

Capítulo 7

Modelado de los sistemas de agua de alimentación y combustibles de una caldera radiante

Yadira Mendoza-Alegría¹

Abstract: The development of feedwater and fuels systems of a radiant steam generator based on mass, energy and momentum balances is presented. The parameters of the mathematical models are calculated from design and operation data. The models are part of a full scope boiler simulator for operators' training and reproduces the behavior of the steam generator in real time for the whole operation range; from the start condition to its nominal state at 110 % of load.

Keywords: Modelling, training simulators, steam boilers, control systems.

Resumen: Se presenta el desarrollo de los modelos del sistema de agua de alimentación y combustibles de un generador de vapor tipo radiante basado en balances de materia, energía y cantidad de movimiento. Los parámetros de los modelos matemáticos del proceso se calculan a partir de la información de diseño y de operación y forman parte de un simulador de alcance total de entrenamiento de operadores de calderas que reproduce el comportamiento del generador de vapor en tiempo real para todo el rango de operación; desde la condición de arranque hasta su estado nominal al 110 % de carga.

Palabras clave: Modelado, simuladores de entrenamiento, generadores de vapor, sistemas de control.

7.1. Introducción

La Gerencia de Sistemas Avanzados de Capacitación y Simulación del Instituto Nacional de Electricidad y Energías limpias ha desarrollado diversos simuladores de entrenamiento principalmente para centrales de generación eléctrica. Para cumplir con este objetivo ha creado tecnología propia en el área de software y modelado de procesos para simulación en tiempo real aplicada a la solución de la capacitación de operadores. En el presente trabajo se aborda la aplicación de esta tecnología para un simulador de entrenamiento de operadores de calderas radiante para una compañía que se dedica al diseño, fabricación y puesta en servicio de generadores de vapor, en lo sucesivo denominada como cliente.

¹ymendoza@ineel.mx Gerencia de Sistemas Avanzados de Capacitación y Simulación, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

7.2. Simuladores de entrenamiento

Un simulador de entrenamiento es una herramienta de software basada en la representación computacional dinámica de un proceso real acoplado a un sistema de control. Permite capacitar a través de condiciones y escenarios preestablecidos en las operaciones de una planta o proceso con la ayuda de pantallas de control similares a las del cuarto de control real con el propósito que el usuario adquiera habilidades en la operación de un proceso que le permitan actuar apropiadamente cuando un evento ocurra en la realidad.

Algunas de las ventajas significativas de usar simuladores de entrenamiento son: la capacidad de entrenar en fallas, transitorios y accidentes; la reducción de riesgos para el personal y los equipos de la planta; la oportunidad de capacitar al personal en eventos reales de la planta; la cantidad de personal que puede recibir capacitación efectiva y, eventualmente, instrucción individualizada de alto nivel o autoaprendizaje (con dispositivos de simulación diseñados teniendo en cuenta estas capacidades) [12].

En un clásico estudio realizado en simuladores de plantas de energía de combustibles fósiles [4] se identificaron los beneficios de simuladores en cuatro categorías: ahorro de disponibilidad, ahorro en el rendimiento térmico y extensión de vida útil de los componentes de una planta, así como también ahorro en los programas de cumplimiento ambiental. La justificación para contar con un simulador de entrenamiento también proviene de la capacidad del simulador para revisar el sistema de automatización y proporcionar a los operadores una mejor comprensión de un nuevo proceso. Con un adecuado programa de adiestramiento en el simulador, los operadores obtienen más rápido las habilidades y la confianza para manejar los procesos adecuadamente lo que acorta significativamente los arranques y paros de la planta y mejora la competencia de operadores menos experimentados.

7.2.1. Configuración de un simulador de entrenamiento

La configuración básica de un simulador de entrenamiento consiste en un nodo de simulación (NS) y un nodo de consola de operador (NCO) una consola de instructor (CI) y una consola de operación (CO) conectadas vía ethernet. La CI está diseñada para guiar una sesión de simulación y tiene disponible diversas funciones que se explican en la Sección 7.2.3.

El NCO consiste de una computadora para que la persona que se va a instruir opere de manera similar a la planta real. Normalmente puede usar varias pantallas de control, también llamadas pantallas de operación o diagramas de proceso interactivo (DPI) que le permiten navegar entre los diversos sistemas para operar adecuadamente. Las pantallas de control son similares a las del sistema de control real y es posible operar a través de cajas de mando, botones para la selección de permisos, despliegue de un sistema de alarmas, además, de tener la posibilidad de graficar en línea las variables más representativas de cada una de las pantallas simuladas. La Figura 7.1 presenta una configuración típica de un simulador de entrenamiento.

7.2.2. Configuración del Software

La arquitectura de software del simulador de Caldera Radiante está basada en la plataforma *Windows*. La Figura 7.2 muestra un diagrama que representa las siguientes tareas: Medio Ambiente de Simulación (*MAS*), pantallas de control, modelos matemáticos, *Agrademos* [17] (ambiente gráfico de modelos de simulación) y el Sistema de Control Distribuido (*SCD*). Las líneas de acuerdo con el tipo indicado en la figura antes mencionada, intercambian información, realizan la sincronización y activación de las tareas [18].

El *MAS* es el ambiente de simulación formado por un sistema ejecutivo que a través de la consola de instructor como interfaz gráfica, coordina las tareas principales del simulador. Activa las pantallas de control para el instructor y operador, activa, sincroniza e intercambia

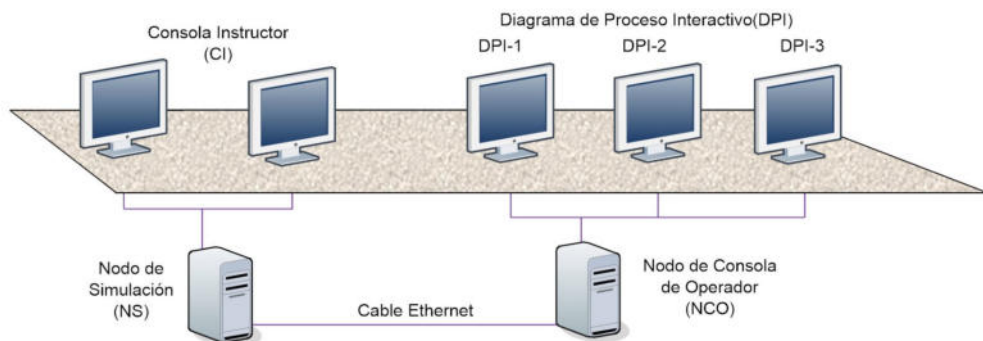


Figura 7.1: Configuración del hardware del simulador.

información con los modelos matemáticos y sincroniza e intercambia información con el sistema de control implementado a través de la herramienta gráfica de modelado *Agrademos*. Cuenta también con una base de datos que contiene la declaración de las variables, la definición de las funciones remotas, fallas, variables de instrumentación, parámetros, parámetros externos, alarmas, históricos, secuencia de los modelos, descripción de las condiciones iniciales y la definición de las cuentas de los instructores.

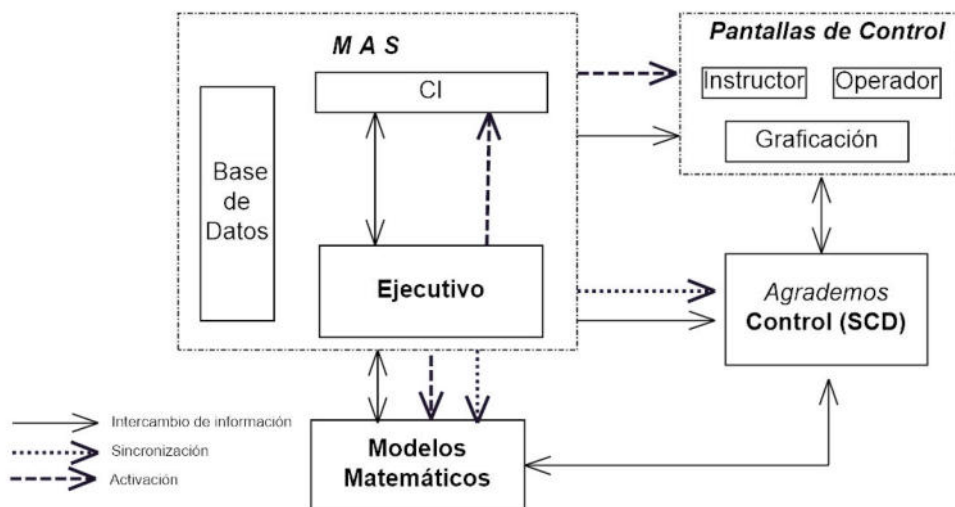


Figura 7.2: Configuración Software del simulador.

7.2.3. Funciones de la consola de instructor

A través de la CI, el usuario puede activar funciones agrupadas en cinco menús principales: *Menú de Control*, inicia o detiene el simulador, activa la función automático y permite simular

cada marco de simulación, *Menú de Condiciones Iniciales*, establece las condiciones inicio para las sesiones de entrenamiento, *Menú de Funciones de Instrucción*, permiten modificar diversos conjuntos de parámetros que afectan el estado de una simulación. Dicha modificación puede efectuarse de manera instantánea o con retardo. Las Funciones de Instrucción están clasificadas en: *parámetros externos*, que son aquellos que permiten modificar las condiciones de temperatura y presión ambiente, humedad, composición del combustible, etc. Las *fallas*, están agrupadas en seis subsistemas de la caldera y permiten activar con diferentes grados de severidad, roturas en alguna sección de los equipos, disparar bombas, ensuciar filtros, etc.

Los *parámetros Internos* o funciones remotas, son aquellas operaciones de la planta que el operador no puede realizar desde el cuarto de control, en el simulador son establecidas por el instructor, por ejemplo, apertura de válvulas locales. *Menú de Seguimiento*, son herramientas de apoyo durante las sesiones de simulación como tabular y graficar variables, *Menú de Miscelánea*, crea cuentas para nuevos usuarios (instructores) y registra una bitácora de acciones durante una sesión de simulación.

7.3. Caldera radiante

La caldera que se simula es de tipo radiante y genera 70 kg/s de vapor [5]. Está conectada a un cabezal común con dos calderas externas de la misma capacidad que proporcionan servicio de vapor a una refinería. La caldera radiante está formada por los siguientes sistemas: agua de alimentación, vapor principal, aire-gases, suministro de combustible gas y combustóleo, sistema de suministro de aire, ventiladores de tiro forzado e inducido, precalentador de aire Ljungström, vapor de atomización, sopladores de hollín, y sistemas auxiliares.

Todos los procesos tienen su control correspondiente, el control de agua de alimentación por ejemplo, tiene dos modos de operación que se establecen de manera automática; cuando el flujo de agua de alimentación es menor al 25 % del flujo nominal, el control trabaja con un elemento, es decir, la acción de la válvula de control es función sólo del nivel en el domo; para un flujo de alimentación mayor, el control pasa a ser de tres elementos, esto es, la acción de la válvula de control es función del nivel del domo y de la diferencia entre el flujo de vapor producido por la caldera y el flujo de agua de alimentación. Algunos más son, el control de nivel del desaereador, el control de suministro de combustibles, el control de la combustión, lógica de los pilotos y quemadores, etc. Todos los controles de la caldera están programados con la herramienta gráfica de simulación *Agrademos* y han sido implementados por el cliente con las adecuaciones necesarias para el simulador.

7.3.1. Descripción del Sistema de Agua de Alimentación

El sistema agua de alimentación de una caldera inicia en el desaereador cuyo fin es eliminar, gracias al aumento de temperatura del agua, los gases disueltos que pueda contener el agua de condensado para recircular a la caldera.

El desaereador precalienta el agua con vapor de baja presión y eleva su temperatura y sirve como tanque de almacenamiento de agua. El vapor de baja presión mantiene a un valor fijo la presión del desaereador. El nivel del desaereador se mantiene con el agua de condensado, con agua desmineralizada de repuesto y con una descarga controlada a un tanque de drenes. También cuenta con una válvula de seguridad, una válvula rompedora de vacío y una salida de agua por derrame para evitar alto nivel en el desaereador.

Una bomba de agua de alimentación succiona el agua de un cabezal y la descarga a otro (una segunda bomba de respaldo se encuentra en una conexión en paralelo). También cuenta con una línea de recirculación de la descarga de las bombas al desaereador para protegerlas por bajo flujo.

Después de las bombas se tiene una recirculación del cabezal inferior de la caldera; posteriormente, el agua continúa hacia el economizador pasando por las válvulas de control del nivel del domo. El economizador se encuentra en la trayectoria de los gases de combustión después de que estos ceden calor a los sobrecalentadores, utiliza calor de los gases de combustión para calentar el agua de alimentación a una temperatura cercana a la de saturación. Una vez calentada y de ser requerida, se inyecta automáticamente entre el sobrecalentador primario y secundario para atemperar el vapor. El agua no desviada para la atemperación se inyecta al domo de vapor.

En La Figura 7.3 se presenta un diagrama simplificado del proceso.

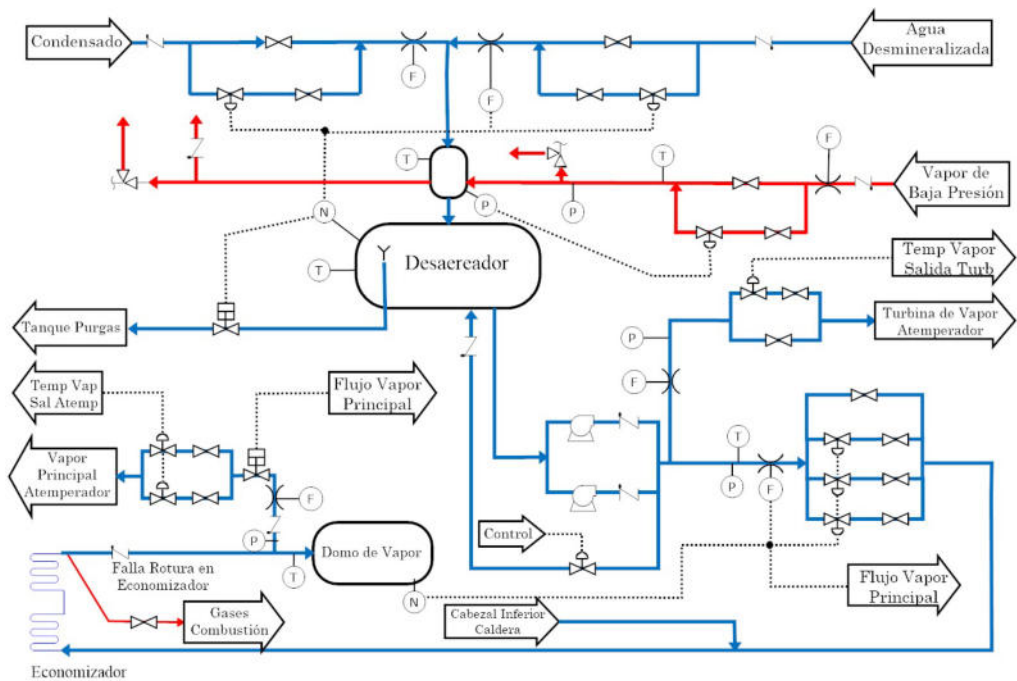


Figura 7.3: Diagrama del Sistema de Agua de Alimentación.

7.3.2. Descripción del Sistema de Combustibles

El sistema combustible de la caldera utiliza combustóleo como combustible líquido y cuenta con una línea de recirculación para mantener la temperatura adecuada para quemarse aproximadamente a $117\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para quemar el combustóleo en estado líquido se debe romper en partículas en forma de rocío muy fino a través del vapor de atomización. El rocío fino de combustóleo atomizado permite que más oxígeno reaccione con las partículas del combustóleo aumentando la eficiencia de la combustión de los quemadores del hogar. El vapor de atomización proviene del cabezal de vapor de presión intermedia y alimenta a los quemadores después de pasar por el juego de válvulas que regulan su presión y flujo. Para el sistema de gas combustible utiliza gas natural y de refinería. Los combustibles son suministrados por sus líneas de tuberías para ser quemadores en dos niveles con cuatro quemadores cada uno haciendo un total de ocho.

Los quemadores son tipo tangencial y tienen una “bola de fuego”. Ésta se define como la condición mínima de operación con la energía suficiente para mantener la combustión del

combustible admitido. Para cumplir con este objetivo, se conservan los pilotos en servicio para mantener la flama principal de los quemadores. Una vez alcanzada la bola de fuego se permite apagar los pilotos transfiriendo el monitoreo de la flama del quemador a los detectores de los quemadores.

El sistema de combustible y el sistema de gas combustible de la caldera tienen un control de suministro durante la etapa de cargas bajas y a plena carga. Ambos sistemas están relacionados con la lógica de arranque de pilotos y quemadores, lógica de quemadores de combustóleo, lógica de disparo maestro y lógica de purga. En las Figuras 7.4 y 7.5 se presentan dos diagramas simplificados del proceso.

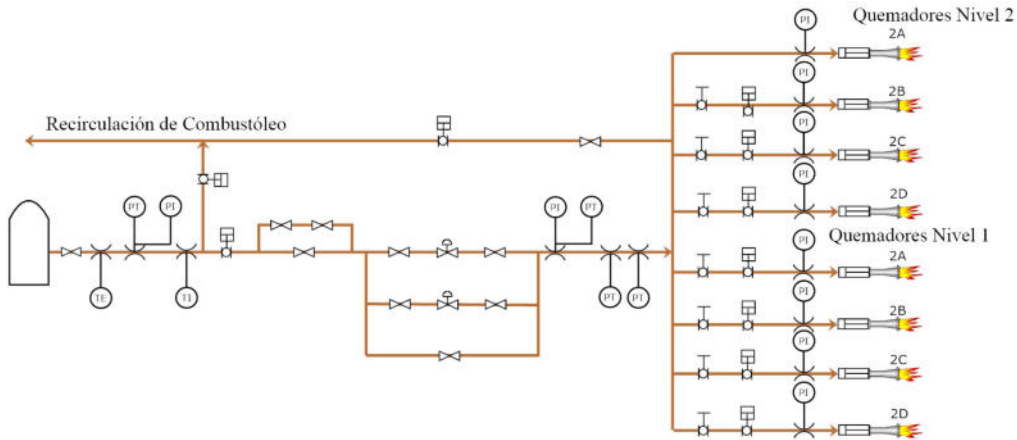


Figura 7.4: Diagrama de Sistemas de combustible, combustóleo.

7.4. Modelado en simuladores de entrenamiento

El modelado de los sistemas de agua de alimentación y combustibles tiene como objetivo representar el funcionamiento de cada sistema en un rango de operación que comprende la condición fría o arranque hasta su estado nominal de operación para el combustóleo y gas natural, además de cumplir con los efectos esperados durante transitorios, fallas y cambios de carga. Por razones de alcance, no se consideró el modelado del gas de refinería. La información para el desarrollo del modelo se obtiene a partir de la descripción del sistema, datos de diseño, guías de operación, balances de masa y térmicos, curvas de operación de los equipos, etc.

Por otro lado, es importante consultar la pantalla del operador para confirmar la inclusión de válvulas manuales, de control y las variables instrumentadas. La información se analiza considerando simplificaciones, hipótesis y suposiciones para un modelo con fines de simulación para entrenamiento, no para propósitos de diseño. Cuando estos pasos han concluido, se obtiene un modelo conceptual para construir las redes flujos y presiones.

En el caso del modelo de agua de alimentación se considera que la parte superior del desareador está simulado como el punto donde se mezcla el vapor con el agua como una mezcla perfecta, las interacciones con agua de condensado y agua desmineralizada se simulan como puntos de presión externa cuyos valores pueden ser cambiados por el instructor. Las válvulas de seguridad de la línea de alimentación de baja presión se simulan con una sola válvula equivalente. El desareador considera cantidades mínimas de líquido y de vapor y se modela como un tanque siempre en equilibrio termodinámico; además, permite la presencia de gases incondensables (aire).

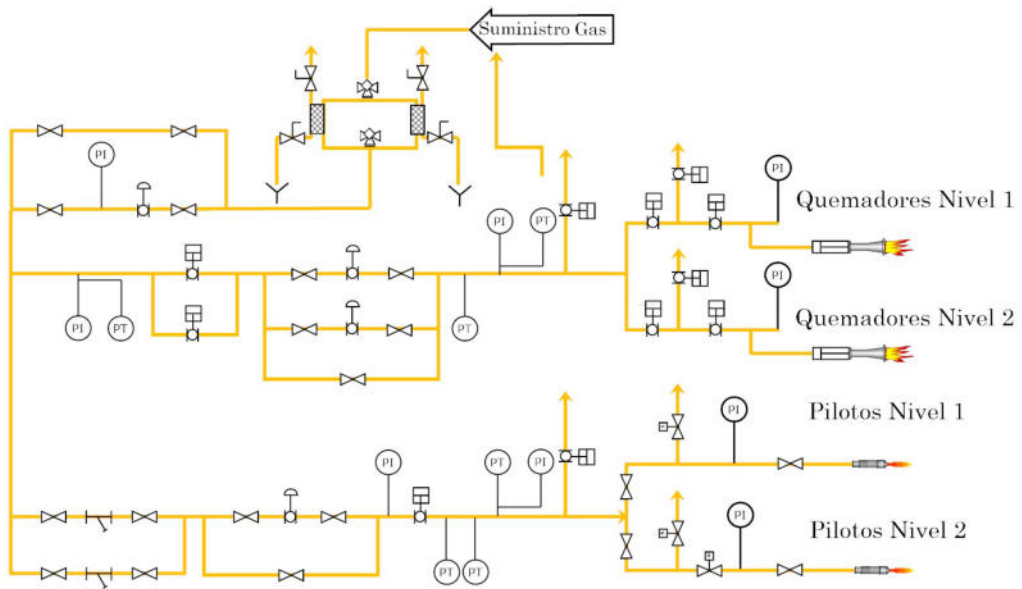


Figura 7.5: Diagrama de Sistemas de combustible, gas natural.

Para el modelo de los sistemas de combustibles se simula sólo el gas natural con variaciones en los principales componentes: gas metano (CH_4) y etano (C_2H_6); los componentes restantes: nitrógeno (N_2) propano (C_3H_8), n-butano (C_4H_{10}), iso-butano (C_4H_{10}), iso-pentano (C_5H_{12}), n-pentano (C_5H_{12}), n-hexano (C_6H_{14}) y bióxido de carbono (CO_2) se calculan automáticamente para ajustar que la suma de las composiciones individuales sea igual a la unidad. Para el combustóleo se consideran las variaciones en los principales componentes: carbón (C) e hidrógeno (H_2), los componentes restantes: oxígeno (O_2), azufre (S_2), ceniza, agua y sedimentos se calculan automáticamente para ajustar que la suma de las composiciones individuales sea igual a la unidad. Como trazas (compuestos menores a una millonésima parte del total), se tienen asfaltenos, vanadio y níquel. Dado que esta baja concentración no es significativa, no se consideran en la composición del combustible.

Normalmente se trabaja con datos al 100 % de la carga para calcular los parámetros de cada uno de los accesorios que forman las redes de flujos y presiones. La programación se realiza para balances de masa, nodos de energía y nodos capacitivos como tanques, desaeradores entre otros. Los modelos se prueban individualmente con controles locales antes de la integración global con el sistema de control distribuido, cuando se realizan las pruebas en fábrica y en sitio, los modelos podrían tener algunas discrepancias de acuerdo con el funcionamiento esperado y se realizan los cambios necesarios para cumplir con la información base de diseño.

En general las suposiciones y ecuaciones usadas en este trabajo son aquéllas que se usan, de manera común, en los desarrollos de diseño y estimaciones de las ciencias de la ingeniería, en específico de la ingeniería química. Las unidades empleadas en este trabajo se expresan en el sistema internacional, excepto en las gráficas de tendencias del simulador que se explican en la Sección 7.5. La nomenclatura usada en las ecuaciones se presenta en la Sección 7.7.

7.4.1. Descripción del modelo genérico de flujos y presiones

Se define como una red de flujos y presiones (fyp) a la sección de un sistema que transporta un fluido y está formada por accesorios, corrientes y nodos. Los accesorios son aquellos dispo-

sitivos que provocan un aumento o disminución de la presión o la temperatura de un fluido y están instalados en las corrientes. Los accesorios usados en las redes presentadas en este trabajo son válvulas, intercambiadores de calor, restricciones al flujo (tuberías, codos, etc.), y bombas. Estos accesorios pueden ser divididos en restricciones variables (válvulas que puedan cambiar su apertura), restricciones constantes (válvulas que no puedan cambiar su apertura, tuberías, codos, bombas apagadas, etc.) y equipos rotatorios, esto es, accesorios que aumenten la presión del fluido que pase a través de ellos (bombas encendidas).

Una corriente es la conexión física entre dos nodos con accesorios en cada una de ellas y representa la tubería que conforma la red. Una corriente puede incluir una o más subcorrientes cuando dos nodos están conectados por una o más corrientes en paralelo. La topología de una red de fyp es una disposición particular de los elementos de la red que permite el flujo a través de sus elementos. La topología puede cambiar, por ejemplo, si una corriente se elimina de la red de fyp porque una válvula está cerrada. La topología completa es la teórica presentada cuando en todas las corrientes se permite flujo a través de ellas.

Un nodo puede ser externo o interno. Un nodo externo es un punto de la red de fyp donde se conoce la presión en cualquier momento. Estos nodos son fuente o sumidero de flujos y sus presiones respectivas no son calculadas por *flupre*, son calculadas de acuerdo con la frontera que representen, que puede ser un tanque abierto, un recipiente a presión, etc. (nodos capacitivos, presentados en la Sección 7.4.3). Un nodo interno es una unión o división de dos o más flujos.

Un sistema puede tener una o más redes de fyp. Cada una de estas redes tiene nn nodos y nc corrientes. Cada nodo k tiene asociadas $n_{ce,k}$ corrientes de entrada (provenientes de otros nodos) y $n_{cs,k}$ corrientes de salida (dirigidas a otros nodos).

Se asocia una presión a cada nodo interno y el método de solución calcula el valor de la presión. El modelo de la red de flujos y presiones resuelve las ecuaciones matemáticas asociadas con una red para obtener los valores numéricos de los flujos en las corrientes y de las presiones en los nodos.

El modelo se deriva de la ecuación de momentum en cada corriente y la ecuación de continuidad en cada nodo, es decir considerando que en cada nodo se cumple que todas las entradas y salidas son igual a la siguiente ecuación:

$$\sum_{ien=1}^{n_{ce,k}} w_{e,ien} - \sum_{isn=1}^{n_{cs,k}} w_{s,isn} = 0. \quad (7.4.1)$$

Esta ecuación se aplica para cada uno de los nodos $k=1, \dots, nn$.

La ecuación de momentum se aplica a cada una de las nc corrientes:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho g_x. \quad (7.4.2)$$

Considerando que los términos de aceleración espacial y temporal no son importantes y que las fuerzas que actúan sobre el fluido se equilibran instantáneamente, se puede establecer un modelo que integra la ecuación a lo largo de la corriente como:

$$\Delta P = -L\Delta\tau + \rho g\Delta z, \quad (7.4.3)$$

donde el término tensor de esfuerzo τ puede evaluarse utilizando expresiones empíricas para cualquier tipo de accesorio (restricciones variables, restricciones constantes y equipos rotatorios).

Para restricciones variables y restricciones constantes, las relaciones de caídas de presión ΔP son, respectivamente [11, pág. 6-6:6-9]:

$$w^2 = k' \rho A p^s (\Delta P + \rho g\Delta z). \quad (7.4.4)$$

$$w^2 = k'' \rho (\Delta P + \rho g\Delta z). \quad (7.4.5)$$

Para equipos rotatorios (bombas, compresores, ventiladores, etc.) la ecuación puede expresarse como [11, pág. pp. 6-6:6-9]:

$$\Delta P = \frac{k'_1}{\rho} w^2 + k'_2 w \omega + \rho k'_3 \omega^2 - \rho g \Delta z. \quad (7.4.6)$$

Nótese que el primer término del lado derecho de esta ecuación representa la restricción al flujo de una bomba cuando no está encendida.

En las ecuaciones (7.4.4), (7.4.5) y (7.4.6), ΔP representa la caída de presión en cada accesorio. Considerando que, para un instante dado de simulación, las variables independientes tienen un valor constante (aperturas, densidades y velocidades angulares), las constantes pueden agruparse en un equivalente para cada término semejante de una manera genérica como:

$$\Delta P = \kappa'_1 w^2 + \kappa'_2. \quad (7.4.7)$$

También debe considerarse que una corriente puede tener más de un accesorio conectados en serie o paralelo, así, agrupando las constantes de estos accesorios puede tenerse que, para dos nodos arbitrarios conectados entre sí, n_e y n_s , la ecuación representativa de esa corriente sería:

$$P_{n_e} - P_{n_s} = \kappa_1 w_{co}^2 + \kappa_2. \quad (7.4.8)$$

En la Figura 7.6 se presenta la red de flujos y presiones del sistema de agua de alimentación. Una vez obtenido el modelo conceptual del sistema, se realizan las siguientes suposiciones: Las caídas de presión se concentran en las válvulas o accesorios, además de la red de agua de alimentación, las redes del combustóleo y del gas combustible para quemadores y pilotos se resuelven con el paquete genérico *flupre* [9, 14]. Para un determinado instante de simulación, *flupre* resuelve las ecuaciones de materia y cantidad de movimiento y las ecuaciones de energía se solucionan de manera independiente. De acuerdo con el modelo que se ejecute primero, los cambios producidos por el balance de energía (densidad y otras propiedades) o los cambios efectuados por los balances de masa y cantidad de movimiento (flujos másicos y presiones), serán tomados por el modelo que los tenga como entradas en el siguiente paso de tiempo.

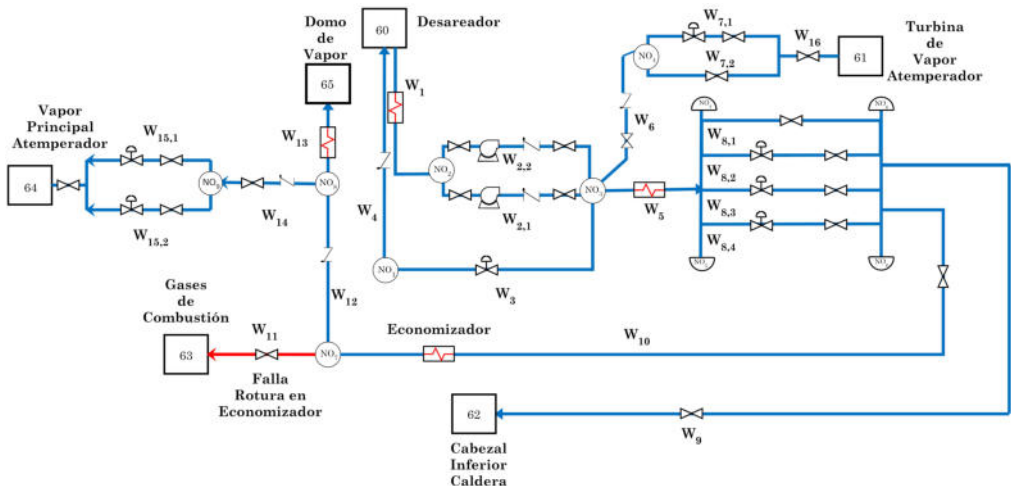


Figura 7.6: Red de Flujos y Presiones del Sistema de Agua de Alimentación.

7.4.2. Nodos de energía

Se cuenta con un modelo genérico reportado en [13] que resuelve el balance de energía y transferencia de calor y considera los fenómenos de ebullición, condensación y convección tanto natural como forzada considerando las características físicas representativas de cada nodo como diámetro hidráulico y área de transferencia. Las correlaciones consideran la presencia de aire y la calidad del vapor. La principal suposición es considerar que la evolución en la respuesta térmica de un sistema es más lenta comparada con la respuesta de los flujos, por esta razón pueden desacoplarse las ecuaciones del balance de energía de las de cantidad de movimiento y balance de materia. El balance de energía se aplica a los nodos donde al menos dos corrientes entregan flujo y/o donde el nodo representa un equipo de transferencia de calor. En el modelo de agua de alimentación el nodo de energía se aplica en las bombas de agua de alimentación y en el economizador.

El modelo de un economizador se presenta en [8]. Se basa en parámetros concentrados pero dividiendo al equipo en 18 zonas, haciendo de éste un modelo entre *CFD* (Computational Fluid Dynamics) y parámetros concentrados cuya ejecución está fuera de tiempo real.

En los nodos de energía, el cambio de la entalpía se toma de la ecuación de energía para un fluido en un volumen de control donde no se realiza trabajo:

$$\frac{dh_{ke}}{dt} = \frac{\sum_{ice=1}^{nce,ke} w_e (h_{e,ice} - h_{ke}) + q_{mt,fl} - q_{fl,mt}}{m_{ke}}, \quad (7.4.9)$$

siendo m_{ke} , la masa del fluido en el nodo que puede ser una mezcla de agua líquida, vapor y aire y q , el flujo de calor que entra o sale del nodo como se presenta en la Figura 7.7. La ecuación se aplica para cada nodo de energía $ke = 1, \dots, nte$. La presión del nodo se calcula con *flupre*.

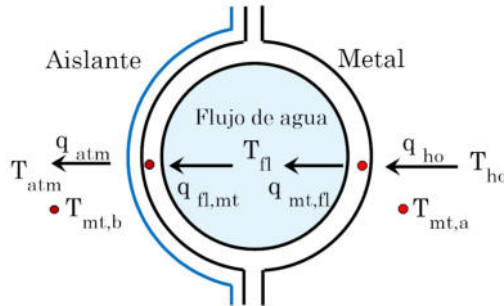


Figura 7.7: Representación esquemática de un nodo de energía.

Con ésta y la entalpía se calculan las propiedades termodinámicas y las masas de cada especie y fase.

El modelado del comportamiento dinámico de las temperaturas del metal, se obtiene de la ecuación de energía considerando su masa m_{mt} y su capacidad calorífica C_{pmt} como constantes:

$$\frac{dT_{mt,a,ke}}{dt} = \frac{q_{ho} - q_{mt,fl}}{m_{mt,a} C_{pmt}}, \quad (7.4.10)$$

$$\frac{dT_{mt,b,ke}}{dt} = \frac{q_{fl,mt} - q_{atm}}{m_{mt,b} C_{pmt}}. \quad (7.4.11)$$

El calor de los gases de combustión se calcula con correlaciones apropiadas y son parte del modelo aire-gases. La sumatoria de calores está formada por aquéllos proporcionados por la fuente de calor hacia el metal y el calor del fluido al metal cuando se simulen pérdidas.

En el caso de nodos calculados por *flupre* donde se tienen medidores de temperatura y no se tiene contacto con los gases de combustión u otra fuente de calor, es necesario calcular el valor de la temperatura usando únicamente la ecuación (7.4.11), siendo la temperatura $T_{mt,b}$ la representativa de todo el metal.

El balance de energía se usó para resolver el sistema completo de agua de alimentación, incluyendo los lazos del agua y de vapor. Nótese que la presión de domo, valor de frontera para el modelo de agua de alimentación, es conocida en todo momento y es calculada por el modelo de caldera, mismo que calcula también el nivel del domo. Este modelo y el de aire-gases no se abordan en este trabajo.

7.4.3. Nodos capacitivos, modelado del desaerador del sistema de agua de alimentación

Un modelo para un desaerador que no considera la presencia de gases incondensables, ni la pérdida de calor a la atmósfera se presenta en [10]. El modelo reportado se comporta adecuadamente alrededor del estado operativo al 100% de carga, pero las simplificaciones realizadas hacen que éste no sea adecuado para un simulador de entrenamiento que se aplique a todo el rango de operación (la presencia de incondensables es imprescindible para la simulación del equipo en frío). Otro modelo de un desaerador se ha reportado en [15] donde se formula empleando como variables de estado la masa de aire, la masa del líquido y la presión total. Este modelo representa bien a los fenómenos ocurridos en el desaerador en todo el rango de operación, pero su formulación se basa en el equilibrio de las fases líquida y de vapor del agua, por lo que es necesaria que siempre se tenga la presencia de ambas. El modelo se aplicó y probó en un simulador para una termoeléctrica de ciclo combinado con resultados adecuados para fines de entrenamiento.

El modelo que aquí se presenta, mejora a éste último teniendo como variables de estado la energía interna total, la masa de agua total y la masa de aire. Esto permite (potencialmente), tener el caso con el desaerador lleno de líquido subenfriado o de vapor sobrecalentado y no necesariamente requerir estar en estado de saturación. Probar y adecuar la programación de este modelo para estos casos, es un trabajo futuro. El modelo está basado en las siguientes ecuaciones:

Balance de materia para el agua (líquido + vapor):

$$\frac{dm_{ag}}{dt} = w_{lq-e} - w_{lq-s} + w_{vp-e} - x_{vp}w_s. \quad (7.4.12)$$

Balance de masa para el aire (incluyendo válvulas que pudiesen existir como venteos, rompedora de vacío, etc.):

$$\frac{dm_{ai}}{dt} = w_{ai-e} - x_{ai}w_s. \quad (7.4.13)$$

En ambos balances de masa, el flujo representado de cada componente (agua líquida, vapor o aire) son el total de las entradas o salidas de cada especie.

Balance de energía en el desaerador:

$$\frac{dU_t}{dt} = \sum_{ied=1}^{ned} w_{e,ied} h_{e,ied} - \sum_{isd=1}^{nsd} w_{s,isd} h_{s,isd} + q. \quad (7.4.14)$$

De la primera ley de la termodinámica [11, pág. 4-5]:

$$H_t = U_t + P_t V_t. \quad (7.4.15)$$

La entalpía en el desaerador, para condiciones de saturación, es:

$$H_t = m_{lq} h_f + m_{vp} h_g + m_{ai} C_{p_{ai}} (T - T_{ref}). \quad (7.4.16)$$

Considerando la ley de las presiones parciales de Dalton, la cual establece que a cualquier temperatura específica la presión total ejercida por una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los gases constituyentes [11, pág. 4-8]:

$$P_t = P_{vp} + P_{ai}. \quad (7.4.17)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7.4.16) y (7.4.17) en la ecuación (7.4.15),

$$U_t + (P_{vp} + P_{ai})V_t = m_{lq}h_f + m_{vp}h_g + m_{ai}Cp_{ai}(T - T_{ref}). \quad (7.4.18)$$

Siendo

$$Cp_{ai}(T - T_{ref}) = h_{ai}. \quad (7.4.19)$$

La fracción del vapor es en la fase gaseosa x_v , o en el desaerador $x_{v,c}$:

$$x_{vp} = \frac{m_{vp}}{m_{mz}}, \quad (7.4.20)$$

$$x_{v,c} = \frac{m_{vp}}{m_{ag}}, \quad (7.4.21)$$

donde:

$$1 - x_{v,c} = \frac{m_{lq}}{m_{ag}}, \quad (7.4.22)$$

o

$$m_{lq} = (1 - x_{v,c})m_{ag}. \quad (7.4.23)$$

Con estas expresiones:

$$0 = \frac{U_t}{m_{ag}} + \frac{P_{vp}V_t}{m_{ag}} - h_f - \frac{m_{ai}h_{ai}}{m_{ag}} + \frac{P_{ai}V_t}{m_{ag}} - x_{v,c}(h_g - h_f). \quad (7.4.24)$$

El volumen total en el desaerador es constante:

$$V_t = \frac{m_{lq}}{\rho_f} + \frac{m_{mz}}{\rho_{mz}}, \quad (7.4.25)$$

y el volumen de la fase gaseosa es:

$$V_{mz} = V_t - \frac{m_{lq}}{\rho_f}. \quad (7.4.26)$$

Donde, considerando la ley de Dalton y que la mezcla gaseosa se comporta como gas ideal:

$$\rho_{mz} = \rho_{ai} + \rho_{gs}, \quad (7.4.27)$$

$$\rho_{ai} = \frac{P_{ai}M_{ai}}{RT}, \quad (7.4.28)$$

$$P_{ai} = \frac{RTm_{ai}}{V_{mz}M_{ai}}, \quad (7.4.29)$$

y

$$m_{mz} = m_{vp} + m_{ai}. \quad (7.4.30)$$

Dividiendo la ecuación (7.4.25) entre m_x , sustituyendo mv de la ecuación (7.4.21), ml de la ecuación (7.4.22) y despejando x_v, c :

$$x_{v,c} = \left(\frac{\rho_f \rho_{mz}}{\rho_f - \rho_{mz}} \right) \left(\frac{V_f}{m_{ag}} - \frac{1}{\rho_f} - \frac{m_{ai}}{m_{ag} \rho_{mz}} \right). \quad (7.4.31)$$

Otras ecuaciones necesarias son, la fracción másica del aire x_{ai} y el volumen V_{lq} que se definen como:

$$x_{ai} = \frac{m_{ai}}{m_{mz}}, \quad (7.4.32)$$

$$V_{lq} = \frac{m_{lq}}{\rho_f}. \quad (7.4.33)$$

7.4.4. Propiedades termodinámicas

Como puede verse en la formulación, es necesario calcular algunas propiedades termodinámicas del agua (agua líquida para el caso del agua de alimentación, vapor para el caso del vapor de baja presión y dos fases en equilibrio para el caso del desaerador). Las propiedades termodinámicas fueron desarrolladas por el INEEL [16] como ajustes a funciones empíricas con mínimos cuadrados tanto en función de la presión y entalpía como de la presión y temperatura. Estas funciones ajustadas presentadas en esta sección, ecuaciones (7.4.37), (7.4.38), (7.4.39) y (7.4.40) se propusieron de tal manera que los errores fuesen menores al 1% respecto al valor esperado (tablas de vapor de Arnold [2]). Las funciones se ajustaron a veintiuna regiones diferentes de presión y son válidas entre 689.5 y 3.12×10^6 Pa y entre 263 y 995 K (equivalentes a 0.42 y 3800 kJ/kg de entalpía). Estas funciones también calculan las derivadas: $\frac{dPT}{dt}$ para la región de saturación (PT puede ser cualquier propiedad termodinámica), $\frac{\partial PT}{\partial P}$ y $\frac{\partial PT}{\partial h}$ tanto para líquido subenfriado y vapor sobrecalentado.

Conociendo las derivadas parciales de una propiedad termodinámica PT , para el caso de líquido subenfriado y vapor sobrecalentado puede conocerse su derivada total como [11, pág. 3-25]:

$$\frac{dPT}{dt} = \frac{\partial PT}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial PT}{\partial h} \frac{dh}{dt}. \quad (7.4.34)$$

Para el caso de propiedades en estado de saturación, donde las propiedades termodinámicas son función de una sola variable de estado, la derivada total es [11, pág. 3-24]:

$$\frac{dPT}{dt} = \frac{dPT}{dP_v} \frac{dP_v}{dt}. \quad (7.4.35)$$

La derivada del volumen específico en condiciones de saturación (líquido o vapor) con respecto a la presión de vapor es [11, pág. 3-10]:

$$\frac{dv}{dP_v} = -\frac{1}{\rho^2} \frac{d\rho}{dP_{vp}}. \quad (7.4.36)$$

Como se mencionó, las funciones se aplican a tres casos diferentes: líquido subenfriado, vapor sobrecalentado y estado de saturación. Para el caso de saturación, las propiedades del líquido y del vapor son sólo una función de la presión y se calculan de la siguiente manera (temperatura, entalpía y entropía):

$$(T, h, s) = k_{t,1} + k_{t,2} \sqrt{P_{vp}}, \quad (7.4.37)$$

donde $k_{t,1}$ y $k_{t,2}$ (y las demás subsecuentes) son constantes para determinar la PT en particular y depende de la fase (líquido o vapor).

Las densidades ρ de líquido saturado y vapor se calculan como:

$$\rho = k_{t,3} + k_{t,4} P_{vp} + k_{t,5} P_{vp}^2. \quad (7.4.38)$$

Para líquidos subenfriados y vapor sobrecalentado, las funciones son:

$$(T, h, s, \rho) = k_{s,1} + k_{s,2} h + k_{s,3} h^2, \quad (7.4.39)$$

donde:

$$k_{s,i} = k_{s,4} + k_{s,5} \sqrt{P}. \quad (7.4.40)$$

Para asegurar un error relativo inferior al 1%, las ecuaciones (7.4.39) y (7.4.19) se modificaron ligeramente en algunas regiones de P .

Las propiedades de transporte (viscosidad, capacidad calorífica, expansión térmica y conductividad térmica) se calculan para líquidos, vapor y aire con funciones polinómicas hasta el cuarto grado (para diferentes regiones P y T).

En particular, la entalpía del aire se calcula en función de su capacidad calorífica [11, pág. 4-14]:

$$h_{ai} = \int_{T_{ref}}^T C_{p_{ai}} dT, \quad (7.4.41)$$

donde h_{ai} se aproxima con un polinomio de cuarto orden [7] usando los datos reportados en [3].

Además de las propiedades termodinámicas, también son relaciones aceptadas para la transferencia de calor, caídas de presión y otras ecuaciones empíricas ajustadas para casos particulares (por ejemplo, la curva de arranque o paro de una bomba donde la velocidad angular se incrementa hasta su valor nominal o disminuye hasta cero; de alguna forma especificada una vez dada la acción de arranque o apagado, respectivamente).

7.4.5. Esquema de solución

El simulador está formado por once modelos de proceso. Cada uno de ellos está compuesto, de manera general, de cuatro grandes bloques:

- Sistema de control de cada uno de los once modelos de proceso.
- Red de flujos y presiones, ecuaciones (7.4.1) y (7.4.8).
- Nodos de energía, ecuaciones (7.4.9) a (7.4.11).
- Nodos capacitivos, ecuaciones (7.4.12) a (7.4.33).

El sistema de control del modelo tiene como tareas: recibir las acciones del operador y del instructor, procesarlas, hacer las acciones propias sobre el control mismo (si aplica) y comunicarlas a los modelos; ejecutar las acciones automáticas del control y desplegar las señalizaciones apropiadas como alarmas, permisos y otras condiciones instrumentadas. En sí, el control actúa como un perturbador del modelo dando valores a las variables independientes x_i que son acciones de operador, instructor y automatismos.

Dadas las variables x_i , estas ecuaciones (red de flujos y presiones y nodos de energía) obtienen un conjunto de variables dependientes y_l .

$$y_l = f(x_i, z_k), \quad (7.4.42)$$

donde z_k son las variables de estado. Los nodos capacitivos representan puntos donde puede conocerse la presión (y otras variables) en función de sus variables de estado z_k .

Los nodos capacitivos también calculan otras variables dependientes y_j .

$$y_j = f(x_i, z_k). \quad (7.4.43)$$

Una característica de los nodos capacitivos es el cálculo de las derivadas de las variables de estado, que dependen del equipo representado y de la manera en que se plantea el modelado.

$$\frac{dz_k}{dt} = f(x_i, z_k). \quad (7.4.44)$$

Las derivadas deben ser integradas para conocer el valor de las variables de estado en el siguiente tiempo de simulación:

$$z_k = \int (x_i, z_k) dt. \quad (7.4.45)$$

La obtención de las variables $\frac{dz_k}{dt}$, y_j y y_l puede requerir métodos iterativos.

En el caso del modelo de agua de alimentación, el método de integración es el de Euler aplicado para todas las variables de estado z_k :

$$z_{\tau+1} = z_{\tau} + \frac{dz_{\tau}}{dt} \Delta t, \quad (7.4.46)$$

donde el subíndice τ representa un paso de simulación. En el simulador en cuestión se usó un paso de tiempo $\Delta t = 0,1s$.

Este esquema de solución de ecuaciones se aplica para cada uno de los modelos de manera secuencial de tal manera que al final de cada paso de tiempo se tiene el valor de todas las variables de estado y todas las variables dependientes para repetir el ciclo.

Lo anterior puede verse de manera esquemática en la Figura 7.8, donde las abreviaciones del dibujo significan: SC, sistema de control; N de E, nodo de energía y N Cap, nodo capacitivo.

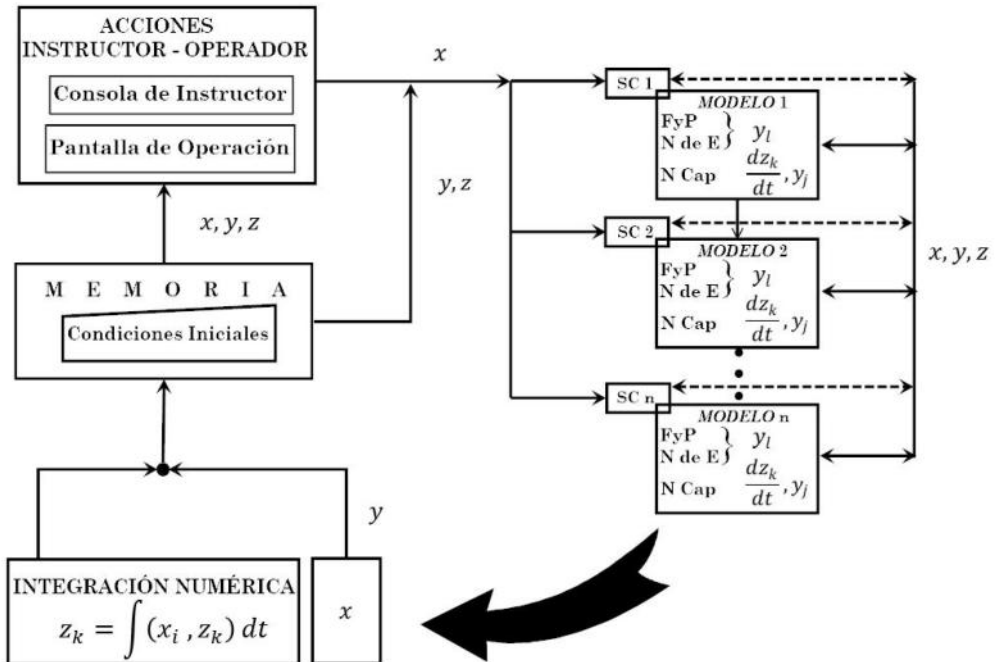


Figura 7.8: Esquema de Solución en el Simulador.

7.5. Resultados

Los resultados del simulador en estado estacionario se compararon con los valores de diseño a 25, 50, 80, 100 y 110 % de la carga nominal y con los valores de referencia para cada uno de los instrumentos de medición del proceso.

Para ejemplificar el comportamiento de los modelos presentados en este capítulo, se ejecutó el simulador completo con sus controles en automático. Se inició del 100 % de carga con la caldera operando con combustóleo.

El reto para el operador consiste en reaccionar de manera adecuada para poder controlar el equipo llevándolo de una manera segura a una condición diferente de operación estable y, si es necesario, realizar un disparo seguro, o en su defecto, hacer un disparo inmediato pero controlado para evitar daños al equipo y provocar el menor disturbio posible en los sistemas restantes que utilizan la generación de vapor de esta unidad.

Sin embargo, durante esta prueba se decidió que el operador no efectuara acción alguna y el simulador presenta los resultados dinámicos correspondientes a las acciones del control. El instructor se limitó a introducir las fallas de acuerdo con la siguiente descripción:

1. Cerca de los dos minutos se introdujo la falla de rotura del economizador con un 80 % de severidad (entre algunas causas que pueden provocar este problema está el fenómeno de corrosión). La falla pasa del 0 % al 80 % en un período de 10 segundos.
2. El simulador continúa activo cuatro minutos más.
3. Alrededor de los seis minutos se aumenta la falla al 100 % (con una transición de 10 segundos).
4. A los diez minutos termina la simulación.

La falla de rotura de tubos del economizador se localiza a la salida del mismo y se ajustó, de acuerdo con el cliente, de tal manera que al 100 % de severidad el control no sea capaz de controlar la situación de manera automática durante los dos minutos siguientes de activación de la falla estando la unidad operando al 100 % de carga con cualquier combustible o combinación de ellos. Los resultados de algunas variables del simulador se presentan en las Figuras 7.9 a 7.14.



Figura 7.9: Variables representativas del desaeador parte agua.

Las gráficas de tendencia mostradas son las que despliega el simulador como apoyo del operador (en este caso las variables mostradas son predefinidas y sus unidades son las acostumbradas por los operadores). Nótese que el tiempo reportado en ellas está en orden inverso, es decir, el tiempo 0:00 es el tiempo último del simulador y el tiempo 0:10 es el tiempo en que se inició la simulación (representa el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba). Las unidades en estas gráficas son: para flujo *Ton/h* (toneladas por hora), para temperatura *°C*, flujo volumétrico *m³/h*, presión en *kPa*, conductividad en *μS/cm*, las aperturas en porcentaje y el tiempo en horas y minutos (00:00).

El economizador se encuentra ubicado a la salida de la trayectoria de los gases, justo antes de la chimenea. Es por esto que el flujo de rotura (agua que fluye y se vaporiza de los tubos

del economizador a la trayectoria de los gases de combustión) no afecta mayormente a la transferencia de calor de las paredes de agua ni a los sobrecalentadores.

Se dará una somera explicación del comportamiento de algunas de las variables presentadas en los gráficos. Las variables de las Figuras 7.9 a 7.10 se muestran en estado estable durante los primeros dos minutos. Al introducir la falla al 80 % y posteriormente al 100 % de severidad, se puede ver que los controles de nivel y presión del desaereador hacen muy bien su función de tal manera que estas variables, y con éstas la temperatura del agua, tengan variaciones muy pequeñas. Las variables de la Figura 7.11 se muestran en estado estable durante los primeros dos



Figura 7.10: Variables representativas del desaereador parte vapor

minutos. Al introducir la falla se puede ver un descenso leve en la presión del domo debido a la pérdida de flujo proveniente del economizador (parte del flujo que iba hacia el domo es desviado hacia los gases de combustión). Este descenso de presión produce una súbita vaporización del agua del domo haciendo que el burbujeo aumente la lectura del nivel del domo.

Después de este fenómeno, el nivel regresa a su medición normal (sin burbujas en el domo) y el control aumenta el flujo de agua de alimentación para tratar de mantenerlo en su punto de ajuste e iniciar su ascenso. Esto funciona durante los siguientes cuatro minutos hasta que la falla de rotura de tubos del economizador aumenta a su 100 % de severidad. En ese momento, se observa que el nivel desciende hasta alcanzar el punto de disparo.

El disparo conlleva el corte de flujo de combustible provocando un descenso súbito en la presión del domo y el fenómeno de burbujeo explicado anteriormente. Después de un comportamiento oscilatorio y al no tener la caldera salida del vapor del domo después del disparo, el nivel tiende a recuperar su valor normal.

La presión del domo inicia un descenso al no haber combustible para mantener su presión. Las variables de la Figura 7.12 se muestran en estado estable durante los primeros dos minutos. Al introducir la falla se puede ver un descenso brusco en la presión de agua de alimentación. Al mismo tiempo el aumento de nivel debido al efecto de burbujeo hace que disminuya momentáneamente la apertura de su válvula de control.

Después de este fenómeno, el nivel regresa a su medición normal y el automatismo abre

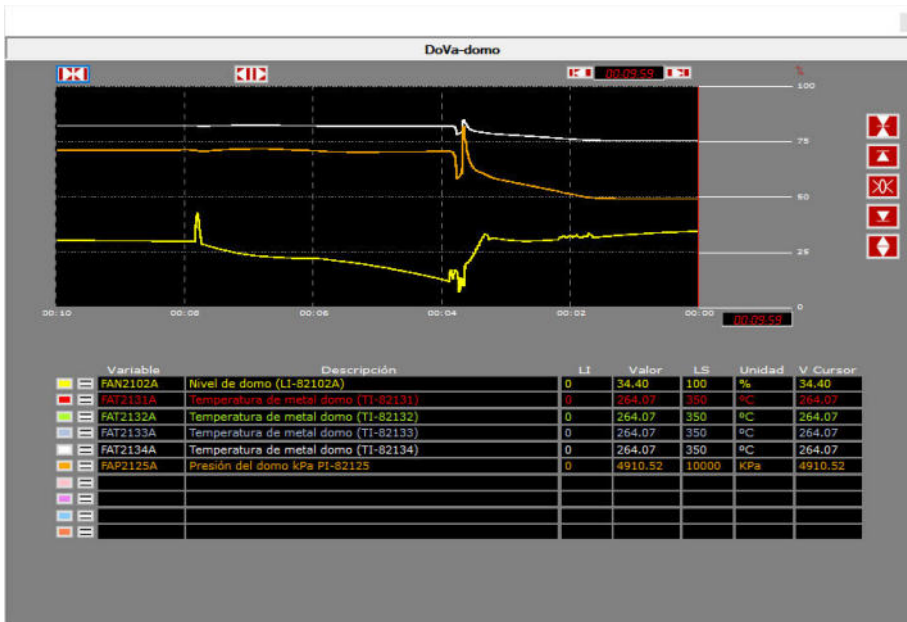


Figura 7.11: Variables representativas del domo de vapor.



Figura 7.12: Algunas variables del sistema de agua de alimentación.

su válvula de control aumentando el flujo de agua de alimentación para tratar de mantener el nivel en su punto de ajuste. La apertura de la válvula de control se satura al 100% y con esto el flujo de agua de alimentación toma un valor fuera de la escala de la gráfica. El nivel aumenta

durante los siguientes cuatro minutos hasta que la falla de rotura de tubos del economizador aumenta a su 100 % de severidad. La apertura de la válvula de control ya está saturada y no se ve ningún efecto adicional. Cuando el nivel desciende hasta alcanzar el punto de disparo, el control sigue los efectos del nivel, incluyendo el efecto de burbujeo.

Después de un comportamiento oscilatorio, los controles tienden a estabilizarse. Nótese que eventualmente se cierra la válvula principal del control de nivel del domo (altas cargas) y abre la válvula de control de nivel de bajas cargas (que se abre cuando el flujo de vapor es bajo). En el caso de la Figura 7.13, son de interés las variables de temperatura antes y después del

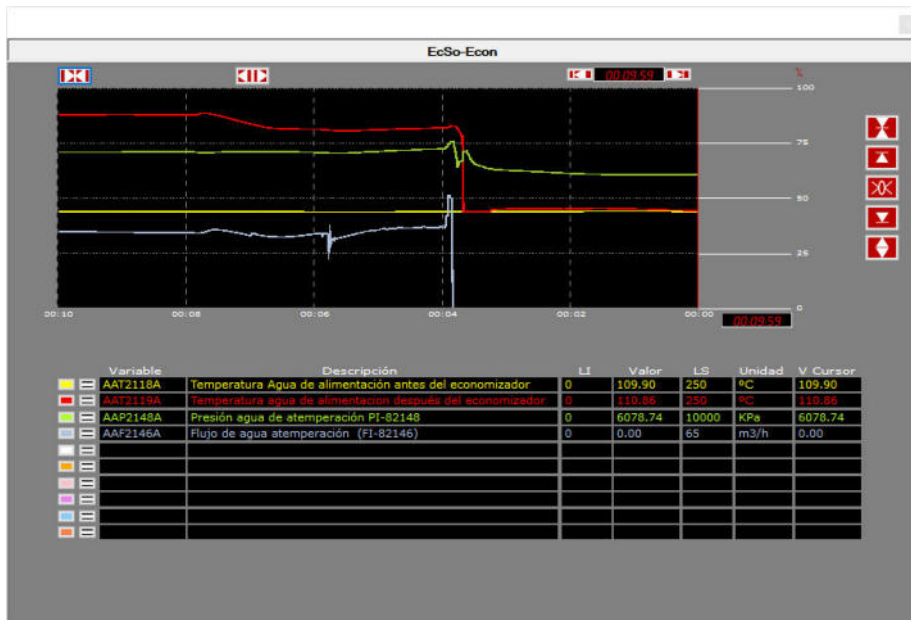


Figura 7.13: Variables del sistema de agua de alimentación en el economizador y atemperador.

economizador. Las variables se muestran en estado estable durante los primeros dos minutos. La temperatura de entrada al economizador se mantiene constante pues ésta es, básicamente, la temperatura del desaerador que no se ve afectada en esta prueba.

Al introducir la falla se puede ver un leve ascenso en la temperatura de salida del economizador seguida de un descenso. El ascenso se debe a la disminución momentánea del flujo debida al efecto de burbujeo. El descenso es ocasionado por el aumento de flujo a través del economizador.

Cuando la falla de rotura de tubos del economizador aumenta a su 100 % de severidad, el flujo a través del economizador aumenta muy poco pues el aumento en el flujo es mínimo. Después del disparo la temperatura se estabiliza (eventualmente desciende al enfriarse los gases de combustión). Las variables de la Figura 7.14 se muestran en estado estable durante todo el transitorio hasta que se dispara la caldera y tanto la presión como el flujo de combustóleo descienden a sus valores mínimos.

Otras variables no graficadas en este trabajo se comportan correctamente en éste y en todos los demás transitorios efectuados en las pruebas de aceptación hechas por el cliente usando el protocolo de pruebas definidas por él, basados en los procedimientos de arranque y operación de la planta real. En todos los casos, los resultados del simulador cumplieron con la norma ANSI ISA S77.20.01-2012. [1]

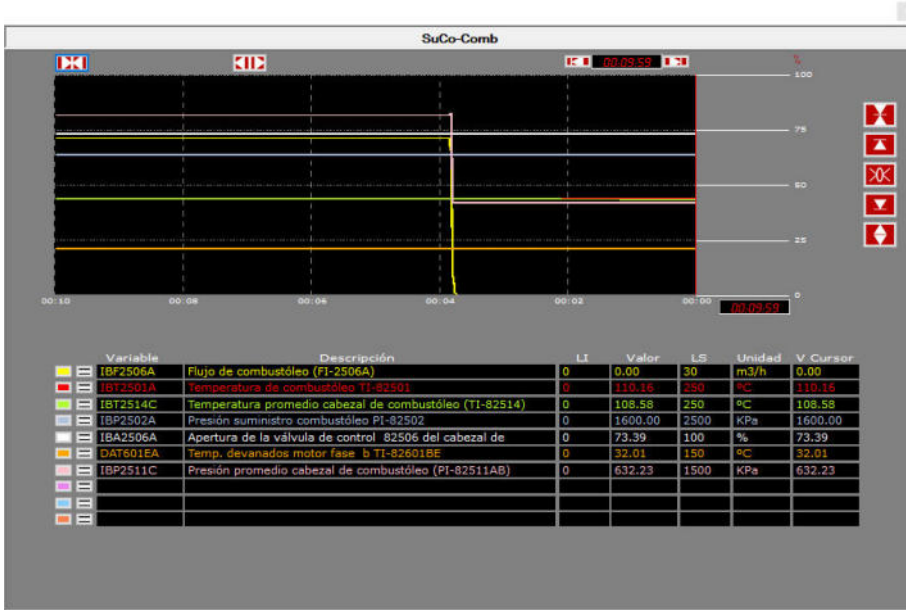


Figura 7.14: Variables representativas del sistema de combustible.

Las pruebas efectuadas al simulador, validadas por personal experto de parte del cliente, corroboraron que éste puede ser usado para dar entrenamiento al personal de operación tanto principiantes como con experiencia. El simulador aporta los beneficios genéricos resumidos en la Sección 7.2. El cliente está usando esta herramienta como un apoyo para que su personal de diseño (tanto de la parte de proceso teórica como de construcción y sus ingenieros de control) tengan una visión general del comportamiento de la planta y la importancia del papel que el equipo por ellos diseñado o construido juega en el desempeño global del proceso. Esto representa un valioso valor agregado identificado y aprovechado por el cliente a través de cursos de capacitación de operadores [6]. Actualmente, la generación de las lecciones para el simulador de calderas radiantes se encuentra en proceso.

7.6. Conclusiones

Se presentó el desarrollo de algunos modelos dentro de un proyecto multidisciplinario donde participaron dos empresas. La infraestructura y experiencia de la empresa desarrolladora fueron de suma importancia para la culminación del proyecto, como fue el caso del INEEL. El apoyo del cliente con experiencia en diseño, operación y puesta en servicio de los equipos y programación del sistema de control fue también de vital importancia. Esto ayudó a culminar el objetivo final de tener una herramienta para el adecuado entrenamiento de operadores de sistemas de generación de vapor.

Los principios básicos utilizados y el alcance propuesto, fueron los adecuados para el desarrollo de los modelos. Las pruebas efectuadas demostraron la validez de los mismos para fines de entrenamiento.

Como trabajo futuro está el hacer las adecuaciones al modelo del desaerador para permitir estados de no equilibrio termodinámico; ajustar el simulador para satisfacer los valores de la planta en cuanto a sus datos de operación en lugar de sus datos de diseño y la implementación,

validación y obtención de condiciones iniciales del modelo que considere como combustible adicional el gas de refinería.

7.7. Nomenclatura

Símbolos

A_p	—	Apertura
C_p	—	Capacidad calorífica (a presión constante)
d	—	Derivada
g	—	Gravedad
H	—	Entalpía total
h	—	Entalpía específica
k	—	Constante
M	—	Peso molecular
m	—	Masa
P	—	Presión
PT	—	Propiedad termodinámica
q	—	Flujo de calor
R	—	Constante de gas ideal
s	—	Entropía
T	—	Temperatura
t	—	Tiempo
U	—	Energía interna total
V	—	Volumen
v	—	Volumen específico
w	—	Flujo másico
x	—	Fracción másica o variable independiente
y	—	Variable dependiente
zk	—	Variable de estado
κ	—	Constante de las ecuaciones empíricas de cantidad de movimiento representativas de los accesorios agrupados de una corriente
ω	—	Velocidad angular
ρ	—	Densidad
τ	—	Tensor de esfuerzo
ς	—	Característica

Subíndices

ai	—	aire
ag	—	agua total (líquido y vapor)
atm	—	atmósfera
c	—	desaerador o contenedor
co	—	índice de corrientes
e	—	entrada
f	—	líquido saturado
fl	—	fluido
g	—	vapor saturado

<i>gs</i>	—	fase gaseosa
<i>ho</i>	—	hogar de la caldera
<i>i</i>	—	índice variable independiente
<i>ice</i>	—	índice de corrientes de entrada a un nodo de energía
<i>ics</i>	—	índice de corrientes de salida de un nodo de energía
<i>ied</i>	—	índice de entradas al desaereador
<i>ien</i>	—	índice de corrientes de entrada a un nodo
<i>isd</i>	—	índice de salidas del desaereador
<i>isn</i>	—	índice de corrientes de salida de un nodo
<i>j</i>	—	índice variable dependiente proveniente de nodos capacitivos
<i>k</i>	—	índice de nodos
<i>ke</i>	—	índice de nodos de energía
<i>l</i>	—	índice variable dependiente proveniente de flujos y presiones y nodos de energía
<i>lq</i>	—	líquido
<i>mt</i>	—	metal
<i>mz</i>	—	mezcla gaseosa
<i>nc</i>	—	número total de corrientes en una red de fyp
<i>ne, ns</i>	—	nodos conectados entre sí, de entrada y salida, respectivamente
<i>nce, k</i>	—	número de corrientes de entrada al nodo k
<i>nce, ke</i>	—	número de corrientes de entrada al nodo de energía ke
<i>ncs, k</i>	—	número de corrientes de salida del nodo k
<i>ned</i>	—	número de entradas al desaereador
<i>nn</i>	—	número total de nodos
<i>nsd</i>	—	número de salidas del desaereador
<i>nte</i>	—	número de nodos de energía
<i>ref</i>	—	referencia
<i>s</i>	—	salida
<i>t</i>	—	total
<i>vp</i>	—	vapor

Bibliografía

- [1] ANSI/ISA. **ANSI/ISA-77.20.01-2012 Fossil Fuel Power Plant Simulators: Functional Requirements**. American National Standards Institute and Instrument Society of America, 2012.
- [2] E. Arnold. **Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water and Steam, Viscosity of Water and Steam, Thermal Conductivity of Water and Steam**. Electrical Research Assoc, 1967.
- [3] Cambridge University Press, **Appendix E: Ideal Gas Properties of Air**, Recuperado de https://www.cambridge.org/es/files/9513/6697/5546/Appendix_E.pdf
- [4] EPRI. **Justification of Simulators for Fossil Fuel Power Plants, Technical Report TR-102690**. Electrical Power Research Institute, 1993.
- [5] R. I. Hernández. **Especificación Técnica para el Desarrollo de un Simulador para Entrenamiento de Personal de Calderas Radiante, Cerrey**. Centro de Tecnología Cerrey S.A. de C.V., San Nicolás de los Garza, N.L., Octubre, 2013.
- [6] R. I. Hernández, B. Durán, and C. Ambrosio. **Capítulo 5. Descripción y Uso del Simulador de Caldera VU60, Curso para Capacitación de Operadores de Calderas tipo VU60**. Centro de Tecnología Cerrey S.A. de C.V., San Nicolás de los Garza, N.L., Julio, 2013.
- [7] X. Hong and L. Hui. **An Empirical Formula of Mean Specific Heat Capacity of Ideal Gases**. 5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine, EMIM 2015, Proceedings, Volume 2, Shenyang, China, Abril 2015.
- [8] W. Jizhou, Z. Yanping, L. Yu, et al. **A Multizone Model of an Economizer in a 600 MW Boiler Unit**. *J. Energy Resources Technology*, 134(4):0416011-6, 2012.
- [9] Y. Mendoza, E.J. Roldán-Villasana, I. Galindo, et al. **Methodology to Adapt the Feedwater and Condensate System Using a Flow and Pressure Generic Model, for the Laguna Verde Nuclear Power Plant Simulator**. Proceedings, Summer Computer Simulation Conference, The Society for Modeling and Simulation International, San Jose California, July, 2004.
- [10] I. Oprisa. **Deaerator Model**. Recent Advances in Electrical Engineering, ISBN: 978-960-474-318-6, December, 2017.
- [11] R.H. Perry, D.W. Green, and J.O. Maloney. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, New York; McGraw-Hill, 1997.

- [12] E.J. Roldán-Villasana, Y. Mendoza-Alegría, M.J. Cardoso et al. **Gas Turbine Power Plant Modelling for Operation Training**. Gas Turbines, Chapter 8, ISBN 978-953-307-146-6, Sciyo, Rijeka, Croatia , October, 2010.
- [13] E.J. Roldán-Villasana, and Y. Mendoza-Alegría. **Modelling of the Drum, Water Walls, and Steam Systems of a 345 Ton/h Natural Circulation Boiler for Operators? Training**. The 6th Workshop on Applied Modeling and Simulation, Buenos Aires, Argentina, Noviembre, 2013.
- [14] E.J. Roldán-Villasana and J.A. Tavira-Mondragón. **Herramienta para la Configuración de Modelos y para Resolver las Ecuaciones Asociadas a los Flujos y Presiones en Redes Hidráulicas**. Certificado otorgado por El Instituto Nacional del Derecho de Autor al INEEL, Registro Público del Derecho de Autor, No. 03-2004-092312451700-01, 8 de octubre de 2004.
- [15] E.J. Roldán-Villasana and A.K. Vázquez. **Model of the Feed Water System Including a Generic Model of the Deaerator for a Full Scope Combined Cycle Power Plant Simulator**. European Modelling Symposium, UKSim Fourth European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation, UK Simulation Society, Pisa, Italy, November, 2010.
- [16] J.A. Tavira-Mondragón and E.J. Roldán-Villasana. **Programa para el Cálculo de Propiedades Termodinámicas de Agua-Vapor para Simuladores en Tiempo Real**. Certificado otorgado por El Instituto Nacional del Derecho de Autor al INEEL, Registro Público del Derecho de Autor, No. 03-2009-112510342200-01, 19 de enero de 2009.
- [17] J.A. Tavira-Mondragón, F. Jiménez-Fraustro, and L. Jiménez-Fraustro. **Graphical Environment to Simulate Power Plants**. European Modelling Symposium, UKSim Fourth European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation, UK Simulation Society, Pisa, Italy, November, 2010.
- [18] A. Verduzco, Y. Mendoza-Alegría, and E.J. Roldán-Villasana. **Manual de Operación del Simulador de Calderas Radiantes Cerrey**. Gerencia de Sistemas Avanzados de Capacitación y Simulación, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Agosto, 2016.