión del patrón de esfuerzos, pero el exponente determinará la rapidez con que se alcanza el estado estacionario (para  $N$  mayores, se alcanza más rápidamente el estado estacionario).

En los casos anteriores no se tomó el efecto del flujo de calor ( $F=0$ ), porque se encontró que este solo afecta ligeramente la etapa inicial del transitorio y después ya no influye.

La inversión del patrón de esfuerzos, es un hecho corroborado por los análisis de fallas, que demuestran que en los tubos fallados por termofluencia, la grieta aparece en la superficie exterior [10].

Ahora veamos si el esfuerzo tangencial exterior, en el régimen estacionario, se podría relacionar con los esfuerzos máximos permitidos por ASME. Para ello, construyamos la siguiente tabla.

b/a	ASME	PROMEDIO	TEP
1.1	11.06	10.50	9.49
1.2	5.88	5.50	4.48
1.3	4.02	3.83	2.81
1.4	3.13	3.00	1.97
1.5	2.59	2.50	1.47
1.6	2.24	2.16	1.13
1.7	1.99	1.93	.88
1.8	1.80	1.75	.70
1.9	1.66	1.61	.56
2.0	1.54	1.50	.44

TABLA 5.1 VALORES DE LA RAZON ESFUERZO/PRESION, DADA POR VARIAS FORMULAS, SEGUN LA RAZON DE RADIOS b/a.

La segunda columna, da los valores del esfuerzo máximo permitido por ASME, la tercera columna, enlista los esfuerzos calculados usando la fórmula promedio ( $S=P(DI+E)/2E$ ), la cuarta columna, da los valores máximos en la etapa estacionaria para el esfuerzo

tangencial, según el modelo Termo-Elasto-Plástico (TEP).

Como puede verse hay una ligera variación entre los valores del modelo propuesto y los de ASME, sugiriendo que aparentemente el modelo contiene los elementos básicos requeridos para reproducir la tendencia de ASME. Por otra parte como muestra la tabla, la fórmula promedio aproxima muy bien a la ASME, dando siempre un esfuerzo menor, por esta razón será posteriormente ocupada como una aproximación de aquella.

Este modelo, como primer intento, toma en cuenta algunos factores, pero no es reflejo fiel de la realidad. El problema es más complejo pues hay que considerar el efecto de la corrosión, formación de depósitos en la pared interior y exterior del tubo, flujo térmico con direcciones preferenciales, variación de la temperatura y presión de operación, etc. De manera que tratar de utilizar el modelo para estimar vida promedio de tubería, solo proporcionaría estimaciones burdas. Por esta razón en el capítulo 5, se presenta un camino alternativo.

## REFERENCIAS CAPITULO CUATRO

- 1.-Timoshenko S.P., Goodier J.N., Theory of Elasticity, McGraw-Hill(1970), Cap.1 p.4 .
- 2.-Mase G.E., Mecánica del Medio Continuo, McGraw-Hill(1977), Cap.2 p.97 .
- 3.-Dieter G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill(1961), Cap.2 pp.57-62 .
- 4.-Ibid; Cap.2 p.47 .
- 5.-Hayden H.W., Moffat W.G., Duff J., Propiedades Mecánicas, Limusa(1968), Cap.6 p.144 .
- 6.-Op. cit. [3], Cap.3 p.93
- 7.-Odqvist F.K.G., Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture, Oxford University Press(1966), Cap.5 pp.19-21 .
- 8.-Op. cit. [5], Cap.6 p.142 .
- 9.-Maurique J.A., Transferencia de Calor, Harla(1976), Cap.2 pp.17-19.
- 10.-Fuentes S.R., Instituto de Investigaciones Electricas, Comunicacion privada



## CAPITULO V

APLICACION DE LOS MODELOS EN LA  
DETERMINACION DE LA VIDA RESIDUAL  
EN TUBERIAS DE GENERADORES DE VAPOR

## 5.1 INTRODUCCION

Como se vió en el capítulo 2, las fallas de tubería de sobrecalentador, rescalentador y pared de agua, se deben a la termofluencia (deformación progresiva con el tiempo), o al desgaste de la superficie metálica (con la consecuente reducción de espesor) provocada por una forma particular de corrosión, conocida como corrosión en alta temperatura. En general el tubo va a sufrir los efectos combinados de la termofluencia y la corrosión externa.

Es de notarse, que la disminución del espesor del tubo debida a la corrosión, va a incrementar los esfuerzos y por consiguiente la termofluencia en el tubo. A su vez, la termofluencia va a modificar el patrón de esfuerzos en el tubo, lo cual a su vez va a modificar la velocidad de corrosión. De esta forma, ambos mecanismos están acoplados, dificultando la posibilidad de predecir el fenómeno, y con ello, estimar la vida útil de cada componente metálico.

## 5.2 MODELO DE VIDA RESIDUAL

El modelo que a continuación describimos, combina mediciones experimentales de campo, con criterios empíricos de daño. En él se supone que la velocidad de adelgazamiento de las paredes del tubo es constante todo el tiempo y uniforme en todas direcciones, la termofluencia interrumpe periódicamente este proceso permitiéndonos evaluar el tiempo de vida residual en esa etapa y, con ello, la fracción de vida consumida que nos llevara a calcular el tiempo total de vida residual.

La medición de espesores periódica mediante técnicas de ultrasonido, ha permitido hacer estimaciones de la velocidad de adelgazamiento de las paredes de la tubería (velocidad de corrosión) [17]. Este parámetro refleja la acción global promedio de la corrosión en las diferentes zonas de medición, permitiendo de esta forma, calcular su efecto medio en los tubos durante etapas breves, y combinarlo con la termofluencia aplicando el concepto de daño.

El concepto de daño acumulado en cada etapa de operación, introducido por Kachanov [3], se traduce en la propiedad aditiva de la fracción de vida consumida.

La partición en etapas de operación, permite introducir el efecto de la corrosión en cada una de ellas, y estimar, posteriormente, la vida residual después del adelgazamiento de las paredes del tubo.

Este modelo de interacción corrosión-termofluencia, para estimar la vida residual de tubería [2], ha sido codificado como subrutina del programa de despliegue gráfico, expuesto en el capítulo 3.

La subrutina hace una partición en etapas de operación, tratando que sean lo más breves, pero limitando su número, por la precisión de la velocidad de corrosión.

Durante la simulación de la interacción, las etapas de operación transcurren, llevándose un registro de la fracción acumulada de vida consumida. El proceso continuará hasta que esta fracción alcance la unidad, entonces se recuenta el tiempo transcurrido, que es la vida residual del elemento considerado.

La fracción de vida consumida, se define como el cociente del tiempo en operación (duración de la etapa de operación) al tiempo que le quedaría de vida si actuara solo la termofluencia, en esas condiciones de operación (tiempo de vida residual).

Aquí conviene aclarar que las condiciones de operación referidas, que determinan el tiempo de vida residual, son: el tipo de acero (determinado por el índice 'I'), la temperatura de operación (T), el diámetro interno del tubo (BI) y el esfuerzo tangencial promedio del tubo dado por [4]:

$$S = (BI - E)P / 2E$$

donde:

E = espesor del tubo

BI = diámetro interno del tubo

P = presión interna del tubo

La expresión analítica usada, para la vida esperada bajo termofluencia es:

$$TF = A(I) \exp[(B(I) - C(I)S) / T] / SB(I)$$

donde:

A(I), B(I), C(I) y S(I) son constantes que dependen del tipo de material.

Esta expresión fué resultado de un ajuste a unas graficas de ruptura bajo esfuerzo, a diferentes temperaturas y con diferentes materiales [5].

El diagrama de flujo del programa que codifica el modelo es:

LEE: TIPO DE ROSEPIA(D), ESPESOR(E0), DIAMETRO(DI)  
VELOCIDAD DE CORROSION(VC) Y TEMPERATURA(T)

CALCULA ESFUERZO TANGENCIAL  $S=(DI+E0)P/2E0$

CALCULA TIEMPO DE VIDA RESIDUAL POR TERMOFLUENCIA  
 $TF=TF(I,S,T,DI)$

HAY CORROSION(VC) > NO  
----> IMPRIME TF --> STOP  
SI

ENCUENTRE EL MINIMO ENTRE:

- a) TIEMPO DE VIDA RESIDUAL POR TERMOFLUENCIA(TF)
- b) TIEMPO NECESARIO PARA QUE LA CORROSION NULIFIQUE EL ESPESOR (E0/VC)

PARTICIONA EL INTERVALO ANTERIOR, EN ETAPAS DE OPERACION, DE IGUAL DURACION

INICIALIZA EL TIEMPO TRANSCURRIDO TIEMP=0

EVALUA LA PRIMERA FRACCION DE VIDA CONSUMIDA DURANTE LA PRIMERA ETAPA DE OPERACION  $FRAC=DT/TF$

CONTADOR DE TIEMPO TRANSCURRIDO DURANTE LAS ETAPAS SUCESIVAS  $TIEMP=TIEMP+DT$

CALCULO DEL ESPESOR ACTUAL  $E=E0-VC(TIEMP)$

CALCULO DEL ESFUERZO TANGENCIAL ACTUAL  $S=(DI+E)P/2E$

CALCULO DE TIEMPO DE VIDA RESIDUAL DURANTE LA ETAPA ACTUAL DE OPERACION  $TF=TF(I,S,T,DI)$

CALCULO DE LA FRACCION ACUMULADA DE VIDA CONSUMIDA AL FINALIZAR LA ACTUAL ETAPA  $FRAC=FRAC+DT/TF$

SI

COMPARACION DE LA FRACCION ACUMULADA ANTERIOR CON LA UNIDAD  $FRAC < 1$

```

      1 NO
      V
      ADICION AL TIEMPO TRANSVERSINO DE LA FRACCION DE "DT"
      QUE REPRESENTA LA DIFERENCIA "FRAC-1"
      TIEMP=TIEMP+DT-DT*(FRAC-1)/(DT/TF)
      !
      V
      IMPRIME TIEMP
      !
      V
      STOP

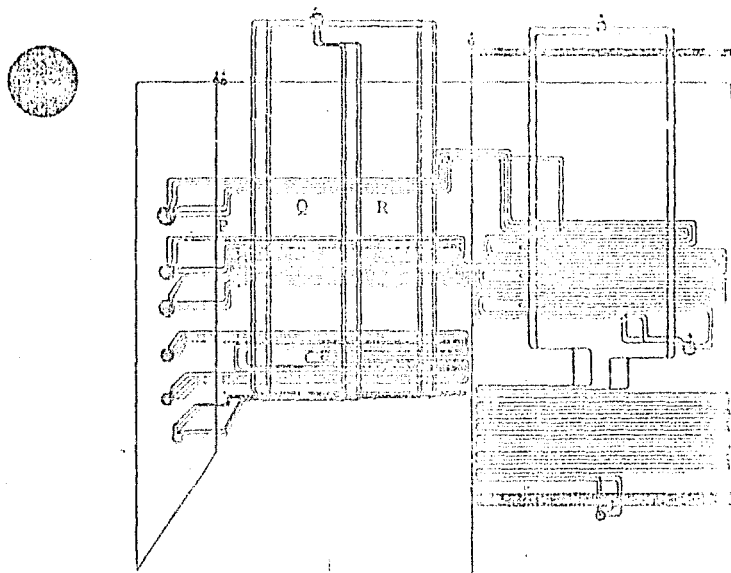
```

### 5.3 APLICACION DEL MODELO INTEGRADO

Como un ejemplo de aplicación del modelo, se estimó la vida residual en diferentes zonas de la tubería de los generadores U-3 y U-4 de la CTE de Manzanillo.

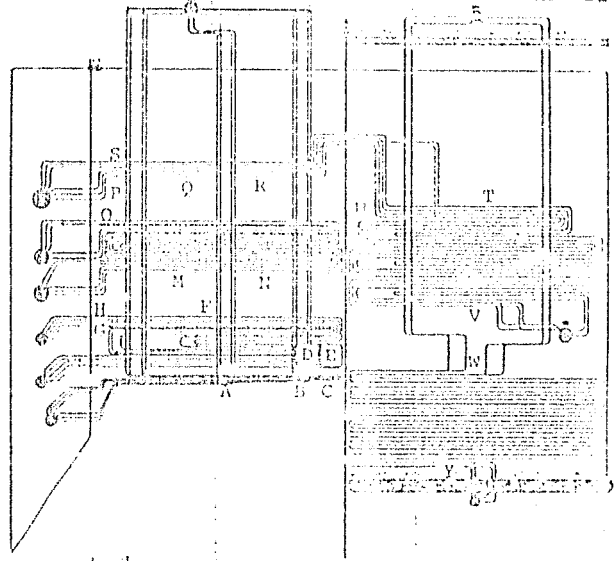
En las figuras 5.1 y 5.2 se resume los resultados concentrados en las inspecciones periódicas realizadas a las unidades 3 y 4 de Manzanillo. En ellas se muestra las mediciones de espesores, velocidades de corrosión medidas, los espesores mínimos requeridos por ASME y la vida residual de la tubería en condiciones de operación de 100% carga a ECR. Como ejemplo, en la figura 5.2 se aprecia que la zona 0 del sobrecalentador de alta temperatura SC-A, es de un acero norma SA310-TP347H, 45 milímetros de diámetro externo y 4.9 milímetros de espesor nominal. A las 7,600 horas de operación (arriba en paréntesis se da este número en miles de horas) registró un espesor promedio de 5.39 milímetros (el promedio se tomó sobre puntos similares de todas las hileras que forman el banco), y a las 18,900 horas dicho promedio fué de 5.29 milímetros. El valor mínimo registrado fué 5.13 mm, y la velocidad de corrosión correspondiente es de 0.08 mm/año. En condiciones de operación de ECR, la presión de trabajo en ese punto es de 174 Kg/cm<sup>2</sup> y 500°C de temperatura media de metal, de lo cual se concluye que el espesor mínimo requerido por ASME es de 4.08 mm, y la vida residual esperada para este punto específico del sobrecalentador es de 25 años. La figura 5.2 muestra el detalle de los resultados obtenidos en dicho punto. Como se muestra en la figura 5.2, absolutamente todos los espesores medidos en la U-4 están por encima tanto del espesor nominal como del mínimo requerido por ASME.

Espesores (mm) y Corrosión (mm/año)



ZONA	Material	E <sub>nom</sub>	PROMEDIOS		E <sub>min</sub>	V <sub>corr</sub>	P	Tm	E <sub>nom</sub>	V <sub>residual</sub>
			(8.8)	(23.3)						
RII-A	P 304H	3.5	3.61	3.59	3.40	0.012	37.8	560.6	1.41	> 30
	Q 304H	3.5	3.87	3.84	3.61	0.018	37.9	576	1.37	> 30
	R 304H	3.5	3.77	3.75	3.56	0.012	38.1	573	1.35	> 30

FIGURA 5.1



PROHEDIOS

ZONA	Material	E <sub>nom</sub>	(7.6)	(18.9)	E <sub>min</sub>	V <sub>corr</sub>	P	T <sub>m</sub>	t <sub>asme</sub>	V <sub>vertical</sub>	
SH-B	A	T-22	8.4	9.03	9.02	8.58	0.008	179	450	3.67	> 20
	B	T-22	8.4	9.07	9.06	8.72	0.008	179	451	3.68	> 30
	C	T-22	6.4	6.87	---	6.70	---	179	451	3.67	
SH-I	D	T-12	5.4	---	---	---	---	178	493	3.20	
	E	T-12	6.9	---	---	---	---	178	494	3.23	
	F	T-22	8.9	9.69	---	9.35	---	177	520	3.05	
	G	T-22	9.6	10.20	---	9.78	---	176	526	3.35	
	H	347H	4.9	5.44	5.42	5.25	0.015	176	526	3.62	> 30
SH-A	M	T-22	7.4	7.91	7.89	7.64	0.015	176	556	3.51	> 30
	N	T-22	8.6	9.33	9.29	9.02	0.031	175	557	3.56	> 30
	O	347H	4.9	5.39	5.29	5.13	0.080	174	567	4.08	28
NH-A	P	304H	3.5	3.74	3.73	3.50	0.008	38	580	1.41	> 30
	Q	304H	3.5	3.84	3.76	3.54	0.061	38	576	1.37	> 30
	R	304H	3.5	3.85	3.81	3.62	0.031	38	573	1.35	> 30
	S	304H	3.5	3.94	3.91	3.73	0.020	38	579	1.40	> 30
NH-B	T	T-22	4.4	4.75	4.74	4.60	0.008	38	537	1.08	> 30
	U	T-12	3.5	3.90	3.86	3.71	0.030	38	512	1.62	> 30
	V	SA192	3.5	4.01	3.92	3.85	0.069	39	415	1.72	> 30
ECC	W	210-C	4.0	4.51	4.45	4.25	0.046	186	357	1.54	> 30
	Y	210-C	4.0	4.51	4.45	4.31	0.046	187	287	1.54	> 30

FIGURA 5.2





## REFERENCIAS CAPITULO CINCO

- 1.-Chacón J.E. et al., Detección y monitoreo de corrosión por medio de ultrasonido en generadores de vapor, Boletín IIE, nov. 1987 pp 244-254.
- 2.-Guiner J-Y and Plumtree A., Life Prediction of Boiler Tubing Using Damage Concepts, Engineering Systems International, 20 Rue Searinen.
- 3.-Kachanov L.M., Time to Rupture Process Under Creep Conditions, Invest. Akad., Nauk. SSSR Otd. Number 6, 1959.
- 4.-Crocker and King, Piping Handbook 5th Edition, Cap 2
- 5.-Baker D.W.C., et al., The Control of high Temperature Fireside Corrosion, Central Electricity Research Laboratories, Laboratory Memorandum No. RD/L/H 404, 2nd Ed. (1975).

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Este trabajo es el resultado de los esfuerzos que se han hecho para reducir los índices de indisponibilidad de las Centrales Termoeléctricas (CTE's) del país. Para ello, se ha desarrollado un sistema que analiza vida residual de materiales, a través de la modelación computarizada del diseño y operación de un generador de vapor. El sistema consiste de: un programa de captura/despliegue de información gráfica de diseño de tubería, un programa de análisis térmico de operación de un generador de vapor y una rutina empírica de cálculo de vida residual en un punto cualquiera de la tubería, si se conocen las condiciones de operación, las características de diseño y la velocidad de corrosión, en ese punto. El sistema se aplicó al diseño de las unidades 3 y 4 de la CTE de Manzanillo, y de este modo se exhibieron las zonas más sensibles al fenómeno corrosión-termofluencia que, como se ha visto, es una de las causas que más daño producen a los generadores de vapor mexicanos.

Para desarrollar la programación del sistema, se partió de un paquete gráfico de uso general que ya existía ('PAGRA', desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas). La programación de la aplicación se tuvo que desarrollar totalmente, puesto que, hasta donde sabemos, no existe en ningún lugar algo semejante. El presente trabajo cubrió la parte gráfica de la aplicación y la de vida residual. La contribución de otros

solucionar (análisis térmico) únicamente se accionó.

Por otra parte, se inicia el desarrollo de un modelo Termo-elastoplástico que puede evolucionar a una rutina de cálculo de vida residual con una base teórica, que reemplaza en el futuro a la rutina empírica antes mencionada. El modelo se fundamenta en las teorías de Elasticidad, Plasticidad y Transferencia de calor, y describe como evolucionan los esfuerzos en un tubo hasta llegar al estado estacionario, donde el patrón inicial elástico de esfuerzos de serie, se invierte, quedando el máximo en el exterior (resultado que está de acuerdo con la experiencia). También se trató de relacionar este esfuerzo con el esfuerzo máximo permitido por "ASME".

Lo anterior señala la utilidad de los métodos preventivos que pueden usarse para coordinar programas de mantenimiento, adelantándose de este modo a la falla. La precisión de las predicciones requiere una atención especial de los puntos más débiles del modelo, por lo cual a continuación los mencionamos y sugerimos la forma de corregirlos.

La rutina de cálculo de vida residual, en ausencia de corrosión, se reduce a estimar el tiempo de vida mediante una curva esfuerzo-ruptura, ajustada a datos experimentales obtenidos de pruebas de termofluencia pura (referencia [5] del capítulo 5). Cuando hay corrosión, el programa modela la interacción corrosión-termofluencia, suponiendo una velocidad de corrosión constante, en todo el tiempo y uniforme en cualquier dirección.

Esto no se ha comprobado experimentalmente, puesto que es un problema particular de los generadores de vapor mexicanos, que hasta la fecha no se ha investigado cuantitativamente. De este modo, debe tenerse cuidado al emplear la rutina de cálculo de vida residual, limitándose sólo a usarla como un medio para comparar el comportamiento de los diferentes elementos de tubería del generador de vapor y, por el momento, no confiar demasiado en el valor absoluto del número obtenido. En el futuro, se sugiere se diseñen pruebas de laboratorio que ayuden a aclarar la forma como están accionados la corrosión y la termofluencia.

La captura de la información es otro punto que presenta ciertas limitaciones, sobre todo en la coordenada Z. Para hacerlo más funcional y rápida, debe realizarse separado e individualmente, en forma tal que, simultáneamente a la presentación de la vista lateral, se pueda hacer un bosquejo de la vista inferior del arreglo básico, con las posiciones tentativas de los puntos donde hay cambio de Z en la vista lateral. Una vez completado el bosquejo, agregar los valores de las distancias no especificadas, para determinar las posiciones exactas de los puntos.

Como último punto, aclararemos que el modelo termo-elastoplástico es el primer paso de los muchos que hay que dar, para que nuestro modelo contemple todos los factores bajo los cuales está sometido un tubo durante la operación del generador de vapor. En este trabajo nuestro interés original fué

modelar la vida como la principal causa de esfuerzos elásticos, pero si creemos que este modelo nos sirva para estimar tiempo de vida residual, tendremos que incorporar primeramente todos los factores más importantes como serian la corrosión, cavitación intergranular, formación de depositos internos y externos, flujo térmico con direcciones preferenciales, ciclos térmicos y de presión durante la operación.

En cuanto a las perspectivas de desarrollo del método en su conjunto, se espera aplicarlo a varios diseños de generadores de vapor e irlo depurando sobre la marcha. Esto con objeto de hacer un estudio comparativo de diseños, y decidir cuales son los más adecuados al país de acuerdo a los problemas presentados.

También se tiene en mente transportar el sistema a una computadora personal, con el fin de llevarlo a planta y realizar un seguimiento fallo/reparación de la tubería, para tener una estadística más confiable y fácil de visualizar, que permita posteriormente evaluar al diseño. Asimismo, conectado en línea con el generador de vapor se pueden validar los modelos resultado del análisis térmico que estan codificados y enlazados al programa gráfico.