Rafael Beltrán

Desarrollo De Un Paquete Computacional Para La Simulación De Plantas Térmicas

Resumen

Se presentan algunos adelantos en el desarrollo de herramientas de simulación y modelaje de plantas térmicas. Se muestra un esquema de las plantas así como algunas consideraciones de tipo termodinámico y computacional que ocurren en la construcción de modelos de esta naturaleza. Se muestran las relaciones fundamentales que rigen el comportamiento de cada uno de los componentes de las plantas. Finalmente, se hace una discusión acerca del comportamiento del fluído de trabajo, así como ejemplos de los resultados obtenidos en comparación con cálculos exactos realizados por medio de tablas de propiedades.

Introducción

El presente trabajo sobre la simulación, diseño y optimización de sistemas térmicos basados en los ciclos de vapor de agua, fué iniciado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de UNIANDES desde hace varios años. En él han participado algunos estudiantes del último año de ingeniería mecánica dentro del trabajo de proyecto de grado conducente al título de ingeniero en esa especialidad, así como varios alumnos de los cursos de Termodinámica, y de Máquinas Térmicas de ese departamento.

Las plantas térmicas son sistemas complejos basados en la transformación de la energía de un combustible en energía mecánica a través del vapor de agua como fluído de trabajo. El vapor es utilizado para muchos procesos industriales, por ejemplo en los procesos de la fabricación de la cerveza, en la elaboración de aceites vegetales al igual que en otras industrias de alimentos, en los procesos de la refinación del petróleo, y muchas más; existe por lo tanto interés por parte de algunas empresas por hacer un aprovechamiento óptimo de ese recurso principalmente en relación con la sustitución y el ahorro de energía eléctrica dentro de las plantas, dado su creciente costo.

RAFAEL BELTRAN: Ingeniero Mecánico, Uniandes. MS, University of Delaware, USA. Director del Departamento de Ingeniería Mecánica, Uniandes. Area de Especialización: Ciencias Térmicas.

También la energía del vapor es utilizada por las plantas térmicas de propiedad de las empresas públicas para generar una fracción de la energía eléctrica demandada en el país.

La complejidad de estos sistemas, el evidente interés por mejorar su rendimiento, las altas presiones y temperaturas utilizadas en la transformación de energía a través del vapor, el tamaño físico de estos equipos, y otros factores relacionados, hacen que sea desable contar con una herramienta de análisis que evite errores de interpretación y de consulta de los datos, y permita conocer sus parámetros de operación. Adicionalmente, el desarrollo de esta simulación hace posible abordar el problema de optimización de la operación, además de servir como herramienta educacional para el entrenamiento de personal e ingenieros encargados de operar los equipos, a costos reducidos y con economías sustanciales de tiempo en comparación con el tiempo normal de entrenamiento necesario en la planta.

Objetivos

En este trabajo se ha pretendido alcanzar algunos objetivos entre los que se cuentan los siguientes:

- Mostrar la operación de la planta, y de sus elementos esenciales pudiéndose variar el número y la naturaleza de los componentes de una corrida a otra del modelo.
- Realizar una comparación de los regímenes de operación, pudiendo variar parámetros de funcionamiento tales como demanda de energía, rendimiento de los componentes, temperaturas y presiones máximas del ciclo de vapor, grado de regeneración y número y tipo de elementos utilizados para precalentar el fluído de trabajo, y otros.
- Visualizar la operación de los controles del equipo para pequeñas excursiones fuera de las condiciones del estado estacionario.

La Planta De Vapor

Se ha considerado que la planta consta de varios elementos esenciales como son:

(a) Caldera para la generación de vapor saturado, así como de supercalentadores para elevar la temperatura del vapor antes de la salida.

(b) Una o varias turbinas de vapor que pueden constar de varios cuerpos, y un número indeterminado de extracciones.

(c) Condensador.

(d) Gobernador que regula el flujo de vapor a la turbina para condiciones variables de carga del generador o de demanda de flujo en las extracciones.

(e) Un número variable de calentadores de agua que pueden ser de tipo cerrado o abierto para calentamiento regenerativo.

(f) Bombas para el movimiento del líquido por el sistema.

(g) Generadores y equipos electricos auxiliares.

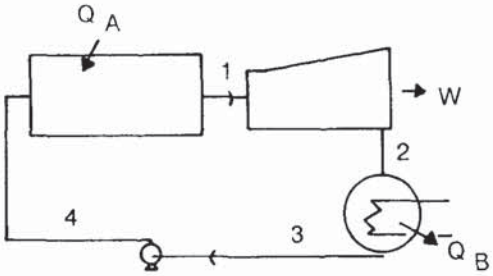
Dado que las plantas utilizadas en Colombia no sobrepasan los 100 MW por unidad, no se han considerado ciclos supercríticos los cuales son utilizados en las unidades de mayor tamaño en el mundo, y por lo tanto las calderas usadas serán de circulación natural en su mayor parte. A este respecto cabe añadir que los límites prácticos para este tipo de plantas (9) (11) son 9 MPa, por el lado de la presión, y 538 °C por el lado de la temperatura a la salida del supercalentador y del recalentador. Este último límite es impuesto por el tipo de aceros disponibles para tuberías de caldera, y es basado en consideraciones de cedencia bajo temperatura (creep) del material.

La figura 2. muestra un esquema típico de la planta. En todos los casos la configuración es dada por el usuario del modelo, y la herramienta de simulación se encarga de establecer las conexiones faltantes del mismo. La planta considerada es típica y contiene los elementos principales mencionados anteriormente. La idea de la simulación es incorporar detalles de cada uno de estos equipos para armar un modelo que utilizando principios termodinámicos explique la operación de la planta y permita visualizar su funcionamiento.

Con el fin de facilitar la labor de construcción se ha elaborado un diagrama de flujo de información como el que se presenta en la figura 3 en la cual las flechas que entran indican información que entra a cada submodelo y las salientes información generada internamente en ellos.El modelo desarrollado tiene en cuenta la forma de operación de elementos de la planta como son calentadores de agua tanto de tipo abierto o de mezcla, como de superficie o cerrados. Así mismo se incluyen submodelos de la caldera y de varias etapas de la turbina, en los cuales se ha tenido en cuenta la posibilidad de extraer vapor en diferentes puntos así como de recalentar la corriente en puntos especificados por el usuario.

La figura 4 (a) muestra un esquema del calentador de agua de tipo mezclador. El vapor de la extracción se mezcla con el agua que viene del condensador aumentando su temperatura y llevándola teóricamente hasta cerca del punto de ebullición. La figura 4 (b) presenta el esquema del calentador de tipo cerrado o de superficie en el cual no existe mezcla entre el vapor de la extracción y el agua que fluye hacia la caldera. En el modelo propuesto no se hace ninguna consideración en cuanto a la efectividad del intercambiador, sino que se supone que el vapor extraído sale de la trampa del vapor como líquido saturado.

El modelo empleado para la caldera es muy simple y se miran dos aspectos: por el lado del vapor son dadas la presión, y la temperatura de salida, determinándose en el proceso la temperatura de la entrada, y el flujo de masa del vapor, y la tasa de extracción de energía tanto de la caldera como del supercalentador. Del lado del gas caliente se calculan los flujos de energía y de combustible, y la temperatura de salida de los mismos, con base en un valor de eficiencia suministrado por el usuario. También en el balance térmico se tiene en cuenta la extracción de calor en el recalentador o recalentadores.



Planta Térmica Simplificada

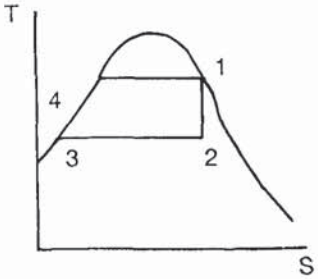


Diagrama de Temperatura vs Entropía

1 - 2 Proceso de expansión en la turbina.
2 - 3 Proceso de condensación.
3 - 4 Proceso de compresión en la bomba de líquido.
4 - 1 Proceso de la caldera.

Qa Calor agregado, caldera
W Trabajo de la turbina
Qb Calor extraído, condensador.

Figura 1. Ciclo de Rankine

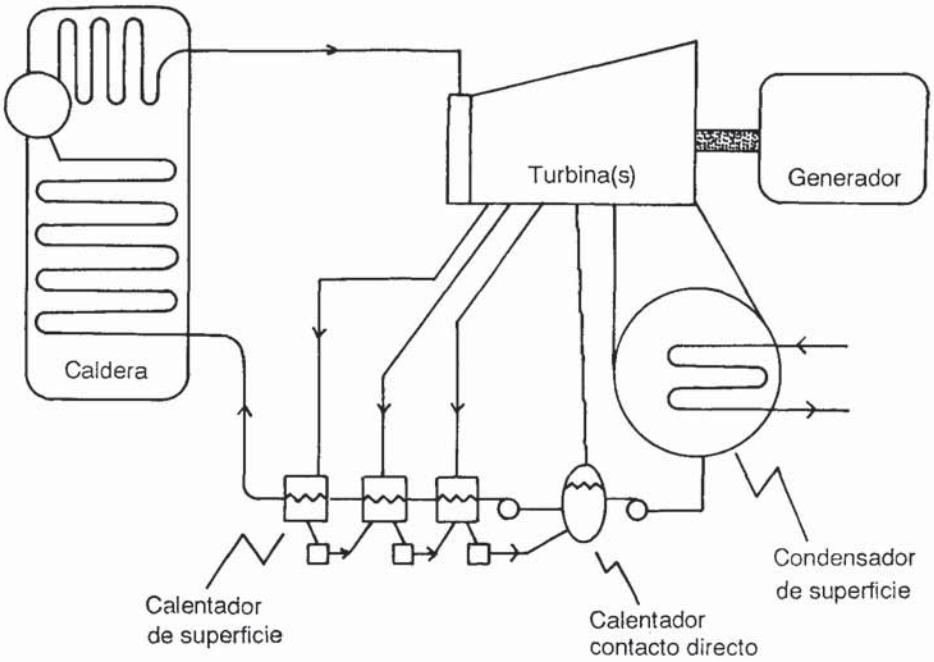


Figura 2. Esquema de la Planta Térmica.

El tipo y capacidad de plantas que se ha considerado, limita en cierta forma el número y disposición de las turbinas utilizadas. Por ejemplo, para capacidades unitarias por debajo de 75 MW normalmente se usan turbinas de un solo cuerpo sin recalentamiento; hasta los 600 MW es posible construir turbinas que operan en ciclos subcríticos con varios cuerpos y recalentamiento hasta 538 °C.

En la turbina se analiza la expansión, etapa por etapa, o por grupo de escalones entre dos extracciones. Para esto es necesario conocer o estimar previamente el rendimiento isentrópico de la etapa, dato que generalmente suministra el fabricante, así como las presiones a la entrada y salida de la misma. El modelo determina el trabajo de la etapa, así como la temperatura, entropía, entalpía y título del vapor a la salida de la misma.

Las condiciones del vapor a la salida de cada etapa de expansión son determinadas con base en las eficiencias estimadas por el usuario o suministradas por el fabricante. En cada caso se determina la condición del fluído ya sea como vapor supercalentado o como mezcla de vapor y agua para algún estado dentro de la región de saturación, como se aprecia en la figura 5, en la cual se representa el cambio de estado del vapor desde el comienzo de la expansión. El modelo incluye la posibilidad de recalentamientos del vapor antes de ser expandido en las últimas etapas de la turbina.

Para el análisis de la expansión se han utilizado volúmenes de control del tipo mostrado en la figura 6. Se consideraron dos casos:

(a) Expansión del vapor hasta un punto de extracción, el cual se relaciona o conecta con un calentador de tipo cerrado (superficie). En este caso en los balances de masa y energía se debe tener en cuenta que el vapor de la extracción saldrá del calentador como líquido el cual pasa, vía una trampa, a un calentador a más baja presión, o al condensador. Así mismo se tiene en cuenta que el líquido proveniente de calentadores a más alta presión pueda ingresar a este volumen de control.

(b) Expansión del vapor hasta un punto de extracción que se conecta con un calentador de tipo abierto (mezclador). En este caso no habrá trampas de líquido que salgan del equipo, aunque es posible que haya líquido entrando desde calentadores a más alta presión, como en el caso anterior. Además, es necesario tener en cuenta que se requiere una bomba de líquido a la salida del calentador para elevar la presión hasta valores iguales a los de las etapas anteriores.

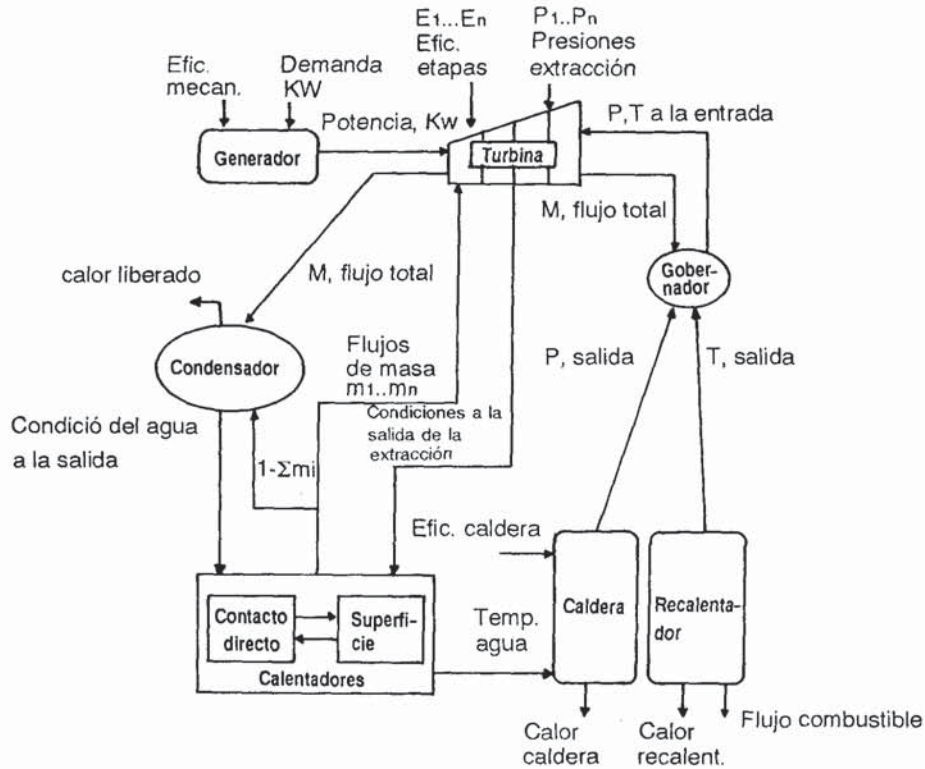


Figura 3. Diagrama del flujo de información para el modelo de una planta térmica.

Propiedades Del Vapor De Agua

Para efectuar el modelaje de este tipo de sistemas se requiere la determinación de las propiedades termodinámicas del vapor de agua. Los intervalos de presiones y temperaturas considerados son los siguientes:

(a) Para la región de saturación, la temperatura va desde cero grados Celsius hasta la temperatura crítica (373.8°C). La presión se determina por medio de una relación funcional (12). Se utilizó una tabla para obtener el volumen, la entalpía y la entropía del líquido y del vapor saturados.

(b) Para la región del vapor se consideraron presiones desde 4000 Pa, hasta 22 MPa, cerca de la presión crítica, y temperaturas desde la saturación a una presión determinada, hasta los 600°C. Se implementó un conjunto de rutinas que permite conocer el volumen, la entalpía y la entropía como funciones de la temperatura y la presión.

Se implementaron las tablas del vapor de agua, según las ecuaciones dadas por el "1967IFC Formulation for Industrial Use" adapatadas en la Sexta Conferencia Internacional Sobre las Propiedades del Vapor de Agua. Estas han sido codificadas en el lenguaje PASCAL.

El Modelo

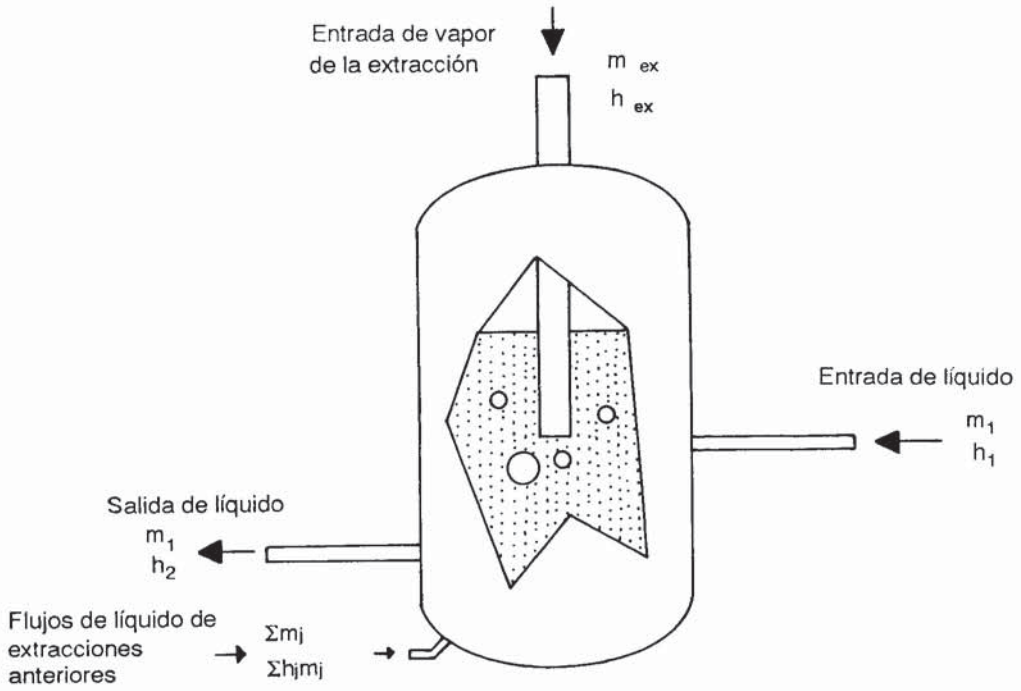
Basados sobre las consideraciones anteriormente expresadas sobre el comportamiento de cada uno de los elementos que componen la planta, es posible encontrar una solución para las incógnitas del problema. Si cada uno de los puntos de extracción o de recalentamiento se considera como un "evento" para el problema de modelaje, entonces si hay N de tales eventos se deben encontrar los valores de las siguientes variables:

- Los flujos m_1 ... m_q que pasan por el sistema de calentadores
- Las entalpías h_1 ... h_q del líquido en el sistema de calentadores
- Los flujos m_{ex1}, ... m_{exq} de las extracciones de cada uno de los calentadores

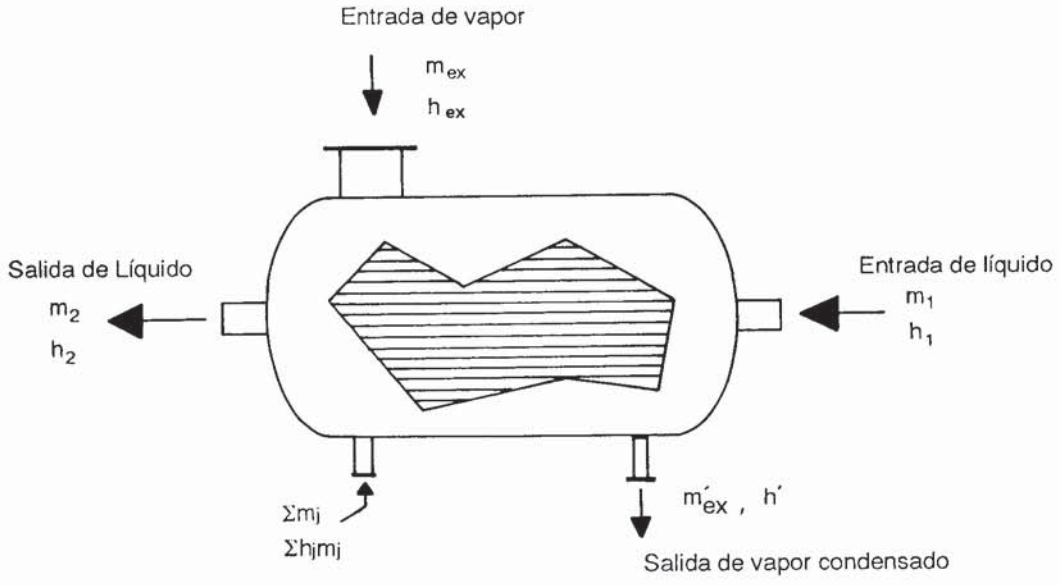
siendo $q < N$ el número de estos elementos en el sistema. En este caso se resuelve el sistema de ecuaciones lineales dado por

$$(A)\ X = b \quad (1)$$

en donde las variables x son las incógnitas del sistema, b son los términos constantes y los coeficientes de la matriz (A) están dados por los términos correspondientes de los balances de masa y energía del sistema.



(a) Calentador Tipo Abierto de Contacto Directo

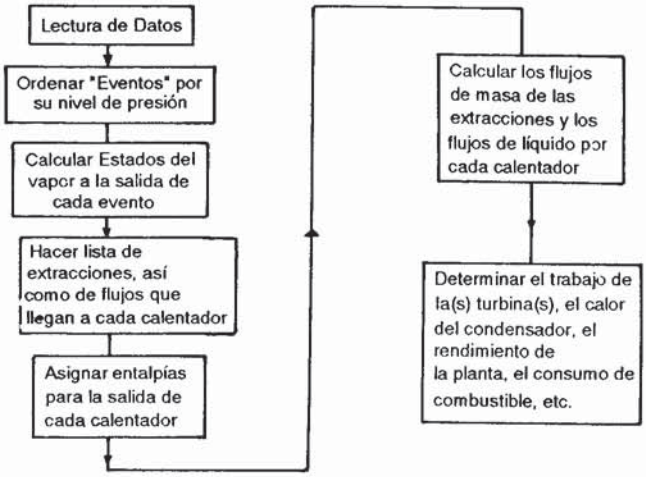


(b) Calentador de Superficie o Cerrado

Figura 4. Calentadores del Condensado

El resto de incógnitas, a saber los valores de los flujos de los N-q eventos restantes son triviales. También se obtiene el trabajo de la turbina, el consumo de combustible en la caldera, la eficiencia térmica del ciclo, y otras, mediante las ecuaciones correspondientes. El sistema de ecuaciones dado por (1), sin embargo, puede resolverse fácilmente en forma secuencial, con gran ventaja desde el punto de vista computacional.

La estructura del modelo de simulación implementado contiene los siguientes pasos:



$$
[A] = \begin{array}{l}
\\
\text{balance de masas afuera calent 1} \\
\text{balance de masas adentro calent 1} \\
\text{balance de energía, cal. 1} \\
\\
\\
\text{balance de masas afuera calent q} \\
\text{balance de masas adentro calent q} \\
\text{balance de energía, cal. q}
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccccccccc} m_1 & m_2 & \cdots & m_q & h_1 & h_2 & \cdots & h_q & m_{ex1} & me_{ex2} & \cdots & me_{exq} \end{array} \\
\left\langle \begin{array}{ccccccccccc}
a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1q} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a_{1.3q} \\
a_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & & a_{2.3q} \\
a_{31} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\
 & & & & & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & & & \\
a_{3q.1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & a_{3q.3q}
\end{array} \right\rangle
\end{array}
$$

Algunos Resultados Obtenidos

A continuación se presentan los resultados de tres casos calculados con el modelo de simulación desarrollado. Este se ha escrito en el lenguaje Pascal para los computadores IBM-PC y Macintosh.

Caso 1

Se considera la planta térmica de la figura 7(a)en la cual el vapor se genera a 12 MPa y 530°C. El paso por el gobernador reduce la presión hasta 9.8 MPa. Existen tres calentadores del agua de la caldera, los cuales operan a presiones de 2.1, 0.44 y 0.095 MPa, respectivamente. La presión del condensador se fijó en 0.02 MPa. Para la expansión entre etapas de extracción se ha supuesto una eficiencia isentrópica constante de 0.85, con lo cual se obtiene la siguiente tabla de propiedades del vapor:

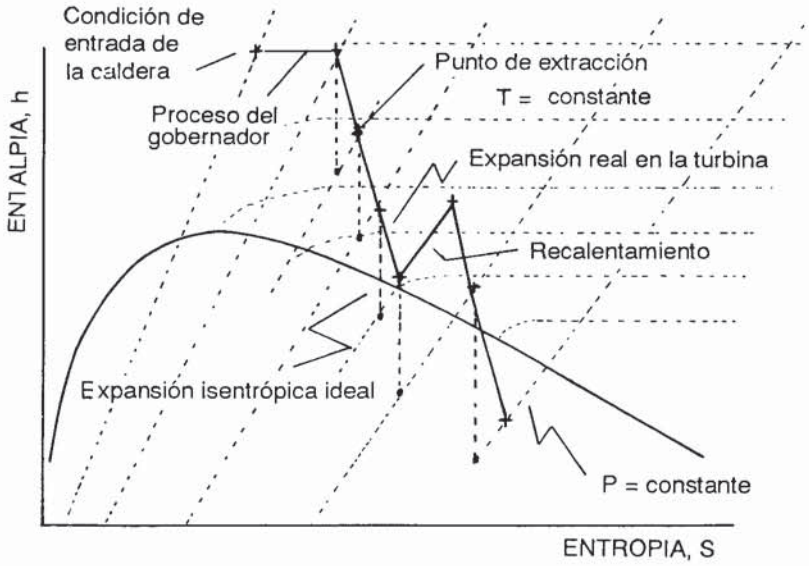


Figura 5. Diagrama h vs s de la expansión en una turbina de vapor.

a Vapor de la etapa anterior.

b Vapor a la siguiente etapa

c Líquido de la trampa a un calentador posterior.

e. Liquido de un trampa anterior.

f Líquido al calentador anterior..

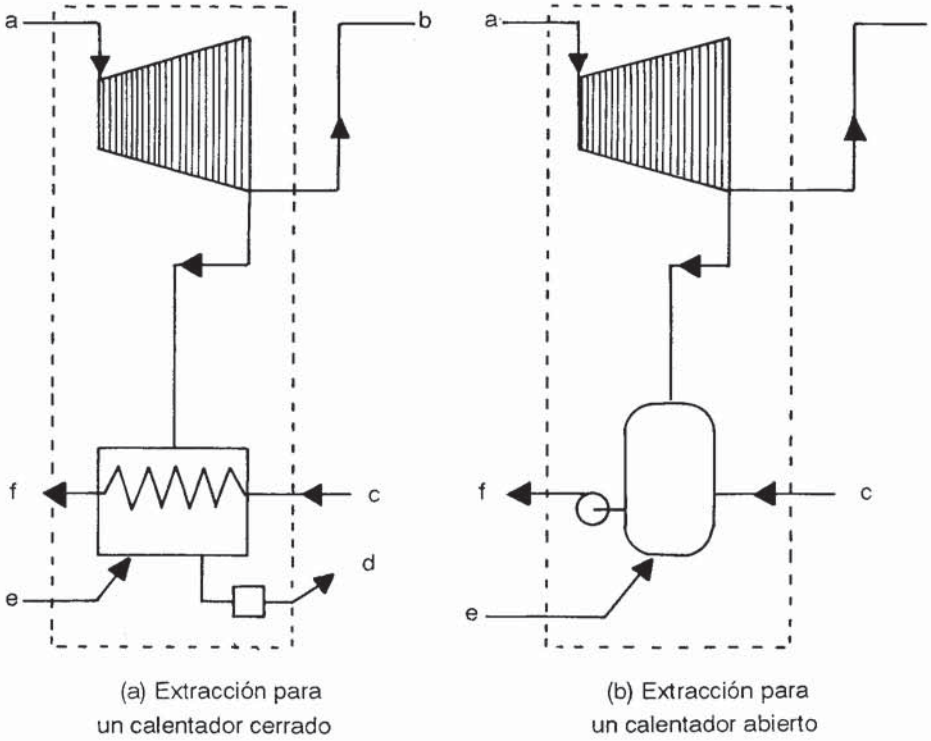


Figura 6. Volúmen de control para el análisis del proceso de expansión con extracción regenerativa

Calculado por medio de tablas de propiedades:

	Temperatura °C	Presión MPa	Entalpia kJ/kg	Entropia kJ/kg °K
Caldera	530.0	12	3428.2	6.5885
Gobernador	520.0	9.8	3427.3	6.6738
Extracción 1	---	2.1	3049.8	6.7904
Extracción 2	---	0.44	2762.1	6.909
Extracción 3	---	0.094	2538.1	7.016 título = 94%
Condensador	---	0.020	2346.0	7.117 título = 88.8 %

Resultados del Modelo:

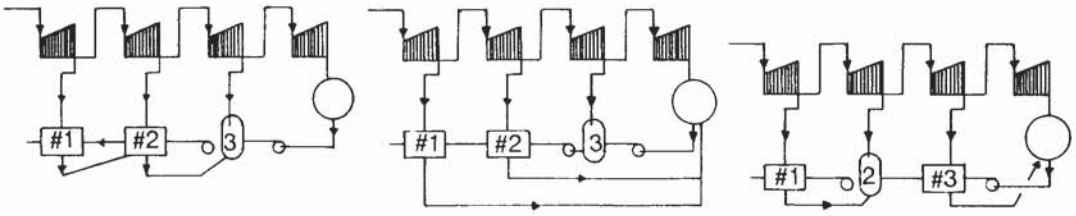
	Temperatura °C	Presión MPa	Entalpia kJ/kg	Entropia kJ/kg °K
Caldera	530.0	12	3428.2	6.5885
Gobernador	520.0	9.8	3427.3	6.6755
Extracción 1	---	2.1	3050.4	6.792
Extracción 2	---	0.44	2763.1	6.9122
Extracción 3	---	0.094	2538.6	7.019 título = 94.1%
Condensador	---	0.020	2347.0	7.121 título = 88.9%

Los flujos de vapor, como fracción de la masa que pasa a través de la caldera son los siguientes:

	Tipo de calentador	FLUJOS (calculado)	(modelo)
Extracción 1	superficie (*)	0.141	0.141
Extracción 2	superficie (*)	0.068	0.067
Extracción 3	mezclador	0.036	0.036
Condensadores	---	0.755	0755

(*) El vapor condensado de la extracción se deriva hacia una etapa a más baja presión, o hacia el condensador.

Eficiencia térmica de la planta: Calculada: 37.59% -
Modelo: 37.55%



(a) CASO 1 (b) CASO 2 (c) CASO 3

Figura 7. Esquema de la Planta Térmica utilizada en los Ejemplos

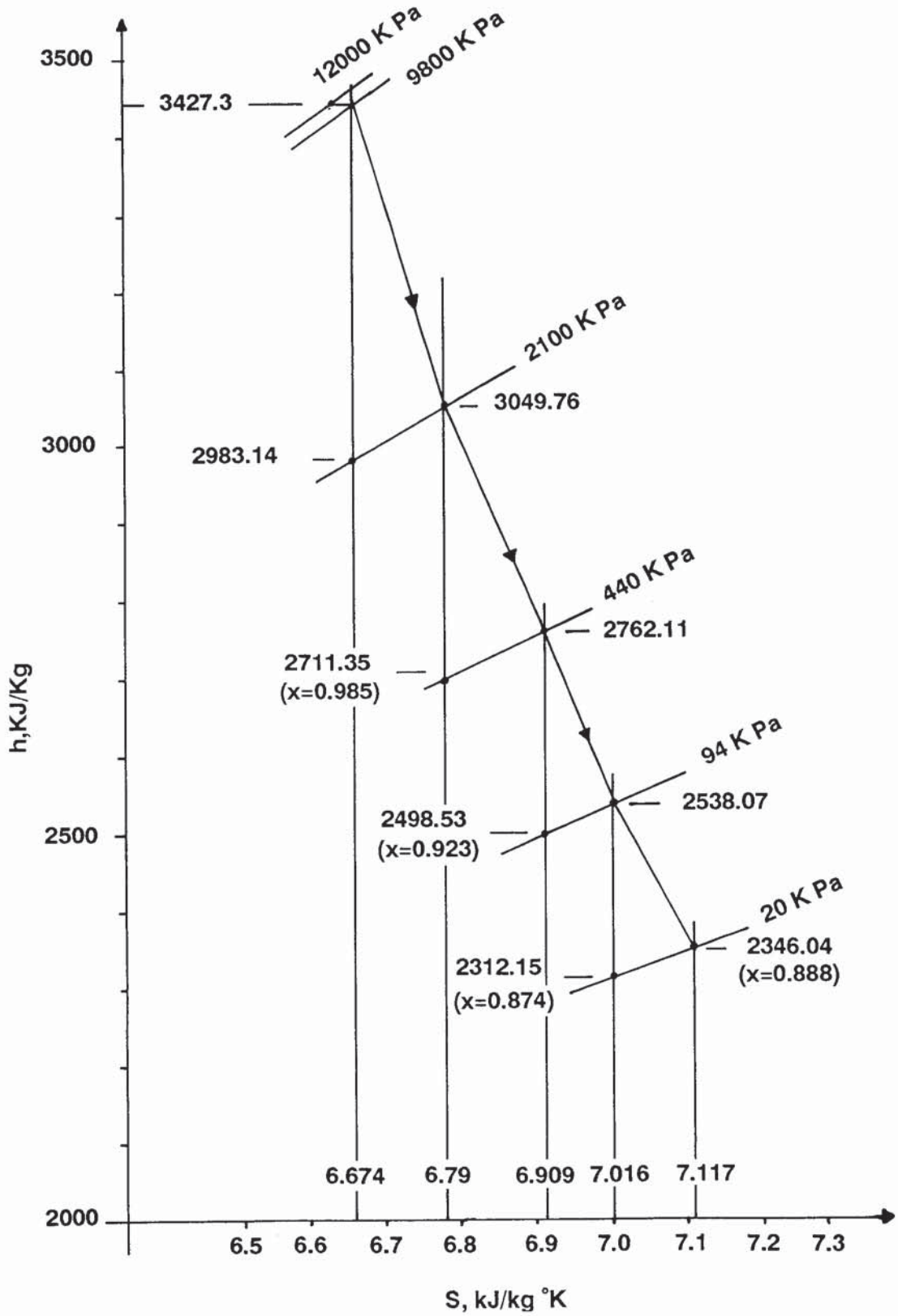


Figura 8. Diagrama h versus s para los casos 1, 2 y 3

CASO 2

Con referencia a la planta del caso 1 anterior, se ha supuesto que el condensado de los dos primeros calentadores se envía directamente al condensador. Esto corresponde al esquema mostrado en la figura 7b.

	Tipo de calentador	FLUJOS (calculado)	(modelo)
Extracción 1	superficie (*)	0.141	0.141
Extracción 2	superficie (*)	0.087	0.087
Extracción 3	mezclador	0.070	0.069
Condensador	---	0.702	0.702

(*) El vapor condensado de la extracción se deriva hacia una etapa a más baja presión, o hacia el condensador.

Eficiencia térmica de la planta: Calculada: 37.01% - Modelo: 36.97%

CASO 3

Aquí se ha supuesto que el primer y tercer calentadores de la planta anterior es del tipo de superficie, mientras que el segundo es de mezcla. Esto modifica los cálculos realizados puesto que por el tercer calentador ahora fluye menos vapor. También se supone que el condensado de los calentadores de tipo de superficie se envía a la etapa inmediatamente siguiente, de acuerdo al esquema presentado en la figura 7c. Los resultados generales son:

	Tipo de calentador	FLUJOS (calculado)	(modelo)
Extracción 1	superficie (*)	0.130	0.131
Extracción 2	mezclador	0.077	0.077
Extracción 3	superficie (*)	0.059	0.059
Condensador	---	0.733	0.733

(*) El vapor condensado de la extracción se deriva hacia una etapa a más baja presión, o hacia el condensador.

Eficiencia térmica de la planta: Calculada: 37.54% - Modelo: 37.50%

Conclusiones

La determinación de las propiedades termodinámicas del agua calculadas por medio de las rutinas de computador implementadas es bastante exacta y permite inclusive llegar a etapas de diseño y evaluación de equipos de utilización de vapor industrial.

El modelo construído es un primer paso hacia el desarrollo de un área que se podría llamar de simulación y diseño asistido de sistemas térmicos, que incluiría otros campos de interés como son la ventilación, el acondicionamiento de aire, la refrigeración industrial y sus equipos auxiliares.

Se trató de incorporar la mayor flexibilidad posible en la entrada de los datos pudiendo el usuario realizar diversas configuraciones de interés práctico. El modelo se sigue desarrollando con el fin de incorporar un mayor número de componentes y con la idea de obtener configuraciones óptimas para los sistemas de vapor. También se incorporará en este modelo una parte gráfica que facilitará la identificación de los componentes, y permitirá la interacción entre el usuario y el modelo.

La experiencia ganada durante este desarrollo permite construír modelos de sistemas de vapor utilizados industrialmente en los que los flujos de extracción son prescritos por las necesidades del proceso.En este caso, el modelo serviría para examinar diversas alternativas de generación de vapor y energía mecánica y eléctrica in situ.

BIBLIOGRAFIA

(1) Masada, G.Y.et al,"Dynamic Model of a 1400 MW Supercritical Pressure Steam Plant", ASME paper 82-jpgc-pwr-13

(2) Sonnenschein, H. "A Modular Optimizing Calculation Method of Power Station Energy Balance and Plant Efficiency". ASME J. of Engineering for Power, april 1982

(3) Gulic, M.G. and Gvozdenac, D.D. "A Mathematical Model for Heat Transfer in Combustion Chambers of Steam Generators", ASME J. of Engineering for Power, july 1981

(4) Bush, R.D. and Kuliasha, M.A."What If..?, Industrial Research, march 1977

(5) Lyubin,A.G. "Modes of Heating the Components of Power Plants With Prescribed Allowable Temperature Differences", Teploenergetika, 30,(7) 64-66(1983).

(6) The Central Electricity Research Laboratories. "Tablas del Vapor de Agua", Surrey, U.K.,1970

(7) Dumnon,V.P. et al."Simplified Procedure for the Calculation of Transient Processes with Great Changes in Boiler Load". Teploenergetika, 30,(7)(1983).

(8) Clary, A.T."Using a Microcomputer to Perform Steam Balance Calculations".ASME, Mechanical Engineering. July 1983

(9) TTI,EPDC."Technical Forum on Thermal Power Generation",Technology Transfer Institute & EPDC International Ltd., Japan,1979

(10) Van Wylen, G.J. Sonntag, R.E. "Fundamentals of Classical Thermodynamics",John Wiley Sons Ltd, 2nd ed., New York, 1976

(11) Skrotski, B. and Vopat, W.A. "Power Station Engineering and Economy". Tata-McGraw-Hill, New Delhi, 1978.

(12) Keenan & Keyes. "Thermodynamic Properties of Steam", John Wiley Sons Ltd., New York,1967

(13) The Babcock and Wilcox Co. "Steam Its Generation and Use". The Babcock and Wilcox Co. 1985

(14) Ricaurte, H. "Elementos Teóricos Para la Simulación de una Planta Térmica", Proyecto de grado-Universidad de los Andes, Fac.Ingen. Dto.Ing.Mecánica, Bogotá, 1983.

(15) Agudo, M. "Simulación de Operación de una Planta Térmica". Proyecto de grado-Universidad de los Andes, Fac.Ingen. Dto.Ing.Mecánica, Bogotá, 1984

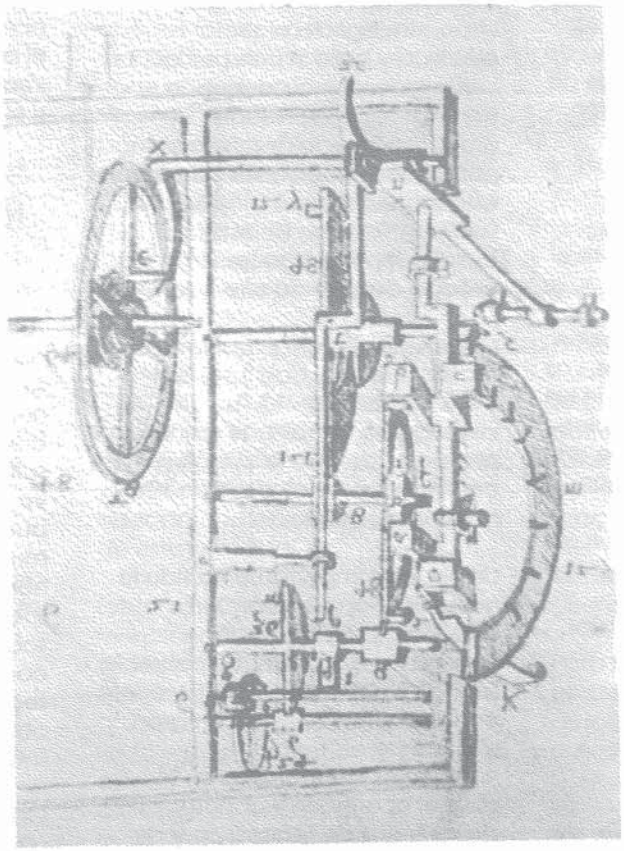
(16) Niño, D.O. "Estudio del Proceso de Circulación y Generación de Vapor en una Caldera". Proyecto de grado-Universidad de los Andes, Fac.Ingen. Dto.Ing.Mecánica, Bogotá, 1987.

(17) Nieto, O.A. et al. "Anotaciones y Reformas a un Modelo de Simulación de una Planta Térmica". Proyecto del curso Máquinas Térmicas- Universidad de los Andes, Fac.Ingen. Dto.Ing.Mecánica, Bogotá, 1985

(18) Southworth, R.W. Deleeuw, S.L. "Digital Computation and Numerical Methods", McGraw-Hill, New York, 1965, cap.8.

(19) McClintok, R.B. Silvestre, G.J. "Some Improved Steam Property Calculation Procedures", ASME, Journal of Engineering for Power, april, 1970

(20) Muneer, T. "An Equation of State for Steam for Systems Analysis". Energy Conversion and Management, vol. 25, No. 3,pp 273-275,1985

(21) Brereton, D.H. "Approximate Equations for the Properties of Dry Steam From a Generalization of Callendar's Equation", Int. J.Heat and Fluid Flow, Vol4, No.1, march 1983.

(22) Rodríguez S. Emery. "Implementación de un Paquete Computacional Para el Cálculo de las Propiedades Termodinámicas del Vapor de Agua". Proyecto de grado-Universidad de los Andes, Fac. Ingen. Dto. Ing.Mecánica, Bogotá, 1990