Ingeniería Energética,
Vol. 47 (2026): publicación continua
ISSN 1815-5901

Universidad Tecnológica de La Habana
José Antonio Echeverría

Artículo de investigación científica y tecnológica

Libro Excel para la evaluación de un esquema térmico principal en la central termoeléctrica del Mariel

Excel workbook for the evaluation of a main thermal scheme in the Mariel thermal power plant

Osvaldo Gozá León[I], *, Adiané Ortega Rubio[II]

[I] Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
[II]Central Termoeléctrica del Mariel "Máximo Gómez Báez", Artemisa, Cuba
*Autor de correspondencia: ogoza@quimica.cujae.edu.cu, osvaldogoza@gmail.com

Recibido: 14 de agosto de 2026 Aprobado: 9 de noviembre de 2026

Este documento posee una licenciaCreativeCommonsReconocimiento-NoComercial4.0internacional

RESUMEN/*ABSTRACT*
En este trabajo se presentan la concepción y las ecuaciones con las que se conformó un libro de trabajo en Microsoft Excel para la evaluación del esquema térmico principal del bloque número 6 de la central termoeléctrica Máximo Gómez Báez, ubicada en el Mariel. En el libro de trabajo aparecen programadas las ecuaciones que dan solución a los balances de masa y energía en el bloque, con cuyos resultados se determinan como indicadores de eficiencia energética el consumo específico de combustible, el rendimiento efectivo de la instalación, el rendimiento térmico del ciclo de vapor, y el rendimiento térmico del generador de vapor, tanto por el método directo como por el método indirecto. Para la evaluación de las propiedades termodinámicas del agua se usó el complemento de Excel WinSteam. Los cálculos fueron realizados y verificados con datos correspondientes a las condiciones de diseño suministrados por los fabricantes.
Palabras clave: central termoeléctrica; evaluación energética; Microsoft Excel; rendimiento térmico.

This paper presents the conception and equations used to create a Microsoft Excel workbook for evaluating the main thermal scheme of block number 6 at the Máximo Gómez Báez thermal power plant, located in Mariel. The workbook contains the equations that solve the mass and energy balances for the block. The results of these calculations were used to determine energy efficiency indicators such as specific fuel consumption, the effective efficiency of the installation, the thermal efficiency of the steam cycle, and the thermal efficiency of the steam generator, using both direct and indirect methods. The WinSteam Excel add-in was used to evaluate the thermodynamic properties of water. The calculations were performed and verified using data corresponding to the design conditions provided by the manufacturers.
Key words: *thermal power plant; energy evaluation; Microsoft Excel; thermal efficiency.*

INTRODUCCIÓN

La producción de electricidad cubana se basa en diferentes tipos de centrales eléctricas, constituyendo las centrales de vapor (termoeléctricas) su columna vertebral [1]. Desde el triunfo de la Revolución se han venido realizando diferentes inversiones en el campo energético del país. Como parte de estas inversiones en la década del 60, el entonces Ministro de Industria Ernesto "Ché" Guevara concretó el contrato para la construcción de 2 centrales eléctricas, una en Santiago de Cuba y la otra en el Mariel; fue así que el 20 de febrero de 1966 sincronizó el primer bloque de 50 MW en la central termoeléctrica del Mariel, nombrada actualmente Máximo Gómez Báez.

Durante los años siguientes se fueron sumando bloques de igual capacidad hasta culminarse la unidad 4 y en 1969 se encontraba con 200 MW instalados. En el año 1975 sincronizó el bloque 5 y primero de 100 MW del país, al que se sumaron tres unidades también de 100 MW y de esta manera en 1983, la termoeléctrica llegó a convertirse en la mayor planta generadora del país, y por su posición geográfica a unos 45 km al oeste de la capital en la más importante del sistema en ese momento.

Debido a la necesidad de cambios en la matriz energética cubana, a finales de la década de los años 90, fue necesario sustituir el combustible en la generación de electricidad por crudos nacionales mezclados con combustible de importación en diferentes proporciones. Para realizar este cambio, se llevó a cabo un proceso inversionista de modernización de las instalaciones existentes [2]. El diseño del equipamiento no respondía a las características del crudo como combustible, por su alto contenido de azufre y cenizas, lo que provocó un deterioro marcado en las calderas y sus equipos auxiliares. Esto aparejado a la imposibilidad de importar los materiales y piezas necesarias hizo más difícil el cumplimiento de los programas de mantenimiento previstos.

En el año 1996 comenzó el intento de adecuación de tecnología soviética a las nuevas condiciones de trabajo. Se ejecutaron modernizaciones en varias unidades como un intento para asimilar el cambio de combustible entre otras modificaciones importantes de primer orden, no obstante la mejora en la quema del crudo cubano fue muy limitada, no lográndose detener el rápido ensuciamiento de las superficies de intercambio debido a los inquemados del combustible cubano y el deterioro de los metales en la zona fría del generador de vapor, lo que limita la carga del mismo e incrementa su frecuencia de limpieza y mantenimiento.

A partir de las experiencias acumuladas y los análisis de los especialistas de esta y otras centrales termoeléctricas se diseñó un nuevo generador de vapor. Se decidió aprovechar la cimentación y el espacio existente de un bloque antiguo para instalar en el mismo lugar el nuevo bloque 6 de potencia 100 MW, el cual entró en operación en el año 2022. Este proyecto marcó un hito en Cuba, siendo el primero de su tipo y destacándose porque su caldera fue diseñada desde el inicio específicamente para utilizar combustible crudo nacional. También incorpora mejoras en una nueva turbina, equipos auxiliares modernos y una renovada construcción civil desde los cimientos, que apuestan por conferirle más de 30 años de explotación.

Para el cálculo y análisis de las centrales termoeléctricas se han utilizado diversas herramientas computacionales que abordan la simulación tanto estacionaria como dinámica, así como el enfoque modular y el orientado a ecuaciones [3-5]. *Thermoflow* es el líder de software comercial de ingeniería térmica para las industrias de energía y cogeneración, y ha desarrollado programas de simulación específicos para plantas de potencia con ciclos de vapor [6-8]. Estos programas no están disponibles para Cuba, y de aquí la utilidad que puede tener desarrollar herramientas computacionales propias que faciliten la evaluación sistemática de la eficiencia energética. El Microsoft Excel está siendo ampliamente utilizado como apoyo en la enseñanza de varias asignaturas en carreras de ingeniería [9-11].

También ha sido utilizado en el cálculo y análisis de centrales termoeléctricas, aplicándose en combinación con otros softwares [12], y en problemas de optimización [13,14]. Su principal limitación como plataforma de modelación para análisis termodinámicos es la carencia de funciones para la evaluación de las propiedades de los fluidos, pero este problema pudiera ser resuelto desarrollando complementos adecuados [15]. Adicionalmente, el mejor complemento libremente accesible desarrollado para hojas de cálculo es el Solver de Excel [16-18].

La central termoeléctrica del Mariel juega un papel fundamental dentro de la estrategia energética del país y, por tanto, es de vital importancia el análisis de su comportamiento para poder garantizar que opere eficientemente, de aquí que resulte de interés disponer de una herramienta que facilite el monitoreo de los indicadores de eficiencia energética. Este trabajo tiene como objetivo presentar la concepción y las ecuaciones con las que se conformó un libro de trabajo en Microsoft Excel que facilitó realizar la evaluación del esquema térmico principal del bloque número 6 de la central termoeléctrica Máximo Gómez Báez del Mariel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del esquema térmico principal del bloque número 6

El esquema térmico principal de la unidad generadora número 6 de la central termoeléctrica del Mariel se muestra en la figura 1. El bloque opera con un ciclo de vapor Rankine con sobrecalentamiento, recalentamiento y regeneración.

Se realizan 7 extracciones laterales de vapor en la turbina, la primera a la salida del cilindro de alta presión (CAP), de la segunda a la sexta en el cilindro de media presión (CMP) y la séptima extracción en el cilindro de baja presión (CBP). Se cuenta con dos sistemas de calentadores regenerativos cerrados, el sistema de alta presión con los calentadores 6 y 7, y el sistema de baja presión con los calentadores 1, 2, 3 y 4. Ambos sistemas operan en cascada hacia arriba. La tercera extracción de vapor alimenta un calentador regenerativo abierto que también funciona como deareador. El vacío en el condensador y el enfriador de vapor de los sellos se garantiza con un sistema de eyectores.

Procedimiento de evaluación

La evaluación realizada se fundamenta en el método de los rendimientos, en el que se calcula el rendimiento efectivo de la instalación mediante las siguientes ecuaciones. Ver ecuación (1 y 2):

$$\eta^{inst}_{efectivo} = \eta_T \cdot \eta_{gv} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \qquad (1)$$

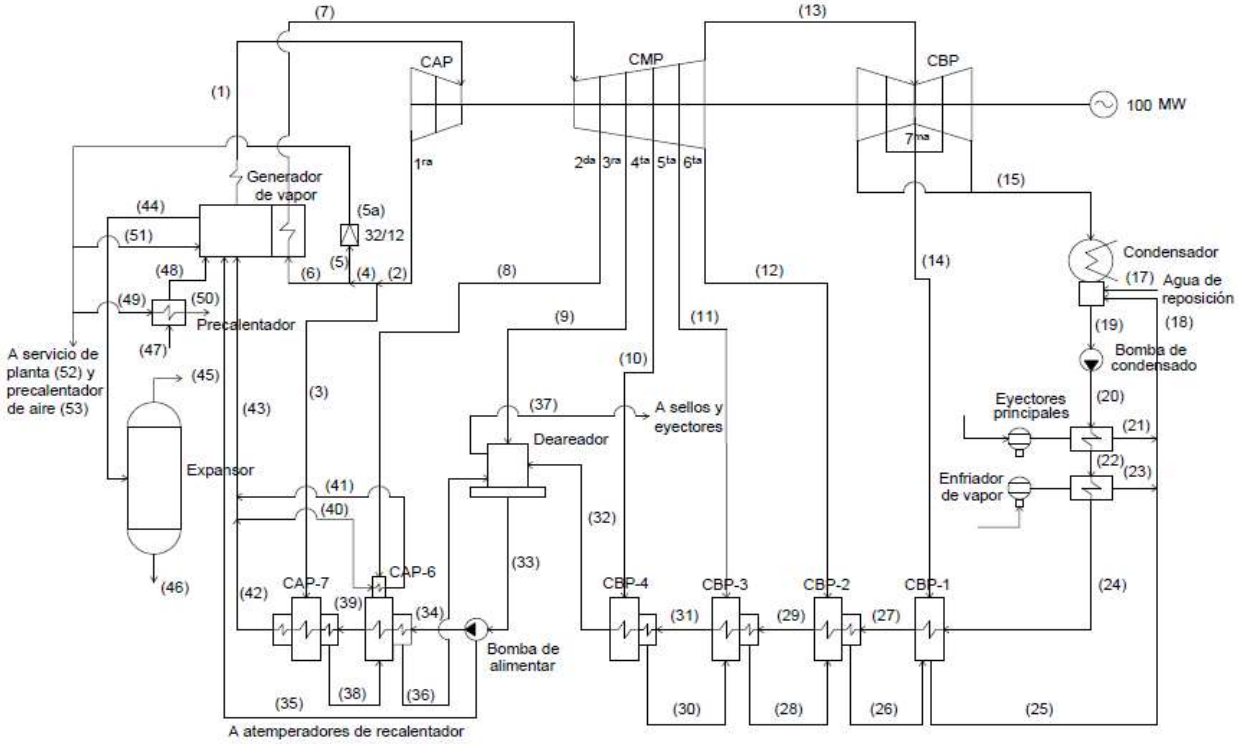


Fig. 1. Esquema térmico principal del bloque número 6 de la central termoeléctrica Máximo Gómez Báez

$$\eta^{inst}_{efectivo} = \frac{W^e_t}{m_{comb} \cdot VCI_{comb}} \qquad (2)$$

Donde:

$\eta^{inst}_{efectivo}$ - Rendimiento efectivo de la instalación, fracción

η_T - Rendimiento térmico del ciclo, fracción

η_m - Rendimiento mecánico del turbogenerador, fracción

η_{gv} - Rendimiento térmico bruto del generador de vapor, fracción

η_g - Rendimiento del generador eléctrico, fracción

W^e_t - Trabajo eléctrico entregado por el turbogenerador

m_{comb} - Flujo másico de combustible quemado en el generador de vapor

VCI_{comb} - Valor calórico inferior del combustible

Con el rendimiento efectivo es posible calcular el consumo específico de combustible de la instalación (CEC) en gramos de combustible por kW–h, sustituyendo el valor calórico inferior del combustible en kJ/kg, mediante la ecuación (3):

$$CEC = \frac{3600000}{VCI \cdot \eta^{inst}_{efectivo}} \qquad (3)$$

El rendimiento térmico del ciclo se evalúa por la ecuación (4):

$$\eta_T = \frac{W_{TR} - W_{ba} - W_{bc}}{Q_{abs.cald} + Q_{abs.recal}} \quad (4)$$

Donde:
W_{TR}- Trabajo real de expansión que realiza el vapor en la turbina
W_{ba} - Trabajo de la bomba de alimentación
W_{bc} - Trabajo de la bomba de condensado
$Q_{abs.cald}$ - Calor absorbido por el agua en la caldera, incluyendo economizador y sobrecalentador
$Q_{abs.recal}$ - Calor absorbido por el vapor de agua en el recalentador

El rendimiento térmico bruto del generador de vapor por el método directo viene dado por la ecuación (5):

$$\eta_{gv} = \frac{Q_{abs.cald} + Q_{abs.recal}}{m_{comb} \cdot VCI_{comb}} \quad (5)$$

Para determinar el trabajo real que realiza el vapor en los cilindros de la turbina es necesario calcular los flujos másicos de vapor de las extracciones, dicho cálculo se fundamenta en los balances de masa y energía en los sistemas regenerativos de baja presión y alta presión, y en el deareador.

El rendimiento térmico bruto del generador de vapor por el método indirecto, sobre la base del valor calórico total del combustible, viene dado por la ecuación (6):

$$\eta_{gv} = 100 - (\%P_{cs} + \%P_{iq} + \%P_{im} + \%P_{me} + \%P_p + \%P_{res}) + \sum hR \quad (6)$$

Donde:
$\%Pcs$ - Pérdidas de calor sensible en los gases de la combustión, %.
$\%Piq$ - Pérdidas de calor por incombustión química, %.
$\%Pim$ - Pérdidas de calor por incombustión mecánica, %.
$\%Pme$ - Pérdidas de calor al medio exterior, %.
$\%Pp$ - Pérdidas de calor por purgas, %.
$\%Pres$ - Pérdidas de calor por residuos, %.
ΣhR - Entalpía relativa de las corrientes de entrada al horno, expresadas como un por ciento del valor calórico inferior total del combustible, %.

Para aplicar el método indirecto es necesario resolver el balance de masa en el horno, a partir del cual se calcula el flujo molar del aire y de los gases de combustión, así como el exceso de aire y el por ciento de completamiento en la combustión.

Herramienta computacional
Dadas las amplias posibilidades como herramienta computacional y su disponibilidad, se escogió el Microsoft Excel para la programación de los cálculos que permitan evaluar la eficiencia energética del bloque. Para la evaluación de las propiedades termodinámicas del agua se utilizó como complemento de Excel el *WinSteam* Versión 4.0, [19, 20]. Este complemento incorpora funciones que permiten calcular los valores puntuales de las propiedades para distintas combinaciones de las variables de entrada presión, temperatura, volumen específico, energía interna específica, entropía específica, entalpía específica y calidad. También permite insertar de forma automática fórmulas directamente en la hoja de cálculo. Estas posibilidades le confieren una gran flexibilidad para la modelación de sistemas termodinámicos complejos en combinación con otros complementos de Excel como *GoalSeek* y *Solver*. Estas características del complemento fueron utilizadas en la confección del libro de trabajo de Microsoft Excel para la evaluación energética del bloque número 6.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

El libro de trabajo se concibió con una hoja de cálculo que presenta cinco secciones:
Entrada de datos y evaluación de propiedades termodinámicas con el complemento *WinSteam.*
Cálculo de los flujos másicos de vapor y agua.
Cálculo de los flujos energéticos (calor y trabajo).
Cálculo de rendimientos.
Método indirecto.

Entrada de datos y evaluación de propiedades termodinámicas con el complemento *WinSteam*

En esta primera sección se implementó la entrada de los datos operacionales de temperatura, presión y flujos de las corrientes conocidas, así como la evaluación de las propiedades termodinámicas mediante el complemento *WinSteam* de todas las corrientes. En la figura 2 se presenta una parte de esta sección.

	Corriente	T (°C)	P abs. , bar	P abs., kPa	m (kg/h)	v (m^3/kg)	s (kJ/kg-K)	h (kJ/kg)
1	Vapor vivo generado	540	130	13000	299000	0,026	6,577	3445,1
2	Vapor de escape del CAP	336,59	29,18	2918	299000	0,091	6,709	3086,2
3	Vapor de 1ra extracción hacia el CAP-7	335,7	28,31	2831	24300	0,094	6,722	3086,2

Fig. 2. Entrada de datos y evaluación de propiedades

Cálculo de los flujos másicos de vapor y agua

Para esta sección los cálculos se realizaron siguiendo como algoritmo la solución de los balances de masa y energía en el sistema regenerativo de alta presión (se calculan los flujos másicos m3, m8 y m36), en el sistema regenerativo de baja presión (se calculan los flujos másicos m10, m11, m12, m14 y m25), en el precalentador de combustible, la caldera y el expansor (se calculan los flujos másicos m49, m51, m44, m45 y m46), en el deareador (se calculan el flujo másico m9 y las pérdidas de calor), y la solución de los balances de masa en los puntos divisores de la primera extracción, el recalentador, el cilindro de media presión, el cilindro de baja presión de la turbina y el pozo caliente (se calculan los flujos másicos m5, m6, m7, m13, m15 y m17). La solución de los sistemas de ecuaciones en los sistemas regenerativos de alta y baja presión se implementó con el complemento *Solver* de Excel, en la figura 3, se presenta una parte de la hoja de cálculo.

CÁLCULO DE LOS FLUJOS MÁSICOS DE VAPOR Y AGUA					
SISTEMA REGENERATIVO DE ALTA PRESIÓN (CAP)					
Balances de masa y energía	Solución del sistema de ecuaciones con el Solver			Celdas cambiantes	
CAP-6: Ecuación restrictiva	0	m_34*(h_39-h_34)+m_40*(h_41-h_40)-m_8*(h_8-h_36)-m_3*(h_38-h_36)=0		24300	m_3 (kg/h)
CAP-7: Ecuación restrictiva	0	m_34*(h_42-h_39)-m_3*(h_3-h_38)=0		17933	m_8 (kg/h)
			m_36 (kg/h)	42233	m_36=m_3+m_8
SISTEMA REGENERATIVO DE BAJA PRESIÓN (CBP)					
Balances de masa y energía	Solución del sistema de ecuaciones con el Solver			Celdas cambiantes	
CBP-1: Ecuación restrictiva	0	m_32*(h_27-h_24)-m_14*(h_14-h_25)-(m_10+m_11+m_12)*(h_26-h_25)=0		10248	m_10 (kg/h)
CBP-2: Ecuación restrictiva	0	m_32*(h_29-h_27)-m_12*(h_12-h_26)+(m_10+m_11)*(h_28-h_26)=0		12097	m_11 (kg/h)
CBP-3: Ecuación restrictiva	0	m_32*(h_31-h_29)-m_11*(h_11-h_28)+m_10*(h_30-h_28)=0		11266	m_12 (kg/h)
CBP-4: Ecuación restrictiva	0	m_32*(h_32-h_31)-m_10*(h_10-h_30)=0		8072	m_14(kg/h)
			Balance de masa en el sistema completo m_25 (kg/h)	41683	m25=m_10+m_11+m_12+m_14

Fig. 3. Balances en los sistemas regenerativos de alta y baja presión

Cálculo de los flujos energéticos (calor y trabajo)

En esta sección se realizan los balances de energía para determinar los trabajos reales de expansión en los cilindros de alta, media y baja presión, el trabajo real de expansión total, los rendimientos mecánico y eléctrico del turbogenerador y la potencia eléctrica del turbogenerador, como se muestra en la figura 4.

CÁLCULO DE LOS FLUJOS ENERGÉTICOS (CALOR Y TRABAJO)		
Balances de energía		
CILINDRO DE ALTA PRESIÓN (CAP)		
Trabajo real de expansión, Wtr_CAP (MW)	29.8	Wtr_CAP=m_1*(h_1-h_2)
CILINDRO DE MEDIA PRESIÓN (CMP)		
Trabajo real de expansión, Wtr_CMP (MW)	59.4	Wtr_CMP=m_7*(h_7-h_8)+(m_7-m_8)*(h_8-h_9)+(m_7-m_8-m_9)*(h_9-h_10)+
		(m_7-m_8-m_9-m_10)*(h_10-h_11)+(m_7-m_8-m_9-m_10-m_11)*(h_11-h_12)
CILINDRO DE BAJA PRESIÓN (CBP)		
Trabajo real de expansión, Wtr_CBP (MW)	12.6	Wtr_CBP=m_13*(h_13-h_14)+(m_13-m_14)*(h_14-h_15)
Trabajo real total de expansión del cilindro, Wtr_C (MW)	101.9	Wtr_C=Wtr_CAP+Wtr_CMP+Wtr_CBP
Potencia eléctrica nominal del turbogenerador, Wten (MW)	100	
Rendimiento mecánico del turbogenerador, nm (%)	95.99	nm=(0.96-(0.025/Wten^1/3))*100
Rendimiento eléctrico del turbogenerador, ng (%)	99.98	ng=(1-(0.04/Wten^1/2))*100
Potencia eléctrica del turbogenerador, Wte (MW)	97.8	Wte=Wtr*(nm/100)*(ng/100)

Fig. 4. Cálculo de los flujos energéticos en el turbogenerador

Además, se determinan los trabajos de las bombas de alimentación y condensado, los calores absorbidos en la caldera y el recalentador, y el calor rechazado en el condensador, como se muestra en la figura 5.

BOMBA DE ALIMENTACIÓN		
Trabajo de bombeo, Wba (MW)	1.8	Wba=m_33*(h_34-h_33)
BOMBA DE CONDENSADO		
Trabajo de bombeo, Wbc (MW)	0.3	Wbc=m_19*(h_20-h_19)
CALDERA		
Calor absorbido, Qabscald (MW)	200.4	Qabscald=m_1*(h_1-h_43)
RECALENTADOR		
Calor absorbido, Qabsrec (MW)	38.6	Qabsrec=m_7*(h_7-h_6)
CONDENSADOR		
Calor rechazado, Qrechcond (MW)	155.9	Qrechcond=m_15*(h_15-h_16)

Fig. 5. Cálculo de los trabajos de bombeo, calor absorbido y rechazado

Cálculo de rendimientos

En esta sección se determina el rendimiento relativo interno de los cilindros de alta, media y baja presión del turbogenerador, el rendimiento térmico del generador de vapor, el rendimiento térmico del ciclo, el rendimiento efectivo de la instalación y el consumo específico de combustible; en la figura 6, se muestra parte de esta sección.

GENERADOR DE VAPOR		
Valor calórico inferior del combustible, VCI (kJ/kg)	37656	
Valor calórico inferior total del combustible, VCItotal (MW)	261.5	VCItotal=m_47*VCI
Rendimiento térmico del generador de vapor, ngv (%)	91.4	ngv=Qabs*100/VCItotal
CICLO		
Trabajo neto en el ciclo, Wneto (MW)	99.8	Wneto=Wtr-Wba-Wbc
Calor absorbido en el ciclo, Qabs (MW)	239.0	Qabs=Qabscald+Qabsrec
Calor rechazado en el ciclo, Qrech (MW)	155.9	Qrech=Qrechcond
Calor neto en el ciclo, Qneto (MW)	83.2	Qneto=Qabs-Qrech
Rendimiento térmico del ciclo, nt (%)	41.7	nt=Wneto*100/Qabs
Rendimiento térmico del ciclo Carnot, ntCarnot (%)	48.6	ntCarnot=(1-(TFF+273)/(TFC+273))
Rendimiento efectivo de la instalación, neinst (%)	37.4	neinst=Wte/VCItotal
Consumo específico de combustible, CEC (g /kW-h)	255.7	CEC=1/(VCI*neinst)

Fig. 6. Cálculo de rendimientos del generador de vapor y el ciclo

Para la verificación de la hoja de cálculo, se tomaron datos correspondientes a las condiciones de diseño suministrados por los fabricantes para una carga de 100 MW, los que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de operación en condiciones de diseño

	Corriente	**T (°C)**	**P abs. , kPa**	**m (kg/h)**
1	Vapor vivo generado	540	13 000	299 000
2	Vapor de escape del CAP	336,59	2 918	
3	Vapor de 1ra extracción hacia el CAP-7	335,7	2 831	
4	Vapor de 1ra extracción hacia la válvula reductora 32/12			
5	Vapor antes de pasar por la válvula reductora 32/12	330	3 200	
5 a	Vapor después de pasar por la válvula reductora 32/12	220	1 200	
6	Vapor de 1ra extracción hacia el recalentador	336,42	2 901	
7	Vapor recalentado	540	2 559	
8	Vapor de 2da extracción hacia el CAP-6	459,71	1 400	

Continuación Tabla 1				
9	Vapor de 3ra extracción hacia el deareador	431,63	935	
10	Vapor de 4ta extracción hacia el CBP-4	355,61	392	
11	Vapor de 5ta extracción hacia el CBP-3	223,15	205	
12	Vapor de 6ta extracción hacia el CBP-2	144,92	92,8	
13	Vapor de escape del CMP y entrada del CBP	145,15	98,8	
14	Vapor de 7ma extracción hacia el CBP-1	75,35	32,6	
15	Vapor de escape del CBP	41,75	8,1	
16	Líquido a la salida del condensador y entrada al pozo caliente		8,1	
17	Agua de reposición	30	147,1	
18	Drenajes del enfriador de vapor de los sellos, los eyectores principales y CBP-1	76,52	54,2	
19	Condensado a la salida del pozo caliente del condensador	40,5	8,1	
20	Condensado a la salida de la bomba de condensado	41	1 500	
21	Drenaje de los eyectores principales	98,21	95	
22	Condensado calentado con drenaje de los eyectores principales			
23	Drenaje del enfriador de vapor	98,21	95	
24	Condensado a la entrada del CBP-1	47,92	1 193	
25	Drenaje del CBP-1	45	32,6	
26	Drenaje del CBP-2	78,04	92,8	
27	Condensado a la entrada del CBP-2	68,04	1 117	
28	Drenaje del CBP-3	104,68	205	
29	Condensado a la entrada del CBP-3	92,68	1 043	
30	Drenaje del CBP-4	130,04	392	
31	Condensado a la entrada del CBP-4	118,04	968	
32	Condensado principal a la salida del CBP-4 y entrada al deareador	139,87	894	290 440
33	Agua de alimentación a la salida del deareador	158,83	600	
34	Agua de alimentación a la salida de la bomba	161,07	17 094	306 940
35	Agua de alimentación a atemperadores del recalentador	161,07	3 500	30 000
36	Drenaje del CAP-6	171,07	1 400	
37	Vapor a sellos y eyectores	160	600	1 150
38	Drenaje del CAP-7	203,54	2 831	
39	Agua de alimentación a la entrada del CAP-7	193,54	16 837	
40	Agua para el enfriamiento del vapor a la entrada del CAP-6	232,77	16 495	63 390
41	Agua para el enfriamiento del vapor a la salida del CAP-6	260,09	16 495	
42	Agua de alimentación a la salida del CAP-7	232,77	16 495	
43	Agua de alimentación enviada al economizador	238,35	16 160	
44	Purga continua en el domo de la caldera		14 500	
45	Vapor de flasheo del expansionador		650	
46	Líquido del expansionador al canal		650	
47	Combustible quemado en el horno del generador de vapor	100		25 000
48	Combustible precalentado	150		
49	Vapor consumido en el precalentador de combustible	250	1 300	
50	Condensado en el precalentador de combustible		1 300	
51	Vapor de atomización			750
52	Vapor a servicio de plantas			0
53	Vapor a precalentadores de aire			4 000

Los resultados obtenidos con el libro de Microsoft Excel para este caso son precisamente los mostrados en las figuras 2, 3, 4, 5 y 6, los cuales se resumen en la tabla 2. Dichos resultados fueron verificados satisfactoriamente con los calculados manualmente, obteniéndose plena coincidencia.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos con el libro de trabajo para condiciones de diseño a una carga de 100 MW

Parámetro	Valor	Unidad
Rendimiento térmico del generador de vapor	91,4	%
Trabajo real de expansión CAP	29,8	MW
Trabajo real de expansión CMP	59,4	MW
Trabajo real de expansión CBP	12,6	MW
Potencia eléctrica del turbogenerador	97,8	MW
Trabajo de la bomba de agua de alimentación	1,8	MW
Trabajo de la bomba de condensado	0,3	MW
Rendimiento térmico del ciclo	41,7	%
Rendimiento efectivo de la instalación	37,4	%
Consumo específico de combustible	255,7	g/kW-h

El consumo específico de combustible, al encontrarse en el intervalo 250-260 g/kW-h, representa un valor competitivo dentro de Cuba y se ve ayudado por un buen rendimiento efectivo de la instalación intermedio entre 35% y 38%. El rendimiento efectivo queda fundamentalmente determinado por los rendimientos térmicos del ciclo y del generador de vapor. El rendimiento térmico del ciclo es muy bueno considerando el intervalo de referencia para plantas modernas de vapor entre el 38% y el 45%, y se encuentra favorecido por el sobrecalentamiento, el recalentamiento y la regeneración, que aumentan la temperatura media de absorción del calor, y por el vacío en el condensador que disminuye la temperatura media de rechazo del calor. El rendimiento térmico del generador de vapor de 91,4% también es muy bueno, superior al valor típico alrededor de 80% para plantas que operan con petróleo crudo cubano lo que indica una operación muy eficiente y hace que este Bloque 6 por sus resultados se considere uno de los mejores bloques térmicos del país.

Método indirecto

Para esta sección se suministra como información adicional la composición de los gases secos producto de la combustión según un análisis Orsat, la composición del combustible según un análisis elemental, las condiciones del aire de combustión y la razón de atomización del quemador (kg de vapor/kg de combustible).

Se resuelve el balance de masa en el horno mediante los balances de carbono y de agua, lo que permite calcular el flujo molar del aire y de los gases de combustión, así como el exceso de aire y el por ciento de completamiento en la combustión. A partir del balance de masa resuelto se determinan las pérdidas de calor sensible en los gases de combustión, por incombustión química, al medio exterior y por purgas, siendo despreciables las pérdidas por incombustión mecánica y por residuos al ser el combustible líquido; con las pérdidas se determina el rendimiento térmico bruto del generador de vapor sobre la base del valor calórico total del combustible y del calor disponible. En la figura 7 se presenta una parte de la hoja con estos cálculos.

MÉTODO INDIRECTO O DE PÉRDIDAS SEPARADAS		
Pérdidas de calor sensible en los gases de la combustión, Pcs %	7,78	Pcs=((nCO2*Cp CO2*(Tgc-25)+nCO*Cp CO*(Tgc-25)+nO2*Cp O2*(Tgc-25)+ nN2*Cp N2*(Tgc-25)+(nSO2*CpSO2*(Tgc-25))+nH2O*Cp H2O*(Tgc-25))/(VCI total))*100
Pérdidas de calor por incombustión química, Piq %	0,03	Piq=((nCO*VCI CO)/ (Mc*VCI))*100
Pérdidas de calor al medio exterior, Pme %	0,58	Pme=((100/Dmax)^(1/2))*A
Pérdidas de calor por purgas, Pp %	0,29	Pp=((P(h_P-h_A))/(Mc*VCI))*100
Rendimiento térmico bruto del generador de vapor sobre la base del valor calórico total , ngv %	91,34	ngv=100-Psc-Piq-Pme-Ppp+ΣhR
Rendimiento térmico bruto del generador de vapor sobre la base del calor disponible, ngvd %	90,39	ngvd=ngv/(1+(ΣHR/VCI total))
Coeficiente en exceso de aire en la combustión, CEA	1,09	CEA=O2 real/O2 teórico
% Completamiento	99,79	% Completamiento = (nCO2/nCentra)*100

Fig. 7. Cálculo del rendimiento térmico bruto del generador de vapor a partir de las pérdidas de calor

Dada la disponibilidad de información sobre la operación del generador de vapor en condiciones de diseño, fue posible profundizar en los factores que influyen en su eficiencia aplicando el método indirecto, conformándose el siguiente caso para una carga de 100 MW: Crudo combustible con valor calórico inferior 37656 kJ/kg, y composición másica C 82,17%, H 9,52%, O 0,70%, S 7,31%, H2O 0,30%. Gases de combustión con temperatura 200°C, y composición molar en base seca CO2 14,59%, CO 0,03%, O2 2,65%, SO2 0,43%, N2 82,30%. Aire de combustión con temperatura 32°C y humedad 0,015 kg agua/kg aire seco. Razón de atomización 0,03 kg vapor/kg combustible. Los resultados obtenidos para este caso son precisamente los mostrados en la figura 7, los que fueron verificados satisfactoriamente con los calculados manualmente obteniéndose plena coincidencia.

El rendimiento térmico bruto del generador de vapor sobre la base del valor calórico total del combustible, se calcula en 91,40% por el método directo y en 91,34% por el método indirecto, indicando esta pequeña diferencia mediciones confiables. Este es un rendimiento alto, que se encuentra favorecido por las modificaciones que se hicieron en el diseño teniendo en cuenta las características del crudo cubano.

Las pérdidas mayores son las de calor sensible en los gases de combustión (7,78%), las que no se consideran elevadas al estar influidas directamente por un valor aceptable de la temperatura de salida de los gases (200°C, considerando el alto contenido de azufre del combustible) y el coeficiente en exceso de aire (1,09). Al contar el equipo con distintas superficies recuperativas de calor (sobrecalentadores, recalentadores, economizador, calentador de aire regenerativo), la temperatura de salida de los gases no es alta. Por otra parte, el coeficiente en exceso de aire no es alto y se encuentra en el intervalo entre 1,05 y 1,15 aceptable para combustible líquidos. El incremento que se hizo en el diseño al área de paso de los gases por los equipos de intercambio de calor, es un factor que contribuyó a la disminución de estas pérdidas al disminuir el ensuciamiento de los tubos y mejorar la transferencia de calor.

Las pérdidas por combustión química son bien pequeñas (0,03%) al lograrse un 99,79% de completamiento en la combustión. En este comportamiento deseable influyen el coeficiente en exceso de aire que no es bajo, y un alto grado de mezcla entre el combustible y el aire favorecidos por un diseño adecuado del horno y nuevos quemadores con atomización por vapor y regulación de aire secundario y terciario, que reciben el combustible precalentado. Las pérdidas de calor al medio exterior (0,58%) son reducidas, lo que evidencia un aislamiento térmico en buen estado, favorecido por la utilización de tubos de agua y vapor membranados. Las pérdidas de calor por purgas (0,29%) son bajas condicionadas por la calidad del tratamiento del agua. Este libro desarrollado en Microsoft Excel, una vez validado con la operación real de la planta, puede ser utilizado para evaluar sistemáticamente la eficiencia energética del bloque en distintas condiciones de operación y con ello facilitar la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Se confeccionó un libro de trabajo en Microsoft Excel que permite evaluar la eficiencia energética con que opera el bloque 6 de 100 MW de la central termoeléctrica Máximo Gómez Báez:

1. Se resolvieron los balances de masa y energía en el esquema térmico principal del bloque 6, y se determinaron como indicadores de la eficiencia energética el consumo específico de combustible, el rendimiento efectivo de la instalación, el rendimiento térmico del ciclo de vapor y el rendimiento térmico del generador de vapor tanto por el método directo como indirecto.
2. La programación en Microsoft Excel del cálculo de dichos indicadores fue verificada con datos correspondientes a las condiciones de diseño suministrados por los fabricantes para una carga de 100 MW.

REFERENCIAS

[1]. Saunders, A., *et al*. "Desarrollo del sistema energético cubano – Desafíos y Posibilidades Tecnológicas". University of Turku; Finland, 2022. ISBN 978-952-249-573-0. Disponible en: https://www.utupub.fi/handle/10024/154409

[2]. Rodríguez, and Rosabal, L. "Aspectos esenciales para lograr el uso eficiente del combustible nacional, en las centrales termoeléctricas cubanas". Universidad y Sociedad. 2023; vol. 15, n. 4, p. 65-75. ISSN 2218-3620. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000400065

[3]. Kabiri, S., *et al*. "4E analysis and evaluation of a steam power plant full repowering in various operations". Energy Sources. 2020, vol. 46, n. 1, p. 7877-7897. ISSN 1556-7230. Disponible en: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2020.1761484

[4]. Witte, F., and Tuschy, I. "TESPy: Thermal Engineering Systems in Python". Journal of Open Source Software. 2020; vol. 5, n. 49, p. 2178. ISSN 2475-9066. Disponible en: https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.02178

[5].Ziółkowski, P., *et al*. "Thermodynamic Analysis of Negative CO2 Emission Power Plant Using Aspen Plus, Aspen Hysys, and Ebsilon Software". Energies. 2021; vol. 14. ISSN 1996-1073. Disponible en: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6304

[6]. Martelli, E., *et al*. "Design Optimization and Dynamic Simulation of Steam Cycle Power Plants: A Review". Frontiers in Energy Research. 2021; vol. 9. ISSN 2296-598X. Disponible en: https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.676969/full

[7].Kaviani, R., and Arezi, A. "Application of Combined Pinch & Exergy Analysis in Steam Power Plant". EJCMPR. 2023, vol. 2, n. 5, p. 114-125. ISSN 2980-9347. Disponible en: https://www-ejcmpr-com.translate.goog/article_175304.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc

[8]. Naeimi, J., et al. "Enhancing conventional steam power plant performance through feed water heating repowering". Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2024, 46:1, p. 18-34. Disponible en: https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2277364

[9]. Dias, G., and da Silva, L. "A Virtual-Lab Tool for Teaching the Fundamentals of a DC Motor-Generator Operation using Excel-VBA". International Journal of Computer Applications. 2021; vol. 183, n. 24. ISSN 0975-8887. Disponible en: https://www.ijcaonline.org/archives/volume183/number24/dias-2021-ijca-921627.pdf

[10]. Awad, M., and Saidi, M. "Excel as an Educational Platform for Design Analyses of Fluid-Thermal Systems". World Journal of Engineering and Technology. 2022, vol. 10, p. 434-443. ISSN 2331-4249. Disponible en: https://doi.org/10.4236/wjet.2022.102025

[11]. Braswell, Z., *et al*. "Reconsidering the Reliability of Chemical Process Simulators I: Implementation of the Murphree and Vaporization Effiencies". Ind. Eng. Chem. Res. 2024, vol. 63, n. 10. ISSN 0888-5885. Disponible en: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.3c04077

[12]. Niegodajew, P., *et al*. "Power Plant Optimisation—Effective Use of the Nelder-Mead Approach". Processes. 2020; vol. 8, n. 3. ISSN 2227-9717. Disponible en: https://www.mdpi.com/2227-9717/8/3/357

[13].Dumka, P., *et al*. "Using Spreadsheets for Analysing the Influence of Bleed Pressure on Rankine Cycle Performance". Spreadsheets in Education. 2024; p. 1-20. ISSN 1448-6156. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Pankaj-Dumka/publication/378801568_Using_Spreadsheets_for_Analysing_the_Influence_of_Bleed_Pressure_on_Rankine_Cycle_Performance/links/65ea9a8ab1906066b2747062/Using-Spreadsheets-for-Analysing-the-Influence-of-Bleed-Pressure-on-Rankine-Cycle-Performance.pdf

[14]. Kalgunde, M., *et al*. "Economic Load Dispatch for Thermal Power Plants using Excel Solver". Panamerican Mathematical Journal. 2024; vol. 34, n. 2, p. 254-261. ISSN 1064-9735. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Hasan-Khoshgoftar-Manesh/publication/341533500_4E_analysis_and_evaluation_of_a_steam_power_plant_full_repowering_in_various_operations/links/5f9d49d8a6fdccfd7b8dfa48/4E-analysis-and-evaluation-of-a-steam-power-plant-full-repowering-in-various-operations.pdf

[15]. Awad, M. "Analyses and Thermoeconomic Optimisation of Energy-Conversion Systems Using Excel". ResearchGate; 2024. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-El-Awad/publication/363478207_Thermodynamic_Analyses_and_Optimisation_of_Energy-Conversion_Systems_Using_Excel/links/66553835479366623a1af385/Thermodynamic-Analyses-and-Optimisation-of-Energy-Conversion-Systems-Using-Excel.pdf

[16]. Sangpom, N., and Sangpom, W. "Project-Based Learning Combined with Inquiry-Based Learning Using Solver Tools to Promote Computational Thinking Among Undergraduate Students". TEM Journal. 2025; vol. 14, n. 1, p. 602-611. ISSN 2217-8309. Disponible en: https://www.temjournal.com/content/141/TEMJournalFebruary2025_602_611.pdf

[17]. Steglich, M. "Optimisation Modelling with Excel and CMPL2". The Thirteenth International Conference on Advances in System Simulation SIMUL. Barcelona, Spain, 2021. ISBN: 978-1-61208-898-3. Disponible en:https://www.researchgate.net/profile/Mike-Steglich/publication/355145321_Optimisation_Modelling_with_Excel_and_CMPL2/links/616009890bf51d481752367b/Optimisation-Modelling-with-Excel-and-CMPL2.pdf

[18] Osorio, C., *et al*. "Enhancing Accessibility to Analytics Courses in Higher Education through AI, Simulation, and e-Collaborative Tools". Information. 2024, vol. 15, n. 8, p. 430. ISSN 2078-2489. Disponible en: https://www.mdpi.com/2078-2489/15/8/430

[19]. Nyberg, T., "Process steam: Steam conditioning at a pulp and paper mill". Report at the Energy and Installation Engineering Program. June 2006, Department of Engineering, Physics and Mathematics, University of Karlstad. Disponible en: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:6267/FULLTEXT01.pdf

[20].Yohanes, A., and Windarta, J. "Optimization of Mechanical Thermal Energy Audit At Pelabuhan Ratu Unit 2 With Pi Vision". E3S Web of Conferences (TALENTA CEST-5). 2024, vol. 519. ISSN 2267-1242. Disponible en: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/49/e3sconf_talenta2024_02004/e3sconf_talenta2024_02004.html

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Osvaldo Gozá León: https://orcid.org/0000-0002-1426-5910

Participó en la revisión del estado del arte, diseño y programación de software empleado en la investigación, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Adiané Ortega Rubio: https://orcid.org/0009-0004-7910-1919

Participó en la recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, revisión crítica del borrador del artículo y aprobación final.