

00579
4
2ej.



Universidad Nacional Autónoma
de México

FACULTAD DE QUIMICA

SIMULACION DINAMICA DE GENERADORES DE VAPOR

TESIS QUE PRESENTA

EDGARDO JAVIER ROLDAN VILLASANA

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA (PROCESOS)



Director de Tesis:
DR. ENRIQUE BAZUA RUEDA

México, D. F.

1987

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 MODELOS DE GENERADORES DE VAPOR	7
CAPITULO 2 METODOLOGIA DE MODELADO	50
CAPITULO 3 MODELO CONCEPTUAL	67
CAPITULO 4 MODELO FORMAL	77
CAPITULO 5 MODELO DIGITAL	148
CAPITULO 6 VALIDACION DEL MODELO	159
CONCLUSIONES	192
APENDICE 1 NOMENCLATURA	195
APENDICE 2 DIAGRAMA DE ESTRUCTURA Y DEFINICION DE SUBPROGRAMAS	202
APENDICE 3 EJEMPLOS DE CODIFICACION	217
APENDICE 4 USO DEL MODELO	251
REFERENCIAS	270
BIBLIOGRAFIA GENERAL	280

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA 1.1	CLASIFICACION DE LOS GENERADORES DE VAPOR	11
FIGURA 1.2	CALDERA DE CASCO	11
FIGURA 1.3	CALDERAS PIROTUBULARES	12
FIGURA 1.4	CALDERA DE DOMO DE CIRCULACION NATURAL	14
FIGURA 1.5	CALDERA DE CIRCULACION FORZADA	16
FIGURA 1.6	CALDERA DE UN SOLO PASO (SUPERCRITICA)	18
FIGURA 2.1	MODULARIZACION INTERNA	59
FIGURA 4.1	SISTEMA SIMPLIFICADO	81
FIGURA 4.2	DIAGRAMA DE CAUSALIDAD EXTERNA	87
FIGURA 4.3	DIAGRAMA DE CAUSALIDAD INTERNA. MODULOS Y SISTEMAS	88
FIGURA 4.4	DIAGRAMA DE CAUSALIDAD INTERNA. SUBMODULOS DEL CICLO ITERATIVO	89
FIGURA 4.5	VOLUMEN DE CONTROL PARA FLUJOS MONOFASICOS	107
FIGURA 4.6	FLUJO BIFASICO EN UN DUCTO	109
FIGURA 4.7	VOLUMEN DE CONTROL PARA FLUJOS BIFASICOS	114
FIGURA 4.8	VOLUMEN DE CONTROL PARA LA ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO	118
FIGURA 4.9	METAL DEL DOMO SUPERIOR	123
FIGURA 4.10	TIPOS DE AISLAMIENTO PARA UN TUBO	125
TABLA 5.1	CARACTERISTICAS COMPUTACIONALES DEL MODELO DIGITAL	158
TABLA 6.1	CONDICIONES DE OPERACION DE LA CALDERA SIMULADA A 100% DE CARGA (UNIDAD NO. 2 DE LA CENTRAL TERMO-ELECTRICA "FRANCISCO PEREZ RIOS" DE TULA, HIDALGO)	162
TABLA 6.2	CALDERA FRIA CON LAS BOMBAS FUNCIONANDO	170
TABLA 6.3	ESTADO ESTABLE A 25% DE CARGA	171

TABLA 6.4	ESTADO ESTABLE A 50% DE CARGA	172
TABLA 6.5	ESTADO ESTABLE A 75% DE CARGA	173
TABLA 6.6	ESTADO ESTABLE A 100% DE CARGA	174
FIGURA 6.1	LLENADO DE LA UNIDAD	176
FIGURA 6.2	CALENTAMIENTO DE LA UNIDAD. NIVEL Y PRESION DEL DOMO	178
FIGURA 6.3	CALENTAMIENTO DE LA UNIDAD. TEMPERATURAS DEL METAL DEL DOMO	179
FIGURA 6.4	AUMENTO DE CARGA DEL 25% AL 100%. PRESION Y NIVEL DEL DOMO	181
FIGURA 6.5	AUMENTO DE CARGA DEL 25% AL 100%. FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION Y FLUJO DE VAPOR	182
FIGURA 6.6	DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. PRESION Y NIVEL DEL DOMO	185
FIGURA 6.7	DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. FLUJOS Y VELOCIDADES ANGULARES DE LAS BOMBAS	186
FIGURA 6.8	ROTURA DE TUBOS CON UN 5% DE SEVERIDAD. PRESION Y NIVEL DEL DOMO	188
FIGURA 6.9	ROTURA DE TUBOS CON UN 5% DE SEVERIDAD. FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION	189
FIGURA 6.10	ROTURA DE TUBOS CON UN 100% DE SEVERIDAD. PRESION Y NIVEL DEL DOMO	191
FIGURA A4.1	VARIABLES DE CARACTERIZACION DEL PROCESO A SIMULAR	254

RESUMEN

En esta tesis se desarrolla, se codifica y se prueba un modelo matemático genérico de calderas acuotubulares. El modelo se valida para un generador de vapor, de domo, de circulación forzada que da servicio a una planta termoeléctrica de 300 MW de capacidad; sin embargo, el modelo se plantea de tal manera que, con la lectura de parámetros obtenidos directamente de datos físicos, pueda ser utilizado para representar a otros tipos de calderas acuotubulares incluyendo las supercríticas y las de plantas nucleares.

Este modelo presenta algunas ventajas sobre los anteriormente desarrollados: a) reproduce el comportamiento de la unidad en todo su rango de operación incluyendo algunas fallas del equipo y errores de operación, b) la caldera en cuestión puede simularse con diferentes grados de distribución espacial, c) la programación se hace modular y estructurada, y d) el modelo está diseñado para ser fácilmente ampliado y puede representar a diversos tipos de generadores de vapor.

Los resultados de diez pruebas de validación presentadas muestran la confiabilidad del modelo.

Además, se propone una clasificación de los principales tipos de generadores de vapor, se resumen las características de algunos modelos de calderas existentes, se conjunta una metodología general para el desarrollo de modelos y se anexa el manual de usuarios.

ABSTRACT

In this thesis, a generic mathematical model for water-tube boilers is developed, coded and tested. The model is validated for a drum forced-circulation steam generator that services a 300 MW thermo-electrical plant; the model is presented in such a way that, with the use of parameters directly derived from physical data, may be applied in the representation of other types of water-tube boilers including those of supercritical and nuclear power plants.

This model presents several advantages over previously developed models: a) it reproduces the behavior of the unit in all its operating range including some equipment failures and operation errors, b) the boiler may be simulated with different degrees of spatial distribution, c) the programming is modular and structured, and d) the model is designed to be easily expanded and can represent several types of steam generators.

The results of ten validation tests are given showing the model's reliability.

Additionally, a classification of the main types of steam generators is proposed, the characteristics of some of the existent models of boilers are summarized, a general methodology for model development is assembled, and the user's guide is annexed.

INTRODUCCION

...cree usted que serA posible?
- QuizA, respondi6 el ingeniero....

Jules Verne,
"L'ile Mysterieuse"

INTRODUCCION

El consumo de energía en cualquiera de sus formas se incrementa rápidamente con el paso del tiempo. En México el 60% de la capacidad instalada de generación de energía pertenece a centrales termoeléctricas, excluyendo a las industrias autosuficientes en este campo, con un crecimiento aproximado del 13% anual. La necesidad de utilizar eficazmente los recursos energéticos del país crecerá dramáticamente en los años venideros.

La simulación se ha convertido en una herramienta poderosa para el diseño, análisis y optimización de procesos. Tener un modelo matemático que represente al menos las partes primordiales de un proceso es de gran ayuda. Por la importancia intrínseca de los generadores de vapor en cualquier industria, es conveniente contar con un modelo de los principales tipos de calderas.

Un generador de vapor puede dividirse en diferentes secciones como son: parte agua/vapor, gases de combustión y vapor sobrecalentado.

El problema que se resuelve en esta tesis es el planteamiento de un modelo dinámico capaz de representar los principales tipos de generadores de vapor en su parte agua/vapor en lo referente al fluido; no se incluye el modelado de los metales (expansión térmica, corrosión, análisis de esfuerzos, etc.). El modelo puede ser utilizado como parte de simuladores para entrenamiento de operadores, para el auxilio en el diseño de estrategias de control de generadores

de vapor y/o para el análisis del comportamiento dinámico de diferentes tipos de unidades generadoras, incluyendo calderas nucleares y supercríticas, en todo su rango de operación. Además, se considera importante plantear el modelo de tal manera que el usuario tenga libertad de elegir, según sus necesidades, el grado de distribución espacial de la caldera a simular (número de nodos en que se divide el generador de vapor para su estudio).

El trabajo, según se desprende de los resultados presentados y el desarrollo mismo, es un modelo que aventaja los trabajos previos hechos en este campo (revisar Capítulo 1) e incluye, adicionalmente, una metodología que puede seguirse durante el desarrollo de otros modelos.

Dado que el modelo en sí representa a cualquier tipo de generadores de vapor acuotubulares, para ejemplificar el método y validar el modelo, se escogió la Caldera 2 de la Central Termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos" de Tula, Hgo.

En resumen, las características principales que presenta el modelo en cuestión son las siguientes:

1. El modelo se basó en los principios físicos de balances de materia, de energía y de cantidad de movimiento, así como en relaciones constitutivas para la transferencia de calor y masa.

2. La caldera modelada puede estudiarse con diferentes grados de distribución espacial, según la conveniencia del usuario.
3. El modelo se desarrolló pensando en que se acoplará, en un futuro, con el resto de los componentes de la caldera o incluso con otras partes del proceso a que pertenezca.
4. El modelo representa diferentes tipos de generadores de vapor acuotubulares, incluyendo los supercríticos y de plantas nucleares.
5. El modelo es capaz de reproducir el comportamiento del generador de vapor en todo su rango de operación, desde el llenado hasta la operación a 100% de carga y el apagado, incluyendo algunas fallas del equipo como son el disparo imprevisto de alguna(s) de la(s) bomba(s) de circulación forzada y la rotura de tubos de la caldera.
6. El modelo es de un uso fácil, tanto en el "armado" del generador de vapor específico que se desea representar como en la simulación, además, los resultados son fácilmente interpretados.
7. El mantenimiento del código puede hacerse de una manera sencilla. El modelo se hizo en forma modular con bloques fácilmente identificables que pueden aislarse del resto del modelo para su estudio particular.

B. El escoger el tipo y características de la caldera a simular se hace directamente a través de la lectura de parámetros físicos.

Las características anteriores, a excepción de la primera, pueden verse como ventajas del presente modelo con respecto a otro. Estas características se discuten y amplían en este trabajo. El contenido de cada capítulo de esta tesis se resume en seguida.

En el Capítulo 1 se hace una clasificación de los principales tipos de generadores de vapor. Se presenta, además, un resumen de las características de algunos modelos de calderas existentes en la literatura.

En el Capítulo 2 se explica el método seguido durante el desarrollo del modelo.

El Capítulo 3 resume el sistema a simular especificando sus fronteras, alcance y modos de operación.

En el Capítulo 4 se desarrolla el modelo matemático del generador de vapor. Se incluye un resumen de la manera en que se resuelven las ecuaciones obtenidas.

El Capítulo 5 muestra las características principales del código computacional generado.

En el Capítulo 6 se discute la forma en que se valida el modelo y se presentan algunos resultados numéricos de la simulación.

Se presenta una sección de conclusiones donde se hacen algunas

consideraciones y recomendaciones acerca del trabajo en general.

Se anexan cuatro apéndices con el fin de facilitar la exposición del trabajo.

En el Apéndice 1 se define la nomenclatura utilizada.

El Apéndice 2 presenta el diagrama de estructura jerarquizado de las rutinas que conforman el programa de computadora final y se describe la utilidad de cada uno de los subprogramas.

En el Apéndice 3 se dan cuatro ejemplos de rutinas codificadas.

En el Apéndice 4 se describe la manera de utilizar el modelo.

Al final se listan las referencias hechas a lo largo de la tesis y la bibliografía general consultada durante la realización de este trabajo.

CAPITULO 1

MODELOS DE GENERADORES DE VAPOR

- Bueno, pues aquí está el horno - dijo Watson...

La caldera se erguía sobre cuatro bloques de cemento; era un largo depósito cilíndrico de metal, cubierto de cobre y remendado en muchas partes.

Stephen King,
"The Shining", (1977)

I N D I C E

CAPITULO 1 MODELOS DE GENERADORES DE VAPOR

1.1	CLASIFICACION DE GENERADORES DE VAPOR	10
1.1.1	Calderas de Casco.	11
1.1.2	Calderas Piro-tubulares.	12
1.1.3	Calderas Acuotubulares.	13
1.2	MODELOS EXISTENTES	19
1.2.1	Chien K.L. et al. (1958).	19
1.2.2	Daniels J.H. et al. (1961).	21
1.2.3	Nicholson H. (1964).	22
1.2.4	Thompson F.T (1967).	23
1.2.5	Anderson J.H. et al. (1968).	25
1.2.6	Mc Donald J.P. y Kwanty H.G. (1970).	26
1.2.7	Mc Donald J.P. et al. (1971).	27
1.2.8	Moeck E.O. y Hinds H.W. (1975).	29
1.2.9	Ray A. y Bowman H.F. (1976).	30
1.2.10	Bell R.D. et al. (1977).	31
1.2.11	Usoro P.B. (1977).	32
1.2.12	Masada G.Y. (1979).	34
1.2.13	Secker P. (1981).	35
1.2.14	Barry R.E. et al. (1981).	36
1.2.15	González Santaló J.M. et al. (1983).	37
1.2.16	Morales J. et al. (1984).	38
1.2.17	Alanís Cantó R. (1984).	39

1.2.18 Snidow N.L. y Wilson T.L. (1984).	40
1.2.19 Madell J.T., (1985).	41
1.2.20 Tseng C.M. et al. (1985).	42
1.2.21 Meneses Del Arco C. (1985).	43
1.2.22 Albornoz Bueno A. (1985).	44
1.3 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS GENERALES	46

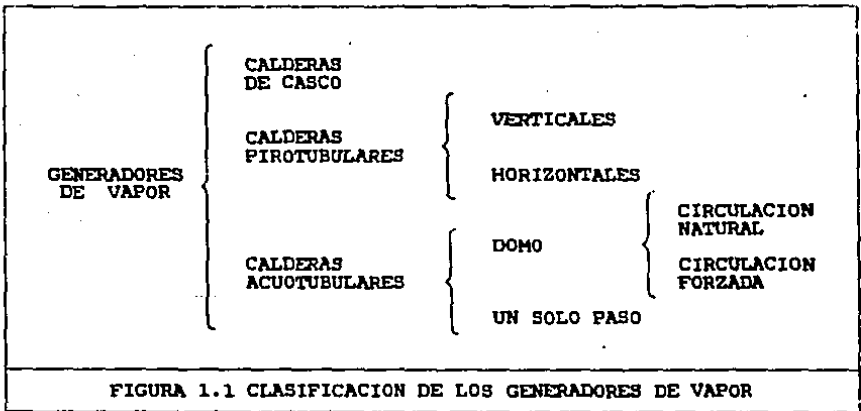
1 MODELOS DE GENERADORES DE VAPOR

En este capítulo se propone una clasificación general de los generadores de vapor y se revisan los principales trabajos hechos sobre el modelado y simulación de calderas.

1.1 Clasificación De Generadores De Vapor

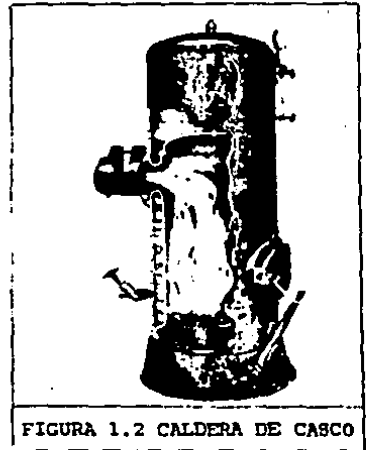
La generación de vapor es consecuencia de un conjunto de necesidades básicas que nacen intrínsecamente de la actividad industrial. Desde principios del siglo XVIII el uso del vapor se ha incrementado continuamente como una fuente térmica y un productor de energía. A partir de ese momento, y hasta nuestros días, el diseño de los generadores de vapor ha evolucionado en una forma acelerada.

Existen actualmente muchos tipos de generadores de vapor y una primera división puede ser el uso a que estén destinados. Por ejemplo, aunque la finalidad de producir vapor sea la misma, son muy distintos los generadores de vapor de las locomotoras que los utilizados para la calefacción de edificios. Asimismo, existen otros enfoques para agrupar a los generadores de vapor como son sus condiciones de operación, materiales de construcción, tamaño, fuente de calor, etc. en la Figura 1.1 se propone una clasificación considerando el diseño básico de los generadores de vapor en lo que respecta a la parte de agua/vapor.



1.1.1 Calderas De Casco. -

Las calderas de casco son un simple recipiente cerrado que contiene agua sobre el que actúa una fuente directa de calor. Estos generadores de vapor son poco usados en la industria actual debido a su limitada capacidad de producción de vapor. Su campo de acción se reduce a servicios de calefacción y calentamiento



de agua. En la Figura 1.2 se muestra una típica caldera de casco.

1.1.2 Calderas Piro-tubulares. -

Las calderas piro-tubulares reciben su nombre porque los productos de la combustión fluyen dentro de los tubos calentando al agua que los rodea. Estas calderas se dividen en calderas de tubos horizontales o verticales aunque las condiciones generales del diseño sean similares. En la Figura 1.3 se muestran dos ejemplos de calderas piro-tubulares.

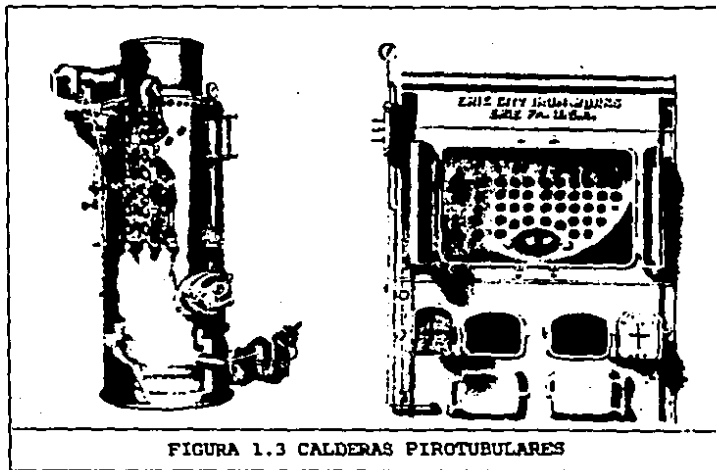


FIGURA 1.3 CALDERAS PIROTUBULARES

Estas calderas presentan las ventajas de ser relativamente baratas y de almacenar un gran volumen de agua que actúa como amortiguador y evita fluctuaciones violentas en el nivel de agua y presión de la caldera ante cambios bruscos en la demanda de vapor, pero debido a problemas en cuanto a la adaptabilidad de sobrecalentadores y a limitaciones en su tamaño, su uso es reducido a nivel industrial. Su rango de operación varía entre los 0.1 MPa y los 2 MPa de presión y pueden dar un servicio de flujo de vapor hasta de 0.35 kg/s.

1.1.3 Calderas Acuotubulares. -

En estas unidades el agua y el vapor circulan por el interior de los tubos en tanto que los gases, productos de la combustión, fluyen por fuera de ellos. Las calderas acuotubulares surgen como una respuesta a la creciente necesidad de aumentar el flujo de vapor y de trabajar con mayores presiones que las proporcionadas por los generadores piro-tubulares. Debido a las menores dimensiones relativas de sus componentes y a una mejor eficiencia en su operación, estas calderas son las más usadas actualmente en el servicio industrial.

Aunque el principal uso de las calderas acuotubulares es el de producir vapor a altas presiones y altas temperaturas, existen trabajando en un amplio rango de operación; desde 0.1 MPa de presión y 1.5 kg/s de capacidad de producción de vapor hasta presiones mayores a la presión crítica del agua (22.105 MPa) y capacidades de 1500 kg/s.

Debido a la importancia de este tipo de generadores de vapor el modelo desarrollado en esta tesis se ocupará exclusivamente de ellos.

A continuación se describe con más detalle la parte agua/vapor de cada una de las subdivisiones de esta clase de calderas.

GENERADORES DE VAPOR DE DOMO. Estas calderas pueden ser de circulación natural o de circulación forzada.

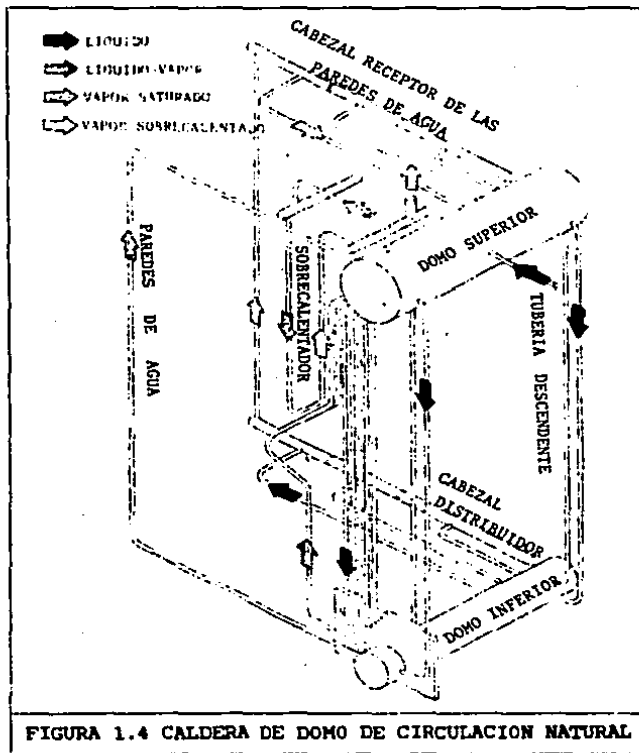
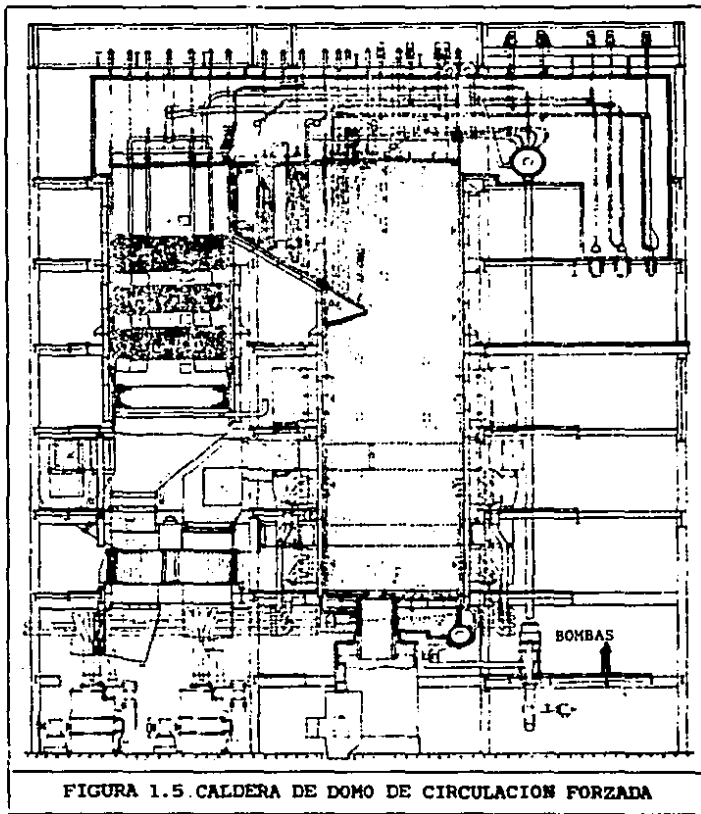


FIGURA 1.4 CALDERA DE DOMO DE CIRCULACION NATURAL

En la Figura 1.4 se presenta un esquema sencillo de una caldera de circulación natural, de tal manera de entender su funcionamiento básico.

En las calderas con domo, de circulación natural, el agua suministrada por el sistema de agua de alimentación entra al domo superior donde se mezcla con el líquido ahí presente. El líquido del domo pasa a través de la tubería descendente hasta el domo inferior donde es posible extraer impurezas (lodos). En algunos equipos se aprovecha el trayecto de la tubería descendente para precalentar el agua con residuos de los gases de combustión. Del domo inferior, el agua pasa a las paredes de agua donde el calor proveniente del hogar es absorbido por el líquido provocando que parte de éste se convierta en vapor. La mezcla de líquido/vapor asciende, por diferencia de densidades, a lo largo de las paredes de agua hasta el domo superior donde las fases se separan por medio de separadores de vapor de algún tipo. El vapor saturado, separado y limpio, pasa a los sobrecalentadores mientras que el líquido se mezcla con el existente en el domo superior para ser recirculado.

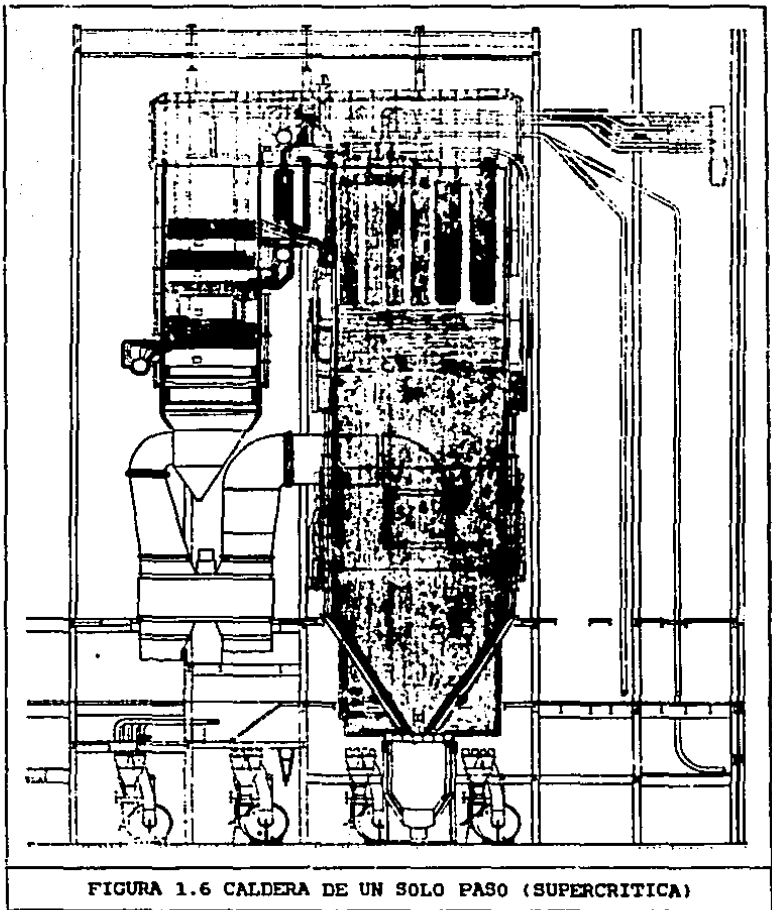
El funcionamiento de una caldera de circulación forzada es esencialmente el mismo que el descrito para las calderas de circulación natural excepto que en algún sitio de la tubería descendente se encuentran una o más bombas que fuerzan el flujo a través de las paredes de agua. En la Figura 1.5 se muestra un ejemplo de una caldera de circulación forzada.



Las calderas de circulación forzada pueden trabajar a mayores presiones que las de circulación natural y es más versátil su diseño por no tener que cuidar las características especiales del tiro de agua.

Los generadores de vapor de domo pueden poseer más de un domo superior con la finalidad de aumentar la capacidad de la unidad y evitar inestabilidades. Generalmente los domos están unidos entre sí y el funcionamiento básico de la caldera no se altera.

GENERADORES DE VAPOR DE UN SOLO PASO. Este tipo de calderas también son conocidas como calderas supercríticas pues su presión de operación es, generalmente, mayor que la presión crítica del agua. El agua de alimentación se provee con una alta presión inicial y se somete a etapas de recalentamiento múltiple. Al no poseer domo para separar el vapor del líquido, las calderas de un solo paso deben evaporar toda el agua que se les alimenta. Esto tiene como consecuencia que el agua debe pretratarse para evitar incrustaciones que dañen los tubos. En general estas calderas tienen una mayor eficiencia térmica que los generadores de vapor con domo, pero debido a los costos altos de su fabricación y a los problemas inherentes de manejar el fluido a alta presión y alta temperatura, no son muchos los casos en que se tenga una justificación económica para su uso. En la Figura 1.6 se muestra una caldera de un solo paso, supercrítica.



1.2 Modelos Existentes

En esta sección se presenta un resumen de los principales trabajos publicados en el campo del modelado y simulación de generadores de vapor hasta la fecha. La revisión se efectúa sobre los trabajos relacionados con los generadores de vapor acuatubulares, únicamente en lo relacionado con la parte agua/vapor.

Algunos autores han desarrollado modelos de generadores de vapor sin plantear las ecuaciones de transporte y conservación. No se presenta aquí mayor comentario sobre los mismos. Algunos ejemplos, entre otros, que pueden citarse son Profos P. (1943) y (1955), Thal Larsen H. (1960), Laubli F. (1961), Enns M. (1962) y Anderson P.M. et al. (1975).

1.2.1 Análisis Dinámico De Una Caldera. - Chien K.L. et al. (1958).

OBJETIVO: Estudio del control dinámico del generador de vapor.

UNIDAD BASE: Pequeña caldera naval con domo, de circulación natural, sin recalentador (no se especifica marca ni modelo). No se definen las condiciones nominales de operación pero para el modelado se toma como base una capacidad de operación del 44%, con una producción de vapor de 15 kg/s y una presión y temperatura en la descarga del sobrecalentador de 8.4 MPa y 783 K, respectivamente.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Se desprecian los términos inerciales

en las ecuaciones de flujo en el circuito. No existe posibilidad de ebullición en la tubería descendente. Las velocidades del vapor y el líquido en las paredes de agua son idénticas. La temperatura del líquido en todo el circuito de circulación es siempre la de saturación a la presión del domo. La calidad del vapor es constante a lo largo de las paredes de agua. La temperatura del vapor en el domo es la de saturación a su presión. La transferencia de calor al fluido de las paredes de agua es proporcional al cubo de la diferencia entre la temperatura del metal y el fluido. Se considera una sola trayectoria en el circuito de recirculación. Se usa un modelo de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales resultantes se linealizan alrededor del estado base y se programan en una computadora analógica (no especificada).

COMENTARIOS: Presenta uno de los primeros modelos formales para reproducir el comportamiento de un generador de vapor y es considerado como clásico. Su alcance es limitado debido a las restricciones computacionales de la época, sin embargo asentó las bases para algunos modelos posteriores. Sólo se analizan las respuestas de la presión y el nivel del domo. El modelo, por su simpleza, no representa al generador de vapor con mucha exactitud y actualmente debe considerarse obsoleto.

1.2.2 Representación Dinámica De Una Gran Unidad Caldera-Turbina. -
Daniels J.H. et al. (1961).

OBJETIVO: Auxiliar para el diseño de sistemas de control

UNIDAD BASE: Unidad Cromby #2 de la Philadelphia Electric Company de circulación forzada y una capacidad nominal de producción de vapor de 183 kg/s con 12.4 MPa de presión y 810 K de temperatura a la salida del sobrecalentador.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Las condiciones del domo son las de saturación a su presión. El flujo volumétrico a través de las bombas se considera constante. La calidad del vapor es constante a lo largo de las paredes de agua. Las velocidades del vapor y el líquido son iguales. Las propiedades del fluido en las paredes de agua se toman como las de saturación a la presión del domo. La transferencia de calor al fluido de las paredes de agua es proporcional al cubo de la diferencia de las temperaturas del metal y el fluido. Se considera una sola trayectoria en el circuito de recirculación. Se usa un modelo de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales no lineales obtenidas se linealizan alrededor de un punto y se transforman por el método de Laplace. Las ecuaciones algebraicas resultantes se programan en una computadora digital (no se especifica marca ni modelo).

COMENTARIOS: Es el primer modelo que representa una unidad generadora completa. En lo que respecta al modelo de la parte agua/vapor no hace ninguna contribución con respecto al modelo presentado por Chien, aunque presenta un mejor tratamiento matemático. Sólo se presentan resultados de la respuesta del nivel del domo. El autor es consciente de que este modelo puede mejorarse pues sus resultados no son del todo satisfactorios. Según el reporte de Dallas H.G. y Sauter D.M. (1961) este modelo no reproduce respuestas lo suficientemente exactas para considerarlo adecuado en el diseño de sistemas de control.

1.2.3 Optimización Dinámica De Una Caldera. - Nicholson H. (1964).

OBJETIVO: Modelo auxiliar para el diseño del control digital de unidades generadoras.

UNIDAD BASE: Unidad instalada en la central termoeléctrica de Merseyside, de circulación natural, con una capacidad de 12.6 kg/s de producción de vapor a 4.5 MPa de presión y 727 K de temperatura.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Se desprecian los términos inerciales en las ecuaciones de flujo en el circuito. No existe posibilidad de ebullición en la tubería descendente. Las velocidades del vapor y el líquido en las paredes de agua son idénticas. La temperatura del líquido en todo el circuito de circulación es siempre la de saturación a la presión del domo. La calidad del vapor es constante a lo largo de las paredes de agua. La temperatura del vapor en el domo es la de

saturación a su presión. La transferencia de calor al fluido de las paredes de agua es proporcional al cubo de la diferencia de las temperaturas del metal y el fluido. Se consideran dos trayectorias en las paredes de agua. Se usa un modelo de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales no lineales obtenidas se linealizan alrededor de un punto y se transforman por el método de Laplace. Las ecuaciones resultantes se programan en una computadora digital (no se especifica marca ni modelo).

COMENTARIOS: El modelo planteado es el mismo propuesto por Chien, excepto el de considerar dos trayectorias en las paredes de agua. Sólo se analizan las respuestas de la presión y el nivel del domo. La parte principal del artículo se concentra en el diseño del lazo de control. No se hace ninguna contribución al modelo de generadores de vapor.

1.2.4 Modelo Dinámico De Una Caldera De Domo. - Thompson F.T. (1967).

OBJETIVO: Auxiliar para el diseño y evaluación de un controlador multivariable.

UNIDAD BASE: Unidad Cromby #2 de la Philadelphia Electric Company, de circulación forzada y una capacidad nominal de producción de vapor de 183 kg/s con 12.4 MPa de presión y 810 K de temperatura a la salida

del sobrecalentador.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: No se mencionan explícitamente. Se hace hincapié en las ventajas de este modelo con respecto a los anteriores. Estas ventajas son: Se considera el efecto de la variación de las propiedades de la mezcla agua/vapor con respecto a la longitud de las paredes de agua; se toma en cuenta el cambio temporal del flujo de recirculación; se toma en cuenta el efecto de la entalpia del vapor saturado con el cambio de presión. Se considera una sola trayectoria en el circuito de recirculación. Se aplica el método de "volumen elemental" que lleva intrínseco el de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones obtenidas se linealizan (no se especifica el método) y programan en una "computadora digital 7094" [sic].

COMENTARIOS: Este modelo da un gran paso en la exactitud con que el modelo representa al prototipo gracias a la técnica de volúmenes elementales. Aparte de la respuesta de la presión y nivel del domo se presenta el perfil de las propiedades de la mezcla líquido/vapor a lo largo de la pared de agua. Los resultados, sin embargo, siguen dando que desear.

1.2.5 Modelos Dinámicos Para Calderas De Plantas De Energia. -
Anderson J.H. et al. (1968).

OBJETIVO: Auxiliar para la síntesis de controladores óptimos.

UNIDAD BASE: Se representan dos calderas, ambas de circulación natural (no se definen marca ni modelo). La primera unidad es de dos domos superiores y trabaja a 6.5 MPa de presión y 769 K de temperatura con una capacidad de 38 kg/s. El otro generador de vapor opera a 16.9 MPa de presión y 814 K de temperatura con una capacidad de 170 kg/s de producción de vapor.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Para cada modelo se hacen suposiciones particulares. Para el modelo de la caldera que trabaja a 6.5 MPa las paredes de agua se dividen en tres secciones, los niveles de los domos son iguales en todo momento, el líquido en los domos están a las condiciones de saturación a su presión de operación, no se considera el deslizamiento de las burbujas de vapor en las paredes de agua, se usa el enfoque de parámetros concentrados. Para el generador de vapor que trabaja a 16.9 MPa se considera que el agua de alimentación se mezcla con la presente en el domo pero los efectos de condensación o evaporación no son tomados en cuenta, el líquido en los domos están a las condiciones de saturación a su presión de operación, no se considera el deslizamiento de las burbujas de vapor en las paredes de agua, se usa el enfoque de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales son linealizadas y puestas en su forma canónica para obtener las respuestas dinámicas usando rutinas normales de integración numérica. A las ecuaciones se les aplicó un método de reducción de orden. No se especifica tipo, marca ni modelo de la computadora usada.

COMENTARIOS: Los autores se basan en los trabajos de Chien y Daniels. Comparan su trabajo con el de Chien para demostrar la validez de su modelo. Excepto por su método de reducción de orden, retroceden en el modelo mismo con respecto al modelo de Thompson.

1.2.6 Modelo Matemático Para Sistemas De Turbina-Generador-Caldera. -
Mc Donald J.P. y Kwanty H.G. (1970).

OBJETIVO: Auxiliar en el desarrollo de las teorías modernas del control.

UNIDAD BASE: Unidad Cromby #2 de la Philadelphia Electric Company de circulación forzada, con capacidad nominal de producción de vapor de 183 kg/s con 12.4 MPa de presión y 810 K de temperatura a la salida del sobrecalentador. El punto base para el modelado se tomó al 90% de capacidad.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: El líquido y el vapor en el domo están en equilibrio termodinámico a la presión del domo. El flujo de recirculación es constante. Se desprecia la transferencia de calor a lo largo de la tubería descendente. No se considera almacenamiento

másico en la tubería descendente. La adición de energía debido a las bombas de circulación forzada se desprecia. No se considera inercia energética en el fluido de las paredes de agua. No se menciona el modelo para la representación de flujo en dos fases. Se usa el modelo de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales se linealizan alrededor del punto base. La solución se hace en una computadora digital no definida.

COMENTARIOS: Los autores se preocupan mucho por no perder la linealidad del modelo y muchas de las suposiciones en el modelado tienen ese objetivo. El desarrollo del modelo se enfoca principalmente a la formulación de otros aspectos del generador de vapor pero en el caso del circuito agua/vapor no existe un avance firme. Se ajusta el modelo (parámetros) con el compartamiento real de la planta. Se intenta dar un significado físico a los parámetros.

1.2.7 Modelo No Lineal Para Sistemas De Turbina-Generador-Caldera. - Mc Donald J.P. et al. (1971).

OBJETIVO: Diseño y análisis de sistemas de control. La unidad se representa para una carga de 50% o mayor.

UNIDAD BASE: Unidad Croaby #2 de la Philadelphia Electric Company, de circulación forzada con capacidad nominal de producción de vapor de 183 kg/s con 12.4 MPa de presión y 810 K de temperatura a la salida

del sobrecalentador. El punto base para la validación del modelo se tomó al 90% de capacidad.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: El líquido y el vapor en el domo están en equilibrio termodinámico a la presión del domo. El flujo de recirculación es constante. Se desprecia la transferencia de calor a lo largo de la tubería descendente. No se considera almacenamiento másico en la tubería descendente. La adición de energía debido a las bombas de circulación forzada se desprecia. No se considera inercia energética en el fluido de las paredes de agua. No se menciona el modelo para la representación de flujo en dos fases. Se usa el modelo de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: No se menciona el método para resolver las ecuaciones diferenciales no lineales. El programa se implanta en una computadora digital IBM 360/44.

COMENTARIOS: Es uno de los primeros modelos que no se linealizan. Los autores hacen hincapié en que los parámetros son "cantidades físicas los cuales pueden obtenerse de datos de diseño o pruebas, así el modelo es convenientemente adaptado a otras aplicaciones" [sic].

1.2.8 Modelo Matemático Dinámico De Un Domo De Vapor. - Moeck E.O. y Hinds H.W. (1975).

OBJETIVO: Estudio de la controlabilidad de estaciones de generación nucleares.

UNIDAD BASE: No especificada. El modelo nace del proyecto de la simulación dinámica de la unidad de generación nuclear de la CANDU-BLW.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: El espacio ocupado por el vapor es homogéneo. La fase líquida está perfectamente mezclada y el agua que deja el domo está a la entalpia promedio. Ninguna de las fases existe en forma metaestable. Se usa el modelo de fases separadas y no se plantea la ecuación de cantidad de movimiento. No hay transferencia de calor entre los fluidos y el metal del domo.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: No se especifican pero se menciona que para algunos casos de pequeñas perturbaciones las ecuaciones se linealizan y se resuelven en una computadora analógica no definida.

COMENTARIOS: El modelo es específico del domo superior y da resultados aceptables según las comparaciones con sistemas reales. No se tiene ninguna consideración empírica pero se desprecia la transferencia de calor. Su contribución fue la de trabajar con fluidos separados y obtener buenos resultados.

1.2.9 Modelo Dinámico No Lineal De Una Caldera Subcritica De Un Solo Paso. - Ray A. y Bowman H.F. (1976).

OBJETIVO: Investigación de la dinámica de sistemas de generación de energía y el diseño de sistemas de control apropiados.

UNIDAD BASE: Un generador de vapor nuclear subcritico de un solo paso. No se especifican marca ni modelo.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Las propiedades del fluido son uniformes en cualquier punto a lo largo de las paredes de agua. Existe un flujo de calor uniforme e independiente en cada sección de las paredes de agua. Existe el mismo flujo en cada uno de los tubos de la caldera. Se desprecia la aceleración temporal en la ecuación de cantidad de movimiento. Se tiene un modelo para la zona de evaporación y otro para el vapor. No se especifican las condiciones de modelado para flujo en dos fases, pero se presume que se usa flujo homogéneo. Se usa el enfoque de parámetros concentrados en secciones grandes.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: El conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales ordinarias no lineales se programan en una computadora digital IBM 370 usando un programa para modelado de sistemas continuos (CSMP III).

COMENTARIOS: Se dan pocos datos para ver el alcance real del modelo. Del resumen de ecuaciones que se presentan parece ser un modelo simple sin mayores pretenciones.

1.2.10 Modelos Para Plantas Con Turbo-Calderas De Gran Capacidad. -
Bell R.D. et al. (1977).

OBJETIVO: Conocimiento de la dinámica de las unidades para su mejor diseño y estudio del control.

UNIDAD BASE: Unidad de la Liddell Power Station de 500 MW de la Electricity Commission de N.S.W. No se precisan los datos de operación.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Se plantean dos modelos uno lineal y otro no lineal. El modelo lineal ajusta datos de la planta. El modelo no lineal se basa en principios físicos pero no menciona las suposiciones hechas.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: El modelo lineal se corrió en una computadora digital CDC 72 y en una Varian 620f. El modelo no lineal se programó en una Univac 1106 usando el lenguaje "Mimic" y se linealizó para algunas pruebas.

COMENTARIOS: Se dan pocos datos del modelado para hacer una evaluación objetiva. El artículo no parece proporcionar ninguna novedad en el área de modelado de calderas. No se menciona la comparación de su modelo lineal con la linealización de su modelo no lineal. Los resultados reportados parecen ser buenos.

1.2.11 Modelado Y Simulación De Una Caldera De Domo Y Una Turbina De Una Planta De Energía Bajo Condiciones De Emergencia. - Usoro P.B. (1977).

OBJETIVO: Representación del sistema caldera-turbina para el desarrollo y evaluación de una estrategia de control para estados de emergencia de la planta a cargas mayores del 50%. Se plantean dos modelos, uno para una computadora digital y otro más sencillo para una analógica.

UNIDAD BASE: No se determinan la marca ni el modelo. La caldera es de circulación forzada con una capacidad de producción de vapor de 530 kg/s a una presión de 18 MPa y una temperatura de 814 K.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Modelo analógico: El agua y el vapor están en equilibrio termodinámico a la presión del domo. La tubería descendente se considera adiabática. Las bombas de circulación forzada se agrupan en una sola equivalente. El fluido en las paredes de agua está a las condiciones de saturación del domo superior. Los coeficientes de caída de presión por fricción son constantes en todo el circuito. Se ignora el efecto de flujo en dos fases. Se desprecia el efecto de compresibilidad en las paredes de agua. La transferencia de calor del metal al fluido en paredes de agua siempre está determinado por la ebullición. La variación del producto $P V$ es despreciable comparada con la variación de la entalpía. Los términos inerciales son despreciados en las ecuaciones de flujo. Las masas del

metal de los tubos se agrupan con la masa del fluido para los efectos de inercia térmica. Usa el enfoque de parámetros concentrados.

Modelo digital: Se supone un flujo de recirculación constante. Se trabaja con un controlador perfecto de nivel: el nivel del domo no varía. El agua y el vapor en el domo están en equilibrio (saturación).

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: No se especifican las computadoras utilizadas. Las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales obtenidas se integran con el método de Runge-Kuta con un paso de integración de 0.1 s.

COMENTARIOS: Este modelo es más completo y preciso que los anteriores ya que su objetivo es representar estados de emergencia. En particular pone un especial interés en modelar los equipos auxiliares en cuanto a su interacción mecánico/eléctrica, a fin de observar el efecto de bajas en la frecuencia y voltaje suministrados.

1.2.12 Modelado Y Control De Sistemas De Caldera - Turbina -
Generador De Plantas De Energia. - Masada G.Y. (1979).

OBJETIVO: Representar fidedignamente la unidad para estudio de sus características dinámicas en situaciones normales y anormales.

UNIDAD BASE: No se especifican marca ni modelo. Caldera supercritica de un solo paso con una capacidad de producción de vapor de 1232 kg/s a 25 MPa de presión y 811 K de temperatura.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Los coeficientes de caída de presión por fricción son constantes en todo el circuito. La variación del producto $P V$ es despreciable comparada con la variación de la entalpía. Los términos inerciales son despreciados en las ecuaciones de flujo. Usa el enfoque de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Computadora digital PDP 11/40. Las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales se integraron con un método de Runge-Kutta de orden cuatro con un paso de integración de 0.4 s.

COMENTARIOS: Este trabajo parece basarse en el de Usoro. Se hace un estudio para determinar el número de nodos que deben tomarse para concentrar parámetros. Se presenta el estudio del control de la planta. El autor propone una guía general para el modelado del control y de los procesos de termo-fluidos de sistemas complejos de plantas de energía.

1.2.13 Modelo Para Paredes De Agua Y Domo De Vapor. - Secker P.
(1981).

OBJETIVO: Modelo auxiliar para el desarrollo de un simulador para entrenamiento de operadores de centrales termoeléctricas.

UNIDAD BASE: No especificada, trata de ser un modelo general.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Se supone equilibrio termodinámico en el domo y paredes de agua. El flujo en dos fases se correlaciona según el régimen de ebullición (se usa la correlación de Nelson-Martinelli para el factor de fricción). Se desprecian los términos inerciales en la ecuación de flujo (se asume un estado cuasi-estático del sistema). El líquido siempre está a las condiciones de saturación.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones no se resuelven, sólo se plantean.

COMENTARIOS: Se anexa la codificación (sin implantar en la computadora). No se presentan resultados y no es posible saber si el modelo es fidedigno.

1.2.14 Modelo Digital Para Estado Estable De Generadores De Vapor Supercríticos. - Barry R.E. et al. (1981).

OBJETIVO: Modelo para la "predicción cuantitativa de los efectos de cambios de áreas, equipo auxiliar o condiciones de operación" [sic].

UNIDAD BASE: Generador de vapor supercrítico Babcock and Wilcox con una capacidad de producir 700 kg/s de vapor a una temperatura de 811 K y una presión de 25 MPa.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: No se plantea explícitamente la formulación matemática.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: No se mencionan.

COMENTARIOS: Se presenta una especie de resumen del algoritmo utilizado sin mencionar las ecuaciones básicas usadas. La tabla de resultados y comparaciones reportada muestra que el modelo no puede considerarse preciso. La presentación deja mucho que desear.

1.2.15 Modelo De Una Caldera De Circulación Forzada De Una Unidad De 300 MW. - González Santaló J.M. et al. (1983), Roldán Villasana E.J. et al. (1984a) y (1984b).

OBJETIVO: Modelo que forma parte de un simulador para entrenamiento de operadores de centrales termoelectricas.

UNIDAD BASE: Unidad 1 de la central termoelectrica "Francisco Pérez Ríos" de Tula, Hgo. Caldera Combustion Canada, de domo, con circulación forzada, con una capacidad de 252 kg/s de vapor a una temperatura de 849 K y una presión de 18 MPa.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Las condiciones en el domo superior son homogéneas y de equilibrio. Se considera una sola trayectoria de flujo en el circuito de agua/vapor. Se usa el modelo de flujo deslizante de Zuber para el flujo en dos fases de las paredes de agua. Los coeficientes de fricción se consideran constantes. Se desprecia la aceleración temporal. Para el cálculo de la aceleración espacial el flujo de entrada se considera igual al flujo de salida en las paredes de agua. Las condiciones termodinámicas a lo largo de las paredes de agua son tomadas a la presión del domo inferior. La capacidad calorífica de los gases se considera constante. El proceso es adiabático excepto en las paredes de agua. Se usa el concepto de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Se programó en una computadora

digital VAX/VMS 11/780 y se implantó también en una GOULD SEL 32/7780. El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales se integraron con el método de Euler usando un paso de 0.25 s.

COMENTARIOS: Este modelo representa al generador de vapor en todo el rango de operación incluyendo el llenado y arranque. Se incluye el efecto de una posible rotura de tubos de las paredes de agua. El modelo corre en tiempo real (durante el desarrollo se cuidó el compromiso entre la exactitud de los resultados y el tiempo de ejecución).

1.2.16 Desarrollo De Un Modelo Matemático De Un Reactor BWR. - Morales J. et al. (1984).

OBJETIVO: Modelo para un simulador de entrenamiento de una planta nucleoelectrónica.

UNIDAD BASE: Reactor de la nucleoelectrónica de Laguna Verde, Ver. No se especifica marca, modelo ni condiciones de operación.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: No se comentan explícitamente.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Se implanta en el Lenguaje de Simulación para Sistemas Continuos DARE-P.

COMENTARIOS: Se presenta un resumen de las ecuaciones obtenidas y al no mencionarse las suposiciones establecidas no se tiene mucha idea del alcance del modelo. Una parte del modelo, el domo, se toma de uno

desarrollado por General Electric (1978).

1.2.17 Simulación De Los Procesos Termohidráulicos En La Vasija De Un Reactor Nuclear Tipo BWR. - Alanis Cantú R. (1984).

OBJETIVO: Desarrollar un modelo matemático de los procesos termohidráulicos dentro de la vasija de un reactor de agua hirviente. Modelo piloto que forma parte para un simulador de entrenamiento de operadores.

UNIDAD BASE: Unidad de la nucleoelectrica de Laguna Verde (no se dan mayores especificaciones).

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: El líquido saturado y el vapor en el núcleo y en el pleno superior del núcleo permanecen en equilibrio termodinámico. Se desprecian las variaciones espaciales de las propiedades termodinámicas en las regiones del núcleo y del pleno superior. Las ecuaciones que integran el modelo describen la evolución de los procesos en función del tiempo únicamente. El flujo del moderador está dividido en dos fracciones, una que recibe calor directamente del combustible y otra adiabática a lo largo del núcleo (la mezcla de las dos fracciones de flujo ocurre en una región sin masa). Se considera que la distribución de potencia térmica en el núcleo es lentamente dependiente del tiempo mientras que la magnitud de la potencia total cambia rápidamente con él. Se desprecian los cambios temporales de la presión en la zona del núcleo. La fracción

de vacío se calculó con el modelo de Akcasu A.Z. (1960) ajustada por mínimos cuadrados para datos experimentales.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: El modelo se implantó en una computadora VAX/780 haciendo uso del paquete de simulación DARIIE. No se describen el método y paso de integración.

COMENTARIOS: El modelo se valida contra el FSAR (Final Safety Analysis Report) y se reportan diez curvas que parecen aceptables, al menos cualitativamente. Los parámetros del modelo se ajustan con datos del estado estable. Se presenta un resumen de las características del lenguaje de simulación DARIIE y el listado de los programas fuente.

1.2.18 Sistema De Modelación Modular De Un Generador De Vapor De Tubo En U. - Snidow N.L. y Wilson T.L. (1984).

OBJETIVO: Contar con un modelo que reproduzca satisfactoriamente los datos de planta durante un disparo de turbina.

UNIDAD BASE: Unidad 2 de Arkansas Nuclear One. Generador de vapor de circulación natural en U. No se definen las condiciones de operación de la caldera.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: El domo se considera adiabático. La tubería descendente es adiabática. Las propiedades del domo y la tubería descendente se evalúan a la presión del domo. El fluido en

las paredes de agua se evalúan a la presión de la parte inferior de la caldera y cuando hay ebullición la segunda variable de estado es la calidad del vapor a la salida de las paredes de agua. Para el flujo en dos fases se usa el modelo de Zuber-Findlay.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: No son mencionados.

COMENTARIOS: Se presenta el análisis de tres transitorios haciendo comparaciones con datos de planta. El modelo parece acercarse al comportamiento del prototipo. El generador de vapor modelado no es de los más usados.

1.2.19 Simulación De Transitorios De Plantas Nucleares Con Una Computadora Personal. - Madell J.T., (1985).

OBJETIVO: Desarrollo de un modelo que requiera poco espacio para su almacenamiento en la memoria de la computadora y sea de rápida ejecución. Se desean determinar las respuestas de la temperatura del sistema.

UNIDAD BASE: Reactor de metal líquido (LMFBR). No se especifican marca, modelo, ni condiciones de operación.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: No se especifican.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Se desarrolla en una VAX 11/750 y se traslada a una computadora personal. El autor establece que "...los componentes de los módulos se escogieron con algoritmos

simples y técnicas de integración rápidas." [sic].

COMENTARIOS: La formulación está hecha para obtener las temperaturas algunos puntos del reactor. No se muestran las ecuaciones de todas las secciones en que se divide el generador de vapor, en algunas sólo se comentan las funcionalidades establecidas. No se presentan datos para la validación del modelo.

1.2.20 Validación De La Simulación Dinámica De Un Ciclo De Circulación Natural. - Tseng C.M. et al. (1985).

OBJETIVO: Parte de un programa para el diseño y construcción de un pequeño reactor nuclear.

UNIDAD BASE: No se especifica.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Se desprecia la transferencia de calor de la tubería de bajada y de las paredes de agua a sus alrededores. El fluido en las paredes de agua siempre es monofásico. Se supone flujo unidimensional a través de todo el circuito. Los coeficientes de transferencia de calor son constantes.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Las ecuaciones diferenciales, tratadas con técnicas de Laplace fueron implantadas en una computadora híbrida no definida.

COMENTARIOS: Las hipótesis hechas parecen mostrar que el modelo no es muy bueno, pero curiosamente de los gráficos mostrados se deduce lo

contrario. No se menciona la fuente de los datos experimentales con que se compararon los resultados de la simulación. La simulación corre en tiempo real.

1.2.21 Modelo Para Análisis Dinámico De Calderas De Circulación Forzada Y Circulación Natural. - Meneses Del Arco C. (1985).

OBJETIVO: Ampliar el alcance del modelo de González Santaló J.M. et al. (1983), que forma parte de un simulador para entrenamiento de operadores de centrales termoeléctricas, para considerar el caso de circulación natural.

UNIDAD BASE: Unidad 1 de la central termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos" de Tula, Hgo. Caldera Combustion Canada, de domo, con circulación forzada, con una capacidad de 252 kg/s de vapor a una temperatura de 849 K y una presión de 18 MPa.

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Las condiciones en el domo superior son homogéneas y de equilibrio. Se considera una sola trayectoria de flujo en el circuito de agua/vapor. Se usa el modelo de flujo deslizante de Zuber para el flujo en dos fases de las paredes de agua. Los coeficientes de fricción se consideran constantes. Se desprecia la aceleración temporal. Para el cálculo de la aceleración espacial el flujo de entrada se considera igual al flujo de salida en las paredes de agua. Las condiciones termodinámicas a lo largo de las paredes de agua son tomadas a la presión del domo inferior. La

capacidad calorífica de los gases se considera constante. El proceso es adiabático excepto en las paredes de agua. Se usa el concepto de parámetros concentrados.

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Se programó en una computadora digital VAX/VMS 11/780. El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales se integraron con el método de Euler con un paso de 0.125 s.

COMENTARIOS: Este modelo se basa en el desarrollado por González Santaló et al. (1983). Sus principales contribuciones son la de considerar circulación natural y acoplar el modelo con otras partes de la caldera.

1.2.22 Implantación De Un Modelo De Reactor BWR Y Simulación De Transitorios Operacionales De La Central Nucleoeléctrica De Laguna Verde. - Albornoz Bueno A. (1985).

OBJETIVO: Modelo de soporte para el desarrollo de un simulador para entrenamiento de operadores.

UNIDAD BASE: Reactor General Electric de la nucleoeléctrica de Laguna Verde (no se dan mayores especificaciones).

SIMPLIFICACIONES E HIPOTESIS: Sólo en la zona del núcleo, pleno superior, separadores de vapor y domo se considera la existencia de dos fases. El líquido y el vapor están en equilibrio termodinámico.

La fracción de vacío se obtiene por la relación empírica de Akcasu A.Z. (1960). En toda la región de agua subenfriada, los cambios en las entalpías se modelan simplemente como retrasos en la función de transporte. Se desprecian los cambios en las propiedades termodinámicas con respecto a las trayectorias de flujo. El flujo del moderador está dividido en dos fracciones, una que recibe calor directamente del combustible y otra adiabática a lo largo del núcleo (la mezcla de las dos fracciones de flujo ocurre en una región sin masa).

COMPUTADORA Y METODO DE SOLUCION: Se programó en una computadora VAX/730 utilizando el lenguaje de simulación continua ISSAP. Las ecuaciones fueron integradas con el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso de integración de 0.0025 s.

COMENTARIOS: Este modelo se basa en el desarrollado por Alanis Cantó (1984). El modelo se valida contra el FSAR (Final Safety Analysis Report) y las curvas reportadas parecen aceptables al menos cualitativamente. Los parámetros del modelo se ajustan con datos del estado estable. Se presenta un resumen de las características del lenguaje de simulación ISSAP y el listado de los programas fuente. Por el paso de integración tan pequeño el programa no corre en tiempo real a pesar de ser un modelo para un simulador de entrenamiento.

1.3 Conclusiones Y Comentarios Generales

Aunque es difícil hacer una comparación uno a uno de los modelos resumidos debido a la diversidad de contenido y forma de presentación de los artículos, se puede hacer un resumen del desarrollo general del modelado de generadores de vapor en su parte agua/vapor.

Casi todos los autores desarrollan el modelo para ser un auxiliar en el diseño del control de calderas. Algunos otros hacen la formulación para incorporar el modelo en un simulador para entrenamiento. Ninguno tiene como fin el estudio profundo de los fenómenos termohidráulicos que tienen lugar en calderas.

Lo anterior implica que los autores tengan una meta común: un modelo preciso de rápida ejecución. Esta es la causa principal de las suposiciones y simplificaciones que se hacen a un modelo. A continuación se presenta una revisión de las principales suposiciones con respecto a:

- TERMINOS INERCIALES DE LAS ECUACIONES DE FLUJO. Con la notable excepción de Thompson F.T. (1967), todos los autores desprecian la inercia del flujo en el circuito. Algunos autores no plantean la ecuación de movimiento o asumen un flujo constante.

- EQUILIBRIO TERMODINAMICO EN EL DOMO. Todos los autores hacen esta consideración.
- FLUJO EN DOS FASES. Algunos artículos mencionan que no se considera el fenómeno de flujo en dos fases. Algunos otros asumen que las velocidades del líquido y vapor son la misma (flujo homogéneo). Secker P. (1981) correlaciona el flujo en dos fases según el régimen de ebullición presente; en los trabajos siguientes se trata el fenómeno con diversas correlaciones. Nadie presenta un tratamiento matemático riguroso en este aspecto.
- NUMERO DE TRAYECTORIAS. A excepción de Nicholson H. (1964) que propone dos trayectorias en las paredes de agua, el resto de los autores trabajan con una sola trayectoria.
- DISTRIBUCION ESPACIAL. La mayoría de los autores consideran que todo el circuito conserva las propiedades termodinámicas prevaletientes en el domo superior y desarrollan un modelo puntual. Thompson F.T. (1967) y Masada G.Y. (1979) consideran la posibilidad de subenfriamiento en la tubería descendente. De una forma u otra todos usan el concepto de parámetros concentrados. En cuanto a los trabajos que usan el modelo unidimensional, Thompson F.T. (1967) trabaja con el concepto de volúmenes elementales con lo que calcula la variación de las propiedades a lo largo de las paredes de agua, sin embargo no se vuelve a tratar el asunto hasta que lo hace González Santaló J.M. et al. (1983) con un modelo en que se integra la velocidad del fluido con respecto a la coordenada axial.

- CONDICIONES DE OPERACION SIMULADAS. La mayor parte de los autores desarrolla su trabajo para un corto rango de condiciones de operación o para un solo punto. González Santaló et al. (1983) simulan todas las condiciones de operación del generador de vapor, incluyendo el encendido de la unidad.
- SOLUCION DE LAS ECUACIONES. Ray A. y Bowman H.F. (1976) son los primeros en no linealizar las ecuaciones diferenciales ordinarias obtenidas. Los autores subsecuentes utilizan diversos métodos para integrar las ecuaciones. La variable de integración siempre es el tiempo. González Santaló J.M. et al. (1983) integran también con respecto a la coordenada axial.

Por otra parte, todos los modelos desarrollados son modelos específicos que se aplican únicamente a la caldera prototipo original. Sin embargo, Mc Donald J.P. et al. (1971) y Barry R.E. et al. (1981), mencionan que su modelo puede ser usado por otros generadores de vapor, aunque parece ser que el ajuste de parámetros es bastante laborioso, según se aprecia en las publicaciones.

Por tanto, en general puede observarse que hasta ahora el modelado de calderas, específicamente en el circuito agua/vapor, ha evolucionado continuamente. Los factores limitantes han sido la capacidad de los equipos de cómputo, los métodos matemáticos disponibles para el tratamiento y solución de las ecuaciones y las correlaciones (empíricas o rigurosas) de los fenómenos físicos efectuados en las calderas.

Como una última reflexión puede concluirse que el modelado de sistemas dinámicos debe enfocarse al desarrollo de códigos flexibles, modulares, que permitan la fácil inclusión de los progresos en los métodos matemáticos y correlaciones físicas y la adaptación del modelo a diversos tipos del equipo simulado.

CAPITULO 2

METODOLOGIA DE MODELADO

¿Hubo un plan cuidadosamente preparado, ensayado y revisado muchas veces o fue sólo algo que ocurrió de un modo más bien improvisado?

Stephen King,
"Carrie", (1974)

I N D I C E

CAPITULO 2	METODOLOGIA DE MODELADO	
2.1	GENERALIDADES	52
2.2	MODULARIZACION	53
2.2.1	Ventajas.	53
2.2.2	Criterios para modularizar.	55
2.2.3	Modularización Externa.	56
2.2.4	Modularización Interna.	58
2.3	MODELO CONCEPTUAL	60
2.4	MODELO FORMAL	60
2.5	MODELO DIGITAL	62
2.5.1	Programación estructurada.	63
2.5.2	Programación modular.	63
2.5.3	Nomenclatura definida.	64
2.6	ACOPLAMIENTO	65
2.7	VALIDACION DEL MODELO	66

2 METODOLOGIA DE MODELADO

En este capítulo se describen los pasos generales seguidos durante el desarrollo del modelo del generador de vapor en la parte agua/vapor. El método aquí presentado puede aplicarse, en general, para el modelado de cualquier proceso.

2.1 Generalidades

El modelado de sistemas complejos puede presentar diversas dificultades durante su desarrollo. La organización del trabajo es importante para salvar los diferentes obstáculos que puedan encontrarse. Méndez E. et al. (1985), González S. et al. (1984) y Castelazo I. et al. (1984), han propuesto un procedimiento sistemático para el modelado de procesos grandes. Se adapta y corrige aquí dicho procedimiento.

Una vez definido el proceso real que se desea simular y el alcance requerido en la simulación deben seguirse una serie de pasos que tienen como fin la culminación del modelo. En primer término debe efectuarse una modularización consistente en una subdivisión del proceso real en sistemas. En seguida se define el modelo conceptual, que es la descripción del prototipo para propósitos de modelado. Se continúa con el modelo formal que se refiere a la representación matemática del sistema. El modelo digital consiste en la codificación

del modelo formal. En seguida se procede a validar el modelo del sistema. Después se realiza el acoplamiento de los sistemas para formar al proceso general simulado. Finalmente se valida el modelo general acoplado.

Debe hacerse notar que los sistemas obtenidos del proceso real en la modularización pueden, a su vez, modularizarse en módulos sobre las cuales deben desarrollarse el modelo formal, el modelo digital, la validación y el acoplamiento.

A continuación se describen con mayor detalle cada una de las etapas mencionadas. Se toma como ejemplo de trabajo el modelo de una caldera de domo, acuatubular, de circulación forzada, objeto de esta tesis.

2.2 Modularización

La modularización consiste en dividir al proceso original en sistemas más manejables desde el punto de vista del modelado, que pueden tratarse independientemente.

2.2.1 Ventajas. -

Las principales ventajas de efectuar una modularización se resumen en seguida:

- Reducción de complejidad. Cuando un proceso grande se divide, necesariamente cada una de las partes resultado de la división será más simple que el proceso original. Con esto se facilita

cada uno de los pasos subsecuentes del desarrollo del modelo, incluyendo la documentación y el mantenimiento del código.

- Desarrollo en paralelo. Al independizar los sistemas y módulos, los modelos pueden ser desarrollado simultáneamente por diferentes personas (inclusiva en diferente tiempo), lo que agiliza tanto el control como la obtención de resultados.
- Módulos comunes. No es raro que varios sistemas tengan módulos similares (bombas, válvulas, turbinas, etc.) que pueden modelarse genéricamente. Lo anterior homogeneiza el tratamiento de los módulos y evita la duplicidad de esfuerzos.
- Procesamiento en paralelo. Por razones de tamaño de la memoria y de tiempo de ejecución, puede ser necesario el procesamiento en paralelo (distribución de los modelos de los sistemas en diferentes unidades de procesamiento digital), la modularización permite la optimización del acomodo de los modelos en los procesadores.
- Dinámicas diferentes. En un proceso pueden existir fenómenos que posean diferentes tipos de dinámicas, desde las muy lentas hasta las cuasi-estáticas. La modularización permite adaptar diferentes métodos y pasos de integración para cada sistema según su dinámica y estabilidad numérica.

2.2.2 Criterios Para Modularizar. -

Aunque no existe un criterio único para efectuar una modularización, se mencionan aquí los más comunes.

- Independencia matemática. Aun cuando no se haya planteado la formulación matemática, puede estimarse el grado de independencia que existirá entre los modelos resultantes. Es deseable tener una independencia matemática entre los módulos o sistemas para facilitar la solución del sistema o proceso general, respectivamente. Para tener la máxima independencia posible es menester fijar las fronteras de los sistemas o módulos en puntos de desacoplamiento natural, como son los nodos capacitivos.
- Dinámicas Similares. Como se mencionó anteriormente, pueden existir diferentes dinámicas en un proceso. El paso y método de integración que debe usarse están directamente ligados a la dinámica del modelo en cuestión; generalmente el fenómeno limitante es el de dinámica más rápida. Si los sistemas se conforman de componentes de dinámicas similares, usando diferentes métodos y pasos de integración se tiene un considerable ahorro en el tiempo de ejecución.
- Número mínimo de interacciones. Las interacciones externas son las variables que comunican a los diferentes sistemas de un proceso. Las interacciones internas son las variables que comunican a los módulos que forman un sistema. Debe procurarse minimizar el número de interacciones al definir una

modularización. La razón es un mayor control de las mismas variables de interacción y un ahorro de memoria en el procesador, principalmente si el proceso simulado es muy grande.

2.2.3 Modularización Externa. -

La modularización externa se refiere a la división del proceso a simular en sistemas. Como ejemplo de la modularización se escoge un proceso de generación de energía eléctrica. Los sistemas, resultado de la modularización, son los que tienen interacción con el generador de vapor en la parte agua/vapor, otras partes del proceso se ignoran.

El primer paso seguido es hacer la modularización de acuerdo a la división que se hace en el proceso real (un proceso real se compone de sistemas físicos). La ventaja de esto es que los resultados obtenidos por un modelo pueden ser interpretados, independientemente de otros modelos, con los datos de planta del sistema físico simulado.

Los sistemas que interactúan con el sistema caldera parte agua/vapor se listan a continuación:

1. Sistema eléctrico
2. Sistema de agua de alimentación
3. Sistema de trasiego y combustible
4. Sistema de caldera en su parte aire
5. Sistema de caldera en su parte gases de combustión
6. Sistema de caldera en su parte agua/vapor

7. Sistema de caldera en su parte sobrecalentador
8. Sistema tableros de control y despliegue de información
9. Métodos numéricos
10. Instructor

Los dos últimos sistemas, Métodos numéricos e Instructor, no son sistemas que existan en el proceso real pero son necesarios en el medio ambiente de un simulador. Cada uno de los sistemas resultantes debe estudiarse a fondo para definir sus fronteras. Aquí no se hace ese estudio, excepto para el sistema de interés de esta tesis (en la Sección 3.1 del Capítulo 3 se definen dichas fronteras).

La modularización externa propuesta cumple con los criterios de independencia matemática ya que el sistema caldera parte agua/vapor es un circuito cerrado cuyas principales fronteras, el domo superior y el metal del generador de vapor, son nodos capacitivos.

En lo que respecta a la dinámica del sistema, el único problema aparente que pudiera existir es en que la dinámica de los cambios de presión es más rápida que la de los cambios de temperatura de los metales, sin embargo dado que el metal es un nodo capacitivo, pudiera separarse, si fuese necesario, del resto del sistema. Como se verá en el Capítulo 6, esta separación no es necesaria.

El número de interacciones con otros sistemas no es muy grande, según se muestra en la Figura 4.2 del Capítulo 4.

Las consideraciones anteriores dan pie para mantener la

modularización propuesta.

2.2.4 Modularización Interna. -

De la misma manera en que se modularizó el proceso original en sistemas es conveniente hacer una modularización del sistema en módulos para facilitar el manejo del modelo (modularización interna). Esta segunda modularización se hizo tratando de no perder las características físicas de cada módulo (que un módulo representase a un equipo específico) y ayudar al proceso de elaboración del modelo digital (que un módulo representara a una rutina o un grupo de rutinas de la programación en FORTRAN 77). En la Figura 2.1 se presenta la modularización interna propuesta.

Los módulos obtenidos son matemáticamente independientes entre sí. El módulo Ciclo iterativo contiene seis submódulos que deben resolverse simultáneamente (no puede evitarse este acoplamiento matemático dada la naturaleza de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 4).

La dinámica del modelo se discutió en la sección precedente y cabe apuntar que existen dos módulos de metales que pueden independizarse, si es necesario, del resto del modelo.

Las interacciones entre los módulos se definen en el Capítulo 4.

SISTEMA	MODULOS	SUBMODULOS
CALDERA PARTE AGUA - VAPOR	DOMO SUPERIOR (NO ITERATIVO)	
	FLUJOS A TRAVES DE LAS VALVULAS DEL DOMO	
	METAL DEL DOMO SUPERIOR	TUBERIA DESCENDENTE
	CICLO ITERATIVO	BOMBAS (HIDRAULICA)
		TUBO ENTRE BOMBAS Y DOMO INFERIOR
	DOMO INFERIOR	
PAREDES DE AGUA		
DOMO SUPERIOR (PARTE ITERATIVA)		
METAL DE TUBOS DE LA CALDERA	TUBERIA DESCENDENTE	
BOMBA Y MOTOR PARTE ELECTRO- MECANICA	TUBO ENTRE BOMBAS Y DOMO INFERIOR	
	DOMO INFERIOR	
	PAREDES DE AGUA	

FIGURA 2.1 MODULARIZACION INTERNA

2.3 MODELO CONCEPTUAL

Es la descripción del prototipo para propósitos del modelado y la definición de las características que el modelo debe tener.

El modelo conceptual se obtiene considerando los efectos que se desean observar y la precisión requerida en la simulación. Este modelo puede dividirse en dos partes:

1. Marco experimental. Alcance del modelo, criterios de fidelidad, información necesaria para la elaboración del modelo y el equipo de computación disponible.
2. Descripción funcional. Conocimiento del modo en que opera el sistema bajo las diversas situaciones en que será simulado.

En el Capítulo 3 se detalla el modelo conceptual para el caso tratado.

2.4 MODELO FORMAL

Es la representación matemática del sistema real. Generalmente el sistema real es demasiado complejo para modelarlo en su totalidad y se recurre a simplificaciones e hipótesis para poder representarlo. Estas simplificaciones e hipótesis pueden clasificarse en tres tipos:

1. Simplificaciones físicas. Tienden a reducir el tamaño del sistema disminuyendo su número de elementos ya sea por eliminación o agrupación.
2. Hipótesis conceptuales. Simplifican los fenómenos físicos o los procesos que se desean representar.
3. Aproximaciones matemáticas de las ecuaciones obtenidas.

Después de efectuar las simplificaciones e hipótesis de trabajo, conviene definir la relación causal que existe entre el sistema propio y otros (causalidad externa) y entre los diferentes módulos que componen al sistema (causalidad interna). Una relación causal es el flujo de información que existe entre los sistemas y módulos que componen al proceso simulado.

El modelado matemático consiste en el planteamiento de las ecuaciones que representarán al proceso modelado. Las ecuaciones obtenidas son del siguiente tipo:

$$l = \lambda (a, b, y, l, n, c, p, t) \quad (A)$$

$$n = v (a, b, y, l, n, c, p, t) \quad (B)$$

$$o = \psi (a, b, y, l, n, c, p, t) \quad (C)$$

$$\dot{a} = \xi (a, b, y, l, n, c, p, t)$$

(D)

Donde a es el vector de las variables de estado dinámicas, b el vector de las variables de estado cuasiestáticas, y el vector de las variables algebraicas, l el vector de las variables de estado lógicas, n el vector de las variables lógicas, c el vector de variables de entrada de otros sistemas, p el vector de parámetros y t el tiempo. Las variables que van a otro sistema son un subconjunto de las anteriores.

En el Apéndice 4 se explica la importancia de la clasificación de las variables y se ilustra su manejo en el modelo. En el Capítulo 4 se desarrolla en detalle el modelo formal del generador de vapor que se va a modelar.

2.5 MODELO DIGITAL

Es la versión codificada del modelo formal. Se recomienda el uso de programación estructurada, cuidando la nomenclatura utilizada y la estructura general del programa.

No es difícil que el acoplamiento de los sistemas de un proceso grande (ver Sección 2.6) se haga con modelos elaborados por diferentes personas (quizá en diferente tiempo). Para que el proceso de acoplamiento entre sistemas se simplifique es pertinente seguir algunas reglas sencillas descritas a continuación.

2.5.1 Programación Estructurada. -

La codificación del programa debe hacerse con un lenguaje de programación estructurado. Cuando se programa con un lenguaje estructurado se tiende automáticamente a homogeneizar el estilo de programación de las diferentes personas generadoras de código y el programa final es fácilmente interpretado por cualquier usuario. El PASCAL o el FORTRAN 77 son dos lenguajes estructurados de amplia divulgación. Para el desarrollo de esta tesis se escogió el FORTRAN 77 por tener, aún, más aceptación que el PASCAL por los potenciales usuarios del modelo, según lo demuestran Christy D.P. y Watson H.J. (1983).

Para un fácil seguimiento del flujo de información, las variables se transfieren como argumentos de subprogramas. Los COMMON's se evitan, excepción hecha con los parámetros que si son traspasados por COMMON's.

Debe procurarse que el tamaño de cada subprograma no exceda las 80 líneas de programación. Cada rutina ha de tener declaradas todas las variables utilizadas por ella y debe tener los comentarios necesarios para un fácil seguimiento del programa.

2.5.2 Programación Modular. -

Una de las características importantes del modelo desarrollado en este trabajo es que la programación se hizo modularmente, esto es, las rutinas codificadas representan fenómenos o equipos específicos. De

esta manera, es posible cambiar una rutina sin afectar al programa en general.

La razón de querer cambiar una rutina puede deberse al mantenimiento o expansión del modelo. Por ejemplo, en el caso de que se publique una nueva correlación de transferencia de calor que mejore a una anterior que se tiene programada, puede hacerse la sustitución de la rutina correspondiente y así darle mantenimiento al modelo. Otro ejemplo es que se desee incorporar el caso de que las bombas de circulación forzada funcionen también mediante una turbina, en este caso se hace la rutina correspondiente a la turbina y con un pequeño cambio en otro subprograma (para que se tome en cuenta el nuevo caso), se tiene una expansión del modelo.

Las rutinas construidas y la secuencia en que son invocadas pueden consultarse en el Apéndice 3.

2.5.3 Nomenclatura Definida. -

Las variables usadas en los programas deben tener una nomenclatura definida de tal manera que cualquier persona conocedora de las reglas pueda fácilmente identificar lo que se desea representar con cualesquiera de esas variables. En el Capítulo 5 se define el método seguido para el desarrollo del modelo digital y se resumen sus características finales.

2.6 Acoplamiento

Una vez terminados y validados (ver siguiente sección) los modelos de los diferentes sistemas, éstos deben acoplarse para tener la representación matemática total del proceso real.

No es de particular interés el proceso de acoplamiento para esta tesis. Se presenta un resumen de los principales puntos contemplados por esta actividad.

- Depuración de errores de interacción. Este tipo de errores son, por ejemplo, que dos sistemas tengan definida la misma variable con diferente nombre, o que un sistema espere una variable de otro sistema que no la contempla.
- Acoplamiento y validación. Se prueba el comportamiento del sistema parcialmente acoplado. Según el tipo de acoplamiento, incremental o integral, se suman más sistemas hasta tener el acoplamiento total.

El acoplamiento incremental se realiza iniciando con un conjunto vacío de sistemas. Se incorporan, uno a la vez, sistemas o grupos de sistemas previamente acoplados hasta llegar al acoplamiento total.

El acoplamiento integral requiere de la existencia de modelos muy sencillos que representen a todos los sistemas que se acoplarán. Los

sistemas modelados sustituyen a los modelos sencillos hasta tener el acoplamiento terminado.

2.7 Validación Del Modelo

La validación de un modelo consiste en corroborar la similitud existente entre los datos arrojados por el modelo y los datos del proceso real.

Para asegurar una validación de calidad, es necesario establecer un criterio de fidelidad que el modelo debe cumplir y diseñar las pruebas a realizar.

En el Capítulo 6 se definen los criterios de validación utilizados y se presentan algunas pruebas efectuadas al modelo.

CAPITULO 3

MODELO CONCEPTUAL

El pensamiento abstracto, por lo menos en sus manifestaciones más sutiles, no es un rasgo permanente del hombre medio en sus actividades cotidianas. ¿Y si el pensamiento abstracto no fuera tanto una cuestión de especie como de grado?

Carl Sagan,
"The Dragons of Eden", (1977)

I N D I C E

CAPITULO 3	MODELO CONCEPTUAL	
3.1	DEFINICION DE FRONTERAS	69
3.2	MARCO EXPERIMENTAL	70
3.3	DESCRIPCION FUNCIONAL	72
3.3.1	Llenado y encendido.	72
3.3.2	Subida de carga hasta el 100% de capacidad.	74
3.3.3	Fallas.	74
3.3.4	Apagado.	75

3 MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual consiste en definir el prototipo que finalmente se modela y la definición de las características finales que debe poseer el modelo. Lo anterior, dependiendo del medio ambiente en que se desarrolla el modelo.

El sistema a modelar es la parte agua/vapor de un generador de vapor acuotubular. Se ejemplificará el procedimiento de modelado tomando como base una caldera acuotubular, con domo, de circulación forzada. La razón de tomar este tipo de generadores de vapor como base para la descripción del método es que estas calderas engloban, por lo general, a los generadores de vapor de circulación natural.

3.1 Definición De Fronteras

El modelo considera básicamente el comportamiento del fluido. El metal y el aislante se modelan en lo que respecta a su cambio de temperatura exclusivamente. Los elementos considerados para el modelado son los siguientes:

- Fluido, metal y aislante del domo superior, válvulas de venteo, purga y de seguridad (no incluye la tubería del agua de alimentación, la del vapor que se manda al sobrecalentador ni la de la purga que puede descargar en algún recipiente).

- Fluido, metal y aislante de la tubería descendente y cabezal de succión de las bombas.
- Bombas de circulación controlada, incluyendo los motores eléctricos.
- Fluido, metal y aislante del domo inferior.
- Fluido, metal y aislante de las paredes de agua.
- Medidores comúnmente presentes en generadores de vapor.

3.2 Marco Experimental

El alcance definido fue el de simular el circuito agua/vapor (fluido) de cualquier tipo de caldera acuotubular en todo su rango de operación (llenado y encendido, subida de carga hasta el 100% de capacidad, algunas fallas del equipo y apagado en diferentes circunstancias). Las fallas se refieren a eventos inesperados que pueden presentarse durante la operación normal del sistema, como pueden ser la rotura de los tubos de las paredes de agua o el paro imprevisto de alguna(s) bomba(s) de circulación forzada.

Asimismo, el modelo desarrollado debe cumplir con los requisitos de ser suficientemente completo como para permitir un buen análisis del comportamiento dinámico del generador de vapor en cuestión y de poder adaptarse para correr en tiempo real en un simulador para entrenamiento.

En el Capítulo 4 se detalla el alcance del modelo y se mencionan las limitaciones del mismo.

Se planteó la posibilidad de contar con un modelo versátil que cubriera los dos extremos (o cualquier punto entre ellos): buena fidelidad en los resultados y rapidez de ejecución. Esto se logró dejando al usuario la posibilidad de establecer el grado de distribución espacial del sistema. Una de las características más importantes del modelo es que concentra parámetros en zonas de control denominadas volúmenes elementales; éstos varían su cantidad y dimensiones según el número de trayectorias de flujo que se consideren en el generador de vapor y el número de nodos en que se divida cada trayectoria de flujo. El número de trayectorias de flujo define el grado de distribución radial del modelo, mientras que el número de nodos de las trayectorias define el grado de distribución axial.

El modelo original se diseñó para correr en una computadora VAX/VMS 11/780 aunque es fácilmente transportable a cualquier otro sistema computacional pues se programó en el lenguaje FORTRAN 77 estándar, evitando las funciones especiales de la computadora VAX/VMS 11/780. En el Capítulo 5 - modelo digital - se resumen las características de la programación.

La información necesaria para la caracterización de la caldera que se desea simular se detalla en el Apéndice 4.

3.3 Descripción Funcional

Dado que el modelo no se basó en una caldera en especial no es posible dar una descripción funcional particular, sin embargo, según lo descrito en el Capítulo 1, todas las calderas acuotubulares se comportan en forma similar. Se hará la descripción de una caldera acuotubular de circulación forzada tratando de abarcar todos los casos posibles. Para tomar un caso concreto en algunos detalles importantes se habla de un generador de vapor de una central termoelectrica. La Figura 1.4 de la hoja 14 sirve de base a la explicación si se piensa que entre el domo superior y el inferior, en la tubería descendente, existe una bomba de circulación forzada.

Para hacer una descripción funcional completa se revisa la operación del generador de vapor en cuatro etapas: Llenado y encendido, subida de carga hasta el 100% de capacidad, fallas y apagado. Debe estar claro que esta descripción se hace exclusivamente con referencia al sistema caldera en su parte agua/vapor ignorándose otros sistemas. No se mencionan las maniobras que deben efectuarse ni los efectos del sistema cuando no son de interés para la simulación que se pretende realizar.

3.3.1 Llenado Y Encendido. -

El llenado se hace estando la caldera fría y sin agua. Se abren sus

venteos, se cierra la purga del domo superior y se llena con agua de alimentación muy lentamente para evitar que queden burbujas de aire atrapadas en el cuerpo del generador de vapor. El nivel del agua se lleva hasta casi inundar el domo superior, se pone en servicio una bomba de circulación controlada y el nivel del domo desciende debido al agua que llena las paredes de agua. Se ajusta el nivel a su valor normal y se encienden los pilotos de la caldera y posteriormente los quemadores.

El calentamiento se trata de efectuar siguiendo la curva recomendada por el fabricante, cuidando tanto la presión del domo como las temperaturas de los metales en diversos puntos del generador de vapor. El control del calor se hace con el flujo de combustible suministrado, inclinación de los quemadores, flujo de recirculación de los gases calientes, atemperación en el sobrecalentador o cualquier combinación de ellos según la caldera particular de que se trate.

En un cierto punto de presión, cuando se considera que se ha desplazado el aire con el vapor generado, se cierran las válvulas de venteo. alguna(s) válvula(s) del sobrecalentador queda(n) abierta(s), hasta rodar turbina, para evitar tener altas temperaturas en los metales del sobrecalentador.

Durante el calentamiento se controla manualmente el nivel del agua, que sube por la expansión térmica, con la purga continua del domo superior. Al llegar el sistema a una presión establecida se comienza el rodado de la turbina para, después, tomar carga con lo cual se inicia la generación de energía eléctrica.

3.3.2 Subida De Carga Hasta El 100% De Capacidad. -

Una vez que se tiene operando el sistema en el estado estable de la primera carga tomada - generalmente al 25% - se cierra gradualmente la válvula de purga continúa, se automatizan los controles y se aumenta la carga paulatinamente. Si existen, se ponen en servicio otras bombas de circulación forzada de manera aproximadamente proporcional a la capacidad con que se opera. Al llegar a la máxima capacidad del sistema se deja la unidad trabajando automáticamente.

3.3.3 Fallas. -

Con la caldera operando en cualquier punto de operación es posible que se presente alguna falla del equipo. Se analizan las dos más comunes, rotura de tubos en las paredes de agua y disparo imprevisto de alguna(s) bomba(s) de circulación forzada.

ROTURA DE TUBOS. Una rotura de tubos se debe al desgaste del material por acción del calor y a la corrosión debida a los gases de combustión. Al presentarse una rotura de tubos en las paredes de agua, parte del flujo de recirculación escapa hacia el hogar provocando dos efectos principales: pérdida del nivel del domo y aumento de la presión en el hogar. Dependiendo del grado de severidad de la falla es posible controlar o no la situación. Si la falla es severa no podrá controlarse el nivel del domo y bajará éste hasta el punto de disparo o aumentará la presión en el hogar hasta causar, también, el disparo de la unidad (salen de servicio la turbina y los quemadores). Si la rotura es leve y la unidad puede controlarse queda

a criterio del operador seguir operando o sacar de servicio al generador de vapor.

DISPARO DE UNA BOMBA DE CIRCULACION FORZADA. Este disparo puede ser causado por fallas en la instalación eléctrica o de la bomba, o por un error del operador. Si el generador de vapor cuenta con una sola bomba de operación y ésta se dispara, entra automáticamente en servicio una de repuesto. Si no existe la bomba de repuesto o no se enciende, la unidad completa es disparada. Cuando la caldera tiene dos o más bombas funcionando normalmente y alguna(s) de ella(s) se dispara(n), debe bajarse la carga proporcionalmente al número de bombas que salieron de servicio.

3.3.4 Apagado. -

Existen dos tipos de apagado de la unidad; el apagado normal y el de emergencia.

APAGADO NORMAL. En este apagado se baja paulatinamente la carga, hasta que la demanda de vapor sea nula y permita sacar de servicio los quemadores, y se deja enfriar la caldera. Las purgas y venteos del sobrecalentador se abren para un enfriamiento más rápido. Con el mismo fin se dejan en servicio los ventiladores del tiro de los gases (forzado y/o inducido), si existen. El nivel del agua debe cuidarse pues continuamente baja debido a la contracción térmica. Al llegar a cierta temperatura se opera únicamente con una sola bomba de circulación forzada, alternándose con las otras hasta lograr el enfriamiento. Cuando se tiene una presión cercana a la atmosférica se

abren los venteos del domo superior y se espera a que el generador de vapor se enfríe.

APAGADO DE EMERGENCIA. El apagado de emergencia se presenta cuando existe una falla en la unidad y es necesario dispararla. Dos tipos de apagados de emergencia pueden mencionarse: el paro en caliente y el paro total.

El paro en caliente se hace cuando es necesario apagar temporalmente la caldera (unas cuantas horas o hasta un día, dependiendo del tamaño del generador de vapor) y se desea conservarla caliente para encenderla más fácilmente después de arreglar la causa del disparo. Para efectuar el paro en caliente de la caldera se cierran las válvulas de admisión de la turbina y se mantienen cerrados todos los drenes y venteos; sólo se abre temporalmente la purga del domo para mantener el nivel que asciende debido a la condensación. Un ejemplo de paro en caliente es el disparo de la unidad debido a que salieron de servicio las bombas de circulación forzada por un desperfecto del sistema eléctrico relativamente fácil de componer. Para encender nuevamente la unidad se sigue el procedimiento normal.

El paro total se efectúa cuando se tiene una falla irreversible no controlable (rotura severa de los tubos de las paredes de agua, por ejemplo). En este caso es difícil manejar la situación ya que no existen reglas específicas de operación y las condiciones de operación pueden variar dependiendo de las circunstancias, sin embargo, el operador debe tratar, en lo posible, seguir el procedimiento de apagado normal para evitar mayores daños al equipo.

CAPITULO 4

MODELO FORMAL

La tarea del cerebro humano sigue siendo la que siempre ha sido; la de descubrir nuevos datos para ser analizados e inventar nuevas fórmulas para ser probadas.

Isaac Asimov,
"I, Robot"

I N D I C E

CAPITULO 4 MODELO FORMAL

4.1	CONSIDERACIONES	79
4.1.1	Simplificaciones.	79
4.1.2	Hipótesis Conceptuales.	82
4.1.3	Grado de Distribución Espacial.	83
4.2	DIAGRAMAS DE CAUSALIDAD	85
4.2.1	Causalidad Externa.	85
4.2.2	Causalidad Interna.	86
4.3	FORMULACION MATEMATICA	90
4.3.1	Domo Superior.	91
4.3.2	Transferencia de Calor.	97
4.3.3	Fluido en una Tubería.	104
4.3.4	Metales.	121
4.3.5	Bombas y Motores.	127
4.3.6	Propiedades Termofísicas.	131
4.3.7	Válvulas.	134
4.3.8	Controles.	137
4.3.9	Proceso de Llenado.	139
4.4	SOLUCION DEL MODELO	141
4.4.1	Secuencia de Solución.	141
4.4.2	Métodos de Integración.	145
4.4.3	Métodos de Convergencia.	147

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4 MODELO FORMAL

Para desarrollar el modelo matemático del sistema es necesario establecer las simplificaciones e hipótesis en que se basa el modelo, definir cuáles variables se desean representar y que datos (parámetros y variables) se requieren para tener cero grados de libertad.

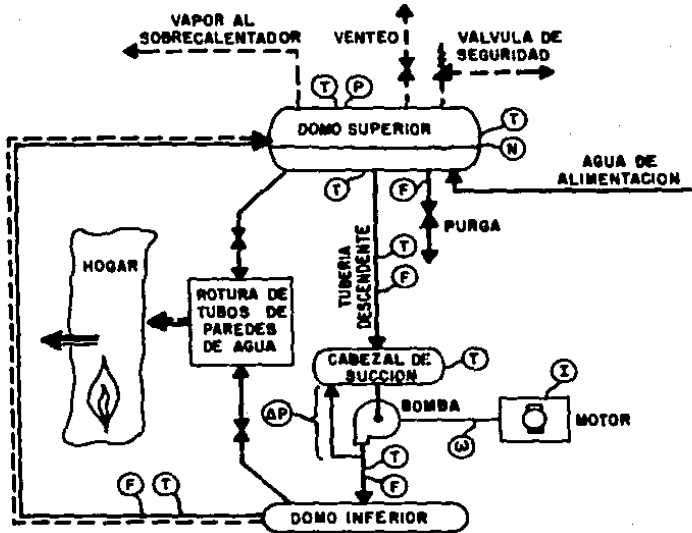
4.1 Consideraciones

Las consideraciones son las bases planteadas para el desarrollo del modelo. En primer lugar deben establecerse una serie de simplificaciones físicas para considerar sólo aquellas partes del proceso real que se consideren relevantes para ser simuladas. Después se especifican las hipótesis conceptuales que se siguen durante la formulación matemática. Como punto adicional, de gran importancia en esta tesis, se describe el grado de distribución espacial considerado en el modelo del generador de vapor.

4.1.1 Simplificaciones. -

Las principales simplificaciones físicas hechas se resumen a continuación.

1. Se consideran hasta cuatro válvulas de seguridad en el domo superior, las que serán equivalentes al número de válvulas reales. Se formulan con una sola válvula con apertura variable, según los puntos de presión de accionamiento.
2. Los venteos del domo superior se representan por una sola válvula equivalente.
3. Los drenes del domo superior se representan por una válvula equivalente.
4. Pueden tenerse hasta cinco bombas de circulación forzada, cada una con su respectivo motor. Cada una de estas bombas puede funcionar según los requerimientos del usuario. No se considera el caso de turbo-bombas ya que por lo general no son utilizadas por los generadores de vapor.
5. La rotura de los tubos en las paredes de agua se representa con dos válvulas, una en el domo superior y otra en el domo inferior descargando vapor y líquido respectivamente hacia el hogar.
6. Los medidores se simulan de manera directa. Por ejemplo, un medidor de flujo en realidad mide una presión diferencial y la convierte a flujo. Aquí, la señal de flujo se toma directamente del modelo.
7. Se eliminan todas las conexiones menores que tiene la caldera para llenado de gas anti-oxidante, inyección de sustancias químicas para control del pH, vaciado de la unidad para mantenimiento, etc.



- | | | | |
|----|------------------------------|---------|----------------|
| ○ | MEDIDOR | → | AGUA |
| F | FLUJO | - - - → | VAPOR |
| I | CORRIENTE ELECTRICA | ==> | DOS FASES |
| N | NIVEL DE AGUA | ≡≡≡ → | FLUJO DE CALOR |
| P | PRESION | | |
| T | TEMPERATURA (FLUIDO Y METAL) | | |
| ω | VELOCIDAD ANGULAR | | |
| ΔP | CAIDA DE PRESION | | |

FIGURA 4.1 SISTEMA SIMPLIFICADO

El sistema simplificado que se toma como base para la elaboración del modelo se muestra en la Figura 4.1. Por simplicidad en la presentación, el diagrama se realiza considerando una sola trayectoria de flujo en la tubería descendente y en paredes de agua, con un solo nodo por trayectoria (ver Sección 4.1.3), y una sola bomba de circulación forzada. Cualquier componente del sistema real que no esté presente en el sistema simplificado no se representa en el modelo.

4.1.2 Hipótesis Conceptuales.

Las principales hipótesis conceptuales hechas para el desarrollo del modelo matemático se listan a continuación.

1. El líquido y el vapor presentes en el domo superior están en equilibrio termodinámico y sus propiedades son las de saturación a la presión del vapor.
2. El aire que hay en el generador de vapor durante el arranque se comporta como un gas ideal.
3. El líquido que llega al domo superior desde el sistema de agua de alimentación se mezcla instantáneamente con el líquido local para llegar a las condiciones de equilibrio.
4. El aire se considera insoluble en la fase líquida.

5. No se modela el caso de que el domo superior esté totalmente inundado.
6. Se asume que los separadores de vapor son perfectos.
7. No se considera la posibilidad de cavitación en las bombas de circulación forzada.
8. En cualquier tramo del circuito agua/vapor de la caldera es posible la existencia de dos fases, en cuyo caso se usa el modelo de flujo deslizante de Zuber N. y Findlay J.A. (1965).
9. El cambio de presión temporal del domo rige a todo el circuito.
10. Los coeficientes de transferencia de calor se toman de correlaciones conocidas dadas en la literatura. Para escoger las correlaciones se toman en cuenta tanto su bondad como su facilidad de cálculo.

4.1.3 Grado De Distribución Espacial. -

Se usan los conceptos de parámetros concentrados y volúmenes elementales. Un modelo de parámetros concentrados se refiere a considerar que las propiedades de todo un volumen de control son constantes en un cierto intervalo de tiempo, esto es, se desprecia toda distribución espacial. Un volumen elemental es un volumen de control. en este caso donde se realiza el estudio. El modelo aquí presentado deja al usuario la libertad de especificar el tamaño de dichos volúmenes.

El circuito agua/vapor de la caldera puede tener un número variables de trayectorias de flujo. Cada una de estas representa un conjunto de tubos, el modelo ideal sería aquel que considerara un número de trayectorias igual al número de tubos de la caldera.

Cada una de las trayectorias puede ser dividida en otro número variable de nodos. Los nodos son los volúmenes elementales.

La división del generador de vapor en trayectorias y nodos permite conjuntar la exactitud de los resultados con la rapidez de ejecución.

El grado de distribución que se puede tener en este modelo y las consideraciones hechas al respecto son:

1. Se pueden tener hasta cinco trayectorias de flujo en la tubería descendente, equivalentes al número real de tubos.
2. Se pueden tener hasta ocho trayectorias de flujo en las paredes de agua, equivalentes al número de tubos real.
3. La tubería descendente puede tener hasta cien nodos por cada trayectoria, cincuenta antes de las bombas y cincuenta después.
4. Las paredes de agua pueden tener hasta cien nodos por cada trayectoria.
5. Los tubos agrupados en una trayectoria se consideran idénticos entre sí.

4.2 Diagramas De Causalidad

Antes de plantear el modelo matemático es necesario establecer las cantidades físicas variables que el modelo ha de representar y aquellas que el modelo necesita para poder hacer dicha representación. El objetivo es tener un sistema matemático sin grados de libertad (solución única). La definición de estas variables se hace, con una presentación muy accesible, en un diagrama de causalidad.

Un diagrama de causalidad es la representación gráfica del flujo de información entre los sistemas que interactúan entre sí para efectos de modelado.

La misma definición puede hacerse para la interacción existente entre los módulos de un sistema, según se explico en el Capítulo 2.

4.2.1 Causalidad Externa. -

El diagrama de causalidad externa se basa en la modularización propuesta en la Sección 2.2.3 del Capítulo 2. Este diagrama se representa con bloques y con flechas. Los bloques son rectángulos que simbolizan a los sistemas que tienen relación entre sí. El bloque dibujado con líneas continuas es el bloque propio, en este caso el generador de vapor en su parte agua/vapor. Los bloques hechos con líneas punteadas representan otros sistemas. Dentro de los bloques se indica el nombre del sistema correspondiente. Las flechas apuntan el sentido del flujo de la información (no confundir con flujo físico). Sobre las flechas se indica las variables que se transfieren. La

nomenclatura utilizada es la definida en el Apéndice 1.

Una de las ventajas de definir la causalidad externa es que cuando se desea efectuar el proceso de acoplamiento se tiene una base con que comparar las variables que entran a un sistema y salen de otros, es decir debe existir una total compatibilidad entre las formulaciones de los diferentes sistemas. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de causalidad externa del sistema caldera parte agua/vapor.

4.2.2 Causalidad Interna. -

Como consecuencia de la modularización interna presentada en la Figura 2.1 del Capítulo 2, se elabora un diagrama de causalidad interna.

El diagrama de causalidad interna tiene las mismas características que el diagrama de causalidad externa, excepto que los bloques representan sistemas, módulos y submódulos. Los bloques con líneas sólidas son módulos locales del sistema caldera agua/vapor, los bloques hechos con líneas punteadas representan otros sistemas. Dentro de los bloques se indica el nombre del módulo o sistema correspondiente y, para el caso de módulos locales, las variables integrables (en la Sección A4.1 del Apéndice 4 se definen los tipos de variables utilizadas en la simulación y en el Apéndice 2 se presentan los nombres de los módulos - subrutinas -). Cada variable integrable tiene relacionada una derivada con respecto al tiempo que tiene que ser integrada por el Sistema de Métodos Numéricos; esta transferencia de información se sobreentiende y no se indica en el diagrama.

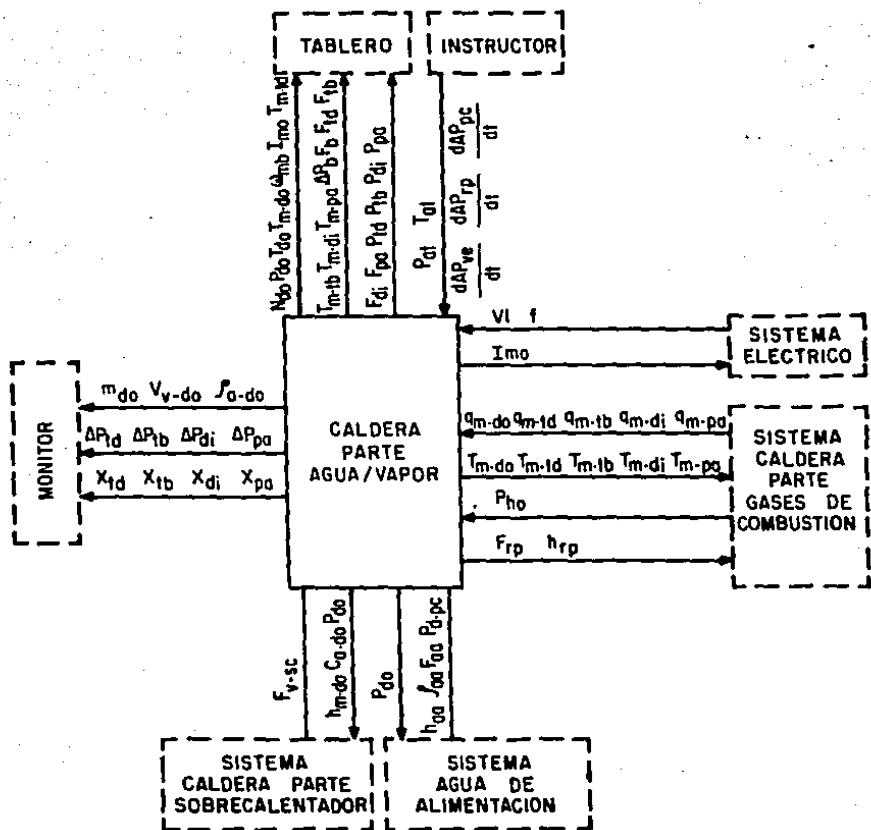
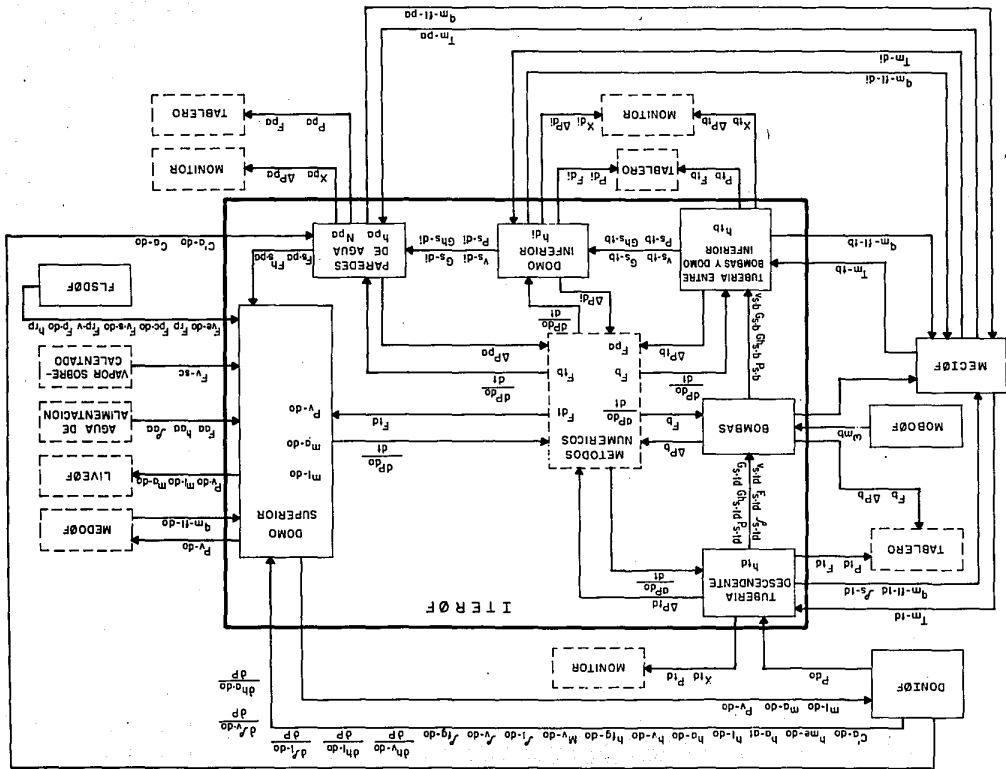


FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE CAUSALIDAD EXTERNA

FIGURA 4.3 . DIAGRAMA DE CAUSALIDAD INTERNA. MODULOS Y SISTEMAS

**FIGURA 4.4 DIAGRAMA DE CAUSALIDAD INTERNA. SUBMODULOS
DEL CICLO ITERATIVO**



En el diagrama de causalidad interna de las Figuras 4.3 y 4.4 puede verse, esquemáticamente, el resultado de la modularización y la manera en que cada módulo está relacionado con otros módulos o con otros sistemas. En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de causalidad interna de los módulos y sistemas presentados en la Figura 2.1 del Capítulo 2. En la Figura 4.4 se desglosa la causalidad del módulo Ciclo Iterativo y sus submódulos correspondientes.

4.3 Formulación Matemática

En esta sección se presenta la formulación matemática del modelo del generador de vapor en su parte agua/vapor. Por claridad en la exposición se desarrollan ocho bloques temáticos, cada uno de ellos contiene sus suposiciones particulares hechas y el desarrollo de las ecuaciones básicas. En cada bloque se menciona su relación con los módulos del modelo digital.

La formulación se hizo lo más sencilla posible tratando de que el modelo resultante representara a la caldera de una manera fidedigna sin excesivas complicaciones. Cada bloque puede mejorarse; se deja esto para un trabajo futuro.

Para un seguimiento en paralelo de la formulación matemática y la codificación conviene consultar los diagramas de causalidad.

4.3.1 Domo Superior. -

Se presenta la formulación matemática del domo superior.

Este bloque se relaciona con los módulos:

DOMO SUPERIOR NO ITERATIVO (DONIOF)

CICLO ITERATIVO (ITEROF), Submódulo Domo Superior (Parte Iterativa)

SUPOSICIONES:

1. El domo se considera como un cilindro de tapas planas. El diámetro y el volumen permanecen iguales a los del original y se ajusta la longitud. Habitualmente estos recipientes son cilíndricos de tapas toriesféricas. El error relativo no suele ser mayor al 4%
2. El líquido y el vapor presentes en el domo superior están en equilibrio termodinámico y sus propiedades son las de saturación a la presión del vapor.
3. La mezcla de aire y vapor que hay en el generador de vapor durante el arranque se comporta como un gas ideal.
4. El líquido que llega al domo superior desde el sistema de agua de alimentación se mezcla con el líquido local para llegar a las condiciones de equilibrio.

5. No se modela el caso de que el domo superior esté totalmente inundado. Este caso no es nada común; antes de una inundación total actúan sistemas de emergencia para disparar la unidad.
6. Se asume que los separadores de vapor son perfectos.

DESARROLLO MATEMATICO:

El domo es un recipiente cilíndrico cerrado que contiene una mezcla de líquido, vapor y un gas incondensable e insoluble en la fase líquida (el gas está presente únicamente durante el proceso de encendido de la unidad). El líquido y el vapor se encuentran en equilibrio termodinámico.

El volumen total del domo, que es constante, puede expresarse como

$$V_t = V_l + V_{me} \quad (1.1)$$

Si se calcula el volumen específico del vapor en función de la presión parcial de vapor, que es igual a la presión de vapor a la temperatura del domo, el producto de la masa del vapor y su volumen específico da como resultado el volumen total ocupado por la fase gaseosa.

$$V_{me} = m_v v_g$$

$$V_t = m_l v_l + m_v v_g \quad (1.2)$$

De esta ecuación puede obtenerse,

$$m_v = \left(V_t - \frac{m_l}{\rho_f} \right) \rho_g \quad (1.3)$$

La masa total en el domo puede calcularse a partir de las masas de los componentes de la mezcla,

$$m_t = m_l + m_v + m_a \quad (1.4)$$

Derivando con respecto al tiempo la ecuación (1.1), sustituyendo las ecuaciones (1.2) y (1.4) en la derivada y despejando la derivada de la masa de líquido con respecto al tiempo, se obtiene;

$$\frac{dm_l}{dt} = \frac{1}{v_{fg}} \left\{ \left[m_l \left(\frac{dv_f}{dP_v} \right) + m_v \left(\frac{dv_g}{dP_v} \right) \right] \frac{dP_v}{dt} + v_g \left(\frac{dm_t}{dt} - \frac{dm_a}{dt} \right) \right\} \quad (1.5)$$

Nótese que esta ecuación tiene implícitos los fenómenos de evaporación y condensación debidos a los cambios de presión. El balance de energía en el sistema se representa como

$$\frac{d(m_t u_t)}{dt} = \sum F_e h_e - \sum F_s h_s + q \quad (1.6)$$

Desarrollando la ecuación anterior y usando la ecuación (1.5) se llega a la expresión

$$\sum F_e h_e - \sum F_s h_s = -q + \left[m_L \left(\frac{dh_f}{dP_v} \right) - \left[m_L \left(\frac{dv_f}{dP_v} \right) + m_v \left(\frac{dv_g}{dP_v} \right) \right] \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \right.$$

$$\left. + m_v \left(\frac{dh_g}{dP_v} \right) + m_a C_{p_a} \left(\frac{dT}{dP_v} \right) \right] \frac{dP_v}{dt} - v_t \frac{dP_t}{dt} +$$

$$h_g \frac{dm_t}{dt} + (h_a - h_g) \frac{dm_a}{dt} - \frac{h_{fg} v_g}{v_{fg}} \left(\frac{dm_t}{dt} - \frac{dm_a}{dt} \right) \quad (1.7)$$

Tomando como base la ley de Dalton de las presiones parciales,

$$P_t = P_v + P_a \quad (1.8)$$

$$P_t = \left(1 + \frac{m_a}{m_v} \frac{M_v}{M_a} \right) P_v \quad (1.9)$$

Derivando ahora esta última expresión con respecto al tiempo, sustituyendo el resultado en la ecuación (1.7) y despejando la derivada de la presión de vapor con respecto al tiempo, se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{dP_v}{dt} = \frac{X_1}{X_2} \quad (1.10)$$

donde

$$X_1 = q + \sum F_e h_e - \sum F_s h_s + \left(\frac{M_v}{M_a} \frac{V_t}{M_v} P_v - h_a \right) \frac{dm_a}{dt} +$$

$$\left(\frac{dm_t}{dt} - \frac{dm_a}{dt} \right) \left\{ \left[\frac{M_v}{M_a} V_t P_v \left(\frac{v_g}{v_{fg}} - 1 \right) \frac{m_a}{M_v^2} \right] - h_g + \frac{v_g h_{fg}}{v_{fg}} \right\} \quad (1.10a)$$

$$X_2 = m_t \left[\frac{dh_f}{dP_v} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{dv_f}{dP_v} \left(1 + \frac{m_a}{m_v^2} \frac{P_v V_t}{h_{fg}} \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

$$+ m_v \left[\frac{dh_g}{dP_v} - \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \frac{dv_g}{dP_v} \left(1 + \frac{m_a}{m_v^2} \frac{P_v V_t}{h_{fg}} \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

$$+ m_a C_{P_a} \frac{dT}{dP_v} - V_t \left(1 + \frac{m_a}{m_v} \frac{M_v}{M_a} \right) \quad (1.10b)$$

Debe notarse que en la derivación anterior se considera que las

propiedades termodinámicas están en función de una sola variable de estado, en este caso de la presión de vapor y que la variación de una propiedad termodinámica con respecto al tiempo puede expandirse como

$$\frac{dPT}{dt} = \frac{dPT}{dP} \frac{dP}{dt}$$

Por otro lado, de la ecuación de continuidad, pueden calcularse el cambio en el tiempo de la masa de aire y la masa total del domo,

$$\frac{dm_a}{dt} = - F_s C_a \quad (1.11)$$

$$\frac{dm_t}{dt} = \sum F_e - \sum F_s \quad (1.12)$$

El nivel en el domo es una relación geométrica del recipiente.

$$N = f(V_f) \quad (1.13)$$

Las fracciones mäsica y molar del aire son:

$$wm_a = \frac{m_a}{m_a + m_v} \quad (1.14)$$

$$wL_a = \frac{m_a M_v}{m_v M_a + m_a M_v} \quad (1.15)$$

4.3.2 Transferencia De Calor. -

En este bloque se presentan las correlaciones para la transferencia de calor utilizadas en todo el modelo, excepto para el caso de conducción que se trata particularmente en el bloque de metales.

Todos los coeficientes se tomaron de correlaciones dadas en la literatura para fluidos dentro de tubos. Se buscó bondad de los métodos y facilidad de cálculo.

Este bloque se relaciona con los módulos:

METAL DEL DOMO SUPERIOR (MEDOOF)

CICLO ITERATIVO (ITEROF) Submódulos: Tubería descendente

Tubo entre bombas y domo inferior

Domo inferior

Paredes de agua

METAL DE LOS TUBOS DE LA CALDERA (MECIOF)

DESARROLLO MATEMATICO.

A) Conveccion natural:

Se usa la correlación presentada por Eckert E.R.G. y Drake K.M (1959),

$$h_{c_{cn}} = \frac{2 k'}{D} \quad (2.1)$$

donde

$$k' = a k X^b \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior el coeficiente a y el exponente b varían con el número de Rayleigh X de la siguiente manera:

$$X < 1300 \quad ==> a = 1, \quad b = 0$$

$$1300 < X < 1 \times 10^6 \quad ==> a = 0.137, \quad b = 0.277$$

$$X > 1 \times 10^6 \quad ==> a = 0.398, \quad b = 0.2$$

B) Convección forzada:

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJO LAMINAR.

Para este caso se usa la ecuación propuesta por Sieder E.N. y Tate G.E. (1936):

$$hc_{cf} = 1.86 (Re Pr D/L)^{0.5} (\mu / \mu_w)^{0.14} \frac{k}{D} \quad (2.3)$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJO TURBULENTO.

Para flujo turbulento la correlación seleccionada fue, nuevamente, la de Sieder E.N. y Tate G.E. (1936).

$$hc_{ft} = 0.026 Re^{0.6} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \frac{k}{D} \quad (2.4)$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EBULLICION.

Para este caso se supone que la diferencia de temperaturas entre la pared y el tubo no es muy grande y se desprecia el calor radiante.

El coeficiente de transferencia de calor por ebullición depende del tipo de fenómeno convectivo de que se acompañe. Una de las correlaciones más usadas, que intrínsecamente cubre los casos de convección natural y convección forzada, es la de Chen J.C. (1963):

$$hc_{eb} = hc_{eb-cn} Sp + hc_{ft} Fc \quad (2.5)$$

donde hc_{ft} es el coeficiente de transferencia de calor para flujo turbulento dado por la ecuación (2.4) y hc_{eb-cn} es el coeficiente de transferencia de calor por ebullición para circulación natural de Forster H.K. y Zuber N. (1960) dado por

$$hc_{eb-cn} = 0.00122 \frac{\Delta T^{0.25} \Delta P^{0.75} C_{pL}^{0.45} \rho_L^{0.49} k_L^{0.79}}{\sigma^{0.5} h_{fg}^{0.25} \mu_L^{0.29} \rho_V^{0.25}} \quad (2.6)$$

donde

$$\Delta T = T_w - T_{fl}$$

y

$$\Delta P = P_v(T_w) - P_v(T_{fl}) \quad (\text{presiones de vapor a } T_w \text{ y } T_{fl})$$

siendo

$$Sp = \left[1 + 2.35 \times 10^{-6} (Re_L Fc^{1.25})^{1.17} \right]^{-1}$$

el factor de supresión para ebullición natural, y

$$F_c = 1$$

$$\text{si } \frac{1}{X_{TT}} \leq 0.1$$

$$F_c = 2.35 \left(0.213 + \frac{1}{X_{TT}} \right)^{0.736} \quad \text{si } \frac{1}{X_{TT}} > 0.1$$

el factor de corrección para circulación forzada, donde

$$\frac{1}{X_{TT}} = \left(\frac{F_v}{F_l} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0.1}$$

es el parámetro de Martinelli R.C. y Nelson D.B. (1948).

Debe cuidarse que al calcular el flujo de calor con el coeficiente de transferencia para ebullición anterior, no exceda el calor crítico calculado por Tong L.S. (1965), según la relación

$$q_{cr} = 0.15 h_{fg} \rho_v \left(\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v} \right)^{0.5}$$

$$+ hc_{ft} (T_{w-cr} - T_{sa}) \quad (2.7)$$

donde

$$T_{w-cr} = 56.67 \log\left(\frac{P}{6894.76}\right) - 53.89\left(\frac{P}{P + 103421.4}\right) \\ - 0.821 j_x + 273.16$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACION.

Se tomó la correlación de Chato J.C. (1962) para representar este fenómeno:

$$h_{c_{co}} = 0.555 \left[\frac{g P (\rho_g - \rho_v) k^3 h_{fg}}{\mu \Delta T D} \right]^{0.25} \quad (2.8)$$

Si se tiene la presencia de gases incondensables durante el fenómeno de condensación, es necesario corregir el coeficiente de transferencia de calor. Normalmente se trata un problema de transferencia de calor y masa simultáneos y se trabaja con un método iterativo para el cálculo de las condiciones en la interfase. Aquí se optó por una correlación que ahorra tiempo de ejecución y líneas de código y que no necesita iterar; Standiford F.C. (1979) corrige el coeficiente de transferencia de calor como función de la concentración del gas incondensable presente,

$$hc_{co-in} = \frac{hc_{co}}{1 + 0.004 C_a hc_{co}} \quad (2.9)$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR A LA ATMÓSFERA.

Saunders O.A. (1932) ajusta la ecuación de Lorenz y obtiene la correlación para diferentes condiciones atmosféricas. Esta correlación es la que aquí se utiliza,

$$hc_{at} = \left(\frac{\rho^2 g \beta \Delta T k^3 C_p}{\mu} \right)^{0.25} \quad (2.10)$$

Los metales que están del lado de la atmósfera se encuentran aislados, así que el coeficiente de transferencia de calor global tiene que calcularse a partir del coeficiente de transferencia a la atmósfera, la conductividad térmica y el espesor del aislante,

$$U_{at} = \frac{1}{\left(\frac{\delta}{k} + \frac{1}{hc_{at}} \right)} \quad (2.11)$$

4.3.3 Fluido En Una Tubería. -

Este bloque presenta el desarrollo matemático de la parte del modelo que representa al fluido viajando dentro de un tubo. El estudio se hace para un nodo (volumen de control), para tener el modelo de toda una tubería es necesario integrar todos los nodos (la integración se hace en la fase de programación). Pueden existir dos fenómenos que se analizan por separado: Flujo monofásico que indistintamente puede ser líquido o fase gaseosa y flujo bifásico.

El calor que recibe o pierde el fluido dado en las ecuaciones de los balances de energía planteados en esta sección, se calcula como

$$q = A hc \Delta T$$

donde hc es el coeficiente de transferencia de calor y se estima, según las condiciones particulares del caso estudiado, con las correlaciones dadas en la Sección 4.3.2.

Este bloque se relaciona con los módulos:

CICLO ITERATIVO (ITEROF) Submódulos: Tubería descendente

Tubo entre bombas y domo inferior

Domo inferior

Paredes de agua

SUPOSICIONES:

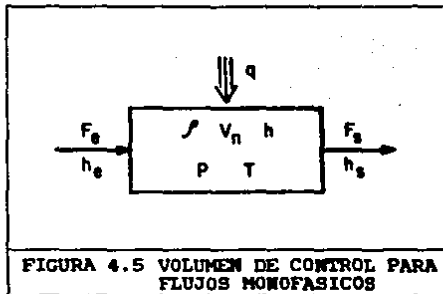
1. Se pueden tener hasta cinco trayectorias de flujo en la tubería descendente (entre el domo superior y las bombas).
2. Se pueden tener hasta cinco trayectorias de flujo en la tubería que une las bombas con el domo inferior.
3. Se pueden tener hasta ocho trayectorias de flujo en las paredes de agua.
4. Los tubos agrupados en una trayectoria son idénticos entre sí.
5. El circuito, que puede tener un número variables de trayectorias de flujo, puede ser dividido en otro número variable de nodos para cada trayectoria. La tubería descendente puede tener hasta cien nodos por cada trayectoria, cincuenta antes de las bombas y cincuenta después. Las paredes de agua pueden tener hasta cien nodos por cada trayectoria. Lo anterior permite convenir la exactitud de los resultados con la rapidez de ejecución.
6. Se usa un modelo unidimensional.
7. En cualquier tramo del circuito agua/vapor de la caldera es posible la existencia de dos fases, en cuyo caso se usa el modelo de flujo deslizante de Zuber N. y Findlay J.A. (1965).

8. Para flujo bifásico, las fases se encuentran en equilibrio termodinámico a la presión del nodo.
9. El cambio temporal de presión del domo rige a todo el circuito.
10. Se desprecia el término inercial de la velocidad en la aceleración temporal, esto es, se asume un modelo cuasi-estático; la velocidad del fluido se ajusta instantáneamente para mantener el balance de fuerzas. Por experiencia se sabe que este término causa inestabilidades numéricas y reduce mucho el paso de integración.
11. Se usan los conceptos de parámetros concentrados y volúmenes elementales.
12. Las propiedades del fluido en un nodo son los de salida, exceptuando la presión que es la del nodo anterior (de entrada). Esto permite desacoplar la ecuación de cantidad de movimiento con los balances de energía y masa. Masada G.Y. (1979) y Roldán Villasana E.J. et al. (1984b) muestran que con este tratamiento aumenta la estabilidad numérica del modelo.
13. El fluido en un nodo, que tiene propiedades constantes a lo largo de su longitud según el criterio de parámetros concentrados, puede ser bifásico o monofásico. Durante el proceso de llenado, si el nivel de agua se encuentra en un cierto nodo, éste se divide en dos partes: un nodo monofásico líquido por debajo del nivel y un nodo monofásico gaseoso por arriba del nivel.

Desarrollo matemático:

NODOS MONOFASICOS.

Supóngase que un fluido monofásico viaja a través de un tubo. Si tomamos un volumen de control tal como el representado en la Figura 4.5, podemos hacer sobre el un balance de materia y otro de energía, despreciando en ésta última los términos de trabajo y de energías cinética y potencial



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial Z} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial G h}{\partial Z} = \frac{q}{V} \quad (3.2)$$

donde el flux másico se define como la velocidad del fluido multiplicada por su densidad,

$$G = v \rho \quad (3.3)$$

El cambio temporal de la densidad puede expandirse a partir de las dos

propiedades de estado,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.4)$$

y el cambio temporal de la energía interna volumétrica está dada por

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \right) - \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.5)$$

Con las dos ecuaciones anteriores y discretizando los cambios axiales, los balances de materia y energía pueden reescribirse como

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho}{\Delta Z} v = \frac{G}{\Delta Z} \frac{n-1}{n} - \frac{\partial p}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\left(\rho + h \frac{\partial \rho}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho h}{\Delta Z} v = \frac{(Gh)}{\Delta Z} \frac{n-1}{n} + \left(1 - h \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{q}{V_n} \quad (3.7)$$

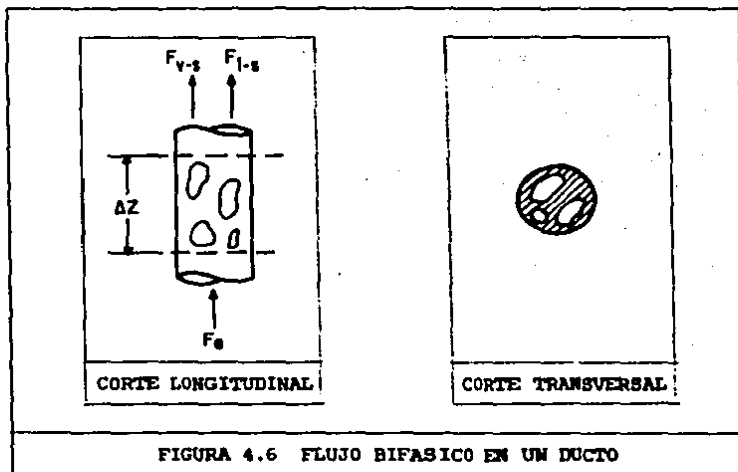
Estas dos últimas ecuaciones pueden resolverse simultáneamente para obtener la derivada de la entalpia con respecto al tiempo y la velocidad de salida del fluido.

NODOS BIFASICOS.

Antes de plantear los balances de materia y energía es conveniente repasar algunos conceptos fundamentales para el tratamiento de fluidos

bifásicos.

Supóngase que se tiene un ducto por el que fluye un flujo en dos fases según se presenta en la Figura 4.6.



Tomando un volumen de control puede definirse la fracción de vacío como la fracción del volumen total ocupado por el vapor,

$$\alpha = \frac{V_v}{V} \quad (3.8)$$

pero considerando el enfoque de parámetros concentrados, la fracción

de vacío puede expresarse en función de las áreas,

$$\alpha = \frac{A_v}{A} \quad (3.9)$$

Los gastos volúmetricos del líquido y del vapor pueden ser definidos independientemente,

$$Q_v = \frac{F_v}{\rho_g} \quad (3.10)$$

$$Q_l = \frac{F_l}{\rho_f} \quad (3.11)$$

y pueden relacionarse con el gasto volumétrico total,

$$Q = Q_v + Q_l \quad (3.12)$$

Las velocidades superficiales de cada fase se definen como si el flujo de la fase ocupara el área total del tubo. Las velocidades superficiales son aditivas y el resultado es la velocidad promedio de la mezcla,

$$j = \frac{F}{\rho A} = \frac{Q}{A} = \frac{Q_v + Q_L}{A} \quad (3.13)$$

$$j = j_v + j_L \quad (3.14)$$

Es fácil concluir que las velocidades superficiales se relacionan con las velocidades normales de la siguiente manera:

$$v_v = \frac{j_v}{\alpha} \quad (3.15)$$

$$v_L = \frac{j_L}{(1 - \alpha)} \quad (3.16)$$

La densidad promedio de la mezcla se obtiene a partir de las densidades de cada fase y la fracción de vacío,

$$\bar{\rho} = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_f \quad (3.17)$$

$$\bar{\rho} = \alpha(\rho_g - \rho_f) + \rho_f \quad (3.18)$$

y la entalpia promedio de la mezcla se calcula, a su vez, con la calidad del fluido,

$$\bar{h} = x h_g + (1 - x) h_f \quad (3.19)$$

La calidad y la fracción de vacío estan relacionadas de la siguiente manera:

$$x = \frac{p_g \alpha}{p} \quad (3.20)$$

Para considerar la diferencia de velocidades de cada fase, se adopta el modelo de flujo deslizante de Zuber N. y Findlay J.A. (1965),

$$j_v = \alpha (C_0 j + v_{gj}) \quad (3.21)$$

Aquí puede sustituirse la ecuación (3.14) para obtener

$$j_v = B_1 j_2 + B_2 \quad (3.22)$$

donde

$$B_1 = \frac{C_0 \alpha}{(1 - C_0 \alpha)} \quad (3.23)$$

y

$$B_z = \frac{v_{gj}^\alpha}{(1 - C_0 \alpha)} \quad (3.24)$$

Los parámetros de esta correlación están dados por las expresiones

$$v_{gj} = 1.53 \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25} \quad \text{si } \alpha < 0.65$$

$$v_{gj} = 1.53 \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25} \frac{(1 - \alpha)}{0.35} \quad \text{si } \alpha \geq 0.65$$

$$C_0^* = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}}$$

$$C_0 = C_0^* \quad \text{si } \alpha < 0.65$$

$$C_0 = C_0^* + (1 - C_0^*) (\alpha - 0.65)/0.35 \quad \text{si } \alpha \geq 0.65$$

Considérese ahora un fluido bifásico dentro de una tubería como se

representa en la Figura 4.7.

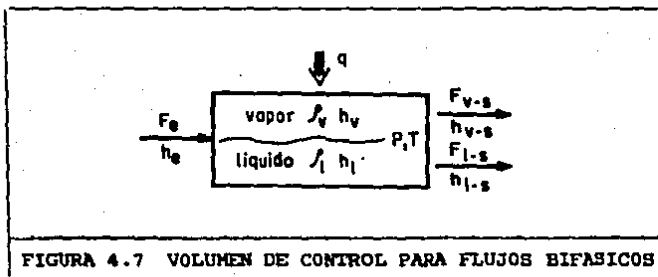


FIGURA 4.7 VOLUMEN DE CONTROL PARA FLUJOS BIFÁSICOS

Los balances de materia y energía son,

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial Z} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho}U)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{G}h}{\partial Z} = \frac{q}{n} \quad (3.26)$$

De la ecuación (3.14) pueden deducirse el flux másico y el flux energético totales.

$$\bar{G} = \rho_l j_l + \rho_v j_v \quad (3.27)$$

$$\overline{Gh} = \rho_f j_L h_L + \rho_g j_v h_g \quad (3.28)$$

Discretizando el cambio axial del flux másico, con la ayuda de la ecuación (3.22), se llega a:

$$\frac{\partial \overline{G}}{\partial Z} = \frac{G_n - G_{n-1}}{\Delta Z} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial \overline{G}}{\partial Z} = \frac{(\rho_f j_L + \rho_g B_1 j_L + \rho_g B_2) j_L}{\Delta Z} - \frac{G_{n-1}}{\Delta Z} \quad (3.30)$$

similarmente para el flux energético,

$$\frac{\partial \overline{Gh}}{\partial Z} = \frac{[(\rho_f j_L + \rho_g B_1 h_g) j_L + \rho_g h_g B_2] j_L}{\Delta Z} - \frac{(\overline{Gh})_{n-1}}{\Delta Z} \quad (3.31)$$

Considérense las cuatro definiciones siguientes (se usarán como expresiones auxiliares),

$$\frac{d\alpha}{dP} = \alpha \left(\frac{d\rho_g}{dP} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{d\rho_f}{dP} \right) \quad (3.32)$$

$$\frac{du^*}{dP} = \alpha \left(\frac{d(h_g \rho_g)}{dP} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{d(h_f \rho_f)}{dP} \right) - 1 \quad (3.33)$$

$$\Delta \rho = \rho_g - \rho_f \quad (3.34)$$

$$\Delta h = \rho_g h_g - \rho_f h_f \quad (3.35)$$

Con lo que los cambios temporales de la densidad y energía interna de la mezcla pueden ser expresadas como

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = \frac{d\rho^*}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} + \Delta \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u})}{\partial t} = \frac{du^*}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} + \Delta h \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3.37)$$

Con las ecuaciones (3.29), (3.30), (3.36) y (3.37) los balances de materia y energía pueden escribirse de la siguiente manera,

$$\Delta \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\rho_f + \rho_g B_1}{\Delta Z} j_z = \frac{G_{n-1}}{\Delta Z} - \left(\frac{d\rho^*}{dP} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \rho_g B_2 \quad (3.38)$$

$$\Delta h \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\rho_f h_f + \rho_g h_{B_1}}{\Delta Z} j_z = \frac{Gh}{\Delta Z} \frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{du^*}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} - \rho_g h_{B_2} + \frac{g}{V_n} \quad (3.39)$$

Resolviendo simultáneamente estas dos ecuaciones se obtienen la velocidad superficial del líquido y la derivada de la fracción de vacío con respecto al tiempo. Con la velocidad superficial del líquido se obtiene la del vapor mediante la correlación de Zuber-Findlay. La derivada de la entalpía con respecto al tiempo puede calcularse a partir de la derivada de la fracción de vacío con respecto al tiempo,

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \left(x \frac{dh_g}{dP} + (1-x) \frac{dh_f}{dP} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + h_{fg} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3.40)$$

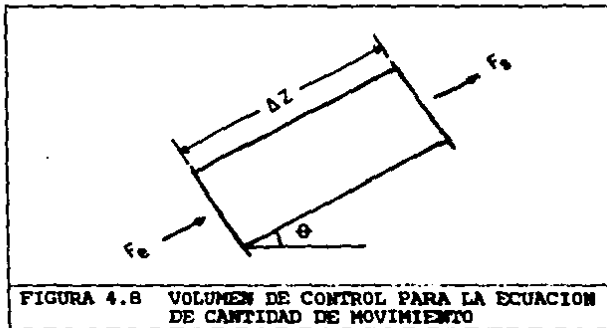
La derivada de la calidad con respecto al tiempo puede obtenerse a partir de la ecuación (3.20),

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\rho_g}{\rho} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\alpha}{\rho} \frac{d\rho_g}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{x}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} \quad (3.41)$$

CAIDA DE PRESION EN EL NODO.

Para calcular la caída de presión a lo largo del nodo se plantea la ecuación de cantidad de movimiento para un nodo bifásico que contiene al caso particular de un nodo monofásico.

La Figura 4.8 presenta un volumen de control sobre el cual se aplica la ecuación de cantidad de movimiento.



La ecuación de cantidad de movimiento en su forma general es,

$$\frac{\partial(\bar{p} v)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2 \bar{p})}{\partial Z} = - \frac{\partial P}{\partial Z} - \frac{\partial \tau}{\partial Z} - \rho g \text{ sen} \theta \quad (3.42)$$

de donde,

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = - \frac{\partial \tau}{\partial Z} - \frac{\partial(\bar{p} v^2)}{\partial Z} - \bar{p} g \text{ sen} \theta - \frac{\partial(\bar{p} v)}{\partial t} \quad (3.43)$$

Se analiza cada uno de los términos de la ecuación para determinar la caída de presión a lo largo del nodo.

El término inercial, en su forma integrada usual se expresa como,

$$-\frac{\partial \tau}{\partial Z} = -\frac{K F_L^2}{\rho \Delta Z} \phi_{20}^2 \quad (3.44)$$

Si se tiene el caso de flujo de vapor el multiplicador de flujo en dos fases $(\phi_{20})^2$ desaparece y el flujo es, obviamente, el de vapor. El coeficiente de pérdidas por fricción está dado por

$$K = -4 f \left(\frac{L}{D} + \left[\left(\frac{L}{D} \right)_{eq} \right] \right)$$

donde el término $(L/D)_{eq}$ es la relación de L/D equivalente para caídas de presión por accesorios y construcción. El factor de fricción de Darcy-Weisbach se toma como $16/Re$ para flujo laminar o del ajuste en función del número de Reynolds hecho por Drew y Generaux (1936) para flujo turbulento, definiéndose una zona de transición entre los dos regímenes de flujo. El multiplicador para flujo en dos fases tiene la funcionalidad,

$$\phi_{20}^2 = f(G, P, \rho_f, \rho_g, x)$$

y se tomó de la correlación de Jones A.B. (1961). El multiplicador converge al valor de uno si la calidad del vapor tiende a cero.

El término de aceleración espacial puede discretizarse con respecto a

la longitud axial,

$$-\frac{\partial(\bar{\rho} v^2)}{\partial Z} = -\frac{\bar{\rho}_e v_e^2 - \bar{\rho}_s v_s^2}{\Delta Z} \quad (3.45)$$

El término de aceleración temporal puede desarrollarse,

$$\frac{\partial(\bar{\rho} v)}{\partial t} = \bar{\rho} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \quad (3.46)$$

Suponiendo un modelo cuasi-estático para evitar inestabilidades numéricas, se elimina el término inercial de la velocidad. El término de la densidad puede expandirse,

$$v \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = v \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (3.47)$$

Con las ecuaciones (3.44), (3.45), (3.46) y (3.47) se define la caída de presión como,

$$\Delta P = -\frac{K}{\rho} F_L^2 \phi_{L0}^2 + (\bar{\rho}_s v_s^2 - \bar{\rho}_e v_e^2) - \bar{\rho} g \Delta Z \operatorname{sen} \theta -$$

$$v \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (3.48)$$

4.3.4 Metales. -

Se presenta el desarrollo de las ecuaciones para el cálculo de las derivadas de las temperaturas del metal de la caldera. La presentación se hace en dos partes; metal del domo y metal de un tubo típico del generador de vapor.

El calor que recibe o pierde el fluido dado en las ecuaciones de los balances de energía planteados en esta sección, se calcula como

$$q = A hc \Delta T$$

donde hc es el coeficiente de transferencia de calor y se estima, según las condiciones particulares del caso estudiado, con las correlaciones dadas en la Sección 4.3.2.

Este bloque se relaciona con los módulos:

METAL DEL DOMO SUPERIOR (MEDOOF)

METAL DE TUBOS DE LA CALDERA (MECIOF) Submódulos: Tubería descendente

Tubo entre bombas
y domo inferior

Domo inferior

Paredes de agua

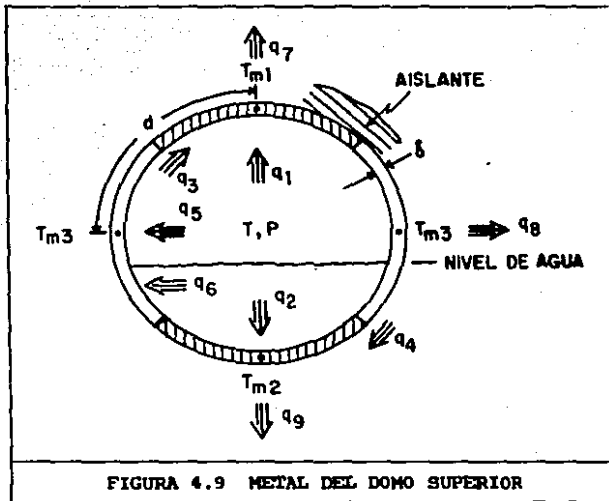
SUPOSICIONES:

1. El metal del domo superior se divide en tres partes; inferior, media y superior. A cada parte se le asigna una temperatura de metal.
2. Se desprecia la conductividad térmica del metal de los tubos del generador de vapor. EL número de temperaturas de metal de un nodo depende del tipo de aislamiento térmico que presente el tubo. Se tiene una temperatura de metal si el tubo está totalmente aislado o sin aislar. Se tienen dos temperaturas de metal si el tubo se encuentra semi-aislado.
3. La entalpía de los metales se expresa en función de la capacidad calorífica a presión constante.

DESARROLLO MATEMATICO:

METAL DEL DOMO.

El domo es un recipiente cilíndrico cerrado que contiene una mezcla de líquido, vapor y un gas incondensable e insoluble en la fase líquida (el gas sólo está presente en el proceso de encendido de la unidad). En la Figura 4.9 se muestra la nomenclatura utilizada para el desarrollo de las ecuaciones del metal del domo superior.



El balance energético para el metal puede ser expresado, para las zonas superior e inferior como

$$\frac{dT_{m1}}{dt} = \frac{q_1 + q_3 - q_7}{m_1 C_{p_m}} \quad (4.1)$$

$$\frac{dT_{m2}}{dt} = \frac{q_2 + q_4 - q_9}{m_2 C_{p_m}} \quad (4.2)$$

Los calores por conducción se calculan como sigue.

$$q_3 = \frac{k_m}{d} A (T_{m3} - T_{m1}) \quad (4.3)$$

$$q_4 = \frac{k_m}{d} A (T_{m3} - T_{m2}) \quad (4.4)$$

donde

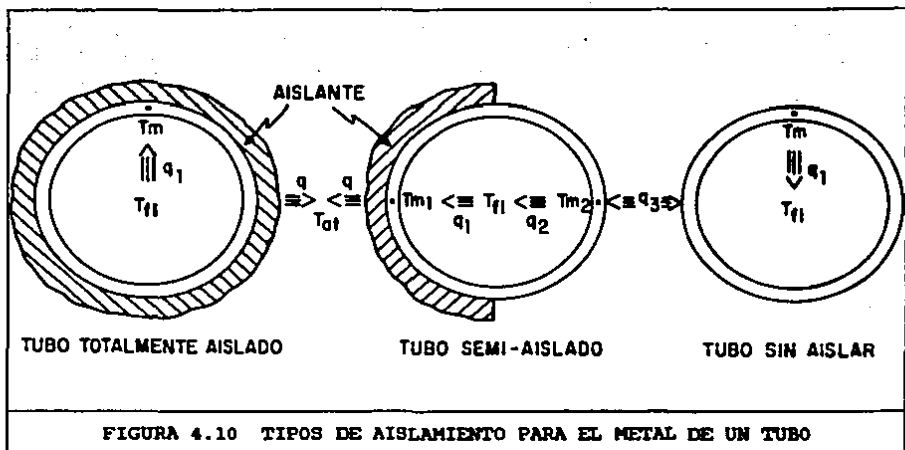
$$A = 2 L_{do} \delta \quad (4.5)$$

Para la zona media,

$$\frac{dT_{m3}}{dt} = \frac{q_5 + q_6 - q_3 - q_4 - q_8}{m_3 C p_m} \quad (4.6)$$

METAL DE UN TUBO.

Los tubos de la caldera se asocian en trayectorias y éstas a su vez, se dividen en nodos. El estudio se hace para cada uno de los nodos. Pueden tener tres tipos de aislamiento en un nodo según se observa en la Figura 4.10.



Las derivadas de la temperatura de metal para cada caso se presentan a continuación.

Tubo totalmente aislado.

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{q_1 - q}{m C_p} \quad (4.7)$$

Tubo semi-aislado.

$$\frac{dT_{m1}}{dt} = \frac{2(q_1 - q)}{m C_p} \quad (4.8)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{2(q_1 - q_2)}{m C_{p_m}} \quad (4.9)$$

En este caso, la masa del metal sigue siendo la total del nodo.

Tubo sin aislar.

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{q_2 - q_1}{m C_{p_m}} \quad (4.10)$$

4.3.5 Bombas Y Motores. -

Se desarrolla la formulación matemática de las bombas de circulación forzada y sus motores. Como base para algunos cálculos se utilizaron las curvas de operación de las bombas proporcionadas por el fabricante. Las curvas se ajustaron a polinomios de bajo grado y ésta es la forma en que aquí se presentan. Las curvas operacionales del motor se ajustaron también a polinomios y se dan aquí de manera funcional.

Este bloque se relaciona con los módulos:

CICLO ITERATIVO (ITEROF) Submódulo: Bombas (hidráulica)

BOMBA Y MOTOR PARTE ELECTRO-MECANICA (MOB00F)

SUPOSICIONES:

1. Pueden tenerse hasta cinco bombas de circulación forzada.
2. No se considera la posibilidad de cavitación en las bombas de circulación forzada.
3. El par mecánico de fricción se toma constante.
4. Las velocidades angulares de una bomba y su motor son iguales. No se considera la existencia de variadores de velocidad.

DESARROLLO MATEMATICO:

Las curvas de operación de las bombas proporcionadas por el

fabricante están dadas a las condiciones nominales de operación, sin embargo existen relaciones conocidas que nos permiten extrapolar datos para cualquier estado operacional a partir de ecuaciones para un punto nominal de las variables que caracterizan el comportamiento de la bomba. Estas variables son la potencia al freno, la cabeza de la bomba (altura de agua) y el flujo volumétrico. Las relaciones mencionadas son,

$$\text{BHP} = \text{BHP}_n (\omega/\omega_n)^3 \quad (5.1)$$

$$H = H_n (\omega/\omega_n)^2 \quad (5.2)$$

$$Q = Q_n (\omega/\omega_n) \quad (5.3)$$

La curva de cabeza de la bomba contra gasto está dada a la velocidad angular nominal. Esta curva se ajusta a una función polinomial,

$$H_n = kt_0 + kt_1 Q_n + kt_2 Q_n^2 \quad (5.4)$$

Considerando que la caída de presión se puede expresar como

$$\Delta P_D = \rho g H \quad (5.5)$$

y con el auxilio de las ecuaciones (5.2) y (5.3), se llega a una relación para la caída de presión a través de la bomba para cualesquiera flujo y velocidad angular:

$$\Delta P_b = ct_0 \omega^2 \rho + ct_1 \omega F + ct_2 \frac{F^2}{\rho} \quad (5.6)$$

Similarmente, ajustando la curva de potencia al freno contra gasto, dada para la velocidad angular nominal, se llega a

$$BHP_n = kt_3 + kt_4 Q_n + kt_5 Q_n^2 + kt_6 Q_n^3 \quad (5.7)$$

La potencia al freno puede expresarse como

$$BHP = TR \omega \quad (5.8)$$

y con el auxilio de las ecuaciones (5.1) y (5.3), se tiene que

$$TR_b = ct_3 \omega^2 + ct_4 \omega \frac{F}{\rho} + ct_5 \frac{F^2}{\rho} + ct_6 \frac{F^3}{\omega \rho^3} \quad (5.9)$$

La curva de eficiencia se ajustó en función de la velocidad angular con una función elíptica.

Las curvas de la corriente demandada por el motor y el par mecánico del mismo se ajustaron a polinomios de bajo orden,

$$I = f(S, V\&L) \quad (5.10)$$

$$TR_{mo} = f(S, V\&L^2) \quad (5.11)$$

donde el deslizamiento se define como

$$S = 1 - \frac{\omega}{v_{si}} \quad (5.12)$$

y la velocidad de sincronía,

$$v_{si} = 2\pi \frac{f}{np} \quad (5.13)$$

La derivada de la velocidad angular con respecto al tiempo se deduce a partir de la segunda ley de Newton para sistemas rotatorios,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{TR_{mo} - TR_b - T_{fr}}{I_m} \quad (5.14)$$

donde el momento de inercia es un dato proporcionado por el fabricante y el par de fricción se considera constante.

4.3.6. Propiedades Termofísicas. -

Para el cálculo de las propiedades termofísicas se usaron ajustes polinomiales y correlaciones dadas en la literatura. Se presenta aquí la fuente de cada una de ellas.

Las propiedades del metal y del aislante de la caldera se ajustaron a polinomios de bajo orden para diferentes intervalos de temperatura. Los coeficientes de estos polinomios se leen como parámetros pues estos materiales pueden cambiar de un generador de vapor a otro.

Este bloque se relaciona con los módulos:

DOMO SUPERIOR NO ITERATIVO (DOMIOF)

METAL DEL DOMO SUPERIOR (MEDOOF)

CICLO ITERATIVO (ITEROF) Submódulos:

Tubería descendente

Tubo entre bombas
y domo inferior.

Domo inferior

Paredes de agua

METAL DE TUBOS DE LA CALDERA (MECIOF) Submódulos:

Tubería descendente

Tubo entre bombas
y domo inferior

Domo inferior

Paredes de agua

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.

Todas las propiedades termodinámicas del agua y el vapor se tomaron del paquete de propiedades termodinámicas desarrollado por el

Departamento de Simulación Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE (1985). Las propiedades se ajustaron con polinomios de bajo orden. Se hicieron ajustes para 26 diferentes intervalos de presión. El rango total en la presión es de 689 Pa a 28 MPa. La temperatura varía en ± 300 K de la línea de saturación.

Las variables independientes son la presión y la entalpía (la presión para casos de saturación).

La base de las propiedades es una entalpía nula para el líquido en el punto triple del agua.

La ecuación de la entalpía del gas incondensable (aire) se ajustó polinomialmente con base en los datos reportados por la ASHRAE (1977). La densidad del aire se calcula con la ley del gas ideal. Estas dos propiedades se dan en función de la presión y la temperatura.

PROPIEDADES DE TRANSPORTE.

Todas las propiedades de transporte están en función de la presión y la temperatura.

La conductividad térmica del agua (líquido y vapor) se obtuvo con la ecuación recomendada por la Sexta Conferencia Internacional sobre Propiedades del Vapor, SCIPV (1964). La viscosidad dinámica se calcula a partir de la correlación de Bruges E.A. et al. (1966).

Las relaciones para la conductividad térmica y la viscosidad dinámica del aire se obtuvieron mediante ajustes polinomiales con base en los datos tabulados por la ASHRAE (1977).

La conductividad térmica y la del metal (acero al carbón) y la del aislante (lana mineral) se ajustaron a polinomios de bajo orden según los datos reportados en el Manual del Ingeniero Químico de Perry y Chilton.

PROPIEDADES FÍSICAS.

Todas las propiedades físicas están en función de la presión y la temperatura. Los códigos para la tensión superficial del agua y la entalpía del aire fueron proporcionadas por el Dr. Marcos Ley Koo del Departamento de Combustibles Fósiles del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

La tensión superficial del agua se calcula con el ajuste hecho por Vargaftik N.B. et al. (1983) tal como se presenta en el documento de la IAPS (1983).

La capacidad calorífica del aire se obtuvo de la ecuación recomendada por la JANAF (1971).

La ecuación para la capacidad calorífica del metal (acero al carbón) se ajustó a un polinomio de bajo orden según los datos reportados en el Manual del Ingeniero Químico de Perry y Chilton.

4.3.7 Válvulas. -

Este bloque se relaciona con el módulo:

FLUJOS A TRAVES DE LAS VALVULAS DEL DOMO (FLSD0F)

Por simplicidad para el modelado de válvulas se toman los modelos prácticos comúnmente usados. Se usan los criterios que recomienda Franks R.G.E. (1972). Según las condiciones de las presiones en la entrada y la descarga de la válvula puede tenerse dos regímenes de flujo: sónico y subsónico.

SUPOSICIONES:

1. Se considera que la válvula puede verse como una resistencia al flujo.
2. Se supone que el fluido se comporta isoentrópicamente al pasar a través de la válvula.
3. Se consideran hasta cuatro válvulas de seguridad en el domo superior.
4. Los venteos del domo superior se representan por una sola válvula equivalente.
5. Los drenes del domo superior se representan por una válvula equivalente.

De una manera práctica se puede estimar si el flujo a través de una válvula es sónico o subsónico según las condiciones de las presiones en la entrada y la descarga de la válvula. Aunque este no es un modelo riguroso nos ofrece una buena aproximación del fenómeno, suficiente para los efectos de este modelo. Entonces, se tiene que,

$$P_d > 0.53 P_e \implies \text{flujo subsónico}$$

$$P_d \leq 0.53 P_e \implies \text{flujo sónico}$$

FLUJO SUBSONICO.

El flujo a través de una válvula, si se tiene flujo subsónico, puede estimarse con la siguiente ecuación;

$$F = \sqrt{\frac{\rho \Delta P}{C_d}} \quad (7.1)$$

FLUJO SONICO.

Para este caso la ecuación usada es:

$$F = \frac{P_e \rho \left[1 - \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \right]}{C_d} \quad (7.2)$$

siendo

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (7.3)$$

Para ambos casos se tiene que

$$C_d = \frac{kt}{f(\Delta P)} \quad (7.4)$$

representa el coeficiente de descarga de la válvula, la cual depende del tipo de válvula que se trate;

$$f(\Delta P) = \begin{cases} (\epsilon + \Delta P)^2 & \longrightarrow \text{Válvulas de control} \\ (\epsilon + \Delta P^2)^2 & \longrightarrow \text{Válvulas de corte} \\ (\epsilon + \Delta P^{0.5})^2 & \longrightarrow \text{Válvulas de globo y mariposa} \end{cases}$$

4.3.B Controles. -

Este bloque representa los controles del nivel y la presión del domo mediante el flujo de agua de alimentación y el flujo de calor proveniente del hogar, respectivamente.

Las rutinas involucradas con este bloque (CONTOF, CTRL0F y QLP10F) deben desaparecer una vez acoplado el sistema con los sistemas caldera parte gases y agua de alimentación.

Ambos controles se suponen como proporcional e integral pues es éste el control típico usado en generadores de vapor. Si el control de la caldera particular que se desea estudiar es de otro tipo este módulo puede ser sustituido.

CONTROL DE NIVEL EN EL DOMO.

$$F_{aa} = F_{no-aa} + G_{a1} \left(e + \frac{1}{\tau_{i1}} \int e dt \right) \quad (8.1)$$

donde el error se define como

$$e = (N_{no-do} - N_{do}) \quad (8.2)$$

CONTROL DE LA PRESION EN EL DOMO.

$$q = q_{no} + G_{a2} \left(e + \frac{1}{\tau_{i2}} \int e dt \right) \quad (8.3)$$

donde el error es,

$$e = (P_{no-do} - P_{do}) \quad (8.4)$$

El calor total calculado por el control se distribuye a lo largo de los tubos de la caldera según el resultado de la investigación hecha por Wiener M. (1977), quien reporta un perfil de flujo de calor en función de la altura de los tubos. Se ajustan las gráficas de Wiener a un polinomio de bajo orden haciendo una normalización tanto de la longitud como del flujo de calor.

4.3.9 Proceso De Llenado. -

El modelo para el llenado de la caldera se desarrolló independientemente del modelo para operación normal. La razón es que incluir este proceso en el modelo normal complica mucho las ecuaciones y la solución del modelo, además de que este caso no es de mucha importancia.

El proceso de llenado se inicia con el generador de vapor vacío, conteniendo aire, y termina cuando el agua de alimentación llega a la parte inferior del domo. Durante este proceso se mantienen fuera de servicio la fuente de calor del generador de vapor y las bombas de circulación forzada. Los venteos permanecen totalmente abiertos.

El modelo de llenado considera que todas las variables de estado son cuasiestáticas, excepto la masa total del líquido en la caldera.

La mayoría de las variables de estado se mantienen constantes. Otras calculan algebraicamente (sus cambios son instantáneos, sin inercia).

La masa de aire presente se calcula algebraicamente con la ley del gas ideal.

Las entalpías de cada nodo se inicializan como la de la mezcla gaseosa (aire y vapor) y se sustituyen por la del agua según se inundan los nodos.

Para el cálculo del nivel de las paredes de agua y de la tubería descendente en función del volumen de agua de llenado se construye

automáticamente una tabla que relaciona:

1. La altura del nivel con respecto al punto más bajo de la caldera,
2. la longitud inundada de los tubos,
3. el número de nodo en que se encuentra el nivel y
4. la inclinación con respecto a la horizontal del nodo en que se encuentra el nivel.

todo esto para cada una de las trayectorias. De esta manera el llenado se hace automáticamente según el volumen de agua que ha entrado a la caldera.

4.4 Solución Del Modelo

En esta sección se presenta el resumen general de la manera en que se resuelven las ecuaciones del modelo y algunas consideraciones generales acerca de los métodos de integración y convergencia.

4.4.1 Secuencia De Solución. -

Se resume la secuencia en que se resuelven las ecuaciones. No se escriben nuevamente dichas ecuaciones, sólo se plantea el orden general de solución. El diagrama de estructura de los programas y la definición de las rutinas mostrados en el Apéndice 2 son un buen auxiliar para el seguimiento de la secuencia de solución. Se asume que los parámetros y condiciones de operación ya están definidos. En seguida se presenta la secuencia de solución del modelo, indicando la sección de este capítulo en que se encuentran las ecuaciones involucradas.

CONTROLES. Se calculan el flujo de agua de alimentación y el calor a cada sección de la caldera. Sección 4.3.8.

DOMO SUPERIOR PARTE NO ITERATIVA. Se calculan la presión total, el nivel de agua, la masa del vapor, la masa total, el volumen ocupado por la fase gaseosa, las fracciones másica y molar del aire y las propiedades termofísicas del líquido, del vapor y del aire presentes en el domo superior. Sección 4.3.1.

VALVULAS DEL DOMO SUPERIOR. Se calculan los flujos que entran o salen del domo a través de sus válvulas de drenes y venteos. Sección 4.3.7.

METAL DEL DOMO. Se calculan el calor que pierden o reciben los fluidos del domo y la derivada de las temperaturas de cada sección del metal del domo. Sección 4.3.4 (se auxilia de la Sección 4.3.2 para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor adecuado).

CIRCUITO ITERATIVO. Se calculan los flujos de entrada, la caída de presión, el calor que pierde o gana el fluido, la calidad del vapor, y las propiedades termodinámicas, todo para cada uno de los nodos del ciclo, se calculan también la caída de presión en las bombas de circulación forzada, la derivada del nivel de agua en cada trayectoria de las paredes de agua y la derivada de la presión de vapor, la derivada de la presión total, la derivada de la masa del aire y la derivada de la masa del líquido del domo superior. Sección 4.3.1 y Sección 4.3.4 (para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en cada nodo del circuito se usan las ecuaciones adecuadas de la Sección 4.3.2 y para la caída de presión en las bombas se utilizan las ecuaciones correspondientes mostradas en la Sección 4.3.5).

Las ecuaciones de este ciclo están acopladas y deben resolverse simultáneamente. Considerense las siguientes definiciones:

- k - número de trayectorias de la tubería que une el domo superior con las bombas de circulación forzada (tubería descendente).
- m - número de bombas de circulación forzada.
- n - número de trayectorias de la tubería que une las bombas de circulación forzada con el domo inferior (tubería de bajada).

p - número de trayectorias de las paredes de agua.

Con esto, las variables inicializables son:

La derivada de la presión total en el domo,

k flujos de entrada a la tubería descendente,

$m-1$ flujos de las bombas de circulación forzada,

$n-1$ flujos de entrada a la tubería de bajada y

$p-1$ flujos de entrada a las paredes de agua,

El número total de ecuaciones es $k + m + n + p - 2$.

En resumen, el sistema trabaja de la siguiente manera:

Con los flujos mássicos y flux energético a la entrada de cada trayectoria de la tubería descendente y la derivada de la presión del domo, se calculan la caída de presión, calidad y la velocidad del fluido (y con éstos el flujo mássico y el flux energético) a la salida del primer nodo. Las condiciones a la salida del primer nodo son las de entrada al segundo nodo. Secuencialmente se repite el mismo procedimiento para cada nodo de cada trayectoria de la tubería. Al final se obtienen las condiciones de salida de cada trayectoria de la tubería, incluyendo la caída de presión total y el flujo total de salida.

Dado que se tienen $m-1$ flujos en las bombas, con un balance de materia se obtiene el flujo restante y se calcula la caída de presión

en cada una de ellas.

El mismo procedimiento hecho en la tubería descendente se aplica en forma consecutiva en la tubería de bajada, el domo inferior y las paredes de agua.

Con las propiedades de entrada a la tubería descendente y las de salida de las paredes de agua, se calculan las derivadas de la presión total, presión de vapor, masa del líquido y masa de aire en el domo.

El criterio para converger es el siguiente:

- La caída de presión en cada una de las trayectorias de la tubería descendente debe ser la misma ($k-1$ ecuaciones).
- La caída de presión en cada bomba de circulación forzada debe ser la misma ($m-1$ ecuaciones).
- La caída de presión en cada una de las trayectorias de la tubería de bajada debe ser la misma ($n-1$ ecuaciones).
- La caída de presión en cada una de las trayectorias de las paredes de agua debe ser la misma ($p-1$ ecuaciones).
- La caída de presión en todo circuito cerrado, debe ser igual a cero (una ecuación).
- La derivada de la presión en el domo calculada debe ser igual a la supuesta inicialmente (una ecuación).

El número total de ecuaciones es $k + n - p - 2$, que es el mismo número que de incógnitas.

METALES DE LOS TUBOS DE LA CALDERA. Para cada uno de los nodos del circuito se calculan las derivadas de las temperaturas de metal. Del ciclo iterativo se conoce el calor que pierde o gana el fluido (que es la que gana o pierde el metal en contacto con el fluido), aquí se calcula el calor que se pierde a la atmósfera. Sección 4.3.4, auxiliado por la Sección 4.3.2 para la estimación de los coeficientes de transferencia de calor.

MOTORES Y BOMBAS PARTE ELECTROMECHANICA. Se calculan la corriente demandada por el motor y la derivada de la velocidad angular de las bombas. Sección 4.3.5.

4.4.2 Métodos De Integración. -

Para seleccionar el método y paso de integración se usó el criterio de elegir el método más rápido y el paso más pequeño posibles.

Las diferencias entre los resultados de un modelo y los datos de planta pueden deberse a tres fuentes principales de error, suponiendo el modelo conceptual está perfectamente representado por el modelo formal y éste a su vez, por el modelo digital:

Errores de modelado. Se refieren principalmente a las limitaciones del modelo debidas a las simplificaciones y las suposiciones hechas al desarrollar el modelo matemático.

Errores de precisión de la computadora. Son los que lleva intrínsecos el uso de una máquina digital para el manejo del modelo. Dependen de la marca y modelo de la computadora.

Errores de los métodos numéricos. Son los causados por los métodos de integración y los métodos de convergencia.

Para minimizar los errores del último tipo, se recurrió al siguiente procedimiento para encontrar la mejor combinación de método y paso de integración:

1. Se generaron simulaciones "exactas" para algunos estados estables y transitorios con un método de integración preciso. Se utilizó el método de Shampine L.F. (1975) con método y orden variables y control de error.
2. Se escogió el transitorio crítico, siendo éste el más difícil de integrar.
3. Con los métodos de paso fijo disponibles (ver la Sección A4.2.3 del Apéndice 4) se simuló el transitorio crítico para diferentes pasos de integración.
4. Se escogió la mejor combinación de método y paso de acuerdo a la rapidez de ejecución y la mejor aproximación a la simulación "exacta".

El resultado de este procedimiento fue el tener un método de Euler con un paso de integración de 0.1 s. En el Capítulo 6 se muestran los resultados numéricos obtenidos.

4.4.3 Métodos De Convergencia. -

El método utilizado fue el de Newton-Raphson debido a su rapidez de convergencia. La matriz jacobiana del sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, se aproximó estimando numéricamente el jacobiano con el método de diferencia hacia adelante.

El jacobiano sólo se estima si se utiliza el método de Newton-Raphson, de otra forma, no se calcula.

En el Apéndice 4 se listan otros métodos de convergencia disponibles.

CAPITULO 5

MODELO DIGITAL

**...Muévete hacia aquí. Muévete hacia
allá. Haz esto. Haz aquello.**

**Stephen King,
"The Stand", (1978)**

I N D I C E

CAPITULO 5 MODELO DIGITAL

5.1	CASOS ESPECIALES	150
5.1.1	Interfaces.	150
5.1.2	Discontinuidades.	151
5.1.3	Método de Solución.	152
5.1.4	Otras Consideraciones.	153
5.2	DEFINICION DE LA NOMENCLATURA FORTRAN	154
5.3	CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA FINAL	156

5 MODELO DIGITAL

El modelo digital es la codificación de la formulación matemática. La elaboración de este modelo se hizo pensando en que el presente sistema eventualmente se acoplará con otros sistemas para tener la representación de una mayor parte la caldera, del generador de vapor completo o aún de todo un proceso.

5.1 Casos Especiales

Entre el modelo en su etapa de formulación matemática y el modelo final codificado existen muchas diferencias, debidas, principalmente, a la lógica programada para considerar algún caso especial, al manejo de las fórmulas matemáticas para economizar tiempo de cómputo y a las restricciones en la capacidad y precisión de la computadora. Por tanto, es conveniente mencionar algunos de los detalles que deben tenerse en cuenta durante la programación.

5.1.1 Interfaces. -

Las variables, en general, pueden ser de dos tipos: variables de comunicación externa y variables de comunicación interna.

Las variables de comunicación externa se refieren a las que conectan los bloques del diagrama de causalidad externa, es decir, son aquellas

que son utilizadas por más de un sistema.

Las variables de comunicación interna son las utilizadas exclusivamente por los módulos de un sistema.

Las variables de comunicación externa no deben ser cambiadas mientras un sistema se está ejecutando. La razón es que existe la posibilidad de tener un procesamiento en paralelo. Si se cambia una variable de comunicación externa en esas condiciones pueden ocurrir dos incidentes no deseados: a) Si la variable pertenece a otro sistema y se cambia mientras el sistema local hace uso de ella en un método iterativo de convergencia, puede retrasar o evitar la convergencia. b) Si la variable va a otros sistemas, puede tomar valores sin ningún significado durante el mismo método iterativo, por ejemplo, lo que ocasionaría disturbios no deseados en el sistema receptor de la variable y aún en la simulación global del proceso.

Para evitar estos incidentes se hace uso de las rutinas de interface antes y después de la ejecución del sistema. Antes de ejecutar el sistema se guardan en variables locales las variables de comunicación externa que vienen de otros sistemas. Después de ejecutar el sistema se asignan, desde otras variables locales, las variables de comunicación externa que van a otros sistemas.

5.1.2 Discontinuidades. -

Una de las grandes ventajas del presente modelo es que puede ser utilizado en todo el rango de operación del generador de vapor. Lo

anterior implica que diversas correlaciones (empíricas y rigurosas) fueron usadas para asegurar la calidad de los resultados según el punto de operación que se desee simular. Cuando se pasa de una correlación a otra debido a un cambio de régimen, son frecuentes las discontinuidades.

En todos los casos se evitaron las discontinuidades definiendo zonas de transición para suavizar el cambio de las correlaciones.

Algunos ejemplos de posibles discontinuidades son los siguientes: tratamiento de fluidos monofásicos o bifásicos, regímenes para caídas de presión, cálculo de coeficientes de transferencia de calor, manejo de flujo sónico o subsónico, etc.

5.1.3 Método De Solución. -

El método de solución lo podemos separar en dos grupos principales: Método de solución de las ecuaciones diferenciales y método de solución de ecuaciones algebraicas simultáneas.

Las ecuaciones diferenciales se integran según se explicó en la Sección 4.4 del Capítulo 4 con el método de Euler y un paso de 0.1 s. Los diversos métodos de integración que pueden ser utilizados pueden consultarse en el Apéndice 4.

Para la solución del ciclo iterativo puede hacerse uso del método de Newton-Raphson, entre otros. En este caso es necesario alimentar al paquete matemático (Sistema de métodos numéricos) con la matriz jacobiana del sistema de ecuaciones simultáneas. Dada la complejidad

del sistema de ecuaciones y que dicho sistema puede cambiar de número de ecuaciones, según el número de trayectorias y de nodos fijados por el usuario, no es fácil el cálculo del jacobiano analítico, así que se implantó el cálculo del jacobiano numérico con diferencia hacia adelante. Si se escoge un método que no requiera la matriz jacobiana, el programa, automáticamente, no hace el cálculo de la matriz mencionada. En el Apéndice 4 se mencionan los métodos de convergencia disponibles.

5.1.4 Otras Consideraciones. -

Por tratarse de un modelo general para cualquier tipo de caldera acuotubular, fue necesaria la inclusión de decisiones lógicas que ubicaran al programa en la caldera específica deseada por el usuario. Algunos ejemplos de estas decisiones son: existencia de bomba(s) de circulación forzada, posible recepción de calor en el domo y tubería descendente, paredes de agua totalmente dentro del hogar o con un lado aislado en contacto con la atmósfera, etc.

Por otro lado se tiene la lectura de los parámetros que definen totalmente al generador de vapor, las condiciones de operación y las características particulares de la simulación (paso de integración, tiempo de simulación, métodos matemáticos, etc.).

Las anteriores consideraciones se discuten con detalle en el Apéndice 4.

5.2 Definición De La Nomenclatura FORTRAN

En esta sección se definen las reglas para asignar los nombres de variables, rutinas y COMMON's.

VARIABLES DE COMUNICACION INTERNA. La nomenclatura para las variables de comunicación interna se hizo formando la variable con seis caracteres alfanuméricos. Los primeros dos caracteres representan la variable física que se desea representar, por ejemplo PA para presión absoluta, PD para presión diferencial, TM para temperatura, RA para velocidad angular, etc. Los siguientes dos lugares, tercero y cuarto, indican el componente a que se refiere la variable; DO para domo, BO para bomba(s), TD para tubería descendente, etc. Es conveniente asociar el componente con un módulo o submódulo desprendido de la modularización interna. El carácter número cinco se refiere a un subíndice que especifique la variable totalmente; A para aislante, M para metal, 0 (cero) si no es necesario el subíndice, 1, 2, 3, ... para subíndices numéricos, etc. El sexto carácter define el tipo de variable de que se trata; es muy importante esta identificación así que se listan todas las posibilidades para el sexto carácter:

- A : Variable analógica
- L : Variable lógica
- E : Variable de estado dinámica
- D : Variable derivada (con respecto al tiempo)

I : Variable inicializable analógica (de estado cuasiestática o algebraica)

Y : Variable de estado lógica

R : Variable derivada con respecto al tiempo no integrable (auxiliar)

X : Variable proveniente de otro sistema (sólo para variables internas)

La importancia de distinguir entre los tipos de variables y una definición más claras de ellas se da en el Apéndice 4. Algunos ejemplos de nomenclatura de variables de comunicación interna se presentan a continuación:

TMDOME : Temperatura de metal del domo (variable de estado)

WABO2A : Velocidad angular de la bomba 2 (variable analógica)

PATDOI : Presión en tubería descendente (variable inicializable)

VARIABLES DE COMUNICACION EXTERNA. La nomenclatura de las variables externas se basa en las mismas reglas mencionadas, pero al nombre de las variables debe anteponerse un par de caracteres que identifiquen al sistema de que se trata. El caracter que identifica al tipo de variable no puede ser X (de otro sistema) para este caso. Por ejemplo, para el desarrollo de un modelo de un generador de vapor de una central termoelectrica, se pueden tener los siguientes caracteres de etiquetación de los posibles sistemas que deben modelarse:

0A : Sistema eléctrico

0B : Sistema de agua de alimentación

0C : Sistema de trasiego y combustible

0D : Sistema de caldera en su parte aire

0E : Sistema de caldera en su parte gases de combustión

OF : Sistema de caldera en su parte agua/vapor
OG : Sistema de caldera en su parte sobrecalentador
OH : Sistema tableros de control y despliegue de información
OI : Sistema de métodos numéricos
OJ : Instructor

Los caracteres de identificación de sistemas son de relevante importancia pues, al ser la variables externas utilizadas por mas de un sistema a la vez, evitan la duplicidad en el nombre de las variables.

Otro uso importante de los caracteres de identificación es el de evitar duplicidad de nombres en COMMON's y nombres de rutinas. Conviene que estos nombres terminen con los dos caracteres de identificación de su sistema correspondiente.

5.2.1 Características Del Programa Final. - El Apéndice 2 contiene un diagrama de estructura jerarquizada que muestra todos los subprogramas utilizados en el orden en son invocados y la descripción de cada uno de ellos.

La programación del sistema contiene dos tipos de rutinas; las rutinas necesarias y las rutinas auxiliares. Las rutinas necesarias son las que contienen el modelo del generador de vapor en si. Las rutinas auxiliares son las que ayudan a la ejecución de las rutinas necesarias pero que no pertenecen al modelo de la caldera y que, eventualmente, pueden desaparecer. A continuación se listan las

rutinas auxiliares. Su descripción puede encontrarse en el Apéndice 2.

- CONDIN
- DATEN
- CONTOF
- CTRL0F
- QLPIOF
- IMPRIME
- NGUIA
- VGNLIN

Las rutinas CONDIN y DATEN definen las condiciones iniciales y datos que entran de otros sistemas respectivamente (de ellas cuelgan otros subprogramas). Las rutinas CONTOF y CTRL0F simulan los controles del nivel y presión del domo (agua de alimentación y flujo de calor respectivamente). La rutina QLPIOF da una distribución empírica del calor a lo largo de las paredes de agua y tubería descendente si es necesario. La rutina IMPRIME ayuda en el monitoreo gráfico de las variables. Las rutinas NGUIA y VGNLIN pertenecen al Sistema de Métodos Numéricos para el control de la simulación y los métodos de convergencia respectivamente (estas rutinas invocan a otros subprogramas). .b Las rutinas auxiliares, excepto VGNLIN, desaparecen o se modifican si se acopla el sistema caldera parte agua/vapor con otros sistemas.

En la Tabla 5.1 se aprecian las características del modelo digital terminado. Se toman como base únicamente las rutinas necesarias.

Para el cálculo del número de líneas ejecutables no se tomaron en cuenta las declaraciones ni la definición de COMMON's. El número de hojas se calculó considerando las declaraciones y definición de COMMON's; una hoja consta de 72 columnas y 52 renglones.

Por su extensión, es impráctico anexar a esta tesis los programas fuente. A manera de ejemplo en el Apéndice 3 se listan cuatro programas codificados.

NUMERO DE SUBPROGRAMAS	:	86
NUMERO DE LINEAS EJECUTABLES	:	1920
PROMEDIO	:	22.3 LINEAS/SUBPROGRAMA
NUMERO TOTAL DE HOJAS	:	261
PROMEDIO	:	3 HOJAS/SUBPROGRAMA
EXTENSION DE PROGRAMAS FUENTE	:	665 600 BYTES
EXTENSION DE PROGRAMA EJECUTABLE	:	362 469 BYTES

TABLA 5.1 CARACTERISTICAS COMPUTACIONALES DEL MODELO DIGITAL

CAPITULO 6

VALIDACION DEL MODELO

¿Que tengo que hacer para convencerte?
¿Necesitas que te lo ilustren con un
dibujo?

Stephen King,
"Cujo", (1981)

I N D I C E

CAPITULO 6	VALIDACION DEL MODELO	
6.1	CARACTERIZACION DEL GENERADOR DE VAPOR A SIMULAR	161
6.2	CRITERIO DE VALIDACION	163
6.2.1	Validación con datos de planta.	163
6.2.2	Validación sin datos de planta.	164
6.2.3	Procedimiento.	165
6.3	DEFINICION DE PRUEBAS	166
6.3.1	Estados estables.	166
6.3.2	Transitorios.	167
6.4	RESULTADOS	168
6.4.1	Estados estables.	168
6.4.2	Transitorios.	175

6 VALIDACION DEL MODELO

La validación de un modelo matemático puede definirse como el procedimiento efectuado para corroborar la similitud entre los resultados generados por el modelo y los datos tomados del proceso real.

Una validación necesita de pruebas al modelo para hacer las comparaciones con los datos existentes del prototipo, así como de un criterio sobre la forma de hacer dichas comparaciones. Todo esto está en función del alcance del modelo.

En este capítulo se presentan las características del generador de vapor simulado y se hace la validación del modelo. Se define el criterio seguido para la validación, se diseñan las pruebas necesarias y se presentan los resultados obtenidos.

6.1 Caracterización Del Generador De Vapor A Simular

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores el modelo puede representar cualquier caldera acuotubular de domo. Para el desarrollo de este ejemplo la caldera a simular es la Unidad Número 1 de la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de Tula, Hidalgo.

Las características esenciales de este generador de vapor, incluyendo las condiciones de operación de algunas variables importantes al 100%

de capacidad, se presentan en la Tabla 6.1.

MARCA	COMBUSTION ENGINEERING (CANADA)
TIPO	ACUOTUBULAR RADIANTE DE CIRCULACION CONTROLADA Y TIRO FORZADO
CONSTRUCCION	1 DOMO SUPERIOR, 1 DOMO INFERIOR, 2 BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA, 2 VENTILADORES DE TIRO FORZADO PARA LOS GASES DE COMBUSTION, 4 ELEVACIONES DE QUEMADORES TANGENCIALES
CONTROL DE TEMPERATURA	INCLINACION DE QUEMADORES Y ATEMPERACION EN EL SOBRECALENTADOR Y RECALENTADOR
COMBUSTIBLE	GAS Y COMBUSTOLEO
CAPACIDAD	252 kg/s
SERVICIO	300 MW
PRESION DE DISEÑO	19.3 MPa
PRESION DE OPERACION EN SC	17.13 MPa
PRESION DE OPERACION DOMO	18.3 MPa
TEMPERATURA DEL VAPOR SC	813.7 K
TEMPERATURA DEL VAPOR RC	813.7 K
TEMPERATURA DE AGUA DE ALIMENTACION AL DOMO	565.4 K
COMBUSTIBLE A QUEMADORES (UNO A LA VEZ):	GAS 15.3 kg/s
	COMBUSTOLEO 18.3 kg/s
FLUJO DE GASES DE COMBUSTION	312.2 kg/s

TABLA 6.1 CONDICIONES DE OPERACION DE LA CALDERA SIMULADA A 100% DE CARGA (UNIDAD NUMERO 2 DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA FRANCISCO PEREZ RIOS DE TULA, HIDALGO).

En el Apéndice 4 se describe la manera en que deben alimentarse los datos a la computadora para definir la caldera particular que se desea modelar. Para el caso particular tratado, se utilizaron los datos proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

6.2 Criterio De Validación

Para efectuar una validación es necesario definir un criterio que especifique claramente cuándo se considera válido un modelo y cuándo no.

Se siguieron dos criterios para la validación del modelo. Uno para el caso de tener disponibles datos de planta y otro si no se tienen.

6.2.1 Validación Con Datos De Planta. -

Para efectuar la validación cuando se tienen disponibles datos de planta se siguió el criterio de la American Nuclear Society Standards Committee (1985) para fenómenos dinámicos en simuladores para entrenamiento de operadores, midiendo el error relativo porcentual.

El error relativo porcentual de una variable se define como la diferencia en valor absoluto entre el valor de las variables resultado de la simulación y la del proceso real, dividida por el valor de la variable real y multiplicado, todo, por cien.

Para los estados estables el máximo error relativo permitido depende de la importancia de la variable de que se trate. Las variables

pueden distinguirse, según su importancia, en variables críticas y variables normales.

Una variable es crítica si en el proceso real es controlada, tiene asociadas alarmas especiales (llamadas también críticas), es registrada o desplegada de manera especial y/o puede ser causa del disparo de la unidad. Para estas variables el máximo error relativo permitido es del 2%. Para el caso de la caldera en cuestión se tienen dos variables críticas: el nivel de agua y la presión del domo superior.

Las variables normales son todas las restantes y el máximo error permitido es del 10%.

Para el caso de los transitorios, es suficiente con que el comportamiento del modelo sea el que se espera. La tendencia debe ser similar en el modelo y en la planta.

6.2.2 Validación Sin Datos De Planta. -

En este caso, el estado estable sólo puede ser validado si el modelo no presenta oscilaciones. Este es un caso que rara vez se presenta.

Para los estados transitorios deben compararse gráficamente con las tendencias esperadas que deben ser previamente definidas. El tiempo de duración estimado del fenómeno para el proceso real debe ser el mismo que el obtenido en la simulación.

6.2.3 Procedimiento. -

La validación se efectuó siguiendo los pasos heurísticos descritos a continuación:

1. Se definieron una serie de pruebas, descritas en la Sección 6.3, que cubrieran, por un lado, los casos más comunes que presenta una caldera, y por otro, las situaciones que parecieran más difíciles de resolver.
2. Para cada una de las pruebas escogidas se generaron resultados "exactos" utilizando un método de integración confiable. Se usó el método de Shampine L.F. (1975) con método y orden variable y control de error que reporta, entre otras cosas, el número de pasos (iteraciones) para un intervalo de tiempo especificado de cada una de las pruebas.
3. La prueba más difícil de integrar, denominado transitorio crítico, se corrió con diferentes métodos de integración de paso fijo (con diferentes pasos de integración).
4. Dependiendo de la rapidez de ejecución de los métodos y su precisión respecto a la simulación "exacta" del transitorio crítico, se escogió la que cualitativamente fuera la mejor combinación de método y paso de integración.

6.3 Definición De Pruebas

Las pruebas que se consideraran suficientes para una validación del modelo se describen en esta sección.

6.3.1 Estados Estables. -

Se prepararon los estados estables descritos a continuación. Las variables observadas se presentan en la sección de resultados.

CALDERA FRIA CON LAS BOMBAS FUNCIONANDO. Esta prueba consiste en tener el generador de vapor con los quemadores y pilotos fuera de servicio. El nivel del domo en su valor nominal y presión atmosférica en el domo superior.

25% DE CARGA. El nivel del domo en su punto normal de operación. El flujo de vapor es el necesario para generar un 25% de la energía eléctrica nominal.

50% DE CARGA. El nivel del domo en su punto normal de operación. El flujo de vapor es el necesario para generar un 50% de la energía eléctrica nominal.

75% DE CARGA. El nivel del domo en su punto normal de operación. El flujo de vapor es el necesario para generar un 75% de la energía eléctrica nominal.

100% DE CARGA. El nivel del domo en su punto normal de operación. El flujo de vapor es el necesario para generar un 100% de la energía eléctrica nominal.

6.3.2 Transitorios. -

Los transitorios escogidos se describen en seguida.

LLENADO. Se simula el llenado de la caldera con agua de alimentación, desde que está completamente vacía, hasta que el agua llega a la parte inferior del domo superior.

CALENTAMIENTO. Se inicia la simulación con el estado estable en frío con las bombas de circulación forzada en operación. Se calienta el generador de vapor hasta los 0.2 MPa en que se cierran los venteos del domo. Se continúa el calentamiento y presurizado del sistema. Al llegar a la presión nominal de operación (18.3 MPa) se empieza a aumentar en forma de rampa durante 1200 s el flujo de vapor que va hacia el sobrecalentador hasta llegar al valor correspondiente a 25% de carga y se deja estabilizar.

SUBIDA DE CARGA DE 25% A 50%. Con el estado estable a 25% de carga se inicia la simulación y se aumenta el flujo de vapor hasta llegar a 25% de carga en 500 s.

DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. Empezando en el estado estable a 100% de carga se dispara y después se restablece una bomba de circulación forzada.

ROTURA DE TUBOS AL 100% DE CARGA CON UN 5% DE SEVERIDAD. Se introduce la falla de rotura de tubos del generador de vapor con un 5% de su intensidad total con la caldera operando al 100% de su capacidad. El 100% de severidad se definió con base en un accidente ocurrido en la Unidad 2 de la Termoeléctrica de Manzanillo (ver referencia CFE) en que con un total de nueve tubos rotos se perdió totalmente el control de la planta. La válvula que representa la rotura tiene un área equivalente a nueve veces el área de un tubo de la caldera si la falla tiene el 100% de severidad. Otro porcentaje de severidad es un área directamente proporcional a la de 100%.

ROTURA DE TUBOS AL 100% DE CARGA CON UN 100% DE SEVERIDAD. Con la caldera trabajando al 100% de carga se introduce la falla de rotura de tubos a su máxima severidad.

6.4 Resultados

En esta sección se presentan y comentan los resultados de cada una de las pruebas definidas. El transitorio crítico resultó ser la rotura de tubos con un 100% de severidad. Todas las pruebas se corren con el método "exacto" de Shampine y con el método y paso seleccionado con la ayuda del transitorio crítico (método de Euler con un paso de 0.1 s). Aquí sólo se reportan los resultados obtenidos con el método de Euler.

6.4.1 Estados Estables. -

Los resultados de los estados se muestran en tablas. Cada tabla

tiene seis columnas. La columna 1 describe la variable observada. En la columna 2 se da el valor real de la variable. Las columnas 3 y 4 muestran el valor obtenido por el método de Shampine y su error relativo porcentual con respecto al valor real, respectivamente. En las columnas 5 y 6 se reporta el valor obtenido con el método de Euler y su error relativo porcentual con respecto al valor real, respectivamente.

CALDERA FRIA CON LAS BOMBAS FUNCIONANDO. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 6.2.

VARIABLE	VALOR REAL	SHAMPINE	ERROR %	EULER	ERROR %
PRESION EN EL DOMO SUPERIOR (Pa)	78600.3	78600.3	0.0	78600.3	0.0
NIVEL DEL AGUA PRESENTE EN EL DOMO SUPERIOR (m)	0.53	0.53	0.0	0.53	0.0
TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO (K)	293.0	293.0	0.0	293.0	0.0
VELOCIDAD ANGULAR DE LAS BOMBAS (rad/s)	?	172.27	?	172.26	?
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION (kg/s)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FLUJO DE VAPOR SOBRECALENTADO (kg/s)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA 6.2 CALDERA FRIA CON LAS BOMBAS FUNCIONANDO

25% DE CARGA. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 6.3.

VARIABLE	VALOR REAL	SHAMPINE	ERROR %	EULER	ERROR %
PRESION EN EL DOMO SUPERIOR (MPa)	18.3	18.3	0.0	18.33	0.16
NIVEL DEL AGUA PRESENTE EN EL DOMO SUPERIOR (m)	0.53	0.527	0.57	0.526	0.75
TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO (K)	?	630.37	?	630.34	?
VELOCIDAD ANGULAR DE LAS BOMBAS (rad/s)	171.32	172.44	0.65	172.44	0.65
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION (kg/s)	63.8	65.7	2.97	65.71	2.99
FLUJO DE VAPOR SOBRECALENTADO (kg/s)	63.0	63.0	0.0	63.0	63.0

TABLA 6.3 ESTADO ESTABLE A 25% DE CARGA

50% de CARGA. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 6.4.

VARIABLE	VALOR REAL	SHAMPINE	ERROR %	EULER	ERROR %
PRESION EN EL DOMO SUPERIOR (MPa)	18.3	18.3	0.0	18.31	0.05
NIVEL DEL AGUA PRESENTE EN EL DOMO SUPERIOR (m)	0.53	0.527	0.57	0.527	0.57
TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO (K)	?	630.77	?	630.94	?
VELOCIDAD ANGULAR DE LAS BOMBAS (rad/s)	171.32	172.44	0.65	172.44	0.65
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION (kg/s)	127.45	128.7	0.98	128.71	0.99
FLUJO DE VAPOR SOBRECALENTADO (kg/s)	126.0	126.0	0.0	126.0	0.0
TABLA 6.4 ESTADO ESTABLE A 50% DE CARGA					

75% DE CARGA. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 6.5.

VARIABLE	VALOR REAL	SHAMPINE	ERROR %	EULER	ERROR %
PRESSION EN EL DOMO SUPERIOR (MPa)	18.3	18.31	0.05	18.31	0.05
NIVEL DEL AGUA PRESENTE EN EL DOMO SUPERIOR (m)	0.53	0.53	0.0	0.53	0.0
TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO (K)	?	630.98	?	630.97	?
VELOCIDAD ANGULAR DE LAS SOMBRAS (rad/s)	171.32	172.44	0.65	172.44	0.65
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION (kg/s)	191.0	191.7	0.37	191.7	0.37
FLUJO DE VAPOR SOBRECALENTADO (kg/s)	189.0	189.0	0.0	189.0	0.0

TABLA 6.5 ESTADO ESTABLE A 75% DE CARGA

100% DE CARGA. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 6.6.

VARIABLE	VALOR REAL	SHAMPINE	ERROR %	EULER	ERROR %
PRESION EN EL DOMO SUPERIOR (MPa)	18.3	18.31	0.05	18.32	0.11
NIVEL DEL AGUA PRESENTE EN EL DOMO SUPERIOR (m)	0.53	0.53	0.0	0.53	0.0
TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO (K)	?	631.28	?	631.32	?
VELOCIDAD ANGULAR DE LAS BOMBAS (rad/s)	171.32	172.44	0.65	172.44	0.65
FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION (kg/s)	254.7	254.7	0.0	254.75	0.02
FLUJO DE VAPOR SOBREALENTADO (kg/s)	252.0	252.0	0.0	252.0	0.0

TABLA 6.6 ESTADO ESTABLE A 100% DE CARGA

6.4.2 Transitorios. -

Las pruebas de transitorios se presentan en forma gráfica. Las flechas en las gráficas indican en que escala deben leerse las curvas. En todos los casos el flujo de calor se asigna como una constante o se mueve mediante rampas. El flujo de agua de alimentación y el calor se mueven con los controles. A continuación se presenta cada una de las pruebas realizadas y los comentarios pertinentes.

LLENADO. Se simula el llenado de la caldera con agua de alimentación hasta que el agua llega a la parte inferior del domo superior. La presión en el domo superior es constante. Se grafican el nivel de una de las trayectorias de las paredes de agua, el nivel del domo (tiene un valor cero en la parte inferior del domo, abajo de éste es negativo) y el flujo de agua de alimentación.

Los niveles permanecen en su posición original durante los primeros 140 s, esto se debe a que durante ese tiempo se está llenando el domo inferior de aproximadamente 8 m³.

Los resultados son satisfactorios, como puede observarse en la Figura 6.1.

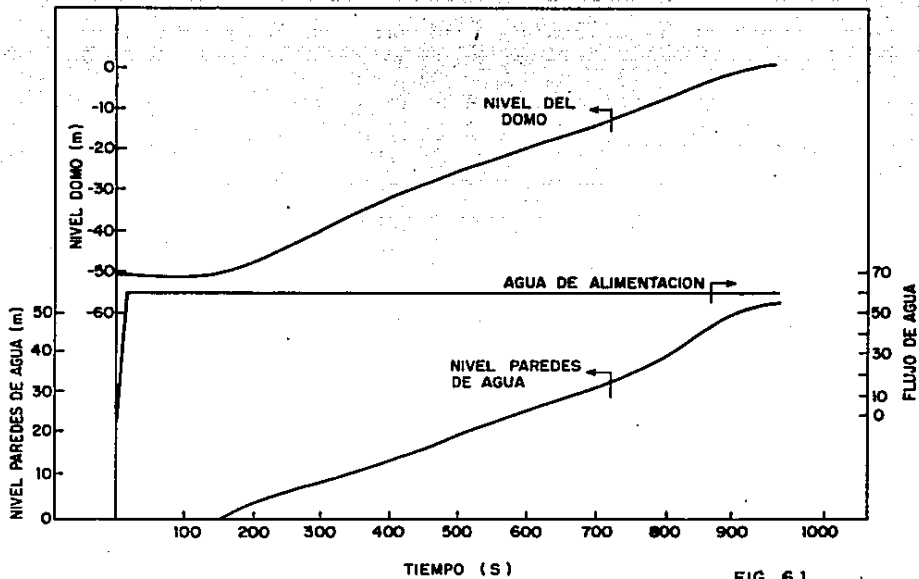


FIG. 6.1

FIGURA 6.1 LLENADO DE LA UNIDAD

CALENTAMIENTO. Se inicia la simulación con el estado estable en frío con las bombas de circulación forzada en operación. Se calienta el generador de vapor hasta los 0.2 MPa en que se cierran los venteos del domo. Se continúa el calentamiento y presurizado del sistema. Al llegar a la presión nominal de operación (18.3 MPa) se aumenta en forma de rampa durante 1200 s, el flujo de vapor que va hacia el sobrecalentador hasta llegar al valor correspondiente a 25% de carga y se deja estabilizar.

En la Figura 6.2 se presentan el nivel y la presión de domo. En la Figura 6.3 se muestran la temperatura del metal del domo superior y el flujo de vapor.

En la Figura 6.2 puede observarse el aumento de presión debido al calentamiento de la caldera. Aproximadamente a los 510 min, el domo alcanza los 0.2 MPa de presión y se aumenta el flujo de vapor, durante 20 min hasta el valor nominal a 25% de carga (ver Figura 6.3), en ese momento el control de presión trata de estabilizarla.

El nivel de agua aumenta debido a la expansión térmica. Cuando se saca vapor del domo, el nivel disminuye y su control trata de estabilizarlo.

La Figura 6.3 muestra el aumento de la temperatura de metal del domo durante el calentamiento. También puede observarse la rampa del vapor para tomar carga.

El comportamiento de las variables es cualitativamente correcto.

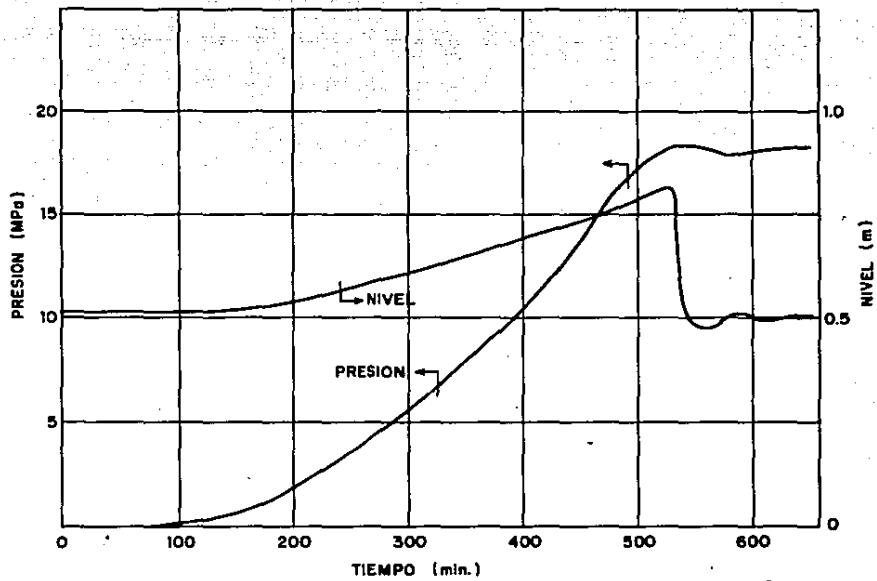


FIG. 6.2

FIGURA 6.2 CALENTAMIENTO DE LA UNIDAD. NIVEL Y PRESION DEL DOMO

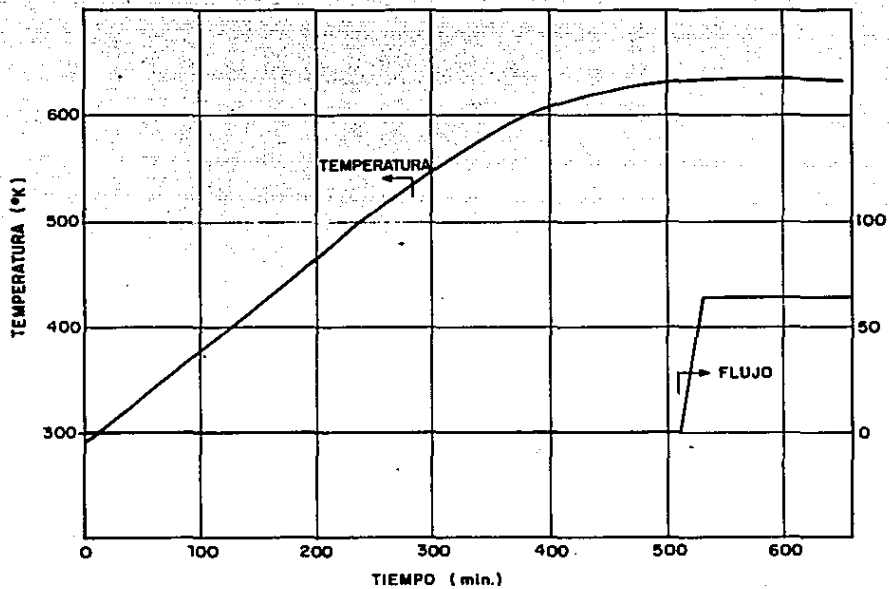


FIG. 6.3

FIGURA 6.3 CALENTAMIENTO DE LA UNIDAD. TEMPERATURA DE METAL DEL DOMO Y FLUJO DE VAPOR

SUBIDA DE CARGA DE 25% A 50%. Con el estado estable a 25% de carga se inicia la simulación y se aumenta el flujo de vapor hasta llegar a 50% de carga en 500 s.

En la Figura 6.4 se presentan el nivel y la presión del domo. Ambas variables descienden debido al flujo de vapor extraído, sin embargo sus respectivos controles estabilizan el sistema.

La Figura 6.5 muestra el comportamiento de los flujos de vapor y de agua de alimentación.

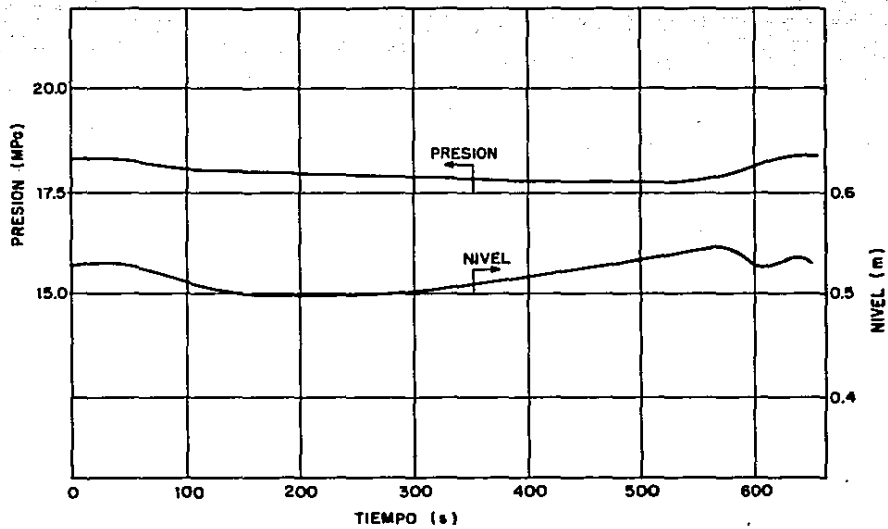


FIG. 6.4

FIGURA 6.4 AUMENTO DE CARGA DE 25% A 50%. PRESION Y NIVEL DEL DOMO

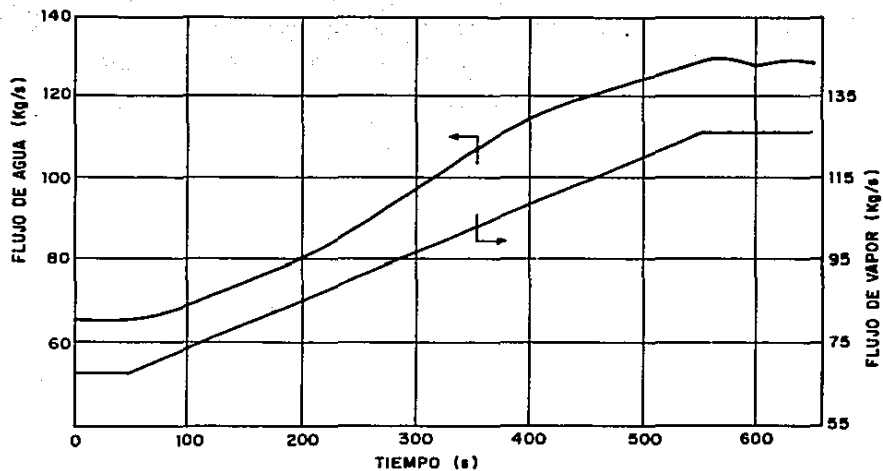


FIG. 6.5

FIGURA 6.5 AUMENTO DE CARGA DE 25% A 50%. FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION Y FLUJO DE VAPOR

DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. Empezando en el estado estable a 100% de carga se dispara una bomba de circulación forzada (bomba 2) a los 20 s y después se restablece a los 150 s.

En la Figura 6.6 se grafican la presión y el nivel del domo. En la Figura 6.7 se muestra el comportamiento de los flujos y las velocidades angulares de las bombas.

En la Figura 6.6 puede observarse un aumento de presión al dispararse la bomba; ésta se debe a que, al disminuir el flujo de recirculación, se extrae menos cantidad de agua del domo mientras que, debido a la dinámica del vapor en las paredes de agua, la disminución de flujo de vapor que entra al domo no es tan rápida. Sin embargo el control de calor actúa y trata de restablecer la presión.

El ligero incremento de nivel se debe a un poco de condensación al aumentar la presión del domo. El control de nivel actúa rápidamente.

Al restablecer las bombas se observa el efecto contrario en el nivel y en la presión.

En la Figura 6.7 se presenta el comportamiento de las velocidades angulares y los flujos de cada bomba de circulación forzada.

La velocidad angular de la bomba que se mantiene en servicio durante la prueba es constante. La velocidad de la otra bomba baja hasta cero

en un tiempo aproximado de un minuto. Al restablecer la bomba, su velocidad angular se iguala con la de la otra casi instantáneamente (un segundo).

El flujo de la bomba que permanece encendida aumenta al apagar la bomba 2 mientras el flujo de la bomba apagada se hace cero rápidamente.

El comportamiento de las variables de la Figura 6.7 son los que se esperaban.

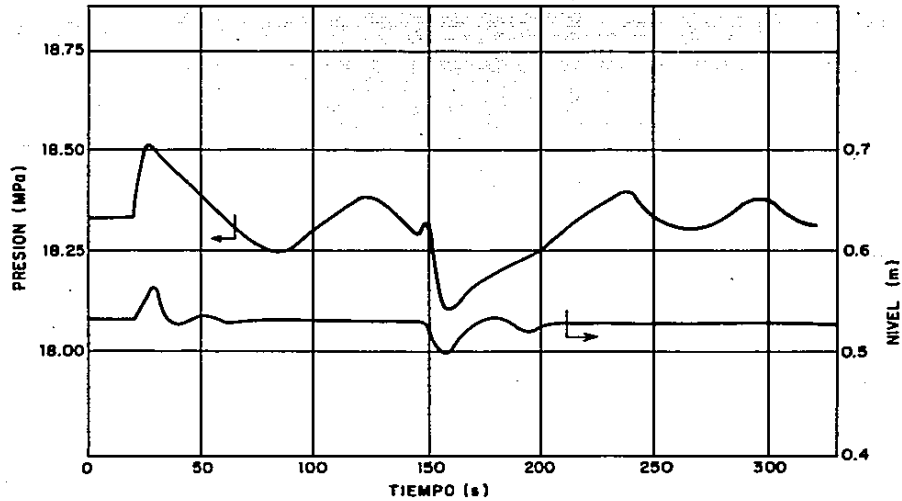


FIG. 6.6

FIGURA 6.6 DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. PRESION Y NIVEL DEL DOMO

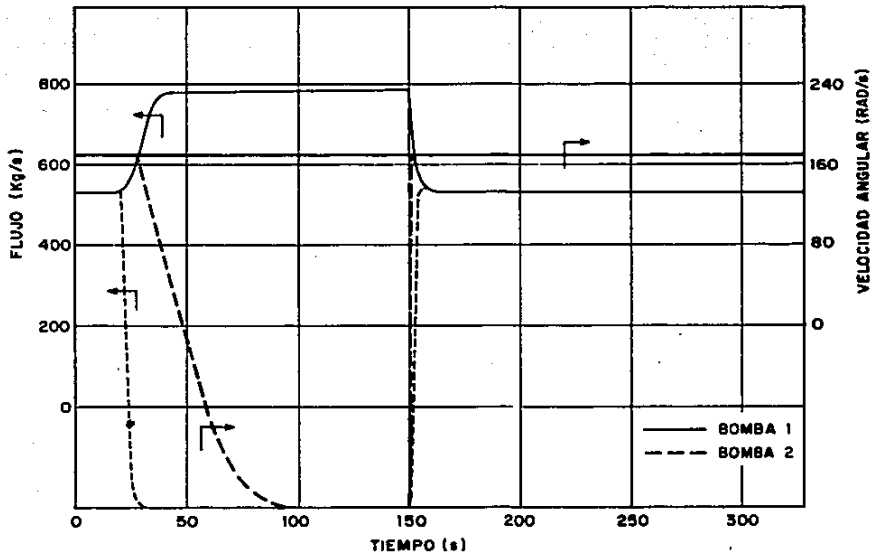


FIG. 6.7

FIGURA 6.7 DISPARO Y RESTABLECIMIENTO DE UNA BOMBA A 100% DE CARGA. FLUJOS Y VELOCIDADES ANGULARES DE LAS BOMBAS

ROTURA DE TUBOS AL 100% DE CARGA CON UN 5% DE SEVERIDAD. A los 30 s de iniciada la simulación, se introduce la falla de rotura de tubos del generador de vapor con un 5% de su intensidad total con la caldera operando al 100% de su capacidad. El flujo de vapor al sobrecalentador se mantiene constante.

La Figura 6.8 muestra el nivel y la presión del domo cuando se rompen los tubos con un 5% de severidad. Puede apreciarse que los controles de presión y nivel actúan y pueden estabilizar la situación. La Figura 6.9 muestra el flujo de agua de alimentación tratando de estabilizar el nivel del domo.

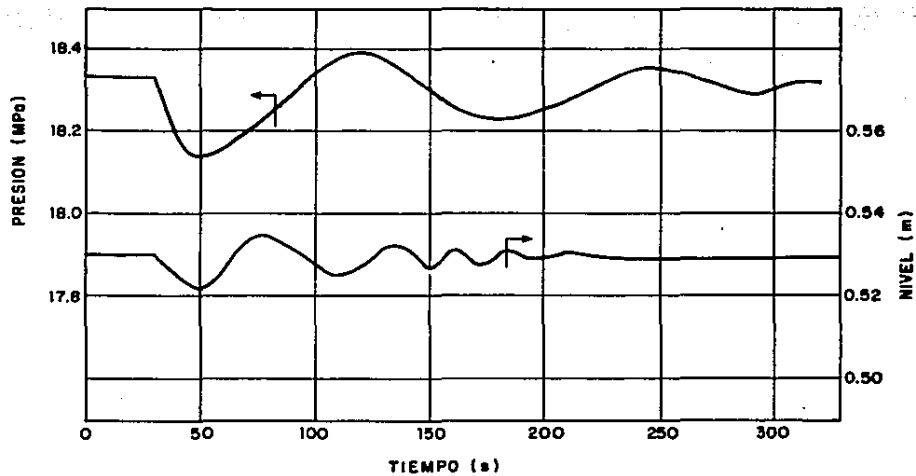


FIG. 6.8

FIGURA 6.8 ROTURA DE TUBOS CON 5% DE SEVERIDAD, PRESION Y NIVEL DEL DOMO.

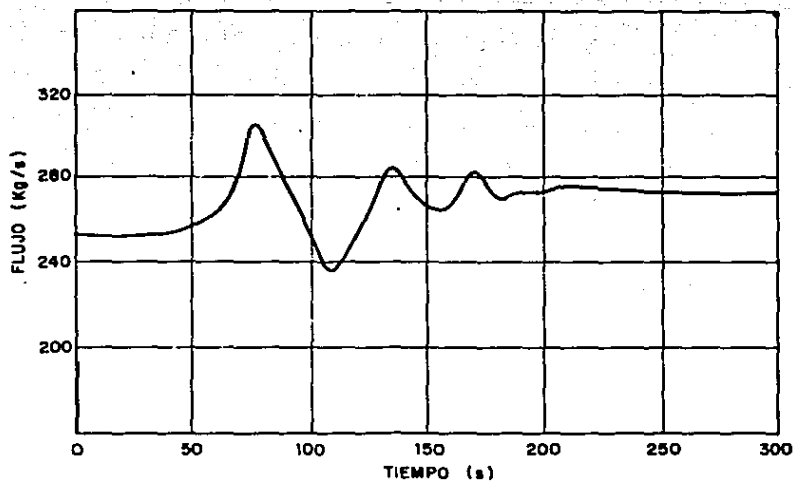


FIG. 6.9

FIGURA 6.9 ROTURA DE TUBOS CON 5% DE SEVERIDAD, FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION

ROTURA DE TUBOS AL 100% DE CARGA CON UN 100% DE SEVERIDAD. Con la caldera trabajando al 100% de carga se introduce la falla de rotura de tubos a su máxima severidad a los 30 s de simulación. El flujo de vapor hacia el sobrecalentador se mantiene constante.

La Figura 6.10 presenta el comportamiento de la presión y el nivel del domo durante la rotura. El flujo de agua de alimentación (no graficado) toma el máximo valor permitido (310 kg/s) muy rápidamente. Puede observarse que ninguno de los controles puede hacer que la caldera siga operando normalmente. En la realidad ocurre un disparo de la caldera debido a una alta presión en el hogar.

La simulación se paró al llegar el nivel de agua a las bombas de circulación forzada ya que el modelo no puede trabajar en este caso.

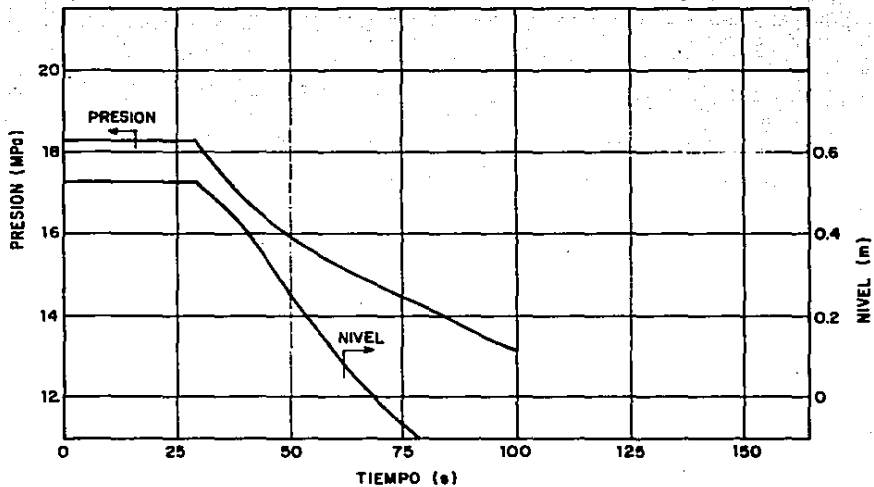


FIG. 6.10

FIGURA 6.10 ROTURA DE TUBOS CON 100% DE SEVERIDAD. PRESION Y NIVEL DEL DOMO

CONCLUSIONES

Ve.: ¿Y cuál es la conclusión final,
doctor Vann?

Va.: ¿Cómo? Pensé que eso ya estaría
claro.

Stephen King,
"The Dead Zone", (1979)

CONCLUSIONES

Se desarrolló, codificó y probó el modelo dinámico, basado en principios físicos, de un generador de vapor en su circuito agua/vapor.

El modelo incluye cualquier tipo de caldera acuotubular, incluyendo supercríticas y de plantas nucleares, en lo referente al comportamiento del fluido y de los cambios de temperatura de los metales.

La especificación del generador de vapor particular que se desea modelar se hace de una manera sencilla, alimentando al modelo con parámetros físicos de fácil cálculo.

Una contribución importante es que la caldera puede estudiarse con diferentes grados de distribución espacial (radial y axial). Esto permite ajustar el tiempo de ejecución con la precisión requerida.

El modelo representa al generador de vapor en todo el rango de operación normal y se incluyen dos fallas importantes: la rotura de los tubos de las paredes de agua (con diferentes grados de severidad) y el disparo de alguna(s) de las bombas de circulación forzada.

El desarrollo modular y estructurado del modelo permite un fácil acceso al código para efectos de interpretación y mantenimiento. Pueden efectuarse cambios al modelo sin dificultad.

Los resultados de la simulación son satisfactorios según puede

apreciarse en las pruebas presentadas en el Capítulo 6 y puede decirse que se tiene un modelo confiable.

Como sugerencias para trabajo futuro en este modelo se plantea:

- incluir el caso de que la caldera opere también con turbo-bombas,
- formular los separadores de vapor del domo,
- considerar el caso de cavitación en las bombas de circulación forzada y
- mejorar el tratamiento de condensación del vapor en presencia de gases incondensables, considerando rigurosamente los fenómenos de transferencia de calor y masa simultáneos (aquí se utilizó una correlación que corrige el coeficiente de transferencia de calor por condensación en función de la concentración de aire presente en el domo)

Dadas las características del trabajo aquí desarrollado, puede decirse que se tiene un modelo que mejora a los hasta ahora existentes, además se ha conjuntado una metodología que se puede adaptar al desarrollo de otros modelos.

APENDICE 1

NOMENCLATURA

- ¿Entonces, caballero, estamos de acuerdo? - insistió Roberto.
- De acuerdo, repitió el inglés, poniéndose de pie.

Jules Verne
"L'agence Thompson et Compagnie"

INDICES LATINOS

A - área	(m**2)
a - vector de variables de estado dinámicas	
AP - apertura	
b - vector de variables de estado cuasiestáticas	
BHP - potencia al freno	(J/s)
B1, B2 - factores auxiliares	
C - concentración (fracción masa)	
C' - fracción mol	
c - vector de variables de entrada desde otros sistemas	
Cd - constante de descarga de válvulas	(m**4)
Cp - capacidad calorífica a presión constante	(J/kg K)
Ct - constante	
Cv - capacidad calorífica a volumen constante	(J/kg K)
C0 - parámetro de concentración del modelo de Zuber-Findlay	
D - diámetro	(m)
d - distancia	(m)
e - error entre variable nominal y variable real	
F - flujo másico	(kg/s)
f - frecuencia	(1/s)
f - función	
f - factor de fricción de Darcy-Weisbach	
Fc - factor de corrección	
G - flux másico	(kg/s m**2)

g	- aceleración de la gravedad	(m/s**2)
Ga	- ganancia de controlador	
Gh	- flux energético	(J/s m**2)
H	- altura (cabeza)	(m)
h	- entalpia	(J/kg)
hc	- coeficiente de transferencia de calor	(J/s K m**2)
hf	- producto de flujo por entalpia (flujo energético)	(J/s)
I	- corriente eléctrica	(A)
Im	- momento de inercia	(kg m**2)
j	- velocidad superficial	(m/s)
K	- coeficiente de perdidas por fricción	
k	- conductividad térmica	(J/s m K)
kt	- constante	
L	- longitud	(m)
l	- vector de variables de estado lógicas	
M	- peso molecular	(kg/mol)
m	- masa	(kg)
N	- nivel de agua	(m)
n	- vector de variables lógicas	
np	- número de polos eléctricos	
P	- presión	(Pa)
p	- vector de parámetros	
Pr	- número de Prandtl	
PT	- propiedad termodinámica	
Q	- flujo volumétrico	(kg/m**3)
q	- flujo de calor	(J/s)

q'' - flux de calor (J/s m²)
 Re - número de Reynolds
 S - deslizamiento
 Sp - factor de supresión
 T - temperatura (K)
 t - tiempo (s)
 TR - par mecánico (N m)
 U - coeficiente global de transferencia de calor (J/s K m²)
 u - energía interna (J/kg)
 V - volumen (m³)
 v - velocidad (m/s)
 v - volumen específico (m³/kg)
 vgj - constante de desplazamiento de Zuber-Findlay (m/s)
 V1 - voltaje (V)
 w1 - fracción molar
 wm - fracción másica
 X - número de Rayleigh
 x - calidad del vapor
 X1, X2 - variables auxiliares
 1/KIT - factor de Martinelli
 y - vector de variables analógicas algebraicas
 Z - coordenada axial

INDICES GRIEGOS

α	- fracción de vacío	
β	- coeficiente de expansión térmica volumétrica	(1/K)
γ	- relación Cp/Cv	
Δ	- diferencia finita	
δ	- espesor	(m)
ϵ	- número real positivo cercano a cero	
λ	- función	
μ	- viscosidad dinámica	(kg/m s)
ν	- función	
ρ	- densidad	(kg/m ³)
θ	- Angulo con respecto a la horizontal	(rad)
σ	- tensión superficial	(N/m)
τ	- tensor de esfuerzo	(kg/m s ²)
τ_i	- constante de tiempo para controlador integral	(s)
ψ	- función	
ξ	- función	
ω	- velocidad angular	(rad/s)
ϕ_{20}^2	- multiplicador para pérdidas por fricción en flujo en dos fases	

SUBINDICES

a - aire
aa - agua de alimentación
at - atmósfera
b - bomba
cf - convección forzada
cn - convección natural
co - condensación
cr - crítico
d - descarga
di - domo inferior
do - domo superior
e - entrada
eb - ebullición
eq - equivalente
f - líquido saturado
fg - diferencia entre vapor saturado y líquido saturado
fl - fluido
fr - fricción
ft - flujo turbulento
g - vapor saturado
gv - generador de vapor
ho - hogar
in - incondensables

l - líquido
m - metal
mb - moto-bomba
me - mezcla gaseosa
min - mínimo (a)
mo - motor
n - número de nodo (contador)
no - nominal
pa - paredes de agua
pc - purga continua
pe - pérdidas
rp - ruptura de tubos
s - salida
sa - saturación
sc - sobrecalentador
si - sincronía
t - total
tb - tubería que une las bombas con el domo inferior
td - tubería que une el domo superior con las bombas
v - vapor
ve - venteos
vs - válvulas de seguridad
w - pared

APENDICE 2

DIAGRAMA DE ESTRUCTURA Y DEFINICION DE SUBPROGRAMAS

...Su estructura refleja todas las fases por las que ha pasado.

Carl Sagan
"Cosmos", (1980)

I N D I C E

APENDICE 2 DIAGRAMA DE ESTRUCTURA Y DEFINICION DE SUBPROGRAMAS

A2.1	DIAGRAMA DE ESTRUCTURA	204
A2.2	DEFINICION DE SUBPROGRAMAS	210

APENDICE 2

A2.1 DIAGRAMA DE ESTRUCTURA

En esta sección se presenta el diagrama de estructura jerarquizado de la codificación final. El diagrama consta de cinco esquemas. En el primer esquema (hoja 205) se muestra la jerarquización hasta los módulos principales del programa. En el segundo y tercer esquemas (hojas 206 y 207) se presenta el desglose de los módulos principales. El cuarto y quinto esquemas (hojas 208 y 209) contienen la partición de dos submódulos importantes.

El diagrama muestra a los módulos y submódulos de acuerdo al orden en que son invocados por el programa codificado. Cada uno de los nombres presentados en el diagrama corresponde a una rutina. El orden de invocación de las rutinas se lee de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Si después de una rutina se encuentra un paréntesis con un número, éste indica la hoja en que continúa la estructura.

		--	DONIPF		
		--	FLSDPF		
		--	MEDOPF		
		--	ITERPF		
		--	PAR10F		
	PARA0F	--	TATY0F	-----	BUSCOF
		--	MECIPF		
		--	CONTFP		
		--	PARCOF	-----	LGNOOF
CAPA0F		--	QLPI0F		
		--	CONDIN		
		--	DATEN		
		--	IMPRIME		
	NGUIA	--			
		--	INTE0F		
		--	CONTOF	-----	CTRL0F
		--	LIVE0F	-----	(206)
		--	DON10F	-----	(206)
		--	FLSD0F	-----	MVA0F
	ECAD0F	--	MED00F	-----	(206)
		--	ITER0F	-----	(207)
		--	MECI0F	-----	(207)
		--	MOB00F	-----	(207)
		--	INTS0F		
		--	LLEN0F		

LIVEOF	---	DNSATL		
	---	LIMIOF		
	---	DNSATV		
	---	ENSATL		
	---	ENSATV		
	---	TMSAT		
DONIOF	---	CPAIOF		
	---	HGAS		
	---	KTAIOF		
	---	ROAIOF		
	---	MUAIOF		
	---	EPSIOF		
	---	NLCIOF	----	XXAUOF
	---	ARDOOF	----	XXAUOF
	---	LINSAT		
	---	CONDTER		
	---	VISDIN		
	---	HHCNOF		
MEDOOF	---	HHCOOF		
	---	HHCAOF		
	---	KIMEOF	----	XXAUOF
	---	CPMEOF	----	XXAUOF
	---	HHDAOF	----	KIASOF ---- XXAUOF

					RDNOOF	----	BUSCOF		
					TUBOOF	----	(208)		
				EPSIOF	BOCOF	----	(209)		
	--	VIVEOF		--	VIVEOF	--	LECTOF	----	BUSCOF
ITEROF	--	VGNLIN	----	FUJAOF	--	CIITOF	--	ENSATL	
	--	VEVIOF		--	VEVIOF	--	DNSATV		
				CAFUOF	ROAIOF				
					TMSAT				
					DOSUOF				

MECIOF	-----	METAOF	--	HHDAOF	----	KTASOF	-----	XXAUOF
			--	CPMEOF	----	XXAUOF		

		--	TRBOOF		
MOBOOF	--	--	TRMOOF	-----	XXAUOF
		--	IIMOOF	-----	XXAUOF

		--	NIBDOF	-----	NLCIOF
LLENOF	--	--	ROAIOF		
		--	LECTOF	-----	BUSCOF

			-- TMSAT	
			-- HGAS	
			-- ENSATL	
			-- ENSATV	
	-- PRTOF		-- PIVAOF	---- (209)
			-- PTAIOF	---- (209)
			-- PILIOF	---- (209)
			-- PILVOF	
			-- HHCNOF	
TUBOOF	-- HHMOOF		-- HHFLOF	
			-- HHFTOF	
	-- NOMOOF			
	-- HHBIOF		-- HHFTOF	-- HHCNOF
			-- HHMOOF	-- HHFLOF
				-- HHFTOF
	-- QLCROF			
	-- NOBIOF	----	PRZFOF	
	-- DPNMOOF	----	FFRCOF	

PTVAOF --- CONDTER
--- DENVAP
--- LINSAT
--- TMVAP
--- VISDIN

PTAIOF --- CPAIOF
--- KTAIOF
--- MUAIOF
--- ROAIOF

PTLIOF --- CONDTER
--- DENLIQ
--- LINSAT
--- TMLIQ
--- VISDIN

PTLVOF --- CONDTER
--- DNSATL
--- DNSATV
--- LINSAT
--- SIH2O
--- TMSAT
--- VISDIN

BOCF0F ----- PD800F ----- EFIB0F

A2.2 DEFINICION DE SUBPROGRAMAS.

En esta sección se da la descripción de cada una de las rutinas que componen al modelo digital. La descripción se presenta en orden alfanumérico.

- ARDOOF - Esta función calcula el área en contacto con el líquido del domo en función del nivel.
- BOCFOF - Esta rutina calcula la caída de presión a través de las bombas de circulación forzada.
- BUSCOF - Esta rutina hace la lectura de la tabla TABTYA para la trayectoria que se le indica e interpola para el dato que se le pide (TABTYA es una matriz formada por los datos físicos de la caldera para el llenado de la unidad. Por ejemplo dando el volumen del líquido en la caldera encuentra la longitud inundada de una trayectoria específica).
- CAFUOF - Esta rutina calcula las funciones que deben ser cero cuando el método iterativo converge a la solución del sistema de ecuaciones.
- CAPAOF - Este programa es el principal del modelo del generador de vapor en su circuito agua/vapor.
- CIITOF - Esta rutina coordina las llamadas a cada uno de los módulos que conforman el ciclo iterativo.
- CONDIN - Esta rutina escoge las condiciones iniciales según el estado que el usuario desea simular.
- CONDTER- Esta rutina calcula la conductividad térmica del agua y del vapor en función de la presión y la temperatura.
- CONTOF - Esta rutina controla el flujo de agua de alimentación y el flujo de calor para mantener en los puntos deseados el nivel y la presión del domo respectivamente.
- CONTF - Esta rutina lee los parámetros de los controles del nivel y la presión del domo.

- CPAIOF - Esta función calcula la capacidad calorífica del aire.
- CPMEOF - Esta función calcula la capacidad calorífica del metal (acero al carbón) en función de la temperatura.
- CTRL0F - Esta función proporciona una salida para el control el cual emula un controlador proporcional e integral.
- DATEN - Esta rutina escoge los datos de entrada (desde otros sistemas) según el estado que el usuario desee simular.
- DENLIQ - Esta función calcula la densidad del líquido subenfriado.
- DNSATL - Esta función calcula la densidad de saturación del líquido.
- DNSATV - Esta función calcula la densidad de saturación del vapor.
- DENVAP - Esta función calcula la densidad del vapor sobrecalentado.
- DONIOF - Esta rutina calcula las propiedades termofísicas de los fluidos contenidos en el domo. También calcula otras variables que no entran en el método iterativo de solución; con esto se evitan cálculos innecesarios en dicho método.
- DONIPF - Esta rutina lee los parámetros del domo en su parte que no itera.
- DOSUOF - Esta rutina calcula las derivadas de las variables de estado en el domo superior.
- DPNOOF - Esta rutina hace el balance de cantidad de movimiento para un tubo y proporciona la caída de presión en la tubería por fricción, gravedad, inercia y fuerza másica dando como resultado la caída de presión total en el tubo.
- ECADOF - Esta rutina coordina la ejecución del modelo caldera parte agua/vapor. Llama a todas las rutinas internas del modelo y escoge si se tiene el caso de llenado o de operación normal.
- EFIBOF - Esta función calcula la eficiencia de la bomba para una velocidad angular dada.
- ENSATL - Esta función calcula la entalpía de saturación del líquido.
- ENSATV - Esta función calcula la entalpía de saturación del vapor.
- EPSIOF - Esta función calcula el paso óptimo para el cálculo de derivadas numéricas.
- FFRCOF - Esta rutina calcula el factor de fricción para la caídas de presión. Lo calcula por medio del número de Reynolds para

tres diferentes zonas: laminar, transición y turbulenta.

- FLSDOF - Esta rutina calcula los flujos asociados a los venteos, rotura de tubos, pérdidas, purga continua y válvulas de seguridad del domo.
- FLSDFE - Esta rutina lee los parámetros de las válvulas del domo.
- FUJAOF - Esta rutina se usa como interface entre la rutina de métodos numéricos y la rutina que coordina la llamada a los módulos que conforman el ciclo iterativo del generador de vapor. Calcula el valor de las funciones y el jacobiano si es necesario.
- HGAS - Esta función calcula la entalpia de una mezcla gaseosa.
- HHBIOF - Esta rutina calcula el coeficiente de transferencia de calor para el fluido que viaja en una tubería. El mecanismo es de convección y es para flujo bifásico.
- HHCAOF - Esta función corrige el coeficiente de transferencia de calor por condensación para tomar en cuenta la presencia de gases incondensables.
- HHCNOF - Esta rutina calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección natural.
- HHCOOF - Esta rutina calcula el coeficiente de transferencia de calor por condensación.
- HHDAOF - Esta función calcula el coeficiente de transferencia de calor global a la atmósfera.
- HHFLOF - Esta función calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada para flujo laminar.
- HHFTOF - Esta función calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada para flujo turbulento.
- HHMOOF - Esta rutina calcula el coeficiente de transferencia de calor para el fluido que viaja en una tubería. El mecanismo es de convección y es para flujo monofásico.
- IIMOOF - Esta función calcula la corriente eléctrica demandada por el motor.
- IMPRIME- Esta rutina auxilia en el monitoreo y graficación de variables.
- INTEOF - Esta rutina sirve para convertir los valores de las variables externas a variables internas.
- INTSOF - Esta rutina sirve para convertir los valores de las varia-

bles internas a variables externas.

- ITEROF - Esta rutina llama a métodos numéricos para la solución de las ecuaciones algebraicas no lineales del circuito domo - tubería descendente - bombas de circulación forzada - tubería de descarga de las bombas - domo inferior - paredes de agua - domo.
- ITERPF - Esta rutina lee los parámetros del circuito iterativo.
- KTAIOF - Esta función calcula la conductividad térmica del aire.
- KTASOF - Esta función calcula la conductividad térmica del aislante en función de la temperatura.
- KIMEOF - Esta función calcula la conductividad térmica del metal (acero al carbón) en función de la temperatura.
- LECTOF - Esta rutina hace la lectura de la tabla TABTYA para la trayectoria que se le indica e interpola para todos los datos de la tabla (TABTYA es una matriz formada por los datos físicos de la caldera para el llenado de la unidad. Por ejemplo dando el volumen del líquido en la caldera se obtiene el número del nodo, para cada trayectoria, en que se encuentra el nivel de agua).
- LGNOOF - Esta función proporciona la longitud de los nodos de las trayectorias de paredes de agua, tubería descendente y tubería de descarga de las bombas.
- LIMIOF - Esta rutina limita variables a valores dados por el usuario.
- LINSAT - Esta función calcula la presión de vapor del agua en función de la temperatura.
- LIVEOF - Esta rutina limita las variables de estado para que no rebasen los límites físicos permitidos.
- LLENOF - Esta rutina simula el llenado de la caldera.
- MECIOF - Esta rutina coordina las llamadas a los metales de las diferentes secciones de tubería que conforman la caldera, para el cálculo de calor perdido a la atmósfera y la derivada de las temperaturas del metal.
- MECIFF - Esta rutina lee los parámetros de los metales de los tubos de la caldera.
- MEDOOF - Esta rutina calcula el calor que recibe y pierde el metal domo.
- MEDOPF - Esta rutina lee los parámetros del metal del domo.

- METAOF** - Esta rutina calcula el calor que pierde el metal de cada nodo de la tubería del generador de vapor a la atmósfera y la derivada de la temperatura del metal.
- MOBOOF** - Esta rutina representa a los motores y bombas en su parte electromecánica.
- MUAIOF** - Esta función calcula la viscosidad dinámica del aire.
- NGUIA** - Esta rutina coordina la simulación en general. Escoge el método y paso de integración. Pertenecce al Sistema de Métodos Numéricos
- NIBDOF** - Esta rutina proporciona los niveles (altura) a partir de un volumen de llenado o líquido suministrado en el proceso de llenado.
- NLCIOF** - Esta función calcula el nivel del agua en un cilindro en función del volumen ocupado.
- NOBIOF** - Esta rutina representa los nodos bifásicos de las tuberías de la caldera. A partir de las entalpías, densidades, velocidad de entrada y calor cedido por los gases, se obtienen la derivada de la entalpía con respecto al tiempo y la velocidad de salida. Se utiliza el enfoque de celda donadora, o sea, las propiedades del nodo son las de salida (mezclado perfecto).
- NOMOOF** - Esta rutina representa los nodos monofásicos de las tuberías de la caldera. A partir de las entalpías, densidades, velocidad de entrada y calor cedido por los gases, se obtienen la derivada de la entalpía con respecto al tiempo y la velocidad de salida. Se utiliza el enfoque de celda donadora, o sea, las propiedades del nodo son las de salida (mezclado perfecto).
- PARIOF** - Esta rutina asigna los parámetros necesarios para la rutina TATVOF.
- PARAOF** - Esta rutina llama a una serie de subrutinas que leen cada uno de los parámetros necesarios en el modelo. La estructura de llamadas de esta rutina es la misma que la que tiene la rutina ECADOF, es decir, los parámetros son leídos en el mismo orden en que aparecen en el modelo mismo.
- PARCOF** - Esta rutina calcula parámetros en forma automática en función de otros parámetros físicos del generador de vapor. Esta rutina es llamada una sola vez al inicio de cada simulación.
- PDBOOF** - Esta función calcula la caída de presión en una bomba que se

encuentra operando normalmente.

- PR2FOF - Esta rutina calcula los parámetros de flujo deslizante para calcular la velocidad del vapor a partir de la velocidad total.
- PRTTOF - Esta rutina calcula las propiedades de transporte y termodinámicas necesarias para un nodo de la caldera.
- PTAIOF - Esta rutina calcula las propiedades de transporte y termodinámicas del aire.
- PTLIOF - Esta rutina calcula las propiedades de transporte y termodinámicas del líquido subenfriado.
- PTLVOF - Esta rutina calcula las propiedades de transporte y termodinámicas para el líquido y el vapor saturados.
- PTVAOF - Esta rutina calcula las propiedades de transporte y termodinámicas del vapor sobrecalentado.
- QLCROF - Esta rutina calcula el calor crítico para la ebullición.
- QLPIOF - Esta rutina calcula las fracciones de calor que le corresponden a cada nodo de la caldera.
- RDNOOF - Esta rutina proporciona el seno del ángulo con respecto a la horizontal de cada nodos de la caldera.
- ROAIOF - Esta función calcula la densidad del aire mediante la ecuación de gas ideal.
- SIH2O - Esta función calcula la viscosidad del agua.
- TATVOF - Esta rutina hace una tabla a partir de los datos de los intervalos de cada una de las trayectorias de las paredes de agua, tubería descendente y tubería descarga de las bombas. También construye una matriz de intervalos lineales para las alturas y volúmenes de la caldera.
- TMLIQ - Esta función calcula la temperatura del líquido subenfriado.
- TMSAT - Esta función calcula la temperatura de saturación en función de la presión.
- TMVAP - Esta función calcula la temperatura del vapor sobrecalentado.
- TRBOOF - Esta función calcula el par mecánico de la bomba.
- TRMOOF - Esta función calcula el par mecánico del motor.

- TUBOOF - Esta rutina representa al fluido contenido en una tubería.
- VEVIOF - Esta rutina asigna desde un vector, utilizado por métodos numéricos, las variables inicializables para ser utilizadas por el ciclo iterativo.
- VISDIN - Esta rutina calcula la viscosidad dinámica del agua.
- VGNLIN - Esta rutina pertenece al Sistema de métodos numéricos. Resuelve sistemas de ecuaciones lineales y no lineales por los métodos de sustituciones sucesivas y Newton-Raphson. Pertenecce al Sistema de Métodos Numéricos.
- VIVEOF - Esta rutina guarda en un vector las variables inicializables para resolver el ciclo iterativo.
- WVVAOF - Esta rutina representa a tres tipos de válvula: de globo, de corte y de control. Calcula el flujo que pasa a través de ellas.
- XKAUOF - Esta función calcula ajustes polinomiales de funciones que han sido divididas en zonas.

APENDICE 3

EJEMPLOS DE CODIFICACION

- ¿Usted lee esas cosas?
- Harlan contestó con orgullo:
- Estos son sólo algunos volúmenes de la colección completa que poseo...

Isaac Asimov,
"The End of The Eternity", (1975)

I N D I C E

APENDICE 3 EJEMPLOS DE CODIFICACION

A3.1 PROGRAMA	CAPA0F	220
A3.2 SUBPROGRAMA	ECAD0F	221
A3.3 SUBPROGRAMA	TUB00F	234
A3.4 SUBPROGRAMA	MECI0F	242

APENDICE 3

EJEMPLOS DE CODIFICACION

En esta sección se listan cuatro subprogramas que sirven de muestra de la codificación general del modelo. Se escogieron algunos representativos.

El primero es el programa principal.

El segundo es el subprograma que coordina al modelo general. Escoge si se está llenando la unidad o se tiene operación normal y llama a cada uno de los módulos.

El tercero representa al fluido que viaja dentro de un tubo. Es uno de los subprogramas más importantes del modelo.

El cuarto es el subprograma que invoca a una rutina para el cálculo del calor en cada una de las secciones en que se dividió el metal de la caldera.

```

C*****
C
C      RUTINA : CAPAOF
C
C      PROGRAMA: EDGARDO J. ROLDAN VILLASANA
C
C      FECHA   : 12 - MAY - 86
C
C      REVISION: 12 - MAY - 86
C*****
C
C      PROGRAM  CAPAOF
C
C      ESTE PROGRAMA ES EL PRINCIPAL DEL MODELO DEL GENERADOR DE VAPOR
C      EN SU CIRCUITO DE AGUA/VAPOR.
C*****
C      ZONA DE DECLARACIONES
C*****
C
C      RUTINAS Y FUNCIONES
C
C      ECADOF - RUTINA QUE LLAMA AL MODELO MISMO PARA EL CALCULO DE
C              LAS ECUACIONES ALGEBRAICAS Y DIFERENCIALES ORDINARIAS.
C              EXTERNAL ECADOF.
C
C      NGUIA  - RUTINA QUE CONTIENE EL PAQUETE DE INTEGRACION.
C
C      PARAOF - RUTINA QUE ASIGNA LOS PARAMETROS UTILIZADOS EN LA SI-
C              MULACION
C*****
C      ZONA EJECUTABLE
C*****
C
C      ASIGNACION Y CALCULO DE PARAMETROS.
C
C      CALL PARAOF
C
C      SIMULACION DEL GENERADOR DE VAPOR.
C
C      CALL NGUIA ( ECADOF )
C
C      CALL EXIT
C
C      END

```

```

C*****
C
C   RUTINA   : ECADOF
C
C   PROGRAMA: EDGARDO J. ROLDAN VILLASANA
C
C   FECHA   : 09 - SEP - 86
C
C   REVISION: 29 - NOV - 86
C*****

```

SUBROUTINE ECADOF

```

C   ESTA RUTINA COORDINA LA EJECUCION DEL MODELO CALDERA EN SU PARTE
C   AGUA/VAPOR. LLAMA A TODAS LAS RUTINAS INTERNAS DEL MODELO Y ES-
C   COGE SI SE TIENE EL CASO DE LLENADO O DE OPERACION NORMAL.

```

```

C*****
C   ZONA DE DECLARACIONES
C*****

```

```

C   APPCOD - DERIVADA DE LA APERTURA DE VALVULA DE PURGA CONTINUA
C             DEL DOMO                                [1/S]
C             REAL*4 APPCOD
C   APPCOE - APERTURA DE VALVULA DE PRUGA CONTINUA DEL DOMO
C             REAL*4 APPCOE
C   APRPOD - DERIVADA DE LA APERTURA DE LA VALVULA EQUIVALENTE DE
C             RUPTURA                                [1/S]
C             REAL*4 APRPOD
C   APRPOE - APERTURA DE LA VALVULA EQUIVALENTE DE RUPTURA
C             REAL*4 APRPOE
C   APVEOD - DERIVADA DE LA APERTURA DE VALVULA DE VENTEOS DEL
C             DOMO                                    [1/S]
C             REAL*4 APVEOD
C   APVEOE - APERTURA DE VALVULA DE VENTEOS DEL DOMO
C             REAL*4 APVEOE
C   BAVSOY - BANDERA INDICADORA SI LA VALVULA DE SEGURIDAD ESTA
C             ABIERTA (TRUE) O CERRADA (FALSE)
C             LOGICAL BAVSOY(5)
C   BEDOAA - EXPANSION VOLUMETRICA DEL AIRE
C             REAL*4 BEDOAA                                [1/K]
C   CPDOAA - CAPACIDAD CALORIFICA DEL AIRE
C             REAL*4 CPDOAA                                [J/KG K]
C   CPDOLA - CAPACIDAD CALORIFICA DEL LIQUIDO
C             REAL*4 CPDOLA                                [J/KG K]
C   DSQP   - DERIVADA DE LA RAI2 CUADRADA DE LA PRESION [PA*-0.5]
C             REAL*4 DSQP
C   FRMOOX - FRECUENCIA DE LA CORRIENTE ELECTRICA ALIMENTADA A LOS
C             MOTORES DE LAS BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA [1/S]

```

		REAL*4 FRMOOX(5)	
C	HPDOAA	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL AIRE CON RESPECTO A LA	
C		PRESION EN EL DOMO	[J/KG PA]
		REAL*4 HPDOAA	
C	HPDOLA	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL LIQUIDO CON RESPECTO A LA	
C		PRESION EN EL DOMO	[J/KG PA]
		REAL*4 HPDOLA	
C	HPDOVA	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL VAPOR CON RESPECTO A LA	
C		PRESION EN EL DOMO	[J/KG PA]
		REAL*4 HPDOVA	
C	HTAAOX	- ENTALPIA DEL AGUA DE ALIMENTACION	[J/KG]
		REAL*4 HTAAOX	
C	HTATAA	- ENTALPIA DEL AIRE A CONDICIONES ATMOSFERICAS	[J/KG]
		REAL*4 HTATAA	
C	HTD10D	- DERIVADA DE ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA	
C		DEL DOMO INFERIOR	[J/KG S]
		REAL*4 HTD10D	
C	HTD10E	- ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA DEL DOMO	
C		INFERIOR	[J/KG]
		REAL*4 HTD10E	
C	HTDOAA	- ENTALPIA DEL AIRE EN EL DOMO	[J/KG]
		REAL*4 HTDOAA	
C	HTDOGI	- ENTALPIA DEL GAS EN EL DOMO (VAPOR Y AIRE)	[J/KG]
		REAL*4 HTDOGI	
C	HTDOLA	- ENTALPIA DEL LIQUIDO EN EL DOMO	[J/KG]
		REAL*4 HTDOLA	
C	HTDOVA	- ENTALPIA DEL VAPOR EN EL DOMO	[J/KG]
		REAL*4 HTDOVA	
C	HTPAOD	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA	
C		DE CADA NODO DE LAS PAREDES DE AGUA	[J/KG S]
		REAL*4 HTPAOD(8,100)	
C	HTPAOE	- ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA DE CADA NODO	
C		DE LAS PAREDES DE AGUA	[J/KG]
		REAL*4 HTPAOE(8,100)	
C	HTRPOI	- ENTALPIA TOTAL DEL FLUIDO EN LA RUPTURA	[J/KG]
		REAL*4 HTRPOI	
C	HTTBOD	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL FLUIDO EN CADA NODO DE LA	
C		TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR	[J/KG S]
		REAL*4 HTTBOD(5,50)	
C	HTTBOE	- ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA DE CADA NODO	
C		DE LA TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR	[J/KG]
		REAL*4 HTTBOE(5,50)	
C	HTTDOD	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA	
C		DE CADA NODO DE LA TUBERIA DESCENDENTE	[J/KG S]
		REAL*4 HTTDOD(5,50)	
C	HTTDOE	- ENTALPIA DEL FLUIDO A LA SALIDA DE CADA NODO	
C		DE LA TUBERIA DESCENDENTE	[J/KG]
		REAL*4 HTTDOE(5,50)	
C	HVDOOA	- ENTALPIA DE VAPORIZACION EN EL DOMO	[J/KG]
		REAL*4 HVDOOA	
C	IIMBOI	- CORRIENTE ELECTRICA GENERADA POR LOS MOTORES DE LAS	
C		BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA	[CAMP]

REAL*4 IIMBOI(5)
 C IN - VARIABLE DONDE SE RECIBE LA FUNCION INDICE
 INTEGER*2 IN
 C KTDAAA - CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL AIRE [W/M KJ
 REAL*4 KTDAAA
 C LENAOL - VARIABLE QUE INDICA SI SE TIENE EL CASO DE LLENADO
 LOGICAL LENAOL
 C MADOAD - DERIVADA DE LA MASA DE AIRE EN EL DOMO [KG/SJ
 REAL*4 MADOAD
 C MADOAE - MASA DE AIRE EN EL DOMO [KGJ
 REAL*4 MADOE
 C MADOLD - DERIVADA DE LA MASA DE LIQUIDO EN EL DOMO [KG/SJ
 REAL*4 MADOLD
 C MADOLE - MASA DE LIQUIDO EN EL DOMO [KGJ
 REAL*4 MADOLE
 C MADOTA - MASA TOTAL CONTENIDA EN EL DOMO [KGJ
 REAL*4 MADOTA
 C MADOVA - MASA DE VAPOR EN EL DOMO [KGJ
 REAL*4 MADOVA
 C MAGVOD - DERIVADA DE LA MASA DE AGUA EN TODA LA CALDERA [KG/SJ
 REAL*4 MAGVOD
 C MAGVOE - MASA DE AGUA EN TODA LA CALDERA [KGJ
 REAL*4 MAGVOE
 C MAMINA - LIMITE INFERIOR DE LA MASA DEL LIQUIDO EN EL DOMO [KGJ
 REAL*4 MAMINA
 C MLDOAA - FRACCION MOLAR DEL AIRE PRESENTE EN LA FASE GASEOSA
 DEL DOMO
 REAL*4 MLDOAA
 C MPDOAI - FRACCION MASA DEL AIRE PRESENTE EN LA FASE GASEOSA
 DEL DOMO
 REAL*4 MPDOAI
 C MUDAAA - VISCOSIDAD DINAMICA DEL AIRE [KG/M SJ
 REAL*4 MUDAAA
 C NLD00I - NIVEL DEL LIQUIDO EN EL DOMO [MJ
 REAL*4 NLD00I
 C NLPAOD - DERIVADA DEL NIVEL DE AGUA EN CADA TRAYECTORIA
 DE LAS PAREDES DE AGUA [M/SJ
 REAL*4 NLPAOD(8)
 C NLPAOE - NIVEL DE AGUA EN CADA TRAYECTORIA DE LAS PAREDES
 DE AGUA [MJ
 REAL*4 NLPAOE(8)
 C NRBOOA - NUMERO DE BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA
 INTEGER NRBOOA
 C NRNPA A - NUMERO DE NODOS EN CADA TRAYECTORIA DE LAS PAREDES
 DE AGUA
 INTEGER NRNPA A(8)
 C NRNTBA - NUMERO DE NODOS EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA QUE
 UNE LAS BOMBAS CON EL DOMO INFERIOR
 INTEGER NRNTBA(5)
 C NRNTDA - NUMERO DE NODOS EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
 DESCENDENTE
 INTEGER NRNTDA(5)

C NRPATA - NUMERO DE TUBOS POR CADA TRAYECTORIAS DE LAS PAREDES
C DE AGUA
C INTEGER NRPATA(8)
C NRTBTA - NUMERO DE TUBOS POR CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA QUE
C UNE LAS BOMBAS CON EL DOMO INFERIOR
C INTEGER NRTBTA(5)
C NRTDTA - NUMERO DE TUBOS POR CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
C DESCENDENTE
C INTEGER NRTDTA(5)
C NRTPA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE LAS PAREDES DE AGUA
C INTEGER NRTPA
C NRTTBA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE LA TUBERIA QUE UNE LA
C DESCARGA DE LAS BOMBAS CON EL DOMO INFERIOR
C INTEGER NRTTBA
C NRTTDA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE LA TUBERIA DESCENDENTE
C INTEGER NRTTDA
C NRVSOA - NUMERO DE VALVULAS DE SEGURIDAD EN EL DOMO
C INTEGER NRVSOA
C PAATOK - PRESION ATMOSFERICA [PAJ
C REAL*4 PAATOK
C PAB00A - PRESION EN LA DESCARGA DE LAS BOMBAS [PAJ
C REAL*4 PAB00A(5)
C PAD10A - PRESION EN LA SALIDA DEL DOMO INFERIOR [PAJ
C REAL*4 PAD10A
C PAD00D - DERIVADA DE LA PRESION TOTAL EN EL DOMO [PA/SJ
C REAL*4 PAD00D
C PAD00I - PRESION TOTAL EN EL DOMO [PAJ
C REAL*4 PAD00I
C PAD00R - DERIVADA DE LA PRESION TOTAL EN EL DOMO
C INICIALIZABLE [PA/SJ
C REAL*4 PAD00R
C PAPA0A - PRESION EN LA SALIDA DE CADA NODO DE LAS PAREDES
C DE AGUA [PAJ
C REAL*4 PAPA0A(8,100)
C PATB0A - PRESION EN LA SALIDA DE CADA NODO DE LA TUBERIA
C BOMBAS - DOMO INFERIOR [PAJ
C REAL*4 PATB0A(5,50)
C PATD0A - PRESION EN LA SALIDA DE CADA NODO DE LA TUBERIA
C DESCENDENTE [PAJ
C REAL*4 PATD0A(5,50)
C PA0A0X - PRESION EN LA DESCARGA DE LA PURGA CONTINUA [PAJ
C REAL*4 PA0A0X
C PA0D0X - PRESION TOTAL EN EL HOGAR [PAJ
C REAL*4 PA0D0X
C PDB0TI - CAIDA DE PRESION EN CADA UNA DE LAS BOMBAS Y EN LA
C TUBERIA DE RECIRCULACION DE ELLAS [PAJ
C REAL*4 PDB0TI(6)
C PDPATA - CAIDA DE PRESION EN CADA TRAYECTORIA DE LAS PAREDES
C DE AGUA [PAJ
C REAL*4 PDPATA(8)
C PDTBTA - CAIDA DE PRESION EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
C DE DESCARGA DE LAS BOMBAS [PAJ

C REAL*4 PDTBTA(5)
 C PDTDTA - CAIDA DE PRESION EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
 C DESCENDENTE [PAJ]
 REAL*4 PDTDTA(5)
 C PDTUBA - CAIDA DE PRESION TOTAL EN LA TUBERIA QUE UNE LOS
 C DOMOS DEL LADO DE LAS BOMBAS (INCLUYE LA CAIDA DE
 C PRESION A TRAVES DE LAS BOMBAS Y SE TOMA LA CAIDA
 C DE PRESION EN LA PRIMERA TRAYECTORIA DE CADA
 C TUBERIA) [PAJ]
 REAL*4 PDTUBA
 C PRDTIA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE PARED EN EL DOMO INFERIOR
 C INTEGER PRDTIA
 C PRTPAA - NUMERO DE TEMPERATURAS EN CADA NODO DE LAS PAREDES
 C DE AGUA
 C INTEGER PRTPAA(8,100)
 C PRTTBA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE LA PARED EN CADA NODO DE LA
 C TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR
 C INTEGER PRTTBA(5,50)
 C PRITDA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE LA PARED EN CADA NODO DE
 C LA TUBERIA DESCENDENTE
 C INTEGER PRITDA(5,50)
 C FVDOOD - DERIVADA DE LA PRESION DE VAPOR EN EL DOMO [PA/SJ]
 C REAL*4 FVDOOD
 C FVDOOE - PRESION DE VAPOR EN EL DOMO [PAJ]
 C REAL*4 FVDOOE
 C QLDIAA - CALOR QUE PIERDE EL DOMO INFERIOR A LA ATMOSFERA [J/SJ]
 C REAL*4 QLDIAA
 C QLDIOA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN EL DOMO INFERIOR [J/SJ]
 C REAL*4 QLDIOA(2)
 C QLDIOX - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
 C AL DOMO INFERIOR [J/SJ]
 C REAL*4 QLDIOX
 C QLDOOA - CALOR TOTAL QUE CEDE EL FLUIDO AL METAL DEL DOMO [J/SJ]
 C REAL*4 QLDOOA
 C QLMDOX - CALOR QUE RECIBE EL DOMO DEL HORNO [J/SJ]
 C REAL*4 QLMDOX
 C QLPAAA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LAS PAREDES DE AGUA
 C A LA ATMOSFERA [J/SJ]
 C REAL*4 QLPAAA(8,100)
 C QLPAOA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C PAREDES DE AGUA [J/SJ]
 C REAL*4 QLPAOA(8,100,2)
 C QLPAOX - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION A
 C CADA NODO DE LAS PAREDES DE AGUA [J/SJ]
 C REAL*4 QLPAOX(8,100)
 C QLTBAA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LAS TUBERIAS
 C BOMBAS-DOMO INFERIOR LA ATMOSFERA [J/SJ]
 C REAL*4 QLTBAA(5,50)
 C QLTBOA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR [J/SJ]
 C REAL*4 QLTBOA(5,50,2)
 C QLTBOX - FLUJO DE CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION

C EN CADA NODO DE LA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR [C/S]
 REAL*4 QLTBOX(5,50)
 C QLTDA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LA TUBERIA DESCENDENTE
 C A LA ATMOSFERA [C/S]
 REAL*4 QLTDA(5,50)
 C QLTDA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C DESCENDENTE [C/S]
 REAL*4 QLTDA(5,50,2)
 C QLTDOX - FLUJO DE CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
 C EN CADA NODO DE LA TRAYECTORIA DE LA
 C TUBERIA DESCENDENTE [C/S]
 REAL*4 QLTDOX(5,50)
 C ROAAOX - DENSIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACION [KG/M**3]
 C REAL*4 ROAAOX
 C RODOAA - DENSIDAD DEL AIRE EN EL DOMO [KG/M**3]
 C REAL*4 RODOAA
 C RODOGA - DENSIDAD DEL GAS EN EL DOMO (VAPOR Y AIRE) [KG/M**3]
 C REAL*4 RODOGA
 C RODOLA - DENSIDAD DEL LIQUIDO EN EL DOMO [KG/M**3]
 C REAL*4 RODOLA
 C RODOVA - DENSIDAD DEL VAPOR EN EL DOMO [KG/M**3]
 C REAL*4 RODOVA
 C ROTDSA - DENSIDAD GLOBAL DEL FLUIDO EN LA SALIDA DE
 C LA TUBERIA DESCENDENTE [KG/M**3]
 REAL*4 ROTDSA
 C RRDOLA - DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL LIQUIDO CON RESPECTO A
 C LA PRESION [KG/M**3 PA]
 REAL*4 RRDOLA
 C RRDOVA - DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL VAPOR CON RESPECTO A
 C LA PRESION [KG/M**3 PA]
 REAL*4 RRDOVA
 C RTDOLA - DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL LIQUIDO CON RESPECTO A
 C LA TEMPERATURA [KG/M**3 K]
 REAL*4 RTDOLA
 C RTDOVA - DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL VAPOR CON RESPECTO A
 C LA TEMPERATURA [KG/M**3 K]
 REAL*4 RTDOVA
 C RVD00A - DENSIDAD DE VAPORIZACION EN EL DOMO (LIQUIDO MENOS
 C VAPOR) [KG/M**3]
 REAL*4 RVD00A
 C SCNIOI - INTEGRAL DEL ERROR DEL NIVEL
 C REAL*4 SCNIOI
 C SCPAOI - INTEGRAL DEL ERROR DE LA PRESION
 C REAL*4 SCPAOI
 C SPPAOX - PUNTO DE AJUSTE PARA LA PRESION [PA]
 C REAL*4 SPPAOX
 C SQF - RAIZ CUADRADA DE LA PRESION (SE OBTIENE DE FUNCION
 C INDICE) [PA**0.5]
 REAL*4 SQF
 C TMATOX - TEMPERATURA AMBIENTE [K]
 REAL*4 TMATOX

C TMDIPD - DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DE METAL DEL DOMO
C INFERIOR, LA POSICION 1 DEBE SER LA TEMPERATURA
C DEL LADO AISLADO , SI PRDIA=2 [K]

REAL*4 TMDIPD(2)

C TMDIPE - TEMPERATURAS DEL METAL DEL DOMO INFERIOR,
C LA POSICION 1 DEBE SER LA TEMPERATURA DEL
C LADO AISLADO , SI PRDIA=2 [K]

REAL*4 TMDIPE(2)

C TMD00I - TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS EN EL DOMO [K]

REAL*4 TMD00I

C TMMDOD - DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DEL METAL DEL DOMO [K/S]

REAL*4 TMMDOD(3)

C TMMDOE - TEMPERATURAS DEL METAL DEL DOMO [K/S]

REAL*4 TMMDOE(3)

C TMPAPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN CADA
C NODO DE LAS PAREDES DE AGUA LA POSICION 1 DEL
C TERCER ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL
C LADO AISLADO , SI PRTPAA=2 [K]

REAL*4 TMPAPD(8,100,2)

C TMPAPE - TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE LAS PAREDES
C DE AGUA LA POSICION 1 DEL TERCER ELEMENTO DEBE SER
C LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO , SI PRTPAA=2 [K]

REAL*4 TMPAPE(8,100,2)

C TMTBPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE
C LA TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR, LA POSICION 1 DEL
C TERCER ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO
C AISLADO, SI PRPTBA = 2 [K]

REAL*4 TMTBPD(5,50,2)

C TMTBPE - TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA
C BOMBAS - DOMO INFERIOR, LA POSICION 1 DEL TERCER
C ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO,
C SI PRPTBA = 2 [K]

REAL*4 TMTBPE(5,50,2)

C TMTDPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO
C DE LA TUBERIA DESCENDENTE, LA POSICION 1 DEL TERCER
C ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO ,
C SI PRPTDA=2 [K]

REAL*4 TMTDPD(5,50,2)

C TMTDPE - TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA
C DESCENDENTE, LA POSICION 1 DEL TERCER ELEMENTO
C DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO,
C SI PRPTDA=2 [K]

REAL*4 TMTDPE(5,50,2)

C VLM00X - VOLTAJE DE ALIMENTACION A LOS MOTORES DE LAS BOMBA [VOLT]

C DE CIRCULACION FORZADA

REAL*4 VLM00X(5)

C VND0VA - VOLUMEN DE LA FASE GASEOSA PRESENTE EN EL [M**3]

C DOMO

REAL*4 VND0VA

C WAMB0D - VECTOR DE DERIVADAS DE VELOCIDADES ANGULARES DE LAS [RAD/S**2]

C BOMBAS

REAL*4 WAMB0D(5)

C WAMBOE - VECTOR DE VELOCIDADES ANGULARES DE LAS BOMBAS [CRAD/S]
 REAL*4 WAMBOE(5)
 C WMAAOX - FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION [KG/S]
 REAL*4 WMAAOX
 C WMB001 - FLUJO MASICO EN LAS BOMBAS [KG/S]
 REAL*4 WMB001(6)
 C WMD10A - FLUJO MASICO A LA SALIDA DEL DOMO INFERIOR [KG/S]
 REAL*4 WMD10A
 C WMPAEI - FLUJO MASICO A LA ENTRADA A LAS PAREDES DE AGUA [KG/S]
 REAL*4 WMPAEI(8)
 C WMPAOA - FLUJO MASICO A LA SALIDA DE CADA NODO DE LAS PAREDES
 C DE AGUA [KG/S]
 REAL*4 WMPAOA(8,100)
 C WMPEOI - FLUJO DE PERDIDAS DEL DOMO [KG/S]
 REAL*4 WMPEOI
 C WMPCOI - FLUJO DE PURGA CONTINUA EN EL DOMO [KG/S]
 REAL*4 WMPCOI
 C WMRPLA - FLUJO DE LIQUIDO A TRAVES DE LA RUPTURA [KG/S]
 REAL*4 WMRPLA
 C WMRPVA - FLUJO DE VAPOR A TRAVES DE LA RUPTURA [KG/S]
 REAL*4 WMRPVA
 C WMRPOI - FLUJO TOTAL A TRAVES DE LA RUPTURA [KG/S]
 REAL*4 WMRPOI
 C WMSCOX - FLUJO AL SOBRECALENTADOR [KG/S]
 REAL*4 WMSCOX
 C WMTBEI - FLUJO MASICO DE ENTRADA A LA TUBERIA DE DESCARGA DE
 C LAS BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA [KG/S]
 REAL*4 WMTBEI(5)
 C WMTBOA - FLUJO MASICO A SALIDA DE CADA NODO DE LA TUBERIA
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR [KG/S]
 REAL*4 WMTBOA(5,50)
 C WMTDEI - FLUJO MASICO QUE ENTRA A LA TUBERIA DESCENDENTE [KG/S]
 REAL*4 WMTDEI(5)
 C WMTDOA - FLUJO MASICO DE SALIDA EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C DESCENDENTE [KG/S]
 REAL*4 WMTDOA
 C WMVEOA - FLUJO DE VENTEOS DEL DOMO [KG/S]
 REAL*4 WMVEOA
 C WMVSOA - FLUJO DE VALVULAS DE SEGURIDAD EN EL DOMO [KG/S]
 REAL*4 WMVSOA
 C WMVSI1A - FLUJO DE CADA UNA DE LAS VALVULAS DE SEGURIDAD [KG/S]
 REAL*4 WMVSI1A(5)
 C XVD10A - CALIDAD DEL FLUIDO EN EL DOMO INFERIOR
 REAL*4 XVD10A
 C XVPAOA - CALIDAD DEL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C PAREDES DE AGUA
 REAL*4 XVPAOA(8,100)
 C XVTBOA - CALIDAD DEL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR
 REAL*4 XVTBOA(5,50)
 C XVTDOA - CALIDAD DEL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C DESCENDENTE

C RUTINAS Y FUNCIONES

- C CONTOF - ESTA RUTINA CONTROLA EL FLUJO DE AGUA DE ALIMENTACION
 C Y EL FLUJO DE CALOR PARA MANTENER EN LOS PUNTOS DESEAD-
 C DOS EL NIVEL Y LA PRESION DEL DOMO RESPECTIVAMENTE.
- C DONIOF - ESTA RUTINA CALCULA LAS PROPIEDADES TERMOFISICAS DE
 C LOS FLUIDOS CONTENIDOS EN EL DOMO. TAMBIEN CALCULA
 C OTRAS VARIABLES QUE NO ENTRAN EN EL METODO ITERATIVO
 C DE SOLUCION; CON ESTO SE EVITAN CALCULOS INNECESARIOS
 C EN DICHO METODO.
- C FLSDOF - ESTA RUTINA CALCULA LOS FLUJOS ASOCIADOS A LOS VEN-
 C TEOS, RUPTURA, PERDIDAS, PURGA CONTINUA Y VALVULAS DE
 C SEGURIDAD DEL DOMO.
- C INTEOF - ESTA RUTINA SIRVE PARA ASIGNAR LOS VALORES DE LA MEMO-
 C RIA COMPARTIDA O DE LOS COMMON'S DE METODOS NUMERICOS
 C A VARIABLES INTERNAS UTILIZADAS POR EL MODELO.
- C INTSOF - ESTA RUTINA SIRVE PARA CONVERTIR LOS VALORES DE LAS
 C VARIABLES INTERNAS A VARIABLES EXTERNAS.
- C ITEROF - ESTA RUTINA LLAMA A METODOS NUMERICOS PARA LA SOLUCION
 C DE LAS ECUACIONES ALGEBRAICAS NO LINEALES DEL CIRCUITO
 C ITERATIVO. ESTE CICLO ESTA COMPRENDIDO POR: DOMO -
 C TUBERIA DESCENDENTE - BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA -
 C TUBERIA DE DESCARGA DE BOMBAS - DOMO INFERIOR -
 C PAREDES DE AGUA - DOMO.
- C LIVEOF - ESTA RUTINA LIMITA LAS VARIABLES DE ESTADO PARA QUE NO
 C REBASEN LOS LIMITES FISICOS PERMITIDOS.
- C MECIOF - ESTA RUTINA COORDINA LAS LLAMADAS A LOS METALES DE LAS
 C DIFERENTES SECCIONES DE TUBERIA QUE CONFORMAN LA CAL-
 C DERA, PARA EL CALCULO DE CALOR PERDIDO A LA ATMOSFERA
 C Y LA DERIVADA DE LAS TEMPERATURAS DEL METAL.
- C MEDOOF - ESTA RUTINA CALCULA EL CALOR QUE RECIBE Y PIERDE EL
 C METAL DEL DOMO.
- C MOBOOF - ESTA RUTINA REPRESENTA A LOS MOTORES Y BOMBAS EN SU
 C PARTE ELECTROMECANICA.

C *****
 C ZONA DE COMMON'S *

COMMON: #FINCOF, PADOOD, PDTDTA, PDBOTI, PDTETA, PDPATA, PDTUBA

```

COMMON /GRALOF/ PATDOA, HTDDE, TMDPE, WMTDOA,
1 HTTDOD, QLTDOA, XVTDOA, PATBOA,
2 HTTBOE, TMTBPE, WMTBOA, HTTBOD,
3 QLTBOA, XVTBOA, PAPAQA, HTPAQE,
4 TMPAPE, WMPAQA, HTPAQD, QLPQAQ,
5 XVPQAQ, PADIOA, HTDIOE, TMDIPE,
6 WMDIOA, HTDIOD, QLDIOA, XVDIOA,
7 PADOOI, WAMBOE, PABOQA, WAVEQA,
8 WMRPOI, WMRPVA, WMPCOI, WMSOQA,
9 WMPEOI, WMAAOX, WMSCOX, MPDOAT,
* MLDQAA, QLDQAA, HTDOGI, HTDOLA,
1 HTATAA, HTAAOX, HTRPOI, HTDOAA,
2 HTDOVA, HVDOQA, HPDOLA, HPDOVA,
3 HPDOAA, PVDQDE, MADOVA, MADOLE,
4 MADOAE, RODOLA, ROBOVA, RRDOLA,
5 RRDOVA, RVDOQA, PVDQOD, MADOAD,
6 MADOLD, ROTDSA, NLPAQE, NLPAOD

```

COMMON /INICOF/ PADOOR, WMTDEI, WMBOOI, WMTBEI, WMPAEI

COMMON /LENAOF/ LENAOL

```

C*****
C PARAMETROS *
C*****

```

C NO SE APLICAN

```

C*****
C ZONA EJECUTABLE *
C*****

```

C RUTINA DE INTERFACE DE ENTRADA. ASIGNA VARIABLES FORANEAS A VA-
C RIABLES INTERNAS.

```

CALL INTEOF (PVDQDE, PVDQOD, MADOLE, MADOLD,
1 MADOAE, MADOAD, APVEQE, APVEOD,
2 APRPOE, APRPOD, APFCQE, APFCOD,
3 TMDQDE, TMDQOD, HTDIOE, HTDIOD,
4 HTTBOE, HTTBOD, HTTDOE, HTTDOD,
5 HTPAQE, HTPAQD, NLPAQE, NLPAOD,
6 TMTBPE, TMTBPD, TMDPE, TMDPD,
7 TMDIPE, TMDIPD, TMPAPE, TMPAPD,
8 WAMBOE, WAMQOD, HTDOGI, NLDOOI,
9 PADOOI, TMDOOI, MPDOAI, HTRPOI,
* WMPCOI, WMRPOI, WMSOQA, PADOOR,
1 WMTDEI, WMPAEI, WMBOOI, WMTBEI,
2 LIMBOI, QLTDOX, QLTBOX, QLPQOX,
3 FRMOOX, VLMQOX, PAATOX, TMAQOX,
4 PAQDOX, PAQAQX, HTAAOX, WMAAOX,
5 WMSCOX, QLDIOX, QLMDQX, ROAAQX,
6 SPPAQX, MAGVOE, MAGVOD, PDBOTT,

```

```

7          SCNIOI, SCPAOI)                                !SALEN
C          SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA EL VALOR DE LAS VARIABLES QUE
C          CONTROLAN EL COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA.
          CALL CONTOF (WMSCOX, WMRPOI, WMPEOI, NLD00I,
1             SCNIOI, PADOOI, HIDOI, HTAAOX,
2             SCPAOI,
3             WMAAOX, QLMDOX, QLTD0X, QLTBOX,
4             QLDIOX, QLPAX)                                !ENTRAN
C          SE LIMITAN LAS VARIABLES DE ESTADO PARA QUE NO TOMEN VALORES
C          FISICAMENTE IMPOSIBLES.
          CALL LIVEOF (MADOLE, MAD0AE, AFVEOE, APRPOE,
1             APPCOE, WAMBOE, PVDOOE,
2             RODOLA, RRDOLA, SQP , DSQP,
3             IN , MAMINA)                                !SALEN
C          SE VERIFICA SI SE TIENE EL CASO DE LLENADO DE LA CALDERA O DE
C          OPERACION NORMAL. PARA ESTO SE VE QUE LA PRESION DE VAPOR EN EL
C          DOMO NO SEA MAYOR A 4000 PA Y QUE LA MASA DEL LIQUIDO EN EL DOMO
C          SEA NEGATIVA.
          IF ((PVDOOE .LT. 4000.0) .AND. (MADOLE .LT. 0.0))THEN
C          SE TIENE EL CASO DE LLENADO.
          LENAOL = .TRUE.
C          SE LLAMA A RUTINA DE LLENADO.
          CALL LLENOF (MAGVOE, ROAAOX, TMD00I, PADOOI,
1             PVDOOE, MAMINA, HTAAOX, HIDOI,
2             WMAAOX, MFDOAI,
3             MAD0AD, MAD0AE, MADOLD, MADOLE,
4             HTDIOI, HTDICE, HTPAOD, HTPAOE,
5             HTDOD, HTDDE, HTBOD, HTBOE,
6             MAGVOD, PVDOOD, TMDOD, TMPAPD,
7             TMDPD, TMTBPD, TMDIPD, NLPAOD,
8             NLPAOE, WAMBOD, NLD00I)                    !SALEN
          ELSE
C          SE TIENE EL CASO DE OPERACION NORMAL.
          LENAOL = .FALSE.
C          SE LLAMA AL DOMO EN SU PARTE NO ITERATIVA.
          CALL DONIOF (PVDOOE, MADOLE, MAD0AE, PAATOX,

```


1		TMATOX, RODOLA, RRDOLA, SQP	
2		DSQP, IN, MAMINA,	!ENTRAN
3		PADOOI, TMDOOI, RODOGA, HTDOLA,	
4		HTDOVA, RRDOVA, RTDOLA, RTDOVA,	
5		HPDOLA, HPDOVA, HVD00A, RVD00A,	
6		NLD00I, MADOVA, HTD0AA, HTDOGI,	
7		VND0VA, MAD0AI, MPD0AI, MLD0AA,	
8		HTATAA, HPD0AA, R0D0AA, BED0AA,	
9		MUD0AA, KTDOAA, CPD0AA, CPDOLA,	
A		MAGVOD, RODOVA)	!SALEN
C		SE LLAMA AL CALCULO DE LOS FLUJOS DE LOS DRENES VENTEOOS Y	
C		VALVULAS DE SEGURIDAD DEL DOMO.	
		CALL FLSDOF (PADOOI, PAODOX, PARTOX, PAOAOX,	
1		APVEOE, APRPOE, APPCOE, RODOLA,	!ENTRAN
2		RODOGA, HTDOGI, HTDOLA,	
3		WMVEOA, WMRPVA, WMRPOI, WMPCOI,	
4		WMVSOA, WMPEOI, HTRPOI)	!SALEN
C		SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA EL CALOR QUE RECIBE Y	
C		PIERDE EL METAL DEL DOMO.	
		CALL MEDOOF (NLD00I, TMD00I, RODOLA, RODOVA,	
1		RTDOLA, RTDOVA, HVD00A, TMD0OE,	
2		MPD0AI, TMATOX, QLMDOX, RODOGA,	
3		BED0AA, MUD0AA, KTDOAA, CPD0AA,	
4		CPDOLA, PVD0OE,	!ENTRAN
5		QLD00A, TMD0D)	!SALEN
C		SE LLAMA A LA RUTINA QUE COORDINA EL METODO ITERATIVO. ESTA	
C		RUTINA UTILIZA EL PAQUETE DE METODOS NUMERICOS Y SE DEFINE	
C		COMO EXTERNAL. AL NO PODER TENER ARGUMENTOS LAS VARIABLES	
C		QUE NECESITA SE COMUNICAN POR EL COMMON /GRALOF/.	
		CALL ITEROF	
C		SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA LOS FLUJOS DE CALOR QUE	
C		PIERDEN A LA ATMOSFERA LOS TUBOS DE LA CALDERA Y LAS DERI-	
C		VADAS DE SUS TEMPERATURAS.	
		CALL MECIOF (TMTDPE, QLTDOA, QLTDOX, TMTBPE,	
1		QLTBOA, QLTBOX, TMDIPE, QLDIOA,	
2		QLDIOX, TMPAPE, QLPAA, QLPAOX,	
3		TMATOX,	!ENTRAN
4		QLTBA, TMTDPD, QLTBAA, TMTBPD,	
5		QLDIAA, TMDIPD, QLPAAA, TMAPD)	!SALEN
C		SE LLAMA A LAS BOMBAS Y MOTORES EN SU PARTE ELECTROMECHANICA.	
		CALL MOBOOF (VLM00X, FRM00X, WAMBOE, WMBOOI,	
1		ROITDA,	!ENTRAN

2

!IMBOI, WAMBOD)

!SALEN

END IF

C
C

RUTINA DE INTERFACE DE SALIDA. ASIGNA VARIABLES INTERNAS A VA-
RIABLES FORANEAS.

```
CALL INTSOF (PVDOOE, PVDOOD, MADOLE, MADOLD,  
1 MADOAE, MADOAD, APVEOE, APVEOD,  
2 APRPOE, APRPOD, APPCOE, APPCOD,  
3 TMMDOE, TMMDOD, HTDIOE, HTDIOD,  
4 HITBOE, HITBOD, HTTDOE, HTTDOD,  
5 HTPAOE, HTPAOD, NLPAOE, NLPAOD,  
6 TMTBPE, TMTBPD, TMTDPE, TMTDPD,  
7 TMDIPE, TMDIPD, TMEAPE, TMEAPD,  
8 WAMBOE, WAMBOD, HTDOGI, NLDOOI,  
9 PADOOI, TMDOOI, MPDOAI, HIRPOI,  
* WMPCOI, WMRPOI, BAVSOY, PADOOR,  
1 WMTDEI, WMPAEI, WMBOOI, WMTBEI,  
2 IIMBOI, MAGVOE, MAGVOD, POBOTI,  
3 SCNIOI, SCPAOI)
```

!ENTRAN

RETURN
END

```

*****
C
C   RUTINA   : TUB00F
C
C   PROGRAMA: EDGARDO J. ROLDAN VILLASANA
C
C   FECHA   : 01 - AGO - 86.
C
C   REVISION: 12 - AGO - 86
C
*****

```

```

SUBROUTINE TUB00F ( PANOEA, HTNOSA, GMNOEA, DMNOOA,
1  TMNOFA, PRTUTA, LCN00A, ARNOTA,
2  ARNOFA, LGDMOA, PADOOR, VNNOOA,
3  RDNOOA, VCN0EA, PRAIOL, MLDOAA,
4  HPDOAI, GHN0EA, NRN0CA,          !ENTRAN
5  GMNOA,  GHNOSA, XVN0OA,  PDNOOA,
6  QLN0OA, HTNOOD,  RONOSA,  VCNOSA,
7  VCNOLA)          !SALEN

```

C ESTA RUTINA REPRESENTA AL FLUIDO CONTENIDO EN UNA TUBERIA

```

*****
C   ZONA DE DECLARACIONES
C
*****
C   ALNOOA - FRACCION DE VACIO DEL FLUIDO
C             REAL*4 ALNOOA
C   ARNOFA - AREA TRANSVERSAL DE FLUJO PARA UN SOLO TUBO EN LA
C             TRAVECTORIA                [M**2]
C             REAL*4 ARNOFA
C   ARNOTA - AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL NODO          [M**2]
C             REAL*4 ARNOTA
C   CPNOA  - CAPACIDAD CALORIFICA DEL LIQUIDO                  [J/KG K]
C             REAL*4 CPNOA
C   CPNOVA - CAPACIDAD CALORIFICA DEL VAPOR                    [J/KG K]
C             REAL*4 CPNOVA
C   DMNOOA - DIAMETRO INTERNO DEL NODO PARA UN SOLO TUBO      [M]
C             REAL*4 DMNOOA
C   GHN0EA - FLUX DE ENERGIA EN LA ENTRADA DEL NODO           [J/M**2 S]
C             REAL*4 GHN0EA
C   GHNOSA - FLUX DE ENERGIA DE SALIDA DEL NODO               [J/M**2 S]
C             REAL*4 GHNOSA
C   GMNOEA - FLUX MASICO DE ENTRADA AL NODO                   [KG/M**2 S]
C             REAL*4 GMNOEA
C   GMNOA  - FLUX MASICO DE SALIDA DEL NODO                   [KG/M**2 S]
C             REAL*4 GMNOA
C   GMNOLA - FLUX MASICO ESTIMADO DEL LIQUIDO                 [KG/M**2 S]
C             REAL*4 GMNOLA

```

C	GMNOVA	- FLUX MASICO ESTIMADO DEL VAPOR REAL*4 GMNOVA	[KG/M**2 S]
C	HHEBOA	- COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICION	[J/SKM**2]
C	HHFTOA	- COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJO TURBULENTO REAL*4 HHFTOA(2)	[J/SKM**2]
C	HHMOOA	- COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA NODO MONOFASICO REAL*4 HHMOOA(2)	[J/SKM**2]
C	HPNOLA	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL LIQUIDO CON RESPECTO A LA PRESION REAL*4 HPNOLA	[J/KG PA]
C	HTNOOD	- DERIVADA DE LA ENTALPIA EN EL NODO REAL*4 HTNOOD	[J/KG S]
C	HPNOVA	- DERIVADA DE LA ENTALPIA DEL VAPOR CON RESPECTO A LA PRESION REAL*4 HPNOVA	[J/KG PA]
C	HTNOSA	- ENTALPIA DEL NODO REAL*4 HTNOSA	[J/KG]
C	HTNOA	- ENTALPIA DEL LIQUIDO REAL*4 HTNOA	[J/KG]
C	HTNOVA	- ENTALPIA DEL VAPOR REAL*4 HTNOVA	[J/KG]
C	I	- CONTADOR INTEGER I	
C	KTNOLA	- CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL LIQUIDO REAL*4 KTNOLA	[J/M S]
C	KTNOVA	- CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL VAPOR REAL*4 KTNOVA	[J/M S]
C	LGDMOA	- LONGITUD EN DIAMETRO EQUIVALENTE REAL*4 LGDMOA	
C	LGNOOA	- LONGITUD DEL NODO REAL*4 LGNOOA	[CM]
C	MLDOAA	- FRACCION MOLAR DEL AIRE EN LA FASE GASEOSA DEL DOMO REAL*4 MLDOAA	
C	MPDOAI	- FRACCION MASA DEL AIRE EN LA FASE GASEOSA DEL DOMO REAL*4 MPDOAI	
C	MUNOLA	- VISCOSIDAD DEL LIQUIDO REAL*4 MUNOLA	[KG/MS]
C	MUNOVA	- VISCOSIDAD DEL VAPOR REAL*4 MUNOVA	[KG/MS]
C	MUNOPA	- VISCOSIDAD DEL LIQUIDO EN LA PARED REAL*4 MUNOPA(2)	[KG/MS]
C	MUNOQA	- VISCOSIDAD DEL VAPOR EN LA PARED REAL*4 MUNOQA(2)	[KG/MS]
C	NRGRLA	- NUMERO DE GRASHOFF DEL LIQUIDO REAL*4 NRGRLA	
C	NRGRVA	- NUMERO DE GRASHOFF DEL VAPOR REAL*4 NRGRVA	
C	NRNOCA	- CORRECTOR PARA TOMAR EN CUENTA EL SIGNO CON QUE	

C		ACTUA LA FUERZA DE GRAVEDAD	
C	NRPRLA	- INTEGER NRNOCA	
C	NRPRVA	- NUMERO DE PRANDTL DEL LIQUIDO	
C	NRRELA	- NUMERO DE REYNOLDS DEL LIQUIDO	
C	NRREVA	- NUMERO DE REYNOLDS DEL VAPOR	
C	PADOOR	- DERIVADA DE LA PRESION TOTAL EN EL DOMO	
C		INICIALIZABLE	[PA/SJ]
C	PANOEAL	- PRESION DEL NODO PARA PROPIEDADES	[PAJ]
C	PANOPA	- PRESION DE SATURACION EN LA PARED	[PAJ]
C	PDNOOA	- CAIDA DE PRESION EN EL NODO	[PAJ]
C	PRAIOL	- PARAMETRO QUE INDICA SI EXISTE AIRE EN EL NODO	
C	PRUTUA	- NUMERO DE TEMPERATURAS EN LA PARED	
C	QLCROA	- CALOR CRITICO PARA EBULLICION	[J/S M**2J]
C	QLNOOA	- CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA LADO DE	
C		LA PARED	[J/SJ]
C	QLNOTA	- CALOR NETO GANADO POR EL FLUIDO	[J/SJ]
C	RDNOOA	- ANGULO DE LA TUBERIA CON RESPECTO A LA VERTICAL (GRADI)	
C	RNNOLA	- DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL LIQUIDO CON	
C		RESPECTO A LA ENTALPIA	[KG/M**3 J]
C	RNNOVA	- DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL VAPOR CON RESPECTO A	
C		LA ENTALPIA	[KG/M**3 J]
C	RONOSA	- DENSIDAD DE SALIDA DE EL NODO	[KG/M**3J]
C	RONOSR	- DERIVADA DE LA DENSIDAD PROMEDIO EN EL NODO	
C		CON RESPECTO AL TIEMPO	[KG/M**3 SJ]
C	RONOLA	- DENSIDAD DEL LIQUIDO	[KG/M**3J]
C	RONOVA	- DENSIDAD DEL VAPOR	[KG/M**3J]
C	RRNOLA	- DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL LIQUIDO CON RESPECTO A	
C		LA PRESION	[KG/M**3 PAJ]
C	RRNOVA	- DERIVADA DE LA DENSIDAD DEL VAPOR CON RESPECTO A	
C		LA PRESION	[KG/M**3 PAJ]

C REAL*4 RRNOVA
 C SGNOOA - TENSION SUPERFICIAL DEL AGUA [KG/M**2]
 REAL*4 SGNOOA
 C TMNOOA - TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL NODO [K]
 REAL*4 TMNOOA
 C TMNOPA - TEMPERATURAS DE LA PARED [K]
 REAL*4 TMNOPA(2)
 C VCNOEA - VELOCIDAD SUPERFICIAL DE ENTRADA AL NODO [M/S]
 REAL*4 VCNOEA
 C VCNOEA - VELOCIDAD SUPERFICIAL DE ENTRADA AL NODO [M/S]
 REAL*4 VCNOEA
 C VCNOEA - VELOCIDAD SUPERFICIAL DE ENTRADA AL NODO [M/S]
 REAL*4 VCNOEA
 C VCNOEA - VELOCIDAD SUPERFICIAL DE ENTRADA AL NODO [M/S]
 REAL*4 VCNOEA
 C VCNOEA - VELOCIDAD SUPERFICIAL DE ENTRADA AL NODO [M/S]
 REAL*4 VCNOEA
 C VNNOOA - VOLUMEN DEL NODO [M**3]
 REAL*4 VNNOOA
 C XVNOOA - CALIDAD DE LA MEZCLA EN EL NODO
 REAL*4 XVNOOA
 C XXQLOA - AUXILIAR PARA EL CALOR
 REAL*4 XXQLOA

C RUTINAS Y FUNCIONES

C DPNNOF - RUTINA QUE CALCULA LAS CAIDAS DE PRESION EN LOS NODOS
 C DE LA TUBERIA.
 C HNBIOF - RUTINA QUE CALCULA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
 C CALOR EN LOS NODOS BIFASICOS.
 C HNMNOF - RUTINA QUE CALCULA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
 C CALOR EN LOS NODOS MONOFASICOS.
 C NOBIOF - RUTINA QUE CALCULA LAS SALIDAS DE FLUXES Y VELOCIDA-
 C DES DE LOS NODOS BIFASICOS.
 C NOMNOF - RUTINA QUE CALCULA LAS SALIDAS DE FLUXES Y VELOCIDA-
 C DES DE LOS NODOS MONOFASICOS.
 C PRTOF - RUTINA QUE CALCULA LAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS Y
 C DE TRANSPORTE QUE SE UTILIZAN EN LOS DEMAS MODULOS.
 C QLCROF - RUTINA QUE CALCULA EL CALOR CRITICO DE EBULLICION.

C*****
 C ZONA EJECUTABLE *
 C*****

C SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA LAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS
 C Y DE TRANSPORTE COMO FUNCION DE LA PRESION Y LA ENTALPIA A LA
 C ENTRADA DEL NODO.

CALL PRTOF (PANOEA, HINOSA, GMNOEA, DMNOOA,

1	TMNOA, PRTUTA, PRAIOL, MLDOAA,	
2	MPDOAI,	!ENTRAN
3	ALNOOA, RONOOA, RONOLA, RONOVA,	
4	RNNOLA, RNNOVA, RRNOLA, RRNOVA,	
5	HTNOLA, HTNOVA, HPNOLA, HPNOVA,	
6	CFNOLA, CFNOVA, KTNOLA, KTNNOVA,	
7	MUNOLA, MUNNOVA, MUNOPA, MUNOQA,	
8	NRRELA, NRREVA, NRPRLA, NRPRVA,	
9	NRGRLA, NRGRVA, SGNOOA, TMNOOA,	
*	PANOPA, GMNOLA, GMNOVA, XVNOOA)	!SALEN

C CALOR , FLUXES Y VELOCIDADES
C -----

C SE LLAMAN A LAS RUTINAS QUE CALCULAN EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR. SE CALCULA EL CALOR Y SE LLAMAN A LAS RUTINAS QUE CALCULAN LOS FLUXES Y VELOCIDADES DE SALIDA SEGUN EL TIPO DE NODO.

IF (XVNOOA .LT. 0.0) THEN ! NODO MONOFASICO LIQUIDO

C CALCULO DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA.

1	CALL HHMOOF (NRRELA, NRPRLA, NRGRLA, MUNOLA,	!ENTRAN
2	MUNOPA, KTNOLA, DMNOOA, LGNOOA,	
3	PRTUTA,	
	HHMOOA)	!SALEN

C CALOR .

QLNOTA = 0.0

DO I = 1 , PRTUTA

1 QLNOOA(I) = HHMOOA(I) * (TMNOA(I) - TMNOOA) *
ARNOTA / PRTUTA

QLNOTA = QLNOTA + QLNOOA(I)

END DO I I

C FLUXES Y VELOCIDADES.

1	CALL NOMOOF (GHNOEA, GMNOEA, HTNOSA, LGNOOA,	
2	PADOOF, QLNOTA, RNNOLA, RONOVA,	!ENTRAN
3	RRNOLA, VVNOOA,	
4	GMNOSA, GHNOSA, HTNOOD, VCNOSA,	!SALEN
	RONOSR)	

RONOSA = RONOLA

VCNOLA = VCNOSA

ELSE

IF (XVNOOA .GT. 1.0) THEN

C ESTAMOS EN UN NODO MONOFASICO VAPOR.

C SE CALCULA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA.

1 CALL HHMOOF(NRREVA, NRPRVA, NRCRVA, MUNOVA,
2 MUNOQA, KINOVA, DMNOOA, LGNOOA,
3 PRTUTA, HHMOOA)

!ENTRAN
!SALEN

C CALOR

QLNOTA = 0.0

DO I = 1, PRTUTA

1 QLNOOA(I) = HHMOOA(I) * (TMNOA(I) - TMNOOA) *
ARNOTA / PRTUTA

QLNOTA = QLNOTA + QLNOOA(I)

END DO

C FLUXES Y VELOCIDADES.

1 CALL NOMOOF (GHNOEA, GMNOEA, HTNOSA, LGNOOA,
2 PADOOR, QLNOTA, RNNOVA, RONOVA,
3 RRNOVA, VVNOOA,
4 GMNOSA, GHNOSA, HTNOOD, VCNOSA,
RONOSR)

!ENTRAN
!SALEN

RONOSA = RONOVA

VCNOLA = 0.0

ELSE

! NODO BIFASICO

C SE CALCULA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA.

1 CALL HHBIOF (ALNOOA, KINOLA, CPNOLA, RONOLA,
2 TINOPA, TMNOOA, PANOEPA, PANOPA,
3 RONOVA, HTNOLA, HTNOVA, SGNOOA,
4 MUNOLA, NRRELA, DMNOOA, MUNOPA,
5 GHOOLA, GMNOVA, PRTUTA,
HHFTOA, HHEBOA)

!ENTRAN
!SALEN

C CALOR CRITICO.

VCNOLA = GMNOLA * ARNOFA

1 CALL QLCROF (HHFTQA, HTNOVA, HINOLA, PANOEA,
2 RONOLA, ROMOVA, SGN00A, TMNO0A,
3 VCNOLA, PRTUTA,
QLCROA) !ENTRAN
!SALEN

C SE VERIFICA QUE NO SE REBASE EL CALOR CRITICO.

QLNOTA = 0.0

DO I = 1 , PRTUTA

XXQLOA = HHEBOA(I) * (TMNOA(I) - TMNO0A)

IF (ABS(XXQLOA) .GT. ABS(QLCROA(I))) THEN

QLNO0A(I) = QLCROA(I) * ARNOTA

ELSE

QLNO0A(I) = XXQLOA*ARNOTA

END IF

QLNOTA = QLNOTA + QLNO0A(I)

END DO I J

C FLUXES Y VELOCIDADES

1 CALL NOBIOF (ALNO0A, GHNOEA, GMNOEA, HTNOLA, !ENTRAN
2 HTNOVA, HPNOLA, HPNOVA, LGNO0A,
3 PADOOR, QLNOTA, RONOLA, ROMOVA,
4 RRNOLA, RRNOVA, VNN00A, XVNO0A,
5 GHNOSA, GMNOSA, HTNOOD, RONOSA,
RONOSR, VCNOSA, VCNOLA) !SALEN

END IF

END IF

C-----
C CAIDA DE PRESION EN EL NODO
C-----

CALL DPNOOF (ALNO0A, GMNOEA, GMNOSA, LGDMOA,
1 NRRELA, NRREVA, PADOOR, PANOEA,
2 RONOLA, ROMOVA, RRNOGA, RDN00A,
3 VCN0EA, VCNOSA, XVNOGA, RONOSA,
4 RONOSR, LGNO0A, RRNOCA, !ENTRAN

5

PDN00A)

ISALEN

RETURN
END

```

*****
C          RUTINA : MECIOF          *
C          PROGRAMO: EDGARDO J. ROLDAN VILLASANA *
C          FECHA   : 30 - AGO - 86   *
C          REVISION: 12 - MAY - 86   *
*****

```

```

SUBROUTINE MECIOF( TMDIPE, QLTDOA, QLTDOX, TMTBPE,
1 QLTBOA, QLTBOX, TMDIPE, QLDIOA,
2 QLDIOX, TMPAPE, QLPAAO, QLPAOX,
3 TMTAOX,                                IENTRAN
4 QLTDA, TMDIPD, QLTBAA, TMTBPD,
5 QLDIAA, TMDIPD, QLPAAA, TMPAPD ) I SALEN

```

```

C      ESTA RUTINA COORDINA LAS LLAMADAS A LOS METALES DE LAS DIFEREN-
C      TES SECCIONES DE TUBERIA QUE CONFORMAN LA CALDERA, PARA EL CAL-
C      CULO DE CALOR PERDIDO A LA ATMOSFERA Y LA DERIVADA DE LAS TEMPE-
C      RATURAS DEL METAL.

```

```

*****
C      ZONA DE DECLARACIONES          *
*****

```

```

C      ARDIFA - AREA TRANSVERSAL DE FLUJO EN EL DOMO INFERIOR [M**2]
C              REAL*4 ARDIFA
C      ARDITA - AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL EN EL DOMO
C              INFERIOR [M**2]
C              REAL*4 ARDITA
C      ARPAPA - AREA TRANSVERSAL AL FLUJO PARA UN TUBO EN CADA
C              TRAYECTORIA DE LAS PAREDES DE AGUA [M**2]
C              REAL*4 ARPAPA(8)
C      ARPATA - AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN CADA NODO DE
C              LAS PAREDES DE AGUA (AREA TOTAL DE UN TUBO) [M**2]
C              REAL*4 ARPATA(8,100)
C      ARTBFA - AREA TRANSVERSAL AL FLUJO PARA UN TUBO EN CADA
C              TRAYECTORIA DE LA TUBERIA BOMBAS-DOMO INFERIOR [M**2]
C              REAL*4 ARTBFA(5)
C      ARTBTA - AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN CADA NODO DE
C              LA TUBERIA BOMBAS-DOMO INFERIOR [M**2]
C              (AREA TOTAL DE UN TUBO)
C              REAL*4 ARTBTA(5,50)
C      ARTDFA - AREA TRANSVERSAL AL FLUJO PARA UN TUBO EN CADA
C              TRAYECTORIA DE LA TUBERIA DESCENDENTE [M**2]
C              REAL*4 ARTDFA(5)
C      ARTDTA - AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN CADA NODO DE

```

C LA TUBERIA DESCENDENTE (AREA TOTAL DE UN TUBO) [M**2] REAL*4 ARDTA(5,50)
 C DMDIEA - DIAMETRO EXTERNO DEL DOMO INFERIOR [M] REAL*4 DMDIEA
 C DMDIIA - DIAMETRO INTERNO DEL DOMO INFERIOR [M] REAL*4 DMDIIA
 C I - CONTADOR INTEGER I
 C J - CONTADOR INTEGER J
 C K - CONTADOR INTEGER K
 C LGDIAA - ESPESOR DEL AISLANTE EN EL DOMO INFERIOR [M] REAL*4 LGDIAA
 C LGDINA - LONGITUD (EN DIRECCION AXIAL) DEL DOMO INFERIOR [M] REAL*4 LGDINA
 C LGPAAA - ESPESOR DEL AISLANTE EN CADA TRAYECTORIA DE LAS PAREDES DE AGUA [M] REAL*4 LGPAAA(8)
 C LGPANA - LONGITUD DE LOS NODOS LA TUBERIA DE LAS PAREDES DE AGUA [M] REAL*4 LGPANA(8,100)
 C LGTBAA - ESPESOR DEL AISLANTE EN CADA TRAYECTORIA DE BOMBAS-DOMO INFERIOR [M] REAL*4 LGTBAA(5)
 C LGTBNA - LONGITUD DE LOS NODOS DE LA TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR [M] REAL*4 LGTBNA(5,50)
 C LGTDAA - ESPESOR DEL AISLANTE EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA DESCENDENTE [M] REAL*4 LGTDAA(5)
 C LGTDNA - LONGITUD DE LOS NODOS DE LA TUBERIA DESCENDENTE [M] REAL*4 LGTDNA(5,50)
 C MADIMA - MASA DEL METAL EN EL DOMO INFERIOR [KG] REAL*4 MADIMA
 C MAPAMA - MASA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA DE PAREDES DE AGUA [KG] REAL*4 MAPAMA(8,100)
 C MATBMA - MASA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA BOMBAS-DOMO INFERIOR [KG] REAL*4 MATBMA(5,50)
 C MATDMA - MASA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA DESCENDENTE [KG] REAL*4 MATDMA(5,50)
 C NRBOOA - NUMERO DE BOMBAS INTEGER NRBOOA
 C NRPAA - NUMERO DE TUBOS POR TRAYECTORIA DE PAREDES DE AGUA INTEGER NRPAA(8)
 C NRNTBA - NUMERO DE NODOS EN CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA QUE UNE BOMBAS CON EL DOMO INFERIOR INTEGER NRNTBA(5)

C NRNTDA - NUMERO DE NODOS EN LA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
C DESCENDENTE
INTEGER NRNTDA(5)
C NRPATA - NUMERO DE TUBOS POR TRAYECTORIA DE PAREDES DE AGUA
C INTEGER NRPATA(8)
C NRTETA - NUMERO DE TUBOS POR CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA DE
C LAS BOMBAS AL DOMO INFERIOR
C INTEGER NRTETA(5)
C NRDTTA - NUMERO DE TUBOS POR CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA
C DESCENDENTE
C INTEGER NRDTTA(5)
C NRTFAA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE PAREDES DE AGUA
C INTEGER NRTFAA
C NRTTBA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE LA TUBERIA QUE UNEN LA
C DESCARGA DE LAS BOMBAS CON EL DOMO INFERIOR
C INTEGER NRTTBA
C NRTTDA - NUMERO DE TRAYECTORIAS DE LA TUBERIA DESCENDENTE
C INTEGER NRTTDA
C PRDINL - PARAMETRO QUE INDICA EL TIPO DE NODO QUE TIENE
C EL DOMO INFERIOR, ESTA VARIABLE ESTA ASOCIADA A LA
C VARIABLE PRDIA DE LA SIGUIENTE MANERA:
C PRDIA = 1
C PRDINL = .TRUE. DOMO TOTALMENTE AISLADO
C PRDINL = .FALSE. DOMO SIN AISLAR
C PRDIA = 2
C NO IMPORTA EL VALOR DE PRDINL
C LOGICAL PRDINL
C PRPANL - PARAMETRO QUE INDICA LOS TIPOS DE NODOS QUE TIENE LA
C TUBERIA DE PAREDES DE AGUA, ESTA VARIABLE ESTA
C ASOCIADA A LA VARIABLE PRTPAA DE LA SIGUIENTE MANERA:
C PRTPAA = 1
C PRPANL = .TRUE. NODO TOTALMENTE AISLADO
C PRPANL = .FALSE. NODO SIN AISLAR
C PRTPAA = 2
C NO IMPORTA EL VALOR DE PRPANL
C LOGICAL PRPANL(8,100)
C PRDIA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE PARED EN EL DOMO INFERIOR
C INTEGER PRDIA
C PRTBNL - PARAMETRO QUE INDICA LOS TIPOS DE NODOS QUE TIENE LA
C TUBERIA BOMBAS-DOMO INFERIOR, ESTA VARIABLE ESTA
C ASOCIADA A LA VARIABLE PRTTBA DE LA SIGUIENTE MANERA:
C PRTTBA = 1
C PRTBNL = .TRUE. NODO TOTALMENTE AISLADO
C PRTBNL = .FALSE. NODO SIN AISLAR
C PRTTDA = 2
C NO IMPORTA EL VALOR DE PRTBNL
C LOGICAL PRTBNL(5,50)
C PRTDNL - PARAMETRO QUE INDICA LOS TIPOS DE NODOS QUE TIENE LA
C TUBERIA DESCENDENTE. ESTA VARIABLE ESTA ASOCIADA A LA
C VARIABLE PRTTDA DE LA SIGUIENTE MANERA:
C PRTTDA = 1
C PRTDNL = .TRUE. NODO TOTALMENTE AISLADO

```

C          PRSTDNL = .FALSE. NODO SIN AISLAR
C          PRSTDA = 2
C          NO IMPORTA EL VALOR DE PRSTDNL
C          LOGICAL PRSTDNL(5,50)
C  PRTPAA - NUMERO DE TEMPERATURAS EN CADA NODO DE LA PARED DE
C          AGUA
C          INTEGER PRTPAA(8,100)
C  PRITBA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE LA PARED EN CADA NODO DE LA
C          TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR
C          INTEGER PRITBA(5,50)
C  PRITDA - NUMERO DE TEMPERATURAS DE LA PARED EN CADA NODO DE
C          CADA TRAYECTORIA DE LA TUBERIA DESCENDENTE
C          INTEGER PRITDA(5,50)
C  QLDIOA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN EL DOMO INFERIOR [J/S]
C          REAL*4 QLDIOA(2)
C  QLDIAA - CALOR QUE PIERDE EL DOMO INFERIOR A LA ATMOSFERA [J/S]
C          REAL*4 QLDIAA
C  QLDIOX - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
C          AL DOMO INFERIOR [J/S]
C          REAL*4 QLDIOX
C  QLPAAO - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
C          PAREDES DE AGUA [J/S]
C          REAL*4 QLPAAO(8,100,2)
C  QLPAAO - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
C          A CADA NODO DE LAS PAREDES DE AGUA [J/S]
C          REAL*4 QLPAAO(8,100)
C  QLPAAA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LAS PAREDES DE AGUA
C          A LA ATMOSFERA [J/S]
C          REAL*4 QLPAAA(8,100)
C  QLTBOX - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
C          A CADA NODO DE LA TUBERIA
C          BOMBAS - DOMO INFERIOR [J/S]
C          REAL*4 QLTBOX(5,50)
C  QLTRAA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LA TUBERIA
C          BOMBAS-DOMO INFERIOR LA ATMOSFERA [J/S]
C          REAL*4 QLTRAA(5,50)
C  QLTDGX - CALOR PROVENIENTE DE LOS GASES DE COMBUSTION
C          A CADA NODO DE LA TUBERIA DESCENDENTE [J/S]
C          REAL*4 QLTDGX(5,50)
C  QLTDAA - CALOR QUE PIERDEN LOS NODOS DE LA TUBERIA DESCENDENTE
C          A LA ATMOSFERA [J/S]
C          REAL*4 QLTDAA(5,50)
C  QLTBOA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
C          BOMBAS - DOMO INFERIOR [J/S]
C          REAL*4 QLTBOA(5,50,2)
C  QLTDQA - CALOR GANADO POR EL FLUIDO EN CADA NODO DE LA TUBERIA
C          DESCENDENTE [J/S]
C          REAL*4 QLTDQA(5,50,2)
C  TMATOX - TEMPERATURA AMBIENTE [K]
C          REAL*4 TMATOX
C  TMDIPE - TEMPERATURA DEL METAL DEL DOMO INFERIOR,
C          LA POSICION 1 DEL TERCER ELEMENTO DEBE SER

```

C LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO , SI PRDIA=2 [K]
 REAL*4 TMDIPE(2)
 C TMDIPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN EL [K/S]
 C DOMO INFERIOR
 REAL*4 TMDIPD(2)
 C TMPAPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN LA TUBERIA [K/S]
 C PAREDES DE AGUA
 REAL*4 TMPAPD(8,100,2)
 C TMPAPE - TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C PAREDES DE AGUA, LA POSICION 1 DEL TERCER
 C ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO,
 C SI PRTPAA = 2 [K]
 REAL*4 TMPAPE(8,100,2)
 C TMTBPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN LA TUBERIA [K/S]
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR
 REAL*4 TMTBPD(5,50,2)
 C TMTBPE - TEMPERATURA DEL METAL EN CADA NODO DE LA TUBERIA
 C BOMBAS - DOMO INFERIOR, LA POSICION 1 DEL TERCER
 C ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA DEL LADO AISLADO,
 C SI PRITBA = 2 [K]
 REAL*4 TMTBPE(5,50,2)
 C TMTDPD - DERIVADA DE LA TEMPERATURA DEL METAL EN LA TUBERIA [K/S]
 C DESCENDENTE
 REAL*4 TMTDPD(5,50,2)
 C TMTDPE - TEMPERATURA DEL METAL DE LA TUBERIA DESCENDENTE, LA
 C POSICION 1 DEL TERCER ELEMENTO DEBE SER LA TEMPERATURA
 C DEL LADO AISLADO , SI PRITDA=2 [K]
 REAL*4 TMTDPE(5,50,2)
 C VNDINA - VOLUMEN DE DOMO INFERIOR [M**3]
 REAL*4 VNDINA
 C XXQLOA - VARIABLE AUXILIAR QUE GUARDA LOS CALORES DE CADA LADO
 C DE LAS PAREDES DEL TUBO [J/S]
 REAL*4 XXQLOA(2)
 C XXTMOA - TEMPERATURA AUXILIAR DEL METAL [K]
 REAL*4 XXTMOA(2)

C*****
 C PARAMETROS *
 C*****

COMMON /AIPAOF/ LGPAAA, MAPAMA
 COMMON /AIDIOF/ LGDIAA, MADIMA
 COMMON /AITBOF/ LGTBAA, MATBMA
 COMMON /AITDOF/ LGTDAA, MATDMA
 COMMON /DIDIOF/ ARDIFA, ARDITA
 COMMON /DIPAOF/ ARPAFA, ARPATA, LGPANA

COMMON /DITBOF/ ARTBFA, ARTBTA, LGTBNA
COMMON /DITDOF/ ARTDFA, ARTDTA, LGTDNA
COMMON /DMDIOF/ DMDIIA, DMDIEA, VNDINA
COMMON /NRBOOF/ NRBOOA
COMMON /NRDIOF/ PRDIA
COMMON /NRPAOF/ NRTPAA, NRPATA, NRPAA, PRTPAA
COMMON /NRTBOF/ NRTEBA, NRTETA, NRNTBA, PRTEBA
COMMON /NRTDOF/ NRTIDA, NRTDTA, NRNTDA, PRTIDA
COMMON /PRDIOF/ PRDINL
COMMON /PRPAOF/ PRPANL
COMMON /PRTBOF/ PRIBNL
COMMON /PRTDOF/ PRIDNL

C*****
C ZONA EJECUTABLE
C*****

C METAL DE TUBERIA DESCENDENTE
C-----

C SE VARIA CADA UNA DE LAS TRAYECTORIAS.

DO I = 1 , NRTIDA

C SE VARIAN LOS NODOS POR TRAYECTORIA.

DO J = 1 , NRNTDA(I)

C SE NORMALIZA EL CALOR QUE GANA EL FLUIDO EN CADA PARED DEL NODO PARA UN SOLO TUBO.

DO K = 1 , PRITDA(I,J)

XXQLOA(K) = QLTDOA(I,J,K) / NRTDTA(I)

KXTMOA(K) = TMTDPE(I,J,K)

END DO I K

C SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA EL CALOR QUE SE PIERDE A


```

C      LA ATMOSFERA Y LAS DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DEL METAL
      CALL METAOF(PRTDNL(I,J), PRTDA(I,J), XXTMOA
1         , TMATOX      , LGTDNA(I,J), LGTDAA(I)
2         , ARTDTA(I,J), XXQLOA      , MATDMA(I,J),
3         , QLTDOX(I,J), XXTMOA      ,
4         , QLTDAI(I,J))
      IENTRAN
      ISALEN

C      CALOR TOTAL QUE SE PIERDE A LA ATMOSFERA EN ESTE NODO.
      QLTDAI(I,J) = QLTDAI(I,J) * NRITDA(I)

      END DO      I J

      END DO      I I

```

```

-----
C      METAL DE TUBERIA BOMBAS - DOMO INFERIOR
-----

```

```

C      ESTA TUBERIA SE TOMA EN CUENTA SOLO SI SU LONGITUD ES MAYOR A CERO.
      IF (NRBOOA .GT. 0) THEN

C      SE VARIA CADA UNA DE LAS TRAYECTORIAS
      DO I = 1 , NRTTBA

C      SE VARIAN LOS NODOS POR TRAYECTORIA
      DO J = 1 , NRNTBA(I)

C      SE NORMALIZA EL CALOR QUE GANA EL FLUIDO EN CADA PARED
C      DEL NODO PARA UN SOLO TUBO.
      DO K = 1 , PRITBA(I,J)

          XXQLOA(K) = QLTBOA(I,J,K) / NRTTBA(I)
          XXTMOA(K) = TMTBPE(I,J,K)

      END DO      I K

C      SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA EL CALOR QUE SE PIERDE
C      A LA ATMOSFERA Y LAS DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DEL
C      METAL
      CALL METAOF(PRTBNL(I,J), PRTBA(I,J), XXTMOA
1         , TMATOX      , LGTBNA(I,J), LGTBAA(I)
2         , ARTBTA(I,J), XXQLOA      , MATBMA(I,J),
3         , QLTBOX(I,J), XXTMOA      ,
4         , QLTBAA(I,J))
      IENTRAN
      ISALEN

```

C CALOR TOTAL QUE SE PIERDE A LA ATMOSFERA EN ESTE NODO.

QLTBAA(I,J) = QLTBAA(I,J) * NRTBTA(I)

END DO I J

END DO I I

END IF

C-----
C METAL DEL DOMO INFERIOR
C-----

C SE LLAMAN A LA RUTINA QUE CALCULA EL CALOR QUE SE PIERDE A LA
C ATMOSFERA Y LAS DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DEL METAL.

CALL METAOF(PRDINL, PRDIA, TMDIPE, TMATOX,
1 LGDINA, DMDIAA, ARDITA, QLDIOA,
2 MADIMA, QLDIOX, TMDIPD, IENTRAN
3 QLDIAA) ISALEN

C-----
C METAL DE PAREDES DE AGUA
C-----

C SE VARIA CADA UNA DE LAS TRAYECTORIAS.

DO I = 1 , NRTPAA

C SE VARIAN LOS NODOS POR TRAYECTORIA.

DO J = 1 , NRNPA(I)

C SE NORMALIZA EL CALOR QUE GANA EL FLUIDO EN CADA PARED DEL
C NODO PARA UN SOLO TUBO.

DO K = 1 , PRTPAA(I,J)

XXQLOA(K) = QLPAOA(I,J,K) / NRPATA(I)

XXTMOA(K) = TMPAPE(I,J,K)

END DO I K

C SE LLAMA A LA RUTINA QUE CALCULA EL CALOR QUE SE PIERDE A
C LA ATMOSFERA Y LAS DERIVADAS DE LAS TEMPERATURAS DEL METAL

CALL METAOF(PRPANL(I,J), PRTPAA(I,J), XXTMOA
1 TMATOX , LGPANA(I,J), LGPAAA(I) ;
2 ARPATA(I,J), XXQLOA , MAPAMA(I,J),

3
4

QLPAOX(I,J), XKTMOA
QLPAAA(I,J)

IENTRAN
ISALEN

C

CALOR TOTAL QUE SE PIERDE A LA ATMOSFERA EN ESTE NODO.

QLPAAA(I,J) = QLPAAA(I,J) + NRPATA(I)

END DO I J

END DO I I

RETURN
END

APENDICE 4

USO DEL MODELO

Ahora bien. Los habitantes de Vega no nos envían estas instrucciones sólo para divertirse; lo que pretenden es que construyamos una máquina.

Carl Sagan,
"Contact", (1985)

I N D I C E

APENDICE 4. USO DEL MODELO

A4.1	CARACTERIZACION DEL GENERADOR DE VAPOR A SIMULAR	253
A4.1.1	Parámetros.	254
A4.1.2	Condiciones de Operación.	256
A4.2	MANEJO DE DATOS	258
A4.2.1	Parámetros.	258
A4.2.2	Condiciones Iniciales Locales.	262
A4.2.3	Condiciones de la Simulación.	267
A4.2.4	Resultados.	268

APENDICE 4

USO DEL MODELO

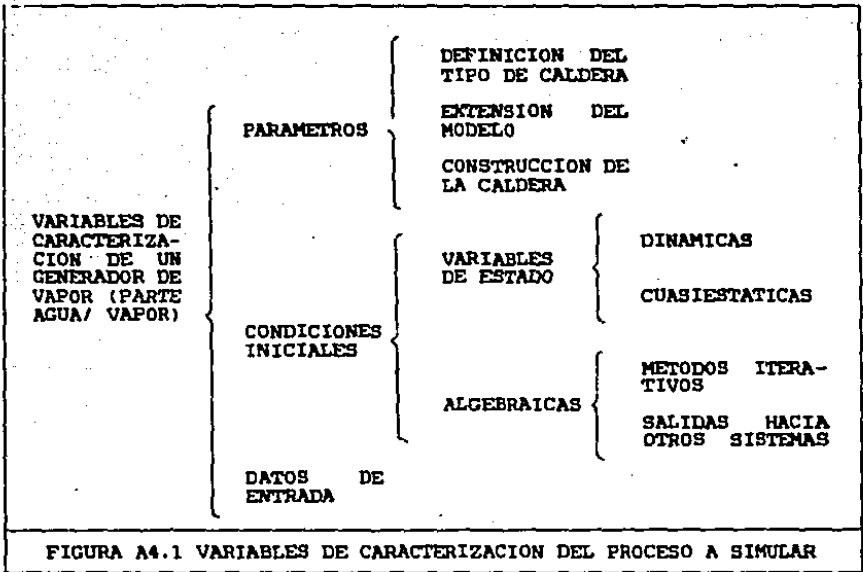
En este apéndice se ejemplifica la forma de utilizar el modelo de la caldera en su parte agua/vapor mediante la selección de datos de un generador de vapor específico cuyo comportamiento se desea reproducir. Conviene haber visto la formulación matemática del modelo presentada en el Capítulo 4 antes de leer el presente apéndice, para una mejor comprensión.

Se hace en primer término una clasificación de los datos necesarios para caracterizar al generador de vapor escogido y se describe, finalmente, de que manera deben alimentarse los datos a la computadora.

A4.1 Caracterización del Generador de Vapor a Simular.

Para simular el comportamiento de un generador de vapor en su parte agua/vapor es menester alimentar a la computadora con una serie de datos que especifiquen dicha caldera (caracterización) tanto física como operacionalmente. Estos datos se pueden dividir en dos grupos principales, los parámetros físicos de la caldera y sus condiciones de operación desde donde se desee iniciar la simulación. Tanto los parámetros como las condiciones de operación deben ser asignadas a variables específicas de una manera fácil para el usuario. En la Figura, A4.1 se propone una división de los datos de caracterización de

una caldera.



A4.1.1 Parámetros.-

Los parámetros físicos pueden ser divididos en tres clases: parámetros de definición del tipo de caldera, parámetros de extensión del modelo y parámetros de construcción del generador de vapor.

PARAMETROS DE DEFINICION DEL TIPO DE CALDERA. El conjunto de estos parámetros especifican el tipo de generador de vapor a simular. Por

ejemplo, deciden si se trata de un generador de vapor de circulación forzada o natural.

PARAMETROS DE EXTENSION DEL MODELO. Son aquellos que definen el número de partes en que se divide el generador de vapor para efectos del modelado. Por ejemplo, contienen el número de trayectorias y nodos considerados.

PARAMETROS DE CONSTRUCCION DE LA CALDERA. Son los parámetros físicos del proceso real adaptados a las necesidades del modelo. Por ejemplo, el diámetro equivalente de un grupo de tubos en paralelo.

Como ejemplo supóngase la siguiente situación ficticia. En la caldera real existen dos equipos unidos por dos tubos diferentes sin aditamentos. El modelo contempla la posibilidad de que exista una bomba en cualquiera de los tubos. Si estos tubos desean ser simulados, el usuario debe indicar que no existen bombas en los tubos; se ha definido un parámetro de definición del tipo de caldera. El usuario puede decidir agrupar los dos tubos en una sola trayectoria; el número de trayectorias es un parámetro de extensión del modelo. Por otro lado, es necesario definir el diámetro interno de la trayectoria equivalente; el usuario debe definir un diámetro promedio adecuado; éste es un parámetro de construcción. No todos los parámetros de construcción son adaptaciones de la realidad; si sólo existiera un tubo en el proceso real, el diámetro equivalente (parámetro de construcción) coincidiría con el diámetro real.

A4.1.2 Condiciones de operación.-

Las condiciones de operación están definidas por el conjunto de valores que toman las variables que definen el estado del sistema. De manera natural las condiciones de operación pueden dividirse en condiciones iniciales locales y datos de entrada.

CONDICIONES INICIALES LOCALES. Son todas aquellas variables internas que es necesario definir antes de comenzar una sesión de simulación. Las condiciones iniciales locales se clasifican en dos tipos: variables de estado y variables inicializables algebraicas.

Las variables de estado son las que definen completamente un sistema. Su inicialización es suficiente para indicar el estado del sistema, físico y operacional, desde el cual parte la simulación; cualquier otra variable interna puede ser obtenida en función de las variables de estado y los datos de entrada.

Las variables de estado se clasifican en variables dinámicas y variables cuasiestáticas.

Una variable de estado dinámica tiene asociada una derivada con respecto al tiempo la cual se integra para representar el comportamiento temporal de esta variable. También se utiliza el término "inercial" para denominar a esta tipo de variables pues ante una perturbación del sistema, tardan un cierto tiempo en estabilizarse.

Las variables de estado cuasiestáticas son las que se ajustan inmediatamente a las nuevas condiciones de un sistema cuando se le perturba. Matemáticamente, el ajuste se hace con técnicas algebraicas. Estas variables no están asociadas a derivadas temporales. Las variables de estado lógicas son cuasiestáticas por naturaleza propia.

Las variables inicializables algebraicas son aquellas que, aunque su inicialización no necesariamente define al sistema, conviene inicializar por las razones dadas en los siguientes dos párrafos. Estas variables se clasifican en variables asociadas a métodos iterativos y variables de salida a otros sistemas. Es posible que alguna(s) variable(s) de estado sea(n) ocupada(s) como variable(s) inicializable(s) algebraica(s) en cualquiera de sus dos categorías.

Las variables involucradas en sistemas de ecuaciones algebraicas simultáneas, requieren de algún método matemático iterativo de convergencia. Su inicialización es conveniente para una convergencia eficaz que afecta, entre otras cosas, al tiempo de ejecución.

Las variables de salida a otros sistemas son las calculadas por el generador de vapor que son requeridas por otros sistemas. La inicialización de estas variables no es necesaria para la solución matemática del modelo de la caldera pero es importante su definición para el proceso del acoplamiento con otros sistemas. Como una muestra de la importancia de las variables de salida considérese la situación de que se desean simular dos sistemas acoplados que se ejecutan secuencialmente; si el Sistema A corre antes que el Sistema B pero no

se tienen definidas las variables de salida del Sistema B, el primero tomará valores "basura" al iniciar la simulación. Un mal resultado de la simulación resulta obvio.

Los datos de entrada están formados por el conjunto de variables generados por otros sistemas que son necesarios para la solución del modelo local.

Debe existir una congruencia en las condiciones iniciales locales. Definir arbitrariamente alguna de ellas, de cualquier tipo, podría provocar la inestabilidad del sistema. Es una buena idea iniciar una simulación desde un estado estable o de una condición de operación definida por el mismo modelo al final de una sesión de simulación previa.

Una vez definidos los parámetros y las condiciones iniciales locales del sistema se tienen cero grados de libertad en el modelo matemático y es posible comenzar una simulación.

A4.2 Manejo de Datos

En esta sección se resume la manera en que hay que alimentar los parámetros y las condiciones iniciales locales a la computadora para caracterizar al generador de vapor y definir su estado operacional.

A4.2.1 Parámetros.-

Los parámetros que caracterizan la caldera son asignados de dos maneras: por lectura directa y por cálculo automático.

Los parámetros de lectura directa debe proporcionarlos el usuario directamente en un archivo de datos llamado NUMEOF.DAT que contiene, para facilidad del usuario, indicaciones acerca de cuales datos escribir y en qué orden. Estos parámetros se leen secuencialmente en bloques. Cada bloque corresponde a un módulo del programa final del modelo. Las rutinas lectoras de parámetros se listan a continuación en el mismo orden en que son invocadas por el programa.

- DONIPF
- FLSDPF
- MEDOPF
- ITERPF
- MECIPF
- CONTPF

Los parámetros leídos por los anteriores archivos se resumen en seguida:

PARAMETROS DE DEFINICION DEL TIPO DE CALDERA

- Número de bombas de circulación forzada (cero si no existen).
- Parámetro que indica si el domo, tubería descendente y tubería de descarga de las bombas reciben calor desde el hogar.
- Parámetro indicativo si la tubería descendente está aislada, semiaislada o sin aislante.
- Parámetro indicativo si la tubería de descarga de las bombas está aislada, semiaislada o sin aislante.
- Parámetro indicativo si el domo inferior está aislado, sin aislante.
- Parámetro indicativo si las paredes de agua están aisladas, semiaisladas o sin aislante.

PARAMETROS DE EXTENSION DEL MODELO

- Número de trayectorias en la tubería descendente.
- Número de nodos en cada trayectoria de la tubería descendente.
- Número de trayectorias en la tubería de descarga de bombas (si existen bombas).
- Número de nodos en cada trayectoria de la tubería de descarga de bombas (si existen bombas).
- Número de polos del motor.
- Número de trayectorias en paredes de agua.
- Número de nodos totales en cada trayectoria de las paredes de agua.
- Número de válvulas de seguridad en el domo.

PARAMETROS DE CONSTRUCCION

- Peso molecular del gas que llena la caldera durante el arranque.
- Constantes de las válvulas de seguridad, venteos y drenes del domo superior.
- Presiones en que abre y cierra cada una de las válvulas de seguridad.
- Constantes de las válvulas que simulan la rotura de las paredes de agua.
- Radio interno y longitud del domo superior.
- Masa del metal del domo.
- Espesor del aislante del domo superior, y en cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Número de nodos que reciben calor en cada trayectoria de las paredes de agua.
- Número de tubos de cada trayectoria de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.

- Diámetros interno y externo y longitud de cada trayectoria de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Seno de los ángulos de inclinación de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas y paredes de agua (se indican por tramos indicando la longitud en que existe un cambio de la inclinación, esto es longitud y número de los tramos).
- Altura y volumen del cabezal de las bombas de circulación forzada.
- Eficiencias mínima y nominal de las bombas de circulación forzada.
- Velocidad angular nominal de cada bomba de circulación forzada.
- Momento de inercia de cada moto-bomba.
- Par de fricción de cada bomba.
- Constante de la caída de presión en la tubería de retorno de las bombas de circulación forzada.
- Punto de ajuste, ganancia y constante de tiempo para los controles del nivel y la presión del domo superior.
- Coeficientes de los ajustes polinomiales de las funciones: capacidad calorífica del metal, conductividad térmica del metal, corriente eléctrica demandada por cada motor, par de cada motor, par de cada bomba y curva característica de cada bomba (flujo contra caída de presión).

Algunos parámetros de construcción son calculados automáticamente por el programa, éstos, se generan a partir de los listados arriba. Las rutinas encargadas de efectuar tales cálculos son las siguientes:

- PAR10F
- PARCOF

A continuación se da una lista de los parámetros calculados automáticamente.

- Número de ecuaciones a resolver simultáneamente en el ciclo iterativo.

- Diámetro del domo superior.
- Volumen del domo superior.
- Área de transferencia del domo superior.
- Volumen del domo inferior.
- Número de temperaturas de metal en cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Volumen de cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Área transversal al flujo para cada trayectoria de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Área de transferencia de calor para cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Longitud de cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Relación L/D para cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Masa del metal en cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Volumen total de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua.
- Volumen total de la caldera.
- Volumen total de la parte descendente del ciclo.
- Matriz para simulación del llenado. Relaciona el volumen inundado con la altura, longitud, número de nodo y seno del ángulo de inclinación del nodo en que se encuentra el nivel de agua.
- Distribución del calor, proveniente del hogar, en la caldera.

A4.2.2 Condiciones Iniciales Locales.-

Los dos tipos de condiciones iniciales locales son definidas por el

nismo subprograma denominado CONDIN. Esta rutina lee en un archivo las variables que representan las condiciones iniciales locales. Se tienen definidos un conjunto básico de condiciones iniciales locales y se agregó un procedimiento interactivo para que el usuario decida cuál desea utilizar. Por supuesto, dicho conjunto puede crecer según las necesidades del usuario.

Por otro lado, las variables de entrada deben ser generados por otros sistemas, sin embargo mientras no se haya acoplado el sistema propio con otros, hay que emular estas variables de alguna manera. Los datos de entrada son definidos por el subprograma llamado DATEN. Esta rutina lee en un archivo las variables de entrada. Se tienen definidos una serie de archivos de lectura que guardan diferentes conjuntos de datos de entrada y se agregó un procedimiento interactivo para que el usuario decida cuál desea utilizar. Pueden crearse más archivos si se desean efectuar pruebas distintas a las diseñadas originalmente.

Una característica del subprograma DATEN es que puede variar los datos de entrada durante la simulación para introducir perturbaciones al sistema. El usuario puede escoger entre cuatro diferentes tipos de variación para cualquiera variable que se desee perturbar: polinomios cúbicos, función senoidal, función exponencial y series de rectas o función de quiebres. En todos los casos hay que especificar, interactivamente si se desea, los coeficientes de la función seleccionada o los puntos de quiebre (tiempo y valor que toma la variable) de las rectas, en su caso.

Las variables inicializables locales se listan a continuación agrupadas según su clasificación.

VARIABLES DE ESTADO DINAMICAS

- Masa de aire en el domo superior.
- Masa de líquido en el domo superior.
- Presión de vapor en el domo superior.
- Aperturas de las válvulas de purga y venteo del domo superior.
- Temperaturas del metal del domo superior (3).
- Entalpia del fluido en cada nodo de la tubería descendente.
- Temperatura de metal en cada nodo de la tubería descendente.
- Entalpia del fluido en cada nodo de la tubería de descarga de las bombas de circulación forzada.
- Temperatura de metal en cada nodo de la tubería de descarga de las bombas de circulación forzada.
- Entalpia del fluido en el domo inferior.
- Temperatura de metal del domo inferior.
- Entalpia del fluido en cada nodo de las paredes de agua.
- Temperatura de metal en cada nodo de las paredes de agua.
- Nivel del líquido en las paredes de agua.
- Velocidad angular de las bombas de circulación forzada.
- Masa del líquido total de la caldera (para proceso de llenado).

VARIABLES DE ESTADO CUASIESTATICAS

- Flujo másico a la entrada de cada trayectoria de la tubería descendente.
- Flujo másico a la entrada de cada trayectoria de la tubería de descarga de las bombas de circulación forzada.

- Flujo másico a la entrada de cada trayectoria de las paredes de agua.

VARIABLES INICIALIZABLES ALGEBRAICAS ITERATIVAS

- Flujo másico a través de cada bomba de circulación forzada.
- Derivada de la presión total en el domo con respecto al tiempo.

VARIABLES DE SALIDA A OTROS SISTEMAS

- Entalpía de la mezcla gaseosa en el domo superior.
- Presión total en el domo superior.
- Nivel del agua en el domo superior.
- Flujo másico a través de la purga del domo superior.
- Temperatura del fluido en el domo superior.
- Fracción molar del gas incondensable en la fase gaseosa del domo superior.
- Entalpía promedio del flujo de rotura de paredes de agua.
- Flujo másico a través de la rotura de paredes de agua.
- Presión diferencial en cada bomba de circulación forzada.
- Corriente eléctrica demandada por cada motor de las bombas.

VARIABLES DE ENTRADA DESDE OTROS SISTEMAS

- Presión atmosférica.
- Temperatura ambiente.
- Presión del hogar.

- Presión en la descarga de la purga continua del domo superior.
- Entalpía del agua de alimentación.
- Densidad del agua de alimentación.
- Flujo másico hacia el sobrecalentador.
- Derivadas de las aperturas de las válvulas de venteo y purga del domo superior.
- Derivadas de las aperturas de las válvulas que representan la rotura de las paredes de agua.
- Frecuencia de la corriente eléctrica entregada a cada motor de las bombas.
- Voltaje de la corriente eléctrica entregada a cada motor de las bombas.

Debido a la importancia que tienen el nivel y la presión del domo superior las variables

- flujo másico del agua de alimentación y
- flujo de calor al domo superior y a cada nodo de la tubería descendente, tubería de descarga de las bombas, domo inferior y paredes de agua

no se leen con la rutina DATEN sino que se controlan dinámicamente con las rutinas CONTOF y CIRLOF que representan un controlador proporcional e integral (se mencionó anteriormente que los puntos de ajuste, ganancias y constantes de tiempo del control se leen con los demás parámetros).

A4.2.3 Condiciones de la Simulación.-

El subprograma NGUIA, antes de iniciar una sesión de simulación pregunta por las condiciones generales de la simulación. El usuario debe proporcionar los siguientes datos:

- Tiempo total de simulación.
- Método de solución de las ecuaciones simultáneas algebraicas:
 1. Método de Sustituciones sucesivas
 2. Método de Newton-Raphson
 3. Método de Broyden
- Máximo error relativo permitido en la convergencia
- Número máximo de iteraciones en la convergencia
- Método de integración:
 1. Método de Euler
 2. Método de Euler hacia atrás
 3. Método de Regla trapezoidal
 4. Método del polígono mejorado
 5. Método de Runge-Kutta de tercer orden
 6. Método de Runge-Kutta-Heun
 7. Método de Runge-Kutta de cuarto orden
 8. Método de Runge-Kutta-Merson
 9. Método para solución explícita
 10. Método de paso variable de Gear
 11. Método de paso variable de Shampine.
- Paso de integración.

- Número de puntos a imprimir.
- Se desea cálculo de jacobiano?
- Número de jacobianos que se desean calcular.
- Tiempo al cual se desea el cálculo de cada jacobiano.

A4.2.4 Resultados.-

La variable que guarda el número de puntos a imprimir sirve para espaciar equidistantemente en el tiempo los resultados de la simulación. La información se reporta de tres maneras diferentes: información en la pantalla durante la simulación, almacenamiento de variables en archivos y estadísticas de la simulación.

La información desplegada en la pantalla durante la simulación debe definirla el usuario en la rutina IMPRIME. Se escribirán tantos puntos como los deseados por el usuario. Puede desplegarse cualquier variable que se desee, incluyendo el tiempo.

Se tienen dos tipos de almacenamiento de variables en archivos; almacenamiento de variables para el seguimiento del modelo y almacenamiento de las variables que representan las condiciones iniciales pero al final de la simulación.

El almacenamiento de variables para el seguimiento del modelo (valores de variables importantes en el proceso de generación de vapor) se hace desde la rutina IMPRIME, en archivos definidos automáticamente. Las variables a imprimir puede escogerlas el usuario. Se imprimen ocho variables por archivo (incluyendo el tiempo) y el formato de salida puede ser aprovechado por programas

normales de graficación.

El almacenamiento de variables de las condiciones iniciales al final de la simulación sirve para continuar una simulación si el tiempo total definido por el usuario fue insuficiente o si se deseaba llegar a un estado estable y éste será, posteriormente, un punto de partida para otras simulaciones.

Las estadísticas de la simulación se guardan en el archivo SIM.DAT y contiene la fecha y la hora de la simulación el tiempo de simulación total, el método y paso de integración utilizados y el tiempo máximo de ejecución (del procesador) por paso de integración. Este archivo es útil para verificar si la ejecución corre en tiempo real, por ejemplo.

REFERENCIAS

...En suma, los profanos no hubieran entendido nada y se creyó conveniente dar a conocer al mundo los resultados de aquella investigación.

Jules Verne,
"Le Secret de Maston"

REFERENCIAS

- Ackasa A.Z., "Teorical Feedback Analysis in Boiling Water Reactors", ANL-6221, October, (1960).
- Alanis Cantú R., "Simulación de los Procesos termohidráulicos en la Vasija de un Reactor Nuclear tipo BWR", Tesis para obtener el título de Fisico, Facultad de Ciencias Fisico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, (1984).
- Albornoz Bueno A., "Implementación (sic) de un Modelo de Reactor BWR y Simulación de Transitorios Operacionales de la Central nucleoelectrica Laguna Verde", Proyecto terminal para obtener el título de Ingeniero Fisico, División de ciencias básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, (1985).
- American Nuclear Society "Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operation Training", ANS Standars Committee Working Group ANS-3.5, La Grange Park, Illinois, (1985).
- Anderson P.M., Siwanan Nanakorn, "An Analysis and Comparison of Certain Low-Order Boiler Models", ISA Transactions, V 14 (1), p 17, (1975).
- Anderson J.H., Kwan H.W., Qualtrough G.H., "Dynamic Models for Power Station Boilers", Control Convention of the Unit Kingdom, Conference on Automation and Computation, (1968).

- ASHRAE, "Handbook and Products Directory (Fundamentals)", American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, New York, p 15.29, (1977).
- Barry R.E., Capellari I.J., Faubert F.M., Singh T., "Steady-State Digital Computer Model for Supercritical Steam Generators", Power Division of the ASME, joint ASME/IEEE Power Generation Headquarters, May 28, (1981).
- Bell R.D., Rees N.W., Lee K.B., "Models of Large Boiler-Turbine Plant", IFAC Symposium 1977, Melbourne, Australia, p 469, (1977).
- Bruges E.A., Latta B., Ray A.K., "New Correlations of the Coefficient of Viscosity of Water and Steam up to 1000 bar and 1000 C", Int. J. Heat Mass Transfer, V 9, p 465, Pergamon Press, (1966).
- Castelazo I., Kuhlmann F., Méndez E., González S., "Large Scale Power Plant Model Development Part II: Coupling Process", Proceedings of the International Conference on Power Plant Simulation, Cuernavaca, Morelos, México, (1984).
- Chato J.C., J. Am. Soc. Heating Refrig. Aircond. Engrs., p 52, Feb. (1962).
- Chen J.C., "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", ASME preprint 63-HT-34, American Society of Mechanic Engineers, (1963).

- Chien K.L., Ergin E.I., Allyn L.A., "Dynamic Analysis of a Boiler", Transaction ASME, November, p 1809, (1958).
- Christy D.P., Watson H.J., "The Application of Simulation: A Survey of Industry Practice", Interfaces V 3, p 47, 5 october, (1983).
- Dallas H.G., Sauter D.M., "Field Testing for Verification of a Dynamic Model", ASME Paper 61-SA-68, ASME Summer Annual Meeting (1961).
- Daniels J.H., Enns M., Hottenstine R.D., "Dynamic Representation of a Large Boiler-Turbine Unit", ASME Preprints 61-SA-69, USA, (1961).
- Drew and Generaux, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., V 32, p 16-17, (1936).
- Eckert E.R.G., Drake K.M., "Heat and mass Transfer", Mc Graw Hill, 2nd. ed., New York, (1959).
- Enns Mark, "Comparison of Dynamics Models of a Superheaters", ASME, Journal of heat Transfer, november, p 375, (1962).
- Forster H.K., Zuber N., "Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer", AIChE J., V 1, p 531, (1961).
- Franks R.G.E., "Modelling and Simulation in Chemical Engineering, Wiley-Interscience, New York, USA, p 195, (1972).

- General Electric, "Qualification of the One-Dimensional Core Transient Model for Boiling Water Reactors", NEDO-24154, October, (1978).
- González S., Méndez E., Kuhlmann F., Castelazo I., "Large Scale Power Plant Model Development Part I: Modularization", Proceedings of the International Conference on Power Plant Simulation, Cuernavaca, Morelos, México, p 359, (1984).
- González Santaló J.M., Roldán Villasana E.J., Del Arco C.M., "Analysis of a Drum Boiler Considering Scope versus Required Execution Time", Instrument Society of America, Proceedings of the Fourteenth Annual Pittsburgh Conference, Pittsburgh, Penn., USA, (1983).
- IIE, "Formulación del Módulo Genérico Propiedades Termodinámicas", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Simulación, Reporte de Trabajo, Proyecto Simulador de Laguna Verde, Actividad G-18-VE, (1985).
- JANAF, "JANAF Thermodynamics Tables", U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 2nd. ed., Washington D.C., (1971).
- Jones A.B., "Hydrodynamic Stability of a Boiling Channel", KAPL-1627, Knolls Atomic Power Laboratory, (1961).

- Laubli F., "The Problem of Simulating the Dynamic Behavior of Steam Generators in Analog Computers", Sulzer Technical Review, V 43, p 35, (1961).
- Madell J.T., "Simulating Nuclear Plant Transients with Personal Computer", The Proceedings of the 1985 Summer Computer Simulation Conference", Chicago, Illinois, p 402, (1985).
- Martinelli R.C., Nelson D.B., "Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water", Trans. ASME, V 70, p 693, (1948).
- Masada G.Y., "Modelling and Control of Power Plant Boiler - Turbine - Generator Systems, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute Technology, Department of Mechanical Eng., (1979).
- Méndez E., González S., Kuhlman F., Castelazo I., "Model Development Procedure for Large Scale Power Plants Simulators", Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, Chicago, Illinois, p 413, (1985).
- McDonald J.P., Kwanty H.G., "A Mathematical Model for Reheat Boiler-Turbine-Generator Systems", Conference Paper IEEE, Winter Power Meeting, New York, USA, (1970).
- McDonald J.P., Kwanty H.G., Spare J.H., "A Nonlinear Model for Reheat Boiler-Turbine-Generator Systems; Part I - General Description and Evaluation", JACC Proc., Paper No. 3-D4, July, p 219, (1971).

- Meneses Del Arco Carlos, "Modelo para Análisis Dinámico de Calderas de Circulación Forzada y Circulación Natural", Tesis Para obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, URAM, (1985).
- Moeck E.O., Hinds H.W., "A Mathematical Model of Steam-Drum Dynamics", Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, Canada, (1975).
- Morales J., Mugica F., Alanís R., Ramos J.C., Laurencio M., Lorencez C., "On the Development of a Mathematical Model for a BWR Reactor System", Proceedings of the International Conference on Power Plant Simulation, Cuernavaca, Morelos, México, p 53, (1984).
- Nicholson H., "Dynamic Optimisation of a Boiler", Proc. IEEE, V 3 (8), p 1479, (1964).
- Profos P., "Die Behandlung von Regenproblemen Vermittels des Frequenzganges des Regelkreises", Dissertation Eigenossische Technische Hochschule, Zurich, (1943).
- Profos P., "Dynamics of Pressure and Combustion Control in Steam Generators", Sulzer Technical Review, V 37 (4), p 1, (1955).
- Ray A., Bowman H.F., "A Nonlinear Dynamic Model of a Once-Through Subcritical Steam Generator", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, V 98, (1976).

- Roldán Villasana E.J., González Santaló J.M., "Modelo Matemático de una Caldera de Circulación Forzada de una Unidad de 300 MW", Revista de la Academia Nacional de Ingeniería A.C., (1984a).
- Roldán Villasana E.J., González Santaló J.M., Del Arco C.M., Méndez Lecanda E., "Model of the Flows and Pressures in the Water Circuit of a Forced Circulation Boiler", Proceedings of the International Conference on Power Plant Simulation, Cuernavaca, Morelos, México, p 220, (1984b).
- Saunders O.A., "Proc. Roy. Soc. (London), A 157, p 278-291, (1936).
- SCIPV, "Suplemento de Propiedades de Transporte", Sexta Conferencia Internacional sobre Propiedades del Vapor, Nueva York, noviembre, (1964).
- Secker P., "Water Walls and Drum Models", Los Alamos technical Associates Inc., para el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Documento privado, Cuernavaca Mor., México, (1981).
- Shampine L.F., Gordon M.K., "Computer Solution of Ordinary Differential Equations. The Initial Value Problem", W.H. Freeman and Co., San Francisco, (1975).
- Sieder E.N., Tate G.E., "Ind. Eng. Chem.", V 28, p 1429-1435, (1936).

- Snidow N.L., Wilson T.L., "U-Tube Steam Generator for the Modular Modeling System", Proceedings of the International Conference on Power Plant Simulation, Cuernavaca, Morelos, México, p 79, (1984).
- Standiford F.C., "Effect of Non-Condensables on Condenser Design and Heat Transfer", Chem. Eng. Prog., V 75, pt 2, pp 59, (1979).
- Thal-Larsen H., "Dynamics of Heat Exchangers and theirs Models", Journal of Basic Eng., Trans. ASME, Series D, V 82, p 489, (1960).
- Thompson F.T., "A Dynamic Model of a Drum-Type Boiler System", IEEE Transactions on PAS, PAS-86 (5), p 625, (1967).
- Tong L.S., "Boiling Heat transfer and Two-Phase Flow", John Wiley, New York, (1965).
- Tseng C.H., Dimmick G.R., Frketch G., "Validation of the Dynamic Simulation of a Natural Circulation loop", The Proceedings of the 1985 Summer Computer Simulation Conference", Chicago, Illinois, USA, p 420, (1985).
- Usoro P.B., "Modelling and Simulation of a Drum Boiler-Turbine Power Plant under Emergency State Control", Master of Sc. Thesis, Massachusetts Institute Technology, Department of Mechanical Eng., (1977).

- Vargaftik N.B., Volkov B.N., Voljak L.D., Phys. Chem. Ref. Data, V 12, p 817, (1983).
- Wiener M., "The Latest Developments in Natural Circulation Boiler Design", American Power Conference, Chicago, Illinois, April 18-20, (1977).
- Zuber N., Findlay J.A., "Average Volumetric Concentration in Two-Phases Flow System", J. Heat Transfer, V 87, p 453, (1965).

BIBLIOGRAFIA GENERAL

Publicar algo es una cosa muy seria.

**Isaac Asimov,
"The Monkey's Finger."**

BIBLIOGRAFIA GENERAL

- ASME, "Steam Tables", The American Society of Mechanical Engineers, 3rd. ed., New York, USA, (1977).
- Babcock G.H., Wilcox S., "Steam its Generation and Use", Babcock & Wilcox ed., 39th. ed., USA, (1978).
- Benedict R.P., "Fundamentals of Pipe Flow", J. Wiley & Sons, New York, USA, (1980).
- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., "Fenómenos de Transporte", Reverté, España, (1978).
- Borse G.J., "FORTRAN 77 and Numerical Methods for Engineers", FWS publishers, 1st. ed., Boston, USA, (1985).
- Burgoyne D., Newbould F., "The Hayward Tyler Glandless Pump and its Applications in Nuclear and Fossil Power Stations, Hayward Tyler Inc.
- CFE, "Balances Térmicos para 25%, 50%, 75%, 100% y 102% de Carga de la Planta Termoelectrica Tula, Unidades 1 y 2", Departamento de Servicio, Tula, Hgo.
- CFE, "Controlled Circ. Suct. & Disch. System", Drawing Number: G-71-118-1031-3.

- CFE, "Curva de encendido de las unidades I y II (TULA)".
- CFE, "Descripción de Sistemas", Unidades 1 y 2 de la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, Tula, Hgo.
- CFE, "Diagrama de Flujo e Instrumentación, Conjunto: Caldera Circuito de Agua, Obra: Planta Termoeléctrica Tula, BICA, S.A., 15/12/71, Hoja M-50.
- CFE, "General Arrangement Plan C-C", Drawing Number: G-71-118-1004-4.
- CFE, "Instruction Manual 1000 HP Glandless Motor Pump Units for Combustion Engineering Super Heater LTD.", Salamanca Valle de México, Hayward Tyler and Co. Limited, Serial Number: 711W1299-300.
- CFE, "Instructivo para Caldera Combustion Canada", Unidades 1 y 2 de la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, Tula, Hgo.
- CFE, "PPA - Lower Side Elevation", Drawing Number: F-71-118-1014-2.
- CFE, "PPA Panel Arrangement", Drawing Number: G-71-118-1011-1.
- CFE, "PP Conn Locations and Exp. Movement Diag", Drawing Number: G-71-118-1016-8.

- CFE, "Refractory and insulation Arrangement and Details of Roof Enclosure", Drawing Number: G-69-119-417-2.
- CFE, "Reporte de Falla ocurrida en la Caldera de la Unidad No. 2 de la Central Termoeléctrica Mazatlán II", Gerencia General de Operación, (1979).
- Cortés M., "Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas", ETA, Tomo I, Barcelona, (1970).
- Fitzgerald, "Electric Machinery", McGraw Hill, New York, USA, (1971).
- Gonzalez Santaló J., "Desarrollo de un Simulador de centrales Termoeléctricas", Boletín IIE, V 5 (2), México, (1981).
- Hernández D.B., "Parameter Lumping: When and to What Extent?", Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Reporte de Investigación 22, México, (1980a).
- Hernández D.B., "Mathematical Model Simplification in Chemical Engineering", Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Reporte de Investigación 34, México, (1980b).
- Hutchison J.W., "ISA Handbook of Control Valves", ISA, 2nd. ed., USA, (1976).

- John J.E.A., Haberman W.L., "Introducción a la Mecánica de los Fluidos", Prentice Hall Int., México, (1974).
- Karassik I., Carter R., "Bombas Centrifugas, Selección, Operación y Mantenimiento", CECSA, México, (1980).
- Luyben, "Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineering", McGraw Hill Kogakusha, (1972).
- Lydersen A.L., "Fluid Flow and Heat Transfer", WILEY, New York, USA, (1979).
- Mataix C., "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", Harla SA, Barcelona, España, (1976).
- Moody F.J., Lahey R.T., "The thermalhydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor", American Nuclear Society, Monograph, USA, (1977).
- Page-Jones M., "The Practical Guide to Structured Systems Design", Yourden Press, New York, (1980).
- Perry J.H., Chilton C., "Chemical Engineer's Handbook", McGraw Hill, 5th. ed., USA, (1980).
- Ramos Villegas R., González Castro S., "Control en Centrales Termoeléctricas", Boletín IIE, V 7 (1), México, (1983).

- Rodriguez G., Kuhlmann F., Castelazo I.A., Fernández del Busto R., Torres M.A., González S., "On The Real Time Simulation of Large Scale Dynamic Systems Using Multirate Integration Methods", Proceedings of the Thirteenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation, V 13 (4), Pittsburgh, Penn., USA, April 22-23, (1982).
- Rohsenow W., Hartnett J., "Handbook of the Heat Transfer", McGraw Hill, New York, USA, (1973).
- Rohsenow W., Choi H., "Heat, Mass and Momentum Transfer", Prentice Hall, New Jersey, USA, (1961).
- Spring H.M., "Boiler Operator's Guide", McGraw Hill, 1st. ed., New York, USA, (1968):
- Toral-Garibay D., Castelazo-Sinencio I., "Executive Control of a Real Time Power Plant Simulator in a Multiprocessor Environment", Proceedings of the Fourteenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation, V 14 (1 and 2), Pittsburgh, Penn., USA, (1983).
- Wallis G.B., "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw Hill, New York, USA, 1969.
- Welty J., "Transferencia de Calor Aplicado a la Ingeniería", LIMUSA, México, (1978).

- Woodruff E.B., Lammers H.B., "Steam-Plant Operation", McGraw Hill, 4th. ed., New York, USA, (1977).