

Artículo Original

**USO DE CONDENSADORES SECOS EN LA GENERACIÓN DE
ELECTRICIDAD EN LA INDUSTRIA AZUCARERA EN CUBA**

**AIR COOLED CONDENSER USE IN CUBAN SUGAR INDUSTRY ELECTRICITY
GENERATION**

Yanán Camaraza Medina ^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-2287-7519>

Oswaldo F. García Morales¹ <https://orcid.org/0000-0001-5895-8033>

Andrés A. Sánchez-Escalona² <https://orcid.org/0000-0002-9770-210X>

¹ Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
Carretera a Varadero Km 3 y ½, Matanzas, Cuba.

² Facultad de Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Nuñez
Jiménez. Avenida Calixto García Iñiguez #15 entre Av. 7 de Diciembre y Calle Reynaldo Laffita Rueda,
Rpto Caribe, Moa, Holguín, Cuba.

Recibido: Febrero 14, 2020; Revisado: Marzo 1º, 2020; Aceptado: Abril 9, 2020

RESUMEN

Introducción:

El proyecto actual de centrales eléctricas (CE) de biomasa en la industria azucarera de Cuba, tiene como limitante el acceso al agua requerida por las instalaciones de condensación. En la actualidad, el uso de condensadores secos es la solución más difundida a nivel mundial reducir los altos índices de consumo de agua en los sistemas de condensación y flexibilizar la ubicación de la CE, siendo más difundidos los aerocondensadores (ACC).

Objetivo:

Realizar un estudio simplificado que demuestre la efectividad de la implementación de la condensación seca en el proyecto de CE de Biomasa en la industria azucarera cubana.

Materiales y Métodos:

Se muestra el estado actual del uso de la condensación seca a nivel mundial en las industrias de generación eléctrica y azucarera, posteriormente se detalla los elementos vinculados al proyecto de CE de biomasa, requeridos para el análisis.

Resultados y Discusión:

Se realiza un análisis sobre el consumo, generación de potencia y área de transferencia de calor requerida por cada variante, además se efectúa un estudio de caso aplicando criterios de selección, VAN, TIR, período de recuperación de la inversión y costo nivelado de la energía, a partir del uso de los métodos de Conradie y col. y Camaraza-Medina y col.



Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Yanán Camaraza, Email: ycamaraza1980@yahoo.com



Conclusiones:

El estudio realizado muestra que el uso del ACC en Cuba es una alternativa ventajosa para los proyectos previstos de CE, al cumplir con los requerimientos de la ley 124/2017 y mostrar indicadores técnico-económicos de operación que resultan adecuados.

Palabras clave: aerocondensador; industria azucarera; planta de potencia.

ABSTRACT

Introduction:

The current biomass power plant (CE) project in Cuban sugar industry is limited by water access required by condensation facilities. At present, the use of dry condensers is the most widespread solution worldwide to reduce high rates of water consumption in condensing systems and to make the location of the CE more flexible, with aero condensers (ACC) being more widespread.

Objective:

To carry out a simplified study that demonstrates the implementation of dry condensation in EC Biomass project in Cuban sugar industry effectiveness.

Materials and methods:

Dry condensation worldwide use in electricity and sugar generation industries current state is shown, subsequently the elements related to biomass CE project, required for the analysis, are detailed.

Results and Discussion:

An analysis is carried out on the consumption, power generation and heat transfer area required by each variant. In addition a case study is carried out applying selection criteria, NPV, IRR, investment recovery period and leveled energy cost using Conradie, et al and Camaraza-Medina, et al methods.

Conclusions:

The study carried out shows that ACC use in Cuba is an advantageous alternative for planned CE projects, as it complies with Law 124/2017 requirements. It and demonstrates adequate technical-economic operation indicators.

Keywords: aero condenser; sugar industry; power plant.

1. INTRODUCCIÓN

Según la Agencia Internacional de Energía, (IEA), al cierre del 2018, cerca del 32 por ciento de los retiros de agua con fines industriales fueron usados en condensadores húmedos. En zonas con limitaciones de acceso al agua, la solución más difundida es el uso de condensadores secos, los cuales logran tasas de ahorro de consumo de agua cercanas al 95 por ciento. De los condensadores secos, el aerocondensador (*Air Cooled Condenser*, ACC por sus siglas en inglés) es el más usado. En la actualidad se emplean en países como China, Estados Unidos, Turquía, Malasia y España (Arrellano, 2019).

El incremento de la demanda energética en el mundo ha orientado el diseño de centrales eléctricas (CTE) con instalaciones innovadoras, surgiendo en la actualidad numerosas

propuestas de proyectos de generación en localidades que anteriormente eran descartadas por su limitación de recursos de agua para el sistema de enfriamiento (Gimelli y col., 2018).

Tras evaluarse varios proyectos de ciclo a vapor en zonas que, debido a la escasez de los recursos hidráulicos no se tenían en cuenta, es necesario incorporar sistemas de enfriamiento secos en sustitución de los tradicionales sistemas húmedos. El aerocondensador surge como la tecnología de mayor auge en las plantas de generación de vapor, al sustituir el tradicional condensador de superficie y el sistema de enfriamiento asociado al mismo con un solo equipo que cumple con el proceso de condensación y enfriamiento al mismo tiempo (Wai y col., 2018).

De acuerdo con (Matthew y col., 2019), el empleo de tecnologías húmedas alternativas, entre ellas las torres de enfriamiento húmedas, requiere un menor consumo específico de agua, sin embargo, el aumento sustancial del consumo por concepto de evaporación es superior a las tasas de reposición que permiten extraer de las cuencas de captación las legislaciones ambientales vigentes. Una situación similar se experimenta con el uso de piscinas de enfriamiento, pues estas también incluyen un alto consumo de agua, al operar a través del enfriamiento evaporativo.

En la actualidad el déficit de agua, unido a la eminencia del empleo de fuentes de energía alternativas, han generado innumerables esfuerzos para saltar las deficiencias asociadas al empleo de las tecnologías conocidas y disponibles para tal fin. El empleo de la biomasa como fuente energética para la generación de potencia eléctrica ha sido una de las alternativas de mayor aceptación en regiones con potencial agrícola y forestal (Camaraza-Medina y col., 2018a).

El estado cubano previsto una inversión capital que permitirá la instalación de 1 650 MW de potencia de generación eléctrica mediante fuentes renovables (solar, eólica y biomasa), lo cual representa el 24 % de la matriz energética nacional. De este volumen, 875 MW serán producidos por 19 CTE de biomasa. Cuba no se encuentra exenta de la crisis global del agua, y por lo tanto resulta imprescindible su uso racional y adecuado, por lo que se justifica el empleo de la tecnología de condensación seca (ACC) en los proyectos previstos de las CTE de biomasa (Camaraza-Medina y col., 2018b).

A pesar del menor consumo de agua, los ACC han logrado una penetración limitada en las plantas de potencia debido a los costos asociados a su uso, pues requieren una inversión de capital mayor que los condensadores húmedos, al incorporar intercambiadores de calor más grandes, con enormes áreas de aletas y requieren estructuras de soporte adicionales (Chen y col., 2016).

En general, los costos de instalación y operación de los sistemas ACC son actualmente de 2,5 a 5 veces superiores a su equivalente húmedo, mientras que los costos típicos de producción de energía nivelada para plantas con ACC oscilan entre los 40 a 80 \$/MWh, siendo aproximadamente un 15 % superior a los costos obtenidos con el empleo de una tecnología de enfriamiento húmedo, de acuerdo a (Guang y col., 2017).

En la literatura existente y disponible no son reportadas experiencias del empleo de los ACC en la industria azucarera, por tal motivo los autores tienen como objetivo del presente artículo realizar un estudio simplificado que demuestre la efectividad de la implementación de la condensación seca en el proyecto de CE de Biomasa en la industria azucarera cubana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Experiencias internacionales sobre el empleo del uso de ACC en plantas de potencia

La primera CTE que uso tecnología ACC fue desarrollada por Kenning en su tesis doctoral en el año 1956, para una potencia de 2 MW. En la actualidad ha sido empleado el ACC en instalaciones con potencias hasta 1 200 MW (Maulbetsch, 2019).

En los últimos años varios países han adoptado el ACC, incluso poseyendo áreas con abundantes recursos hídricos, como es el caso de Gran Bretaña, Irlanda, Bélgica, Luxemburgo y el norte de Italia. En la actualidad, la mayor planta de ciclo combinado (1 200 MW) en Europa está radicada en Marsella, Francia, y la misma emplea como condensador un ACC, permitiendo así su ubicación en las inmediaciones de la fuente de abasto de combustible (Adamet, 2019).

En Estados Unidos de América (EUA), el uso de ACC no se ha limitado a las regiones áridas, sino que también se han especificado para las plantas ubicadas en zonas donde el agua suele ser más abundante, siendo realizados estudios de rigor auspiciados por la Comisión Federal de Energía, California. A inicios del 2019, en este país se disponen de 263 plantas que operan con ACC (Matthew y col., 2019).

En la figura 1 se muestra la construcción de una planta de 800 MW (Colorado, EUA) en las inmediaciones de una zona con grandes reservas de carbón y con baja disponibilidad de recursos hídricos. La proximidad de la planta a la fuente de abasto de combustible ha sido posible por el uso del ACC.

En China, al seleccionar el sitio de ubicación de una futura planta, la proximidad a una fuente de agua para condensación no es un elemento importante. Para reducir el impacto ambiental generado por el uso del agua, se han adoptado el ACC. El decreto 167/2017 establece como requisito primario el empleo de condensación seca para las CTE de nueva construcción o remodelación. Este elemento permite optimizar la ubicación de la planta con respecto a las líneas de transmisión y las líneas de distribución de gas (para plantas de ciclo combinado) o las líneas de ferrocarril (para plantas a carbón). En los últimos cinco años, China ha adquirido como promedio un ACC por mes, para ser usado en las nuevas centrales eléctricas de carbón, con capacidades típicas de 2x300 MW o 2x600 MW. Al cierre del 2018 en este país habían instalados ACC en un total de 125 plantas con una capacidad instalada de 75 GW, (Li y col., 2018).

En la figura 2 es mostrada una planta de ciclo combinado de 600 MW instalada en Jianse, China. Esta zona posee abundantes fuentes de agua, sin embargo, en su construcción fue establecido el empleo de condensadores secos para proteger la floreciente agricultura de arroz de esta zona.

Investigaciones sobre el uso de condensadores secos también han sido extendidas a otros países. En Rusia existe un centro de investigación especializado en condensación seca, radicado en el Instituto Politécnico de San Petersburgo, siendo ejecutados en los últimos cinco años cerca de dos docenas de proyectos investigativos para extender y generalizar el uso del ACC como condensador (Milman y col., 2018). Otros países como España, Alemania y Turquía, también han extendido el empleo de la condensación seca a plantas de mediana potencia ($P < 60$ MW), siendo usado fundamentalmente plantas termosolares y de reciclado de basura (que usan desechos urbanos como combustible). En el primero destacan las plantas termosolares de la

provincia Palma, mientras en el segundo y tercero existen varias unidades en Baviera y Gazi respectivamente con capacidades que oscilan entre los 15 a 40 MW.

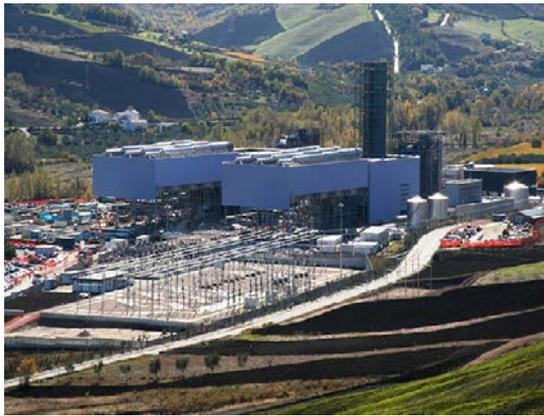


Figura 1. CTE de 800 MW ubicada cerca de la fuente de abasto de combustible (EUA)



Figura 2. Planta de 600 MW que usa ACC como estrategia para proteger el agua destinada a la agricultura (China)

En América son conocidas varias instalaciones que usan ACC, en Venezuela las plantas Pentech y Simón Bolívar, con 385 y 120 MW respectivamente, en México las plantas Salamanca Corp. I y II con potencias de 400 y 150 MW respectivamente, en Colombia las plantas Occidente I y Occidente IV, con potencias de 150 MW cada una, en Chile la planta Colón con una capacidad de 400 MW, en Argentina la planta Tucuman I, con una capacidad de 150 MW, aunque recientemente fue ampliada esta unidad, siéndole anexado un nuevo ciclo combinado llamado Tucuman II (véase la tabla 1).

Tabla 1. Resumen de las mayores plantas de reciente construcción que usan ACC

<i>Localidad</i>	<i>Tipo de planta</i>	<i>Diseño sistema de enfriamiento</i>
Queensland, Australia	Planta de carbón 840 MW, dos turbinas de vapor 420 MW c/u	Dos ACC con 36 celdas cada uno en configuración de 6x6
Las Vegas, EUA	Ciclo combinado de 1 200 MW, dos turbinas de vapor de 200 MW c/u	Dos ACC, configuración 10x5, en una estructura conjunta (20x5).
Yant-se China	Ciclo combinado de 2 400 MW, dos turbinas de vapor de 400 MW c/u	Dos ACC de 25 celdas cada uno en configuración 5x5
Marsella, Francia	Ciclo combinado de 890 MW, dos turbinas de vapor de 200 MW c/u	Un ACC de 50 celdas en configuración 10x5
Linden, EUA	Planta de cogeneración de 614 MW, tres turbinas de vapor de 95 MW c/u	Tres ACC de 20 celdas cada uno. Configuración 4x5 continua.
Tucumán II, Argentina	ACC para un ciclo combinado de 680 MW, una turbina de vapor de 150 MW	Un ACC de 15 celdas en configuración 10x5

Al cierre del 2018 en América (excluyendo los EUA y Canadá) se encontraban en servicio un total de 180 plantas de potencia que emplean ACC como sistema de condensación, con una capacidad instalada de 17,2 GW (Adamet, 2019).

En la tabla 1 se proporciona un resumen de las cinco mayores plantas puestas en marcha en los últimos dos años que emplean ACC como sistema de condensación.

2.2 Experiencias internacionales sobre el uso empleo de condensación seca en la industria azucarera.

Según (Gimelli y col., 2018), a nivel global, la generación de potencia mediante biomasa cañera alcanza promedios de 75 kWh/tcaña (75 kWh de energía generada por cada tonelada de caña procesada), sin embargo en Cuba este valor promedio ronda los 34 kWh/tcaña, según los reportes de (ECIAZ, 2019), lo cual indica un potencial energético que puede ser aprovechado. Al igual que en las grandes plantas de potencia, son conocidas aplicaciones de sistemas ACC a la industria azucarera, destacándose su aplicación en países como Malasia, India, Francia, Brasil y recientemente en México.

Es un criterio difundido el potencial de aprovechamiento del agua generada en el proceso agroindustrial de un central azucarero, sin embargo, (Pellegrini, 2015) demostró que en la industria azucarera el abastecimiento de agua puede ser conservado para incrementar la eficiencia de la planta, sumándole el reciclado del agua residual y otras avenidas, pero estas técnicas encarecen el proyecto, por lo que se consideran solo cuando no existe otra fuente de reposición de agua o regulaciones ambientales así lo requieran, por lo tanto, recomendado el uso de condensación seca a la industria azucarera brasileña. En las figuras 3 a la 5 se muestra el empleo de ACC en instalaciones reales de la industria azucarera en Francia y Brasil.

La adopción de la condensación seca en la industria azucarera mundial, a diferencia de las grandes plantas de potencia, no muestra una tendencia acelerada al incremento de su empleo, por lo tanto en la literatura disponible y consultada no se cuenta con un volumen de información apreciable sobre el tema. Tres importantes trabajos que brindan elementos valiosos sobre la temática son (Malek, 2016), (Gimelli y col., 2018) y (Alderete, 2019), los que realizan importantes contribuciones al estudio técnico-económico del desempeño de la condensación seca en las plantas de 20 y 50 MW, asociadas a ingenios azucareros de caña de azúcar y remolacha por este orden, ubicados en Brasil, México y Malasia respectivamente.

Según reportes de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IREA, 2020), al cierre del 2018, a nivel mundial existen cerca de 1 300 instalaciones de potencia que emplean condensación seca, sin embargo de ellas solo 120 pertenecen a la industria azucarera. Esta agencia reporta dos ingenios en México que están en proceso de adopción de esta tecnología (San Juan De Dios y La Concepción). Igualmente se destaca la presencia de Crystalsev, (Brasil) con una potencia instalada de 140 MW en tres ingenios vinculados a igual cantidad de centrales eléctricas de biomasa (CEB).

En la tabla 2 se brinda un resumen de varios proyectos de plantas de potencia asociados a la industria azucarera de reciente operación, que emplean ACC como sistema de condensación, de acuerdo a los reportes de (IREA, 2020).

En la actualidad, se muestra una tendencia en Francia y otros territorios europeos productores de azúcar de remolacha, al empleo de ACC en las CEB asociadas a esta industria. A raíz de la entrada en vigor de la ley europea de protección a las aguas, en la cual el parlamento europeo bonifica a las entidades que contribuyan de forma notable a la reducción del consumo de agua, ha generado en un corto plazo la proliferación del uso de la condensación seca en este tipo de tecnología (Lam y Law, 2018).



Figura 3. Condensador seco compacto (cuatro unidades de 10 MW cada una), instalado en una planta térmica de una fábrica de azúcar de remolacha en Marsella, Francia



Figura 4. Condensador seco compacto (4 unidades de 12 MW cada una) instalado en el central azucarero. Crystalsev1, Brasil



Figura 5. Condensador seco compacto (3 unidades de 8 MW cada una). En proceso de montaje (Ingenio Crystalsev2. Brasil)

Tabla 2. Proyectos actuales de CEB asociados a la industria azucarera

<i>Localización</i>	<i>Tipo de planta</i>
Durango, México	CEB (caña de azúcar) de 20 MW
Valle del Cauca, Colombia	CEB (caña de azúcar) de 20 MW
Curicó, Chile	CEB (remolacha azucarera) de 10 MW
Livorno, Italia	CEB (remolacha azucarera) de 10 MW
Jinjie, China	CEB (remolacha azucarera) de 15 MW
Siegerland, Alemania	CEB (remolacha azucarera) de 20 MW

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Valoración del uso de ACC en las Centrales Eléctricas de Biomasa cubanas.

Cuba no se encuentra exenta de la crisis global del agua, por tal motivo el estado cubano aprueba la ley 124/2017 sobre las aguas terrestres, la que establece en su artículo 72 la negativa del uso de cuencas con cotas críticas (Gaceta Oficial de la República de Cuba No.51, 2017).

El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), confirmó que el último quinquenio el déficit estimado de agua ha crecido en un 12 por ciento, declarando en el boletín hidrológico 03-2019 un total de 37 cuencas en estado crítico de sus cotas. Del total de CEB previstas, un total de 17 se sitúan en zonas de este tipo (INRH, 2019).

El INRH clasifica las fuentes de abasto de agua en tres zonas fundamentales, las cuales

son:

- 1- Zona de explotación acuífera normal;
- 2- Zona de explotación acuífera desfavorable
- 3- Zona de explotación acuífera crítica

En la primera es posible el uso del agua de forma racional. En la segunda el empleo de agua es permitido, pero regulado por el INRH. Para la tercera zona, la ley 124/2017 permite el empleo del agua solo en casos excepcionales. Este elemento agrupa al total de CEB previstas en tres grupos, según la disponibilidad de agua, o sea:

- Grupo I- Abundante disponibilidad de agua para condensación
- Grupo II-Aceptable disponibilidad de agua
- Grupo III-Escasa disponibilidad de agua

En la tabla 3 es resumida la descripción hidrológica del proyecto inversionista de CEB, tomando como referencia los valores reportados en de acuerdo a los valores reportados en (INRH, 2019).

A cada Ingenio azucarero reflejado en la tabla 3 se encuentra asociada una CEB, la cual recibe materia prima combustible del primero y a la par, le entrega vapor para el proceso fabril. Por este motivo el flujo de vapor a condensar en la CEB va a depender del estado operativo del ingenio y de las variables ambientales imperantes. Por lo tanto, existen cuatro posibles variantes de trabajo, que deben ser consideradas para el estudio que se pretende realizar, estas son:

- Variante 1 - CEB e ingenio funcionando, día cálido.
- Variante 2 - CEB funcionando e ingenio fuera de servicio, día cálido.
- Variante 3 - CEB funcionando e ingenio fuera de servicio, día frío.
- Variante 4 - CEB e ingenio funcionando, día frío.

Tabla 3. Descripción hidrológica del proyecto inversionista CEB de biomasa

<i>Ingenio azucarero</i>	<i>Cuenca hidrográfica</i>	<i>Provincia</i>	<i>Grupo</i>	<i>Costo de mitigación por uso del agua (USD/m³)</i>
30 de Noviembre	HS-2 N	Artemisa	I	0,66
Héctor Molina	HS-5	Mayabeque	II	0,87
Jesús Rabí	M-V	Matanzas	III	1,41
Mario Muñoz	M-III-Sur	Matanzas	III	1,03
Quintín Bandera	VC-III-1-d	Villa Clara	III	1,55
George Washington	VC-III-1-h	Villa Clara	III	1,21
Héctor Rodríguez	VC-III-1-i	Villa Clara	III	1,46
Uruguay	SS-18	S. Spíritus	II	1,16
Ciro Redondo	CA-1-11	Ciego de Ávila	III	1,29
Ecuador	CA-1-9	Ciego de Ávila	III	1,39
Brasil	C-I-11	Camagüey	III	1,56
Panamá	C-I-4	Camagüey	III	1,24
Batalla de Guásimas	C-I-8	Camagüey	III	1,26
Colombia	C-I-14-1	Tunas	III	1,27
Majibacoa	LT-II-2	Tunas	II	1,36
Antonio Guiteras	LT-II-1	Tunas	III	1,46

Cristino Naranjo	HG-II-1-1	Holguín	III	1,48
Urbano Noris	HG-II-1-0	Holguín	III	1,74
Fernando de Dios	HG-II-1-1	Holguín	II	1,31
Julio A Mella	SC-II-1	Santiago	III	1,89
Grito de Yara	G-II-2A	Granma	II	1,43
Enidio Díaz	G-II-2B	Granma	III	1,28
Ciudad Caracas	CF-II	Cienfuegos	II	1,25
Antonio Sánchez	CF-I	Cienfuegos	III	1,62
5 de Septiembre	CF-III	Cienfuegos	II	1,19

Los elementos planteados conllevaron a la ejecución de una investigación para la posible aplicación de ACC al proyecto de CEB (Camaraza-Medina y col., 2019a).

En la actualidad, en la evaluación de un ACC se emplea el método de excesos de áreas o método de Conradie, (Conradie y col., 2016), sin embargo, este posee varios inconvenientes que limitan la precisión de los resultados, siendo requerido el uso de coeficientes de reserva, lo que incrementa el área de transferencia de calor requerida, encareciendo el proyecto (Camaraza-Medina y col., 2019b). Para reducir el exceso de áreas requerido, fue desarrollada una metodología (Camaraza-Medina y col., 2018b), que permite evaluar un ACC, sin coeficientes de reserva. Los resultados obtenidos con el uso de esta metodología, permiten caracterizar la efectividad del ciclo de la CEB que opera acoplado al ACC.

Un primer aspecto a considerar es el incremento de insumos propios de la CEB generado por la presencia de los tiros de ventilación forzada. Al ser empleado el aire como agente refrigerante, debido a su baja capacidad de transporte de energía térmica, son requeridos grandes volúmenes de aire, lo cual eleva apreciablemente el consumo de energía de los auxiliares, (Camaraza, 2017).

En la figura 6 es graficado el consumo de energía requerido por cada ventilador, para las distintas variantes operativas estudiadas. En la figura 6 se observan dos familias de curvas, una para cada potencia preestablecida de la CEB. En la misma se puede constatar que en la medida que se incrementa el valor de la temperatura de bulbo seco (T_{TBS}), se eleva de forma exponencial el consumo de energía requerida por los auxiliares (ventiladores), llegando a ser en las operaciones realizadas en ambiente cálido casi el doble de la requerida para igual operación en épocas de frío.

La potencia específica de los auxiliares (en kW) por MW de potencia útil es graficado en la figura 7. Se puede constatar que el mismo incrementa proporcionalmente al aumento de la T_{TBS} . Para el ciclo combinado su valor medio (a 32°C) es aproximadamente la mitad del obtenido para el caso de la operación solitaria de la CEB. En la figura 8 es graficada la reducción de potencia útil en la CEB asociada al uso de ACC. Un inconveniente del ACC son los grandes volúmenes de área de intercambio térmico requeridos. En la figura 9 son dados los equivalentes logarítmicos del área de termo transferencia requerida por los estudios desarrollados.

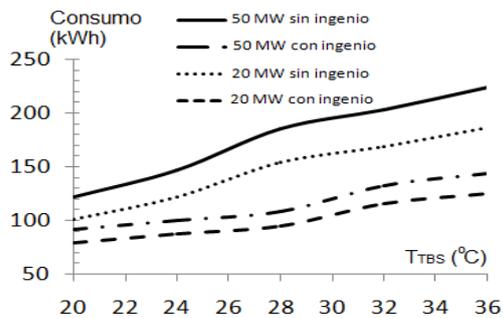


Figura 6. Incremento del insumo de auxiliares en la CEB con ACC

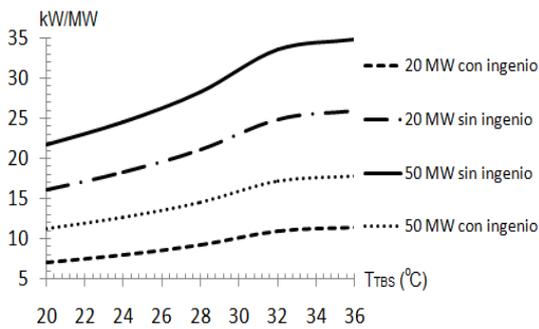


Figura 7. Consumo específico de auxiliares por MW generado

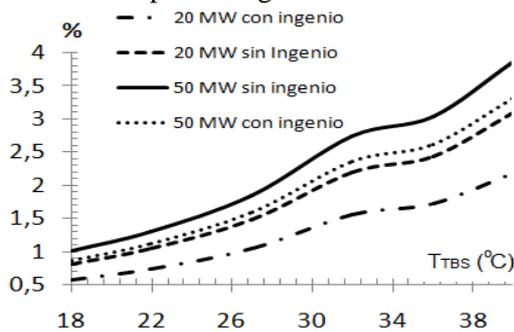


Figura 8. Reducción de la potencia útil por el empleo de ACC

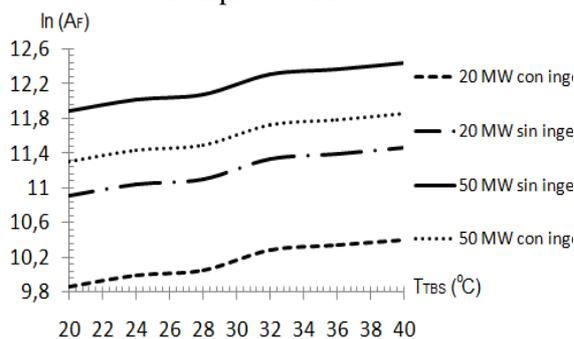


Figura 9. Área requerida por el método de Camaraza

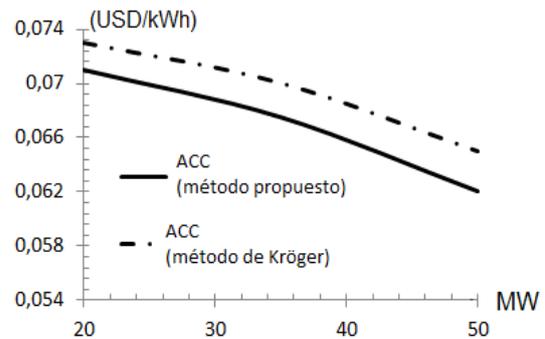


Figura 10. Costo nivelado de la energía para las variantes analizadas

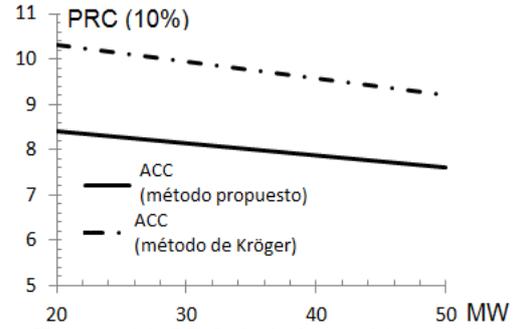


Figura 11. PRC de la inversión para las variantes estudiadas

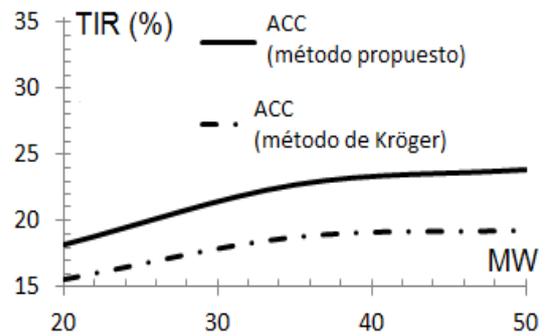


Figura 12. TIR de la inversión para las variantes estudiadas

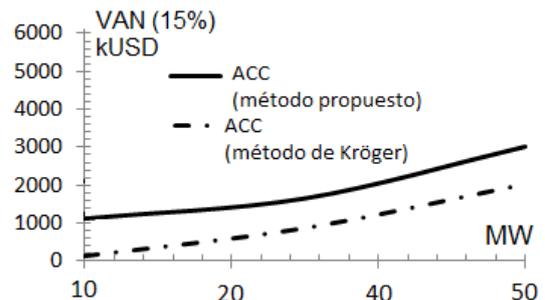


Figura 13. VAN con una tasa de actualización del 15% para las variantes estudiadas

El período de vida útil de un ACC es de 35 años, (Camaraza y col., 2019a). Los valores del costo nivelado de la energía obtenidos con su uso son graficados en la figura 10. En la misma se aprecia que el método de Conradie (Conradie y col., 2016), incrementa en 1,1 veces el valor del costo nivelado con respecto al propuesto.

Con una tasa de actualización del 10 por ciento el período de recuperación compuesto

(PRC) para cada variante de método es mostrado en la figura 11. El mismo presenta un comportamiento decreciente con el incremento de la potencia de salida de la CEB, con una pendiente muy similar para ambas variantes, sin embargo, el valor obtenido a partir de la aplicación del método de Conradie (Conradie y col., 2016), resulta ser aproximadamente 1,2 veces superior al obtenido con el uso de la nueva propuesta.

Los criterios del TIR y el VAN obtenidos para ambas variantes son graficados en las figuras 12 y 13. Como los valores de TIR alcanzados son superiores al por ciento de interés bancario (5,5 por ciento) se considera favorable esta inversión, observándose además que la TIR presenta resultados más favorables para la variante propuesta, cuyo valor es aproximadamente 1,2 veces superior al obtenido con el uso del método de Conradie, (Conradie y col., 2016).

Para el análisis del VAN se toma una tasa de actualización del 15 por ciento al ser esta la empleada por ENERGOIMPORT (entidad encargada en Cuba de las importaciones de equipamiento para fines energéticos). En todos los casos se perciben valores favorables del VAN (en kUSD), sin embargo, la variante de ACC evaluada por el método tradicional computa aproximadamente la mitad del VAN obtenido para un ACC examinado por la metodología propuesta.

4. CONCLUSIONES

Los ACC han ido incrementando su presencia como sistema de condensación en plantas de potencia a nivel mundial. El estudio realizado permite llegar a las siguientes conclusiones:

- 1- El ACC ya está siendo empleado de forma exitosa en la industria azucarera mundial y en diversas instalaciones de plantas de potencia, fundamentado por su ventaja de lograr tasas de ahorro de agua entre un 90 a un 95% con respecto a condensadores de tipo húmedos.
- 2- En la industria azucarera en América y de remolacha en Europa ya es conocido y utilizado el ACC como condensador en varias instalaciones CEB existentes.
- 3- El uso del ACC en Cuba una alternativa ventajosa para los proyectos de instalación y puesta en marcha de las CEB previstas, al cumplir con los requerimientos de la ley 124/2017 y mostrar indicadores técnico-económicos de operación que resultan adecuados.
- 4- Un estudio de caso comparativo entre los métodos dados por (Conradie y col., 2016) y (Camaraza-Medina y col., 2018b), arroja mejores resultados para este último, al brindar mejores índices del período de recuperación compuesto de la inversión, valores superiores de VAN y TIR, y lograr reducir el costo nivelado de la energía en 2 USD/MWh.

REFERENCIAS

Adamet, J., Diseño y análisis del comportamiento de un aerocondensador en una central térmica., *Anales de Energía-ESTI*, Vol. 19, No. 2, 2019, pp. 31-32.

Alderete, S., Modeling and dynamic simulation of the use of an air cooled condenser in the modern sugar industry., *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 13, 2019, pp. 101-122.

- Arrellano, B., Metodología y análisis para la selección del aerocondensador en centrales de generación a vapor., *Ciencia Sur*, Vol.12, No.v2, 2019, pp. 36-41.
- Camaraza, Y., Introducción a la termo transferencia., Editorial Universitaria, La Habana, 2017, pp. 918-919.
- Camaraza-Medina, Y., Cruz-Fonticiella, O.M., García-Morales, O.F., Predicción de la presión de salida de una turbina acoplada a un condensador de vapor refrigerado por aire., *Centro Azúcar*, Vol. 45, No. 1, 2018 a, pp.50-61.
- Camaraza-Medina, Y., Hernández-Guerrero, A., Luviano-Ortiz, J.L., Cruz-Fonticiella, O. M., y García-Morales, O.F., Metodología para la evaluación de plantas de potencia que operan con sistemas de condensación secos., *Centro Azúcar*, Vol. 45, No. 4, 2018 b, pp. 150-162.
- Camaraza-Medina, Y., Hernández-Guerrero, A., Luviano-Ortiz, J.L., Cruz-Fonticiella, O.M., y García-Morales, O.F., Empleo de condensadores secos en centrales termoeléctricas de biomasa: un caso de estudio., *Centro Azúcar*, Vol. 46, No. 2, 2019 a, pp. 21-34.
- Camaraza-Medina, Y., Hernández-Guerrero, A., Luviano-Ortiz, J.L., Mortensen-Carlson, K., Cruz-Fonticiella, O.M., García-Morales, O.F., New model for heat transfer calculation during film condensation inside pipes., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, 2019 b, pp. 344-353.
- Chen, L., Yang, L., Du, X, & Yang, Y., A novel layout of ACC to improve thermo-flow performances., *Applied Energy*, Vol. 165, 2016, pp. 246-251.
- Conradie, A.E., Kröger, D., & Heyns, A., Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications., *Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, 2016, pp. 219-232.
- ECIAZ., Datos técnicos e ingeniería básica para el proyecto de instalación de CEB de biomasa en el quinquenio 2019-2024., Empresa Contratista de Inversiones Azucareras, (ECIAZ, SA.), La Habana, 2019, pp. 1-56.
- Gaceta Oficial de la República de Cuba., No.51, 16 de Noviembre del 2017, Ley 124/2017 sobre las aguas terrestres y Decreto 337/2017, Consejo de Ministros, La Habana, Cuba, 2017.
- Gimelli, A., Luongo, A., & Marechal, A., An 20 MW sugar cane biomass steam power plant with air-cooled condenser: experimental and thermodynamic analysis., *Journal of Renewable Energies and Quality*, Vol.13, 2018, pp. 2162-2178.
- Guang, X., Wang, H., Yao, E., & Marechal, F., Thermo-economic optimization of a combined cooling, heating and power system based on small-scale compressed air energy storage., *Energy Conversion and Management*, Vol. 118, 2017, pp. 377-386.
- IREA., International Renewable Energy Agency., Council World Energy Data Handbook, United Nations library, New York, 2020, pp. 119-121.
- INRH., Boletín hidrológico, Análisis de lluvias, embalses, acuíferos y costo del agua, marzo-2019., Dirección de Uso Racional del Agua, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, 2019.
- Lam, P., & Law, A., Crowd funding for renewable and sustainable energy projects: An exploratory case study approach., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, 2018, pp. 11-20.
- Li, X., Wang, N., Wang, L., Yang, Y., & Marechal, F., Identification of optimal

- operating strategy of direct air-cooling condenser for Rankine cycle based power plants., *Applied Energy*, Vol. 209, 2018, pp. 153-166.
- Malek, A., Techno-economic analysis and environmental impact assessment of an 50 MW biomass sugar beet power plant in Malaysia., *Cleaner Production*, Vol. 98, 2016, pp. 12-28.
- Matthew, S.L., O'Hagan, J., & Mortensen, K., Comparison of alternate cooling technologies for power plants., California Federal Energy Commission, USA, 2019, pp. 4-182.
- Maulbetsch, J.S., Water conserving with air cooling condenser systems., American Research and Environmental Protection Association, Michigan, 2019, pp. 28-31.
- Milman, O.O., Ananiev, P.A., & Romanova, L.V., Air-cooled condensing units (review)., *Thermal Engineering*, Vol. 65, No. 3, 2018, pp. 157-162.
- Pellegrini, L.F., Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade., *Escola Politécnica de Sao Paulo, Sao Paulo*, 2015, pp. 77-83.
- Wai, H.G., Gebreegziabher, T., & Zhing, H., Design and optimization of biomass power plant with air-cooled condenser., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 26, 2018, pp. 11-16.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Yanán Camaraza Medina. Realizó la escritura del artículo, la búsqueda bibliográfica y las propuestas metodológicas empleadas en el estudio de caso efectuado. Lideró el análisis e interpretación de los datos y resultados obtenidos.
- Dr.C. Osvaldo F. García Morales. Revisó la escritura del artículo, contribuyó en la búsqueda bibliográfica y en la revisión de los datos y resultados obtenidos.
- M.Sc. Andrés A. Sánchez Escalona. Participó en el análisis e interpretación de los datos y los resultados obtenidos, con aportes relevantes.