

APLICACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO EN LA PRÁCTICA INGENIERIL DE ANALISIS DE SISTEMAS TÉRMICOS

María Isabel Sosa, Alberto Fushimi
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
Avda. 1 y Calle 47, (1900) La Plata, Prov..BA.
Fax: 54 221 425 9471
misosa@volta.ing.unlp.edu.ar, afushimi@arnet.com.ar

RESUMEN. Un sistema térmico debe ser evaluado en forma global, dado que cualquier alteración en el diseño de una de las unidades afecta el funcionamiento de todas las demás. La correcta evaluación del sistema debe realizarse en modo diseño y en modo simulación operativa e implica comparar resultados de diferentes posibles alternativas. En el presente trabajo se discute la modelización computacional de sistemas térmicos utilizando hoja de cálculo, esto permite un análisis mucho más riguroso, exhaustivo y creativo del sistema a estudiar, que con las metodologías convencionales. La confección de modelos puede hacerse en forma relativamente simple si se conoce la problemática a resolver, a través de módulos que se combinan de acuerdo a un esquema conceptual. La formación y creatividad del analista son primordiales y valoriza la producción intelectual del mismo

Palabras clave: Modelización, Sistemas térmicos, Hoja de cálculo, Módulos.

1. INTRODUCCIÓN

La computación ha transformado sustancialmente la práctica ingenieril del análisis de sistemas térmicos, tradicionalmente basaba en metodologías de cálculo disponibles en “Manuales”. Actualmente, la tarea de “diseño” adquiere cada vez más las características de una investigación tecnológica original, en la que se tienen en cuenta todas las variables que ejercen alguna influencia en los resultados del caso específico a resolver. Los programas comerciales son voluminosos para abarcar un universo amplio de casos de aplicación, pero no consideran todas las variables del caso específico, descartando la posibilidad de visualizar mejores opciones. La confección de modelos puede hacerse en forma relativamente simple si se conoce la problemática a resolver, a través de módulos que se combinan de acuerdo a un esquema conceptual.

En el Primer Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería se presentó un trabajo (Fushimi et al., 1996) donde se relatan los inicios de la aplicación de la computación en temas de Cogeneración y Ciclos Combinados en la asignatura optativa de grado de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, UNLP. La metodología fue desarrollada en la Unidad de Investigación y Desarrollo (UID) “Generación de Energía, Cogeneración, Ciclos Combinados, Uso Racional de la Energía en los Sistemas Térmicos, creada institucionalmente en 1992, la cual a partir de 1995 logró la acreditación institucional de la UNLP del Proyecto I-012 “Cogeneración de Energía”, continuando con el I-048 y actualmente con el I-070.

Entre los años 1993 y 1995 la UID ha realizado importantes trabajos de investigación tecnológica en el área Cogeneración y Ciclos Combinados para el EPRE, Ente Provincial Regulador Energético de la Provincia de Buenos Aires, estudiando industrias radicadas en la Provincia de Buenos Aires, como ser Pirelli (Merlo), Nestlé (Magdalena), Papelera del Plata (Wilde), Massalin Particulares (Merlo), Copetro (Ensenada), Parmalat (Pilar), Base Naval de Puerto Belgrano (Punta Indio), Imasa (Chacabuco), Maltería Quilmes (Tres Arroyos), entre otras. También se realizaron trabajos para el complejo Maleic-Polibutenos Argentinos, CIE de Repsol YPF (Ensenada), Celulosa Argentina (Zárate) y estudios de repotenciación a ciclos combinados de la mayoría de las centrales térmicas del País.

La realización de las tareas mencionadas planteó la necesidad de modelizar los sistemas térmicos, desarrollándose la habilidad para la confección de modelos, que facilitan el análisis. Esto involucra:

- Planteamiento de la problemática específica del caso a resolver a nivel conceptual
- Confección de los modelos acorde con los esquemas conceptuales de interés, desarrollando metodologías y unidades de análisis almacenadas en módulos
- Corridas del modelo acorde a los casos de interés
- Discusión de los resultados en la búsqueda de conclusiones de valor práctico
- Realimentación de estas conclusiones en los esquemas conceptuales en caso de resultar necesario o conveniente
- Análisis posterior en sus etapas de diseño y de comportamiento operativo en condiciones no nominales

Como base para la modelización se adoptó la hoja de cálculo, en particular el programa Excel, el cual posee además de todos los elementos necesarios, una configuración adecuada que ha permitido resolver todos los casos que se han presentado. Su organización en libros con páginas interactivas permite un ordenamiento temático claro y la inserción de módulos preconfeccionados para su integración al modelo. (Sosa, M. I. y Fushimi, A., 2002).

La técnica de confección de modelos de sistemas térmicos se ha simplificado de tal manera que los alumnos, en especial los destacados, lo encuentran sumamente motivante, evidenciado a través de análisis de los sistemas ingeniosos que formulan, analizan y presentan con satisfacción y orgullo, como una tarea en la que han podido desarrollar su creatividad a un nivel sorprendente, imposible sin la ayuda de la modelización computacional. Durante el año lectivo 2002, dos alumnos destacados, ayudantes ad honorem de las cátedras a cargo de los autores, presentaron la modelización de un sistema de cogeneración, trabajo que fue acreedor del Primer Premio del Concurso Premio Preingeniería, instituido por el Centro Argentino de Ingenieros (CAI) y abierto a alumnos del último año de las carreras de Ingeniería de las Universidades del País.

2. MODELIZACIÓN DE SISTEMAS TÉRMICOS

Un sistema térmico está compuesto por unidades interrelacionadas de acuerdo a la concepción del sistema y a una lógica funcional. En un sistema en el que intervienen turbinas de gas por ejemplo, no es posible considerar estas unidades en forma aislada. Además de los factores potencia y consumo específico relacionados con la generación de energía, se deben considerar el caudal y la temperatura de los gases de escape que afectan a la cantidad y calidad del calor recuperable de una magnitud mayor que el trabajo mecánico en términos cuantitativos. Asimismo, los parámetros mencionados definen básicamente las características de la unidad de recuperación requerida para satisfacer las demandas del caso. Un sistema debe ser pues evaluado en forma global, dado que cualquier alteración en el diseño de una de las unidades afecta el funcionamiento de todas las demás. Un sistema óptimo no necesariamente contiene unidades aisladamente óptimas, pues la adecuación a las características del sistema resulta en general de mayor importancia.

Cada una de las unidades, así como el sistema global, pueden ser analizados en el modo “diseño” (parámetros de diseño, como función de condiciones operativas especificadas), o en el modo “simulación operativa” (comportamiento como función del diseño y las condiciones operativas). El análisis completo del sistema térmico debe contener ambos aspectos. El segundo debe ser completado considerando las diferentes condiciones operativas expresada por curvas de duración, histogramas, u otras formas, lo cual permite pronosticar los resultados operativos. Este pronóstico junto con los datos de inversión y financiamiento definirán la factibilidad económica del sistema. La correcta evaluación de diseño de un sistema térmico implica pues comparar los resultados de diferentes alternativas, a priori consideradas de interés. Para ello se requiere la modelización en modo diseño y en modo simulación, la cual debe contener para cada caso específico a tratar:

- Características nominales de las unidades componentes para los modelos de diseño y de simulación operativa
- Su interacción a través de la concepción del sistema y la lógica operativa
- Cálculos técnicos que determinan comportamiento, indicadores cualitativos, costos y beneficios
- Análisis económico-financiero

Para facilitar las corridas de forma de obtener la información necesaria y ordenada para la interpretación y discusión de los resultados, se confecciona una página resumen que contiene las variables independientes, y las magnitudes e indicadores de interés para el análisis. Se agrega además una página con el diagrama del sistema analizado, con los parámetros intensivos y extensivos de las corrientes, flujos de energía, interacciones de calor y trabajo con los alrededores y los datos que fueran necesarios para el informe. Los modelos deben tener las siguientes propiedades:

- Claridad en su estructuración y accesibilidad para su revisión y corrección
- Ordenamiento según la lógica de los cálculos e identificación de los valores
- Identificación de los parámetros a monitorear en las corridas
- Establecimiento de los intervalos de validez de las correlaciones
- Advertencia de condiciones fuera de rango o no admisibles
- Manejo amigable

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA MODELIZACIÓN EN HOJA DE CÁLCULO

Los esquemas conceptuales son definidos en función de las características propias de cada caso a resolver, ya sea un proyecto nuevo, en el que existen restricciones impuestas por el sistema existente, o una simulación operativa en el que se desea determinar la incidencia de las modalidades operativas en los costos energéticos del sistema. Definido el esquema conceptual, se confecciona el modelo utilizando módulos preconfeccionados, existentes en la biblioteca, como por ejemplo:

1) *Propiedades termodinámicas del vapor de agua*

Contiene las correlaciones de Gonzalez Pozo (1986) para las propiedades del agua y vapor saturado y de la American Society of Mechanical Engineering-ASME (1967) para vapor sobrecalentado. Los resultados fueron comparados con los valores de las tablas de Keenan et al. (1969), no encontrándose diferencias significativas en el rango de parámetros típicos industriales. El estado se define por sus parámetros intensivos, presión y temperatura y se dispone en columnas copiables tantas veces como número de estados sean requeridos en el modelo.

2) *Expansión del vapor en turbinas*

Basado en el anterior, el módulo determina el estado del vapor al final de la expansión isoentrópica y real. Si el vapor es saturado, el cálculo es simple. En caso de vapor sobrecalentado el módulo se vale de los parámetros (presión-entropía) y (presión-entalpía) para determinar el estado por un procedimiento iterativo, calculando el salto isentrópico y el real.

- 3) *Demandas de vapor y retorno de condensado*
Son planillas tipo formulario, donde se ingresan los datos de las demandas calóricas y retornos de condensado para cada tipo de vapor usado en la planta.
- 4) *Laminación del vapor en válvulas reductoras de presión*
Determina el estado final de una laminación del vapor en una válvula reductora de presión en una transformación isoentálpica.
- 5) *Desobrecalentamiento*
Determina los caudales de agua y vapor en un proceso de desobrecalentamiento de vapor por inyección de agua, partiendo del caudal de vapor a desobrecalentar o desobrecalentado.
- 6) *Recuperación de vapor flash*
Determina el caudal de vapor de reevaporación (vapor flash) que puede ser obtenido del agua a alta presión AP y alta temperatura, al ser descomprimido a una presión inferior.
- 7) *Desaireadores térmicos*
Contiene los balances de masa y energía con los que se determinan los caudales y parámetros de estado del agua de reposición y vapor de calefacción de un desaireador térmico típico.
- 8) *Pérdidas de carga en cañerías de vapor saturado*
Permite la determinación de las pérdidas de carga del vapor saturado en cañerías de diámetros y espesores normalizados.
- 9) *Aislaciones térmicas en cañerías*
Determina las pérdidas de calor a través de aislaciones de cañerías de diferentes materiales de aislamiento, temperaturas exteriores y velocidades del viento.
- 10) *Turbogrupos de gas*
Planilla base de datos de turbogrupos de gas disponibles en el mercado, con los datos técnicos necesarios para el análisis de su integración a un sistema térmico. Cada unidad se individualiza mediante un número de menú, mediante el cual el módulo da los correspondientes datos técnicos, extraídos de la base de datos mediante funciones de búsqueda.
- 11) *Entalpía de gases de combustión*
Contiene las correlaciones entalpía-temperatura de los gases de combustión, determinado la correlación de la mezcla de gases en cuestión.
- 12) *Calderas de recuperación y módulos*
Determina el perfil de temperaturas a través de los paquetes de transferencia térmica de la caldera de recuperación HRSG (Heat Recovery Steam Generator), típicamente representada por tres tipos de paquetes de transferencia, sobrecalentador, vaporizador y economizador, caracterizados por una transferencia sin cambio de fase en fase gaseosa (sobrecalentador), con cambio de fase (vaporizador) y sin cambio de fase con una fase líquida (economizadores y precalentadores de agua). Para una configuración diferente a la típica, es posible “armar” el HRSG componiendo adecuadamente los tres tipos de paquetes en la forma que corresponda.
- 13) *Balance de distribuidores de vapor a través de estaciones reductoras de presión y venteos*
Estos elementos son utilizados para asegurar el balance de caudales de vapor independientemente de los cambiantes caudales de entrada y salida de vapor de cada distribuidor. Su resolución requiere del uso de funciones lógicas.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se considerará una industria de proceso continuo establecida en la década de 1960's con las siguientes demandas energéticas

Vapor		Caudal, kg/hora	Retorno de condensado a 100°C, %
alta presión AP	saturado de 25 bar	6000	60
baja presión BP	saturado de 7 bar	40000	30
Electricidad	valor promedio	8.48 MW	
Periodo operativo	24 horas por día, 7500 horas por año		

El sistema energético se basa en un sistema aislado de energía total, con generación de vapor de 64 bar (a) 450°C y turbina de condensación con extracción no controlada de AP y controlada de BP. En la Figura 1 se muestra el diagrama del sistema, generando la potencia media durante su operación anual con los datos del sistema y los calculados por el modelo. El turbogrupos de vapor fue modelizado como turbina equivalente paralelo, compuesta de tres en paralelo, dos de contrapresión y una de condensación.

El costo marginal de generación eléctrica está dado por el caudal específico a condensación, en este caso de 4.54 kg /kWh. Siendo la energía demandada por el generador de vapor de 58.37 MW en términos de PCI y el caudal de vapor producido de 68867 kg/hora, el costo combustible de la electricidad generada resulta de 0.848 kWh/kg de vapor y de 3.85 kWh combustible por kWh de electricidad generada, con un rendimiento de 26% y costos indicados a continuación

Combustible	Costo unitario	Costo en \$/MWh	PCI	Costo en \$/MWh
Gas natural GN	150 \$/Dm ³	15.36	8400	59.14
Fuel oil FO	210 \$/Ton	18.81	9600	72.42

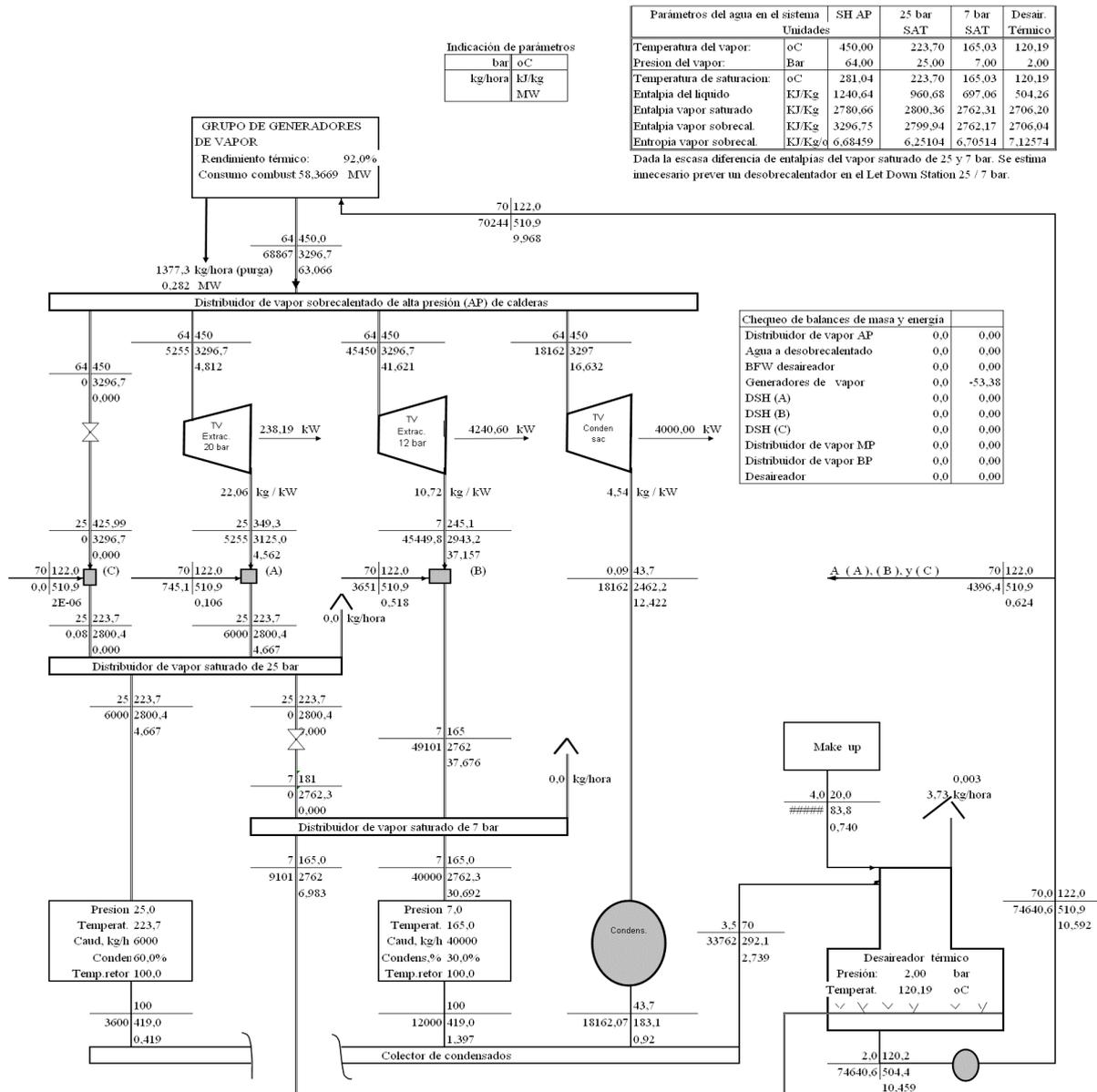


Figura 1: Diagrama del sistema de energía total existente, con turbina de condensación de 64/450, extracciones en 25 y 7 bar.

Ambos costos resultan mayores a los que pueden ser logrados comprando la electricidad en el mercado eléctrico mayorista, cuyo precio se estima en 35 a 40 \$/MWh. El costo energético total del sistema resulta de 58.37 MW PCI x 15.36 MWh = 896.56\$/hora, operando con gas natural, y de 1097.94 \$/hora operando con fuel oil.

La desactivación de la turbina de vapor puede ser simulada por el modelo ingresando una potencia nula en cada una de las turbinas en que fue descompuesto la unidad en su modelado, en cuyo caso se anulan los caudales de extracción y de condensación, reduciendo sensiblemente el caudal de vapor a generar, de 58.37 a 36.50 MW, o sea 21.87 MW. El costo de la electricidad para que el costo energético total sea igual al caso anterior es:

Total costo horario		896.56 \$/hora
Compra		
Gas natural	36.50 MW	560.64 \$/hora
Electricidad	8.48 MW	335.92 \$/hora

Esta alternativa operativa es pues conveniente si se puede comprar la electricidad a un precio menor a 39.62 \$/MWh, por lo que la compra a 40 \$/MWh no produce una variación significativa en los costos energéticos, aun cuando los costos operativos se reducirán. También es posible operar el turbogruppo reduciendo la generación a condensación al mínimo posible, lo cual puede ser simulado por el modelo ingresando una potencia de generación nula, suponiendo que la unidad puede operar en tales condiciones. Se observa que en este caso, la generación en la turbina de contrapresión AP/BP debe reducir levemente su generación dada la reducción de la demanda de vapor del desaireador, por ingresar al mismo el condensado mas caliente al no retornar el condensado frío del condensador de la turbina.

El costo energético total del sistema debe contemplar la compra de 4.23 MW a un costo de 40 \$/MWh, siendo necesaria la compra de 40.88 MW de gas natural:

Compra	Costo unitario, \$/MWh	Cantidad, MW	Costo total, \$/hora
Electricidad	40.00	4.23	169.22
Gas Natural	5.36	40.88	627.92
Costo energético total del sistema			797.14

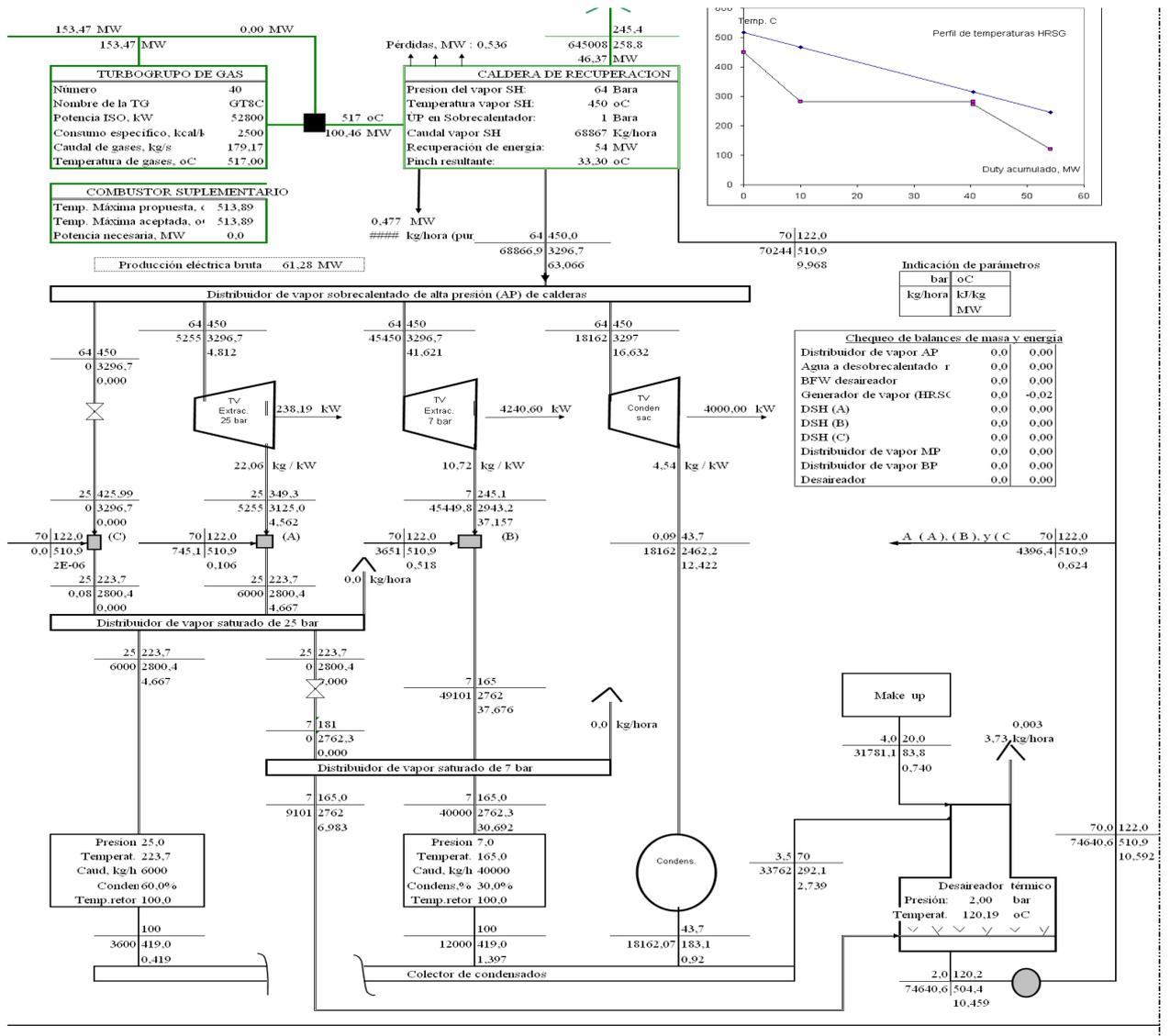


Figura 2: Modelo del sistema repotenciado con un turbogrupo de gas y caldera de recuperación

También es posible reemplazar la caldera convencional por una caldera de recuperación HRSG, agregando módulos de TG's y HRSG's simplificado, según el esquema conceptual indicado en la Figura 2. Este corresponde a una repotenciación de un sistema de energía total existente con turbina de vapor con el reemplazo de la caldera convencional con una de recuperación, aumenta significativamente la generación eléctrica total del sistema reduciendo en la misma magnitud las irreversibilidades ocasionadas por la caldera. La producción eléctrica total es de 61.28 MW, posibilitando la venta de excedentes, supuesta a efectos comparativos al precio de 40 \$/MWh. Los resultados para esta repotenciación serían:

	MW	\$/MWh	\$/hora
Compra de gas	153.47	15.36	2357.3
Producción de electricidad	61.28		
Demanda eléctrica	8.48		
Compra	0.00	40.00	0.0
Venta	52.80	40.00	2112.0
Costo energético			245.3

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados indica que el problema plantea un juego de demandas eléctrica y térmica, admitiendo diversos esquemas conceptuales y alternativas de solución, adecuados en mayor o menor grado a las condiciones del caso específico.

El sistema de energía total con turbina de vapor indicado en la Figura 1 resultaba adecuado para las magnitudes de demandas de nuestro País hasta la década de 1970, periodo en que tanto los combustibles como el suministro de energía eléctrica eran caros y de mala calidad. El descubrimiento de importantes reservas de gas natural y la implementación del programa de sustitución de combustibles líquidos por gas natural llevado a cabo por Gas del Estado permitió la utilización de este combustible por la industria y la generación eléctrica. Pero después de 1982, la introducción de la competencia en la generación eléctrica y la instalación de modernos ciclos combinados de elevada eficiencia, produjeron una reducción de los precios de la electricidad hasta un nivel tal que algunas industrias prefirieron desactivar los sistemas de energía instalados.

La evolución tecnológica, en especial de la turbina de gas, permitió adicionalmente la reducción de irreversibilidades en la caldera y una reducción considerable de los costos energéticos de la industria. El caso presentado en la Figura 2 indica un posible ahorro económico del orden de 750 000 \$/año con solo optimizar la operación y de cerca de 5 000 000 \$/año con la repotenciación. En todos los casos debe considerarse el ahorro de energía, no solo en la reducción de costos (aspectos microeconómicos), sino también desde el punto de vista del uso racional de los recursos no renovables y del impacto ambiental.

6. CONCLUSIONES

Un sistema térmico debe ser evaluado en forma global, dado que cualquier alteración en el diseño de una de las unidades afecta el funcionamiento de todas las demás. La correcta evaluación del sistema debe realizarse en modo diseño y en modo simulación operativa e implica comparar resultados de posibles alternativas. La modelización facilita notablemente esta tarea.

La modelización computacional de sistemas térmicos puede hacerse utilizando hoja de cálculo, lo cual permite un análisis mucho más riguroso, exhaustivo y creativo del sistema a estudiar, que con las metodologías convencionales. La disponibilidad de módulos facilita notablemente la tarea. Cuando se consideran varios esquemas conceptuales, es posible usar partes del modelo principal que procese información común, como las demandas en todos ellos.

La formación y creatividad del analista son primordiales y valoriza la producción intelectual del mismo.

7. REFERENCIAS

- ASME (1967), *Correlations for Superheated Steam Properties*, Transactions of the ASME.
- Fushimi, A, Pedernera, R, Beducci, R, Mestroni, J. y Aquino, A. (1996), *Experiencia en la enseñanza de Cogeneración - Ciclos Combinados en Termotecnia IV, en el Área Termotecnia, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata*, I Congreso Argentino sobre la Enseñanza de la Ingeniería, U.N. Río Cuarto, Pcia de Córdoba, Octubre de 1996, Memorias del Congreso, Tomo I, pp. 228- 234.
- Fushimi, A. y Sosa, M. I. (2001), *Modelado de un sistema de cogeneración de vapor mediante hoja de cálculo*, Informe Tecnológico, La Serena, Chile, (ISSN 0716-8756), Vol 12 N° 4, pp. 45-52.
- Gonzalez Pozo, V. (1986), *Formulas estimate properties for dry saturated steam*. Chemical Engineering, May 12, pp. 123.
- Keenan, J., Keyes, F., Hill, P. and Moore, J. (1969), *Steam Tables*, John Wiley & Sons, New York.
- Sosa, M.I., Fushimi, A. (2002), *Experiencias didácticas usando hoja de cálculo para la modelización de un sistema de cogeneración*, International Conference on Engineering and Technology Education INTERTECH'2002, Santos, Brasil, www.asee.org/international/INTERTECH2002/810.pdf.
- Sosa, M. I. y Fushimi, A. (2002), *La enseñanza del Uso Racional de la Energía en las Materias del Área Térmica en las Carreras de Ingeniería Industrial y Mecánica*, AVERMA Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 6, pp. 10.43-10.48. Área Temática: N° 10, Artículo 10-171, ISSN/ISBN: 03295184.

ABSTRACT: A thermal system must be evaluated in global form, since any design alteration of one of the units affects the operation of all the other ones. The correct system evaluation should be carried out in mode design and in mode operative simulation and implies to compare results of different possible alternatives. In this work the computational modelizing of thermal systems using spreadsheet is discussed, which allows a much more rigorous, exhaustive and creative analysis of the system to study that using conventional methodologies. Knowing the problem to solve, models can be made in a relatively simple form in Spreadsheets, using modules to combine and link according to a conceptual outline. Analyst's basic knowledge and creativity are primordial to perform his task that valorizes his intellectual production.