

Libro Excel para la evaluación del esquema térmico principal en una central termoeléctrica

Excel workbook for evaluating the main thermal scheme in a thermal power plant

Osvaldo Gozá León^{I *}, Yadira Gutiérrez Barroso^{II}, Orlando Caballero Roca^{III}

^IUniversidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba

^{II}Centro de Inmunología Molecular CIM, La Habana, Cuba

^{III}Central Termoeléctrica Este Habana "Ernesto Guevara de la Serna", Mayabeque, Cuba

*Autor de correspondencia: osvaldогоza@gmail.com

Recibido: 22 de julio de 2025

Aprobado: 8 de octubre de 2025

Este documento posee una [licenciaCreativeCommonsReconocimiento-NoComercial4.0internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



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 3 de la central termoeléctrica Ernesto Guevara de la Serna, ubicada en Santa Cruz del Norte. 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. 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.

In this work, the conception and equations with which a Microsoft Excel workbook was created for the evaluation of the main thermal scheme of block number 3 of the Ernesto Guevara de la Serna thermal power plant are presented. The equations that solve the mass and energy balances in the block are programmed in the workbook, with these results several indicators of energy efficiency are calculated such as specific fuel consumption, the effective performance of the installation, the thermal efficiency of the steam cycle, and the thermal efficiency of the steam generator. For the evaluation of the thermodynamic properties of water, the Excel complement WinSteam was used. The calculations were made and verified with data corresponding to the design conditions supplied 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]. La central termoeléctrica Este Habana, nombrada actualmente Ernesto Guevara de la Serna en conmemoración al aniversario 90 del natalicio del Guerrillero Heroico, está ubicada en la costa norte de la provincia Mayabe que y en el municipio Santa Cruz del Norte. Su construcción se fijó para dos etapas: una primera de tres unidades energéticas de 100 MW y una segunda etapa de ampliación, aun no ejecutada, sobre la base de unidades de 200 MW.

La capacidad total de 1300 MW de potencia a instalar, constituye el proyecto más grande de su tipo en el país. El arranque de la primera unidad de 100 MW tuvo lugar en 1987, la segunda en el 1988, y el de la tercera unidad en diciembre de 1995. 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 2002, se aprobó la inversión en las unidades generadoras, y la instalación de una nueva planta productora de agua desmineralizada por ósmosis inversa, a partir de agua de mar, siendo la primera de este tipo en termoeléctricas de nuestro país. Se realizó una modernización en el área de generación de vapor y la turbina en los bloques 2 y 1 respectivamente, mientras que al bloque 3 solo se le realizó una reparación capital en el año 2016.

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].

Esta central termoeléctrica 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 para la evaluación del esquema térmico principal del bloque número 3 de la central termoeléctrica Ernesto Guevara de la Serna de Santa Cruz del Norte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del esquema térmico principal del bloque número 3

El esquema térmico principal de la unidad generadora número 3 de la central termoeléctrica de Santa Cruz se muestra en la figura 1. El bloque opera con un ciclo de vapor Rankine con sobrecalentamiento, recalentamiento y regeneración.

Se realizan 8 extracciones laterales de vapor en la turbina, la primera a la salida del cilindro de alta presión (CAP), de la segunda a la séptima en el cilindro de media presión (CMP) y la octava 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 7 y 8, y el sistema de baja presión con los calentadores 1, 2, 3, 4 y 5. 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):

$$\eta_{\text{efectivo}}^{\text{inst}} = \eta_{\text{T}} \cdot \eta_{\text{gv}} \cdot \eta_{\text{m}} \cdot \eta_{\text{g}} \quad (1)$$

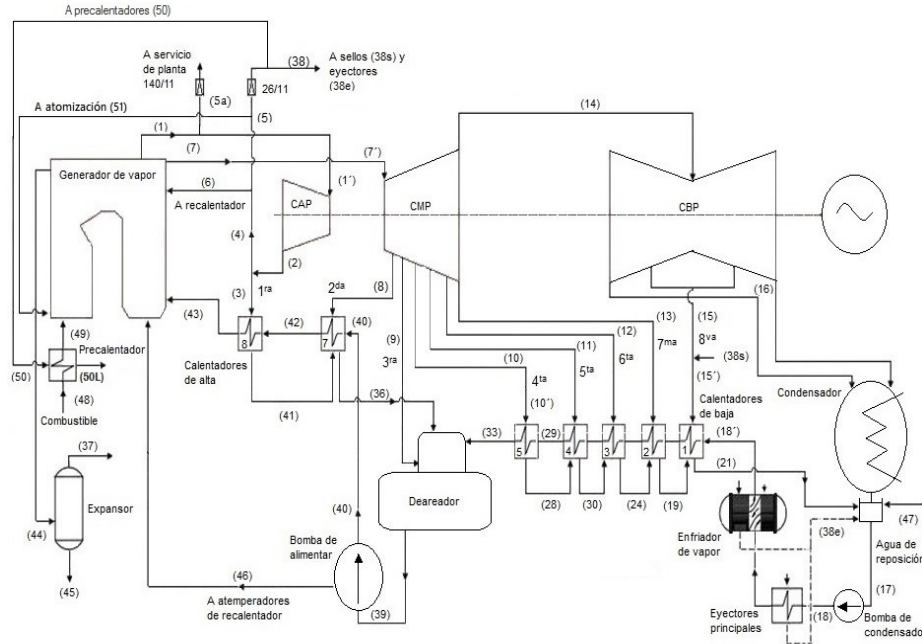


Fig. 1. Esquema térmico principal del bloque número 3 de la central termoeléctrica Ernesto Guevara de la Serna

$$\eta_{\text{efectivo}}^{\text{inst}} = \frac{W_t^e}{m_{\text{comb}} \cdot VCI_{\text{comb}}} \quad (2)$$

Donde:

$\eta_{\text{efectivo}}^{\text{inst}}$ - 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_t^e - 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):

$$CEC = \frac{3600000}{VCI \cdot \eta_{\text{efectivo}}^{\text{inst}}} \quad (3)$$

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

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

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

$Q_{\text{abs.cald}}$ - Calor absorbido por el agua en la caldera

$Q_{\text{abs.recal}}$ - 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.

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 3.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

El libro de trabajo se concibió con una hoja de cálculo que presenta cuatro 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.

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., kPa	m (kg/h)	T (°C)	P (kPa)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg °C)
1 Vapor vivo generado enviado hacia la turbina	545,0	14185,5	325000	545,0	14185,5	0,0242	3445,6	6,5405
1' Vapor vivo alimentado al CAP	540,0	13172,3	325000	540,0	13172,3	0,0260	3443,2	6,5687
2 Vapor de escape del CAP	340,0	2837,1	325000	340,0	2837,1	0,0942	3096,2	6,7371
3 Vapor de 1ra extracción a la entrada del CAP-8	348,0	2371,0	25430	348,0	2371,0	0,1156	3125,2	6,8629

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, m13, m15' y m21), en el precalentador de combustible, la caldera y el expansor (se calculan los flujos másicos m51, m50, m44, m45 y m37), 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 m6, m7, m14, m16 y m47).

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.

CÁLCULOS DE LOS FLUJOS MÁSCOS DE VAPOR Y AGUA			
SISTEMA REGENERATIVO DE ALTA PRESIÓN CAP			
Balances de masa y energía	Solución del sistema de ecuaciones en el solver		Celdas cambiantes
CAP 7: Ecuación Restrictiva	0	$m40*(h42-h40)-m8*(h8-h36)-m3*(h41-h36)=0$	25430 m3 (kg/h)
CAP 8: Ecuación Restrictiva	0	$m40*(h43-h42)-m3*(h3-h41)=0$	17098 m8 (kg/h)
		m36 (kg/h)	42529 m36=m3+m8
SISTEMA REGENERATIVO DE BAJA PRESIÓN CBP			
Balances de masa y energía	Solución del sistema de ecuaciones en el solver		Celdas cambiantes
CBP-1: Ecuación restrictiva	0	$m33*(h20-h18prima)-m15prima*(h15prima-h21)-(m10+m11+m12+m13)$	8816 m10 (kg/h)
CBP-2: Ecuación restrictiva	0	$m33*(h25-h20)-m13*(h13-h19)-(m10+m11+m12)*(h24-h19)=0$	8944 m11 (kg/h)
CBP-3: Ecuación restrictiva	0	$m33*(h27-h25)-m12*(h12-h24)-(m10+m11)*(h30-h24)=0$	8987 m12 (kg/h)
CBP-4: Ecuación restrictiva	0	$m33*(h29-h27)-m11*(h11-h30)-m10*(h28-h30)=0$	11413 m13 (kg/h)
CBP-5: Ecuación restrictiva	0	$m33*(h33-h29)-m10*(h10-h28)=0$	5365 m15 prima (kg/h)
		Balance de masa del sistema comple m21 (kg/h)	43525 m21=m10+m11+m12+m13+m15 prima

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)	31	WtrCAP=m1prima*(h1prima-h2)	
CILINDRO DE MEDIA PRESIÓN (CMP)			
Trabajo real de expansión, Wtr_CMP (MW)	56	WtrCMP=m7*(h7prima-h8)+(m7-m8)*(h8-h9)+(m7-m8-m9)*(h9-h10)+ (m7-m8-m9-m10)*(h10-h11)+(m7-m8-m9-m10-m11)*(h11-h12)+ (m7-m8-m9-m10-m11-m12)*(h12-h13)	
CILINDRO DE BAJA PRESIÓN (CBP)			
Trabajo real de expansión, Wtr_CBP (MW)	12	WtrCBP=m14*(h14-h15)+(m14-m15)*(h15-h16)	
Trabajo real total de expansión del cilindro, Wtr_C (MW)	99	WtrC=WtrCAP+WtrCMP+WtrCBP	
Potencia eléctrica nominal del turbogenerador, Wten (MW)	100		
Rendimiento mecánico del turbogenerador, nm (%)	95,46	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)	95	Wte=Wtr_C*(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)	2	Wba=m39*(h40-h39)	
BOMBA DE CONDENSADO			
Trabajo de bombeo, Wbc (MW)	2	Wbc=m17*(h18-h17)	
CALDERA			
Calor absorbido, Qabscaled (MW)	221	Qabscaled=m1*(h1-h43)	
RECALENTADOR			
Calor absorbido, Qabsrec (MW)	37	Qabsrec=m7*(h7-h6)	
CONDENSADOR			
Calor rechazado, Qrechcond (MW)	148	Qrechcond=m16*(h16-h16L)	

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)	42000	
Valor calórico inferior total del combustible, VCItotal (MW)	296	$VCItotal = m_{48} \cdot VCI$
Rendimiento térmico del generador de vapor, ngv (%)	86,9	$ngv = Q_{abs} \cdot 100 / VCItotal$
CICLO		
Trabajo neto en el ciclo, Wneto (MW)	95,7	$Wneto = W_{tr} - W_{ba} - W_{bc}$
Calor absorbido en el ciclo, Qabs (MW)	257,6	$Qabs = Q_{abscond} + Q_{absrec}$
Calor rechazado en el ciclo, Qrech (MW)	148,5	$Qrech = Q_{rechcond}$
Calor neto en el ciclo, Qneto (MW)	109,1	$Qneto = Q_{abs} - Q_{rech}$
Rendimiento térmico del ciclo, nt (%)	37,2	$nt = Wneto \cdot 100 / Q_{abs}$
Rendimiento térmico del ciclo Carnot, ntCarnot (%)	48,4	$ntCarnot = (1 - (TFF + 273) / (TFC + 273))$
Rendimiento efectivo de la instalación, neinst (%)	32,0	$neinst = Wte / VCItotal$
Consumo específico de combustible, CEC (g /kW-h)	267,5	$CEC = 1 / (VCI \cdot neinst)$

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 enviado hacia la turbina	545	14186	325000
1'	Vapor vivo alimentado al CAP	540	13172	
2	Vapor de escape del CAP	340	2837	
3	Vapor de 1 ^{ra} extracción a la entrada del CAP-8	348	2371	
5	Vapor de 1 ^{ra} extracción a servicio de planta			11005
6	Vapor de 1 ^{ra} extracción a recalentador	349	3104	
7	Vapor a la salida del recalentador	545	2716	
7'	Vapor recalentado a la entrada del CMP	540	2716	
8	Vapor de 2 ^{da} extracción hacia el CAP-7	463	1595	
9	Vapor de 3 ^{ra} extracción del CMP	386	914	
10	Vapor de 4 ^{ta} extracción	331	579	
11	Vapor de 5 ^{ta} extracción hacia el CBP-4	273	349	
12	Vapor de 6 ^{ta} extracción hacia el CBP-3	213	162	
13	Vapor de 7 ^{ma} extracción hacia el CBP-2	155	104	
14	Vapor de escape del CMP y entrada al CBP	155	104	
15	Vapor de 8 ^{va} extracción	75	37	
15'	Vapor de 8 ^{va} extracción hacia el CBP-1	72	33	
16	Vapor de escape del CBP	49	9	
17	Condensado a la salida del pozo caliente	43	9	
18	Condensado a la salida de la bomba de condensado	50	1823	
18'	Condensado a la entrada del CBP-1	51	1520	
19	Drenaje del CBP-2		104	
20	Condensado a la salida del CBP-1	66	1419	
21	Drenaje del CBP-1		33	

Continuación Tabla 1				
24	Drenaje del CBP-3		162	
25	Condensado a la salida del CBP-2	91	1317	
27	Condensado a la salida del CBP-3	112	1216	
28	Drenaje del CBP-5		579	
29	Condensado a la salida del CBP-4	131	1115	
30	Drenaje del CBP-4		349	
33	Condensado principal a la salida del CBP-5	150	1013	272630
36	Drenaje del CAP-7		1595	
39	Agua de alimentación a la salida del deareador		608	
40	Agua de alimentación a la salida de la bomba	161	19627	325074
41	Drenaje del CAP-8		2371	
42	Agua de alimentación a la entrada del CAP-8	193	19475	
43	Agua de alimentación enviada al economizador	231	19323	
48	Combustible quemado en el horno	100		25400

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	86,9	%
Trabajo real de expansión CAP	31,3	MW
Trabajo real de expansión CMP	56,0	MW
Trabajo real de expansión CBP	12,1	MW
Potencia eléctrica del turbogenerador	94,9	MW
Trabajo de la bomba de agua de alimentación	1,6	MW
Trabajo de la bomba de condensado	2,2	MW
Rendimiento térmico del ciclo	37,2	%
Rendimiento efectivo de la instalación	32,0	%
Consumo específico de combustible	268	g /kW-h

El consumo específico de combustible queda determinado por los rendimientos térmicos del ciclo y del generador de vapor. El rendimiento térmico del ciclo se ve 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, si bien es mejorado con las superficies recuperativas de calor, se encuentra afectado por las características del crudo cubano utilizado como combustible.

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. Se trabaja en la incorporación al libro de trabajo del método indirecto de cálculo del rendimiento térmico del generador de vapor, que permita profundizar en las causas de las pérdidas energéticas que se manifiestan en este equipo. También, dada la flexibilidad que ofrece el Microsoft Excel y la similitud de los esquemas térmicos principales, se trabaja en la implementación de libros de trabajo para la evaluación energética de los restantes bloques de esta central, así como de otra central termoeléctrica.

CONCLUSIONES

Se confeccionó un libro de trabajo en Microsoft Excel que permite evaluar la eficiencia energética con que opera el bloque 3 de 100 MW de la central termoeléctrica Ernesto Guevara de la Serna:

1. Se resolvieron los balances de masa y energía en el esquema térmico principal del bloque 3, 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.
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 termoelectricas 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]. Ziolkowski, 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, vol. 46, n. 1, p. 18-34. ISSN 1556-7036. 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 Efficiencies”. 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 Thermo-economic 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. ISSN2078-2489. 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. 2006. 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 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.

Yadira Gutiérrez Barroso: <https://orcid.org/0009-0000-3974-7687>

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

Orlando Caballero Roca: <https://orcid.org/0009-0000-8632-1021>

Participó en el aporte de ideas y establecimiento de conclusiones, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, revisión crítica del borrador del artículo y aprobación final.