

Uso Racional del Agua en Centrales Termoeléctricas¹

Isnel Benítez Cortes², Raúl Luis Justiz Casas³, Idalmis Justiz Esquivel⁴, Luis Fernando Prieto Montenegro⁵, Sarah Isabel Barreto Torrella⁶, Amaury Pérez Sánchez⁷

Resumen

Introducción: Los procesos de generación de energía en centrales termoeléctricas son uno de los principales consumidores de agua dulce. **Objetivo:** El trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el consumo de agua en el proceso de generación de electricidad en la Central Termoeléctrica “10 de Octubre”, en Nuevitas, Cuba, así como la generación

de residuales líquidos, que permita la propuesta de alternativas para la reducción del impacto ambiental debido al vertimiento de las aguas residuales, aplicando el principio de producciones más limpias. **Materiales y métodos:** Mediante el análisis de registros de datos y la realización de balances de masa, se identifican y cuantifican los principales consumos de agua y generación de residuales. **Resultados:** Con estos datos, se establecen

- 1 Artículo original derivado del proyecto de investigación “Aprovechamiento racional de agua en termoeléctricas e impacto en ecosistemas costeros de Cuba” adscrito a la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey, financiado por la Universidad de Camagüey, y ejecutado entre septiembre de 2016 y diciembre de 2020.
- 2 Doctor en Ciencias Técnicas, Ingeniero Químico de la Universidad de Camagüey, docente-investigador y Profesor Titular de la Universidad de Camagüey, Correo: isnel.benites@reduc.edu.cu / ORCID: 0000-0003-2427-640X.
- 3 Magíster en Análisis de Procesos de la Industria Química de la Universidad de Camagüey, Ingeniero Químico de la Universidad Central de Las Villas, Especialista Técnico de Corrosión de la Central Termoeléctrica “10 de Octubre”, Correo: justiz@ctenue.une.cu / ORCID: 0000-0002-0280-7663.
- 4 Ingeniera Química de la Universidad de Camagüey, Especialista B en Mantenimiento Agroindustrial de la Unidad Empresarial de Base Central Azucarero “Ignacio Agramonte” de Florida, Camagüey, Cuba. Correo: idalmis.justiz@agramonte.azcuba.cu / ORCID: 0000-0002-9130-7897.
- 5 Magíster en Eficiencia Energética de la Universidad de Oriente, Ingeniero Termoenergético de la Universidad de Camagüey, Director de la Dirección Integrada de Proyectos de la Central Termoeléctrica “10 de Octubre”. Correo: fernando@ctenue.une.cu / ORCID: 0000-0002-6985-6531.
- 6 Doctora en Ciencias Técnicas de la Universidad Central de Las Villas, Ingeniera Sanitaria y Magíster en Ingeniería Sanitaria del Instituto de Ingeniería de la Construcción de Leningrado, docente-investigador y Profesor Titular de la Universidad de Camagüey, Correo: sara.barreto@reduc.edu.cu / ORCID: 0000-0002-2471-7263.
- 7 Estudiante de Magíster en Biotecnología del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Ingeniero Químico de la Universidad de Camagüey, Especialista de la Planta Piloto y Profesor Instructor de la Universidad de Camagüey, Correo: amaury@nauta.cu / ORCID: 0000-0002-0819-6760.

Autor para Correspondencia: Amaury Pérez Sánchez, amaury@nauta.cu
Recibido: 16/03/2021 Aceptado: 30/11/2021

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

los mapas de consumo y de desperdicios de agua, determinándose que el volumen de agua residual vertido al mar, asciende a los 26 417 m³/año, producto de los lavados de los Calentadores de Aire Regenerativo (CAR), el eje convectivo y las purgas continuas y periódicas al generador de vapor.

Conclusiones: Se propone la reutilización de las aguas residuales de las purgas continuas y periódicas en los lavados mediante su recolección en tanques y posterior

utilización en los lavados de los CAR, lo cual ayuda a neutralizar el carácter ácido de las mismas. De esta forma, se disminuye el impacto ambiental en la bahía y los costos por concepto de compra de agua cruda en USD \$ 12 954.95/año, lográndose un doble efecto ambiental.

Palabras clave: Agua, calentadores de aire regenerativo, contaminación, producciones más limpias, termoeléctrica.

Rational use of Water in Thermolectric Plants

Abstract

Introduction. Power generation processes in thermolectric plants are one of the main consumers of fresh water. **Objective.** The work was carried out with the objective of evaluating the water consumption in the electricity generation process in the “10 de Octubre” Thermolectric Power Plant, in Nuevitas, Cuba, as well as the generation of liquid waste, which allows the proposal of alternatives for the reduction of the environmental impact due to the discharge of wastewater, applying the principle of cleaner productions. **Materials and methods.** By analyzing data records and carrying out mass balances, the main water consumption and generation of residuals are identified

and quantified. **Results.** With these data, the water consumption and waste maps are established, determining that the volume of residual water dumped into the sea amounts to 26 417 m³/year, as a result of the washing of the Regenerative Air Heaters (RAH), the convective axis and the continuous and periodic purges to the steam generator. **Conclusions.** It is proposed to reuse wastewater from continuous and periodic purges during washing by collecting it in tanks and later using it in RAH washes, which helps to neutralize their acidic character. In this way, the environmental impact in the bay and the costs for the purchase of raw water are reduced by USD \$ 12,954.95/year, achieving a double environmental effect.

Keywords: Water, regenerative air heaters, pollution, cleaner productions, thermolectric.

Uso Racional da Água em Termelétricas

Resumo

Introdução: Os processos de geração de energia em usinas termelétricas são um dos principais consumidores de água doce. **Objetivo:** O trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o consumo de água no processo de geração de energia elétrica na Usina Termelétrica “10 de Octubre”, em Nuevitas, Cuba, bem como a geração de resíduos líquidos, o que permite propor alternativas para a redução do impacto ambiental devido ao lançamento de efluentes, aplicando o princípio de produções mais limpas. **Materiais e métodos:** Por meio da análise dos registros de dados e da realização de balanços de massa, são identificados e quantificados os principais consumos de

água e geração de resíduos. **Resultados:** Com esses dados, são estabelecidos os mapas de consumo de água e resíduos, determinando que o volume de água residual lançada no mar, é de 26 417 m³/ano, produto da lavagem dos Aquecedores de Ar Regenerativos (AAR), do convectivo eixo e as purgas contínuas e periódicas para o gerador de vapor. **Conclusões:** Propõe-se o reaproveitamento do efluente de purgas contínuo e periódico na lavagem, recolhendo-o em tanques e posteriormente utilizando-o nas lavagens AAR, o que ajuda a neutralizar seu caráter ácido. Desta forma, o impacto ambiental na baía e os custos com a compra de água bruta são reduzidos em US \$12.954,95/ano, obtendo um duplo efeito ambiental.

Palavras-chave: Água, aquecedores de ar regenerativos, poluição, produções mais limpas, termoelétricas.

Introducción

El agua es un recurso natural crucial que sustenta la vida en la Tierra y apuntala la equidad, estabilidad, y sociedades y ecosistemas productivos (Fan et al., 2020). El desarrollo y la utilización excesiva de los recursos hídricos, la contaminación del agua y el deterioro del entorno hídrico interrumpen el proceso regional del ciclo del agua, agravando los riesgos relacionados con los procesos hídricos (Bolognesi et al., 2018). El agua se está convirtiendo en un recurso limitado en términos de cantidad y calidad debido a la creciente economía y población, aceleración de la urbanización y efectos del cambio climático (Saidan et al., 2020).

El concepto moderno de sostenibilidad se desarrolló no solo en la dimensión medioambiental, sino también en los niveles económico y social. Desde 1987 se han realizado muchos esfuerzos, pero aún existe la necesidad de completar la transición hacia la sostenibilidad con procesos de innovación, observación y análisis de teorías, políticas y mejores prácticas. Uno de los sectores más importantes llamados a gestionar esta transformación es el sector energético, involucrando políticas públicas y estrategias empresariales donde, para estas últimas, las tecnologías ambientales también podrían generar ventajas competitivas (Miglietta et al., 2018).

Los sistemas de agua y energía están estrechamente relacionados. Generalmente, la producción de energía consume grandes cantidades de agua (Liu et al., 2019). En este sentido, el término “nexo agua-energía” es muy pertinente para la gestión sostenible del agua (Miglietta et al., 2018).

Dado que la disponibilidad y la calidad del agua representan preocupaciones importantes, la gestión de los recursos hídricos es un desafío importante a enfrentar para mejorar la sostenibilidad del ciclo de producción. En este caso, el agua se puede reutilizar y reciclar. Sin embargo, dado que el aumento del reciclaje de agua, después de la limpieza y el enfriamiento de equipos y sistemas, puede disminuir la calidad del agua, las plantas productoras de energía tienen que comprometerse a reducir el uso y consumo de agua, o mejorar las tecnologías de limpieza (Colla et al., 2017).

Los procesos de generación de energía en centrales termoeléctricas son uno de los principales consumidores de agua dulce (Ocampo & Pérez, 2017). Por otra parte, están considerados como procesos que impactan negativamente sobre las aguas de las bahías donde estas están enclavadas (Quevedo et al., 2012; Fernández et al., 2015). Durante el proceso de limpieza de los agregados de un generador de vapor de una central termoeléctrica, así como en los procesos de enfriamiento de las turbinas, se producen efluentes líquidos: efluentes cloacales, efluentes de la planta de tratamiento de agua, agua de lavado (solo en procesos de limpieza) y desagües pluviales que pueden ser acuosos y oleosos, los cuales son vertidos al mar, con o sin tratamiento previo, en una

planta de tratamiento de residuales (Rojas & Espinosa, 2015).

Dentro de los efluentes acuosos generados se encuentran: los residuales de las purgas continuas y periódicas, de las limpiezas de los ejes convectivos, de la planta de ósmosis inversa y de las limpiezas químicas a los generadores de vapor. También se encuentran los residuales oleosos de la planta y grupo electrógeno producto de las purgas de los tanques de combustible y salida de las trampas de combustible respectivamente, considerados como hidrocarburos (Fernández et al., 2015). También, pueden contener niveles considerables de grasas y aceites, hidrocarburos que tienen un alto impacto negativo sobre las zonas costeras donde están enclavadas (Santana & Rodríguez, 2017).

Estos residuales constituyen grandes riesgos de alteración de los ecosistemas acuáticos debido a su cercanía a este recurso natural. Estos riesgos pueden reducirse con un mayor control de las operaciones y aplicando criterios de Producciones Más Limpias (PML), estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios con el objetivo de incrementar la eficiencia y reducir los riesgos sobre la población humana y el ambiente, que permitan la recirculación y reutilización del agua en los procesos de generación de energía. La PML es reconocida como un método válido para mitigar los efectos negativos de las actividades industriales, incluidas las emisiones industriales, las aguas residuales y la producción de residuos (Shen et al., 2016). La PML se refiere a las estrategias de prevención integral que se utilizan en el

proceso de producción y el producto de forma continua, con el fin de reducir el riesgo de destrucción del medio ambiente y maximizar los beneficios sociales y económicos (Zhao et al., 2020). La aplicación de la PML ayuda a reducir el consumo de materiales agotables, como materiales minerales, agua y energía eléctrica, y disminuye los costos de producción. Además, la PML ejecutada en todas las etapas del proceso productivo y de fabricación contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, incluidos los residuos sólidos, las aguas residuales y los gases residuales (Nunes et al., 2019).

La evaluación de la PML en las centrales térmicas puede ayudar a los gerentes a aclarar la implementación real y optimizar las medidas relevantes. De esta manera, la competitividad de las centrales térmicas puede mejorarse de manera integral, no sólo ahorrando energía y reduciendo las emisiones, sino también reduciendo el riesgo de pasivos ambientales, lo que puede mejorar los beneficios económicos de las empresas (Ye et al., 2019).

Son varios los autores que han estudiado y aplicado metodologías relacionadas con la PML en plantas generadoras de energía (Wang et al., 2015; Yong et al., 2016; Ye et al., 2019; Zhao et al., 2020).

El principal problema ambiental se encuentra relacionado con el lavado de los CAR en el sistema aire-gas ya que esta agua residual es ácida, de color negro, y contiene cenizas, escorias y metales pesados. Debido a los altos volúmenes de agua generada, así como por su carácter agresivo, se hace necesario realizar un estudio de la

influencia de esta partida en comparación con todas las emisiones de aguas residuales del generador de vapor. Esto se debe a las deposiciones de compuestos productos de la combustión del combustible con alto contenido de cenizas que son arrastrados en los gases de combustión y se depositan en las diferentes áreas de transferencia de calor de los agregados del generador de vapor, específicamente en la zona de bajas temperaturas.

Para poder realizar tareas de minimización de estas emisiones y su posible reutilización dentro del proceso para que no provoque la contaminación del ecosistema marino, se aplican los criterios de PML. Se realizan los balances de masa en todo el sistema de agua del generador de vapor y sus agregados y se desarrollan los mapas de consumo y de residuos o desperdicios.

Por tanto, teniendo en cuenta la necesidad de reducir los impactos ambientales de las aguas residuales de los procesos de lavado, el objetivo de este trabajo es evaluar las principales emisiones del sistema de limpieza del proceso de generación de electricidad en la empresa Central Termoeléctrica “10 de Octubre” de Nuevitas, Cuba, mediante la aplicación de herramientas de la ingeniería y de PML, que permitan la propuesta de alternativas para la reducción de sus impactos ambientales.

Materiales y Métodos

Se realiza una caracterización del proceso de generación de electricidad de la Unidad 6 de 125 MW/h, teniendo en cuenta las instrucciones de operación del sistema de

aire y gases, sistema de agua de enfriamiento y de agua de mar, así como los procedimientos de lavados de los CAR, eje convectivo y lavado químico de caldera (Termoeléctrica, 2000c, 2017a; 2017b; 2017c).

Se aplican los criterios de PML y se determinan los mapas de consumo y de desperdicios de toda el agua utilizada en el proceso de limpieza. Posteriormente, se plantean propuestas de mejora al proceso que minimizan estas emisiones.

Caracterización del Proceso

El sistema de aire está compuesto por dos precalentadores de aire, dos ventiladores de

tiro forzado, dos CAR y los conductos de aire (Ver Figura 1). Cuenta con dos ventiladores recirculadores y los conductos por donde circulan los gases en su recorrido hasta la chimenea.

En el eje convectivo se encuentran situados los cuatro pasos de sobrecalentamiento de vapor (de forma horizontal) y dos pasos de recalentamiento (también de forma horizontal). Posteriormente, se encuentra el economizador y seguido a este, en el sentido de la dirección de los gases, están situados los CAR.

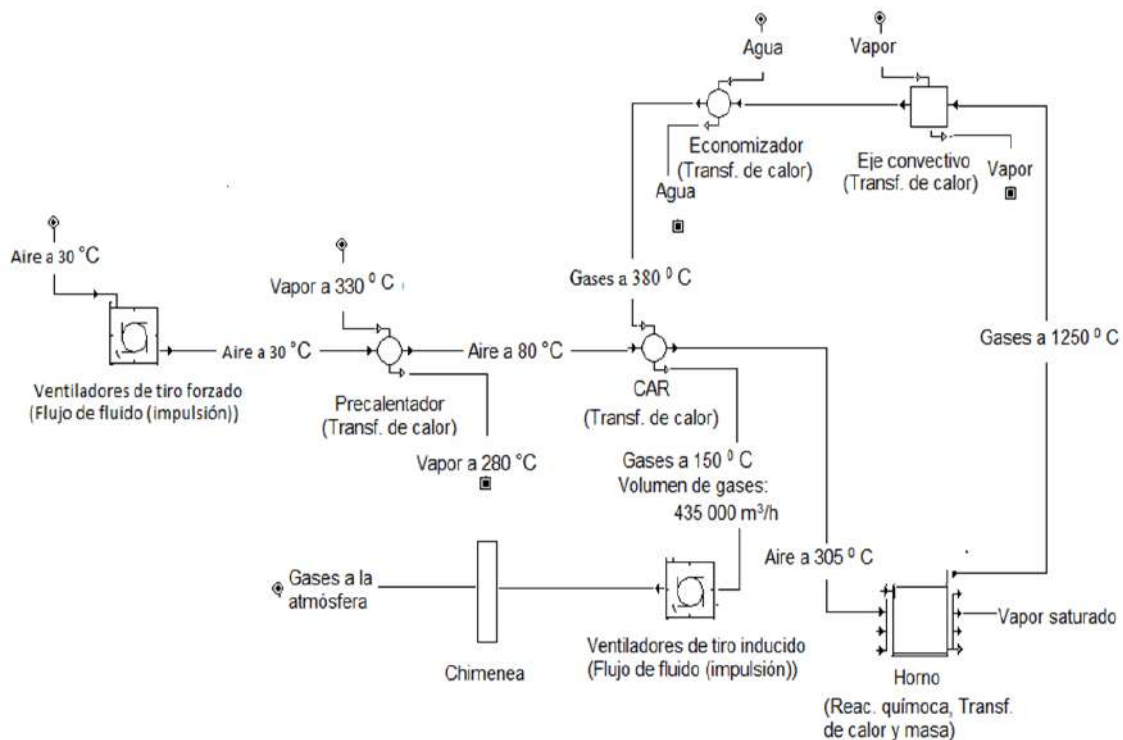


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema aire-gas

Fuente: Elaborada por los autores.

El aire es succionado de la atmósfera por los ventiladores de tiro forzado (VTF) y enviado a los precalentadores de aire, donde eleva su temperatura hasta unos 80 °C mediante el intercambio con vapor de servicio de planta. De aquí llega a los CAR y eleva su temperatura hasta 305 °C mediante el intercambio con los gases, que entran a 380 °C y salen a 150 °C. Luego de este último calentamiento, el aire es enviado a la cámara de combustión en el horno.

Los gases producto de la combustión salen del horno a una temperatura de unos 1 250 °C y circulan por las diferentes secciones intercambiando calor con el vapor en los sobrecalentadores y van disminuyendo su temperatura, para pasar a completar el calentamiento del aire entrando al economizador a 350 °C, y finalmente ceden calor al aire en los CAR, emergiendo de allí a una temperatura de unos 180 °C, para ser impulsados por los ventiladores de tiro inducido y enviados a la atmósfera a través de la chimenea.

La cantidad de aire que se suministra a la caldera se realiza siempre con un pequeño exceso de aire por encima del valor estequiométrico, el cual es verificado por analizadores de CO₂ colocados en los gases de la combustión. Estos valores se ajustan en el control de unidad.

Residuos Acuoso Generados en la Producción

Purgas continuas y periódicas

Los residuales generados por las purgas continuas y periódicas al generador de vapor

son agua que se vierten durante el proceso de operación y control del régimen químico de las unidades. Estas son aguas ligeramente alcalinas y están constituidas principalmente por sales, agentes alcalinizadores e inhibidores de la corrosión (fosfato e hidracina), por lo que su agresividad al medio ambiente no resulta de gran impacto. En los arranques de las unidades, las purgas continuas están abiertas durante 3 h con un flujo de 3 t/h y durante las horas de operación de cada unidad están abiertas a razón de 1 t/h (Datos obtenidos según reporte horario del operador de control de unidad del generador de vapor).

Residuales de limpiezas de CAR y eje convectivo

Los residuales del lavado de los CAR y del eje convectivo poseen un grado de agresividad al medio ambiente. Durante el proceso de limpieza de estas superficies el personal de operaciones químicas toma muestra de forma periódica de estas aguas residuales, controlando su color, pH y la presencia de metales, llevando su control según lo establecido en el procedimiento para el lavado de los CAR y el eje convectivo (Termoeléctrica, 2000a, 2000b).

La limpieza de los CAR se hace con un flujo 250 m³/h, lo cual es controlado por un medidor de caudal instalado en la descarga de las bombas del sistema contra incendio (Termoeléctrica, 2000a), el tiempo de duración del lavado es de 4 h con una frecuencia de nueve veces al año aproximadamente cada unidad, y el eje convectivo dos veces al año utilizando el

mismo flujo y el mismo tiempo de limpieza antes mencionado para los CAR.

Limpiezas químicas a los generadores de vapor

La limpieza química al generador de vapor es controlada por los especialistas, según lo establecido en el procedimiento para lavado químico (Termoeléctrica, 2000c) debido a la rigurosidad que requiere este proceso, y a la agresividad de los residuales generados, las características de los residuos generados varían de acuerdo con el paso o etapa que se efectúe. Estas aguas son de color negro y con un PH ácido, y presenta un gran contenido de grasa. Cuando se realiza el esquema de limpieza se realiza unos trazados de líneas provisionales para el trasiego de los residuales hacia los fosos de neutralización, así como los esquemas provisionales de recirculación y traslado de los mismos hacia los fosos de secado, por lo que estos residuales no se vierten a la bahía.

Balance de Materiales

Se realiza un balance de materiales detallado durante el proceso de limpieza química al generador de vapor, y se obtienen las corrientes que entran y salen del proceso. El procedimiento de cálculo es el siguiente.

Cálculos de los volúmenes de agua residual en el proceso

Los datos para los cálculos fueron obtenidos de las instrucciones de operación del proceso de generación de energía y los reportes diarios de operación.

- Volumen de agua residual generado durante el lavado de los CAR

La unidad cuenta con dos CAR que utilizan un flujo de agua de lavado de 250 m³/h (Termoeléctrica, 2000a) (valor medido descarga bomba contra incendio) durante 4 h (tiempo establecido según procedimiento para el lavado de los CAR) un total de nueve veces al año (Salidas de líneas en un año para efectuar el lavado). Por tanto:

$$\text{Ecuación 1} \quad V_{CAR} = F_{al} \cdot t \cdot N_{CAR} \cdot f$$

Dónde: F_{al} : flujo de agua (m³/h), t : tiempo de lavado (h), N_{CAR} : número de CARs, f : frecuencia anual de limpieza (veces/a).

- Volumen de agua residual generado durante el lavado del eje convectivo (V_{eje}):

Se realiza de forma análoga sólo que la frecuencia es dos veces al año.

- Cantidad de agua residual generado durante las purgas continuas y periódicas al generador de vapor (V_p):

Las purgas continuas se dividen en purgas de arranque y de operación. Las primeras están en el orden de 3 ton/h durante 36 h (horas correspondientes al periodo de arranque de las unidades) al año y las de operación son del orden de 1 ton/h durante 6 309 h (horas de operación anuales de la unidad) (Termoeléctrica, 2000a). El valor total de determina por:

$$\text{Ecuación 2} \quad m_p = (m_a + m_{opon})$$

Dónde: m_p : flujo másico de agua de purgas (t/a), m_a : flujo másico de agua en el arranque (t/a), m_{opon} : flujo másico de agua

en la operación (t/a). Dividiendo entre la densidad del agua (t/m³) se obtienen los flujos volumétricos.

- Volumen de agua residual generado durante la limpieza química al generador de vapor

Este proceso se desarrolla en varias etapas donde se generan diferentes volúmenes de aguas residuales:

Enjuague, prueba hidráulica y prueba térmica: $V_{ep} = 240 \text{ m}^3$

Desengrase: $V_d = 126,58 \text{ m}^3$

Enjuague de desengrase: $V_{des} = 480 \text{ m}^3$

Decapado: $V_{dec} = 138 \text{ m}^3$

Enjuague: $V_{enj} = 500 \text{ m}^3$

Monocitrato y pasivación: $V_{m,p} = 124 \text{ m}^3$

- Suma total del volumen de agua residual de la limpieza del generador de vapor.

Ecuación 3 $V_{LG} = V_{ep} + V_d + V_{des} + V_{dec} + V_{enj} + V_{m,p}$

- Volumen total de agua residual:

Ecuación 4 $V_T = V_{CAR} + V_P + V_{Eje} + V_{LG}$

- Volumen total de agua residual vertido al mar:

Ecuación 5 $V_{TR} = V_T - V_{LQ}$

Cálculo de las Pérdidas de Agua Durante el Lavado de los CAR

En la planta no existe un sistema independiente para el lavado de los CAR, por lo que se utiliza para esta actividad el sistema contra incendio el cual consta de tres bombas una de 160 m³/h (diésel), una de 60 m³/h (eléctrica) y una de 250 m³/h. Por otra parte, existen diferentes salideros que conforman un total de 47,45 m³/h. La suma de todos ellos da como resultado las pérdidas de agua durante el lavado de los CAR.

Resultados

Mediante los cálculos realizados de los balances de masa se determinaron los volúmenes de agua durante los procesos de limpieza, los que ascienden 28 025,58 m³/año. De estos, los mayores volúmenes corresponden a los CAR con un valor de 18 000 m³. La Figura 2 muestra los resultados.

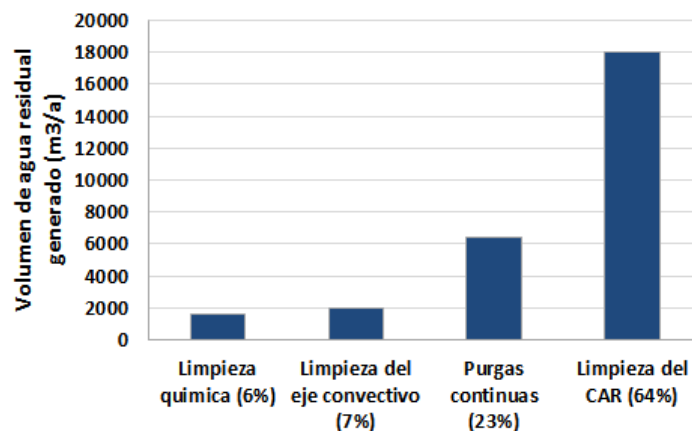


Figura 2. Volúmenes de agua residual generados en el proceso en un año

Fuente: Elaborada por los autores.

De toda esta agua residual solo es vertida al mar 26 417 ton/año, que está constituida por el proceso de lavado de los CAR, (64 %) el lavado del eje convectivo (7 %) y las purgas continuas y periódicas al generador de vapor (23 %), siendo la del lavado de los CAR la que aporta un mayor volumen (64 %), el cual representa un 83,88 % del costo de agua cruda utilizada para el lavado.

El agua de la limpieza química del generador de vapor, es enviada a los fosos de neutralización para ser tratada y no es enviada directamente al mar. Las etapas de la limpieza química son realizadas, solamente, en los mantenimientos capitales cuando son cambiadas superficies de transferencia de calor.

Los resultados muestran que las aguas de lavado de los CAR resultan las de mayor impacto sobre la bahía de Nuevitas, no solo por su alto volumen, sino por su alta carga contaminante. El control de esta etapa de lavado se realiza mediante la medición del

pH y el color del residual. Los valores de pH observados en los resultados de los análisis químicos realizados al agua de salida del lavado y plasmado en los modelos de control según lo establecido en el procedimiento de lavado (Termoeléctrica, 2000a, 2000c) en su inicio es alrededor de 2 y se va incrementando con el transcurso del lavado, tomándose como criterio de parada del mismo el que se igualen el pH del residual con el del agua cruda (que es alrededor de 7). Esto se debe a que, a medida que se desarrolla este proceso, las suciedades, conformadas por un grupo importante de óxidos metálicos, cenizas de la combustión que son arrastradas, entre otros, se van eliminando y el pH comienza a aumentar hasta llegar a niveles similares o iguales al del agua introducida al sistema. Esto tiene como inconveniente que el pH del agua cruda no es igual en todas las centrales eléctricas, oscilando entre 6,8 y 8, por lo que si el pH es de 8 se tiene que emplear más agua para el lavado y el volumen residual es mayor.

En cuanto al color, al igual que el pH los valores anotados en la hoja de control describen que al inicio el residual sale completamente negro y a medida que van pasando las horas de lavado se va aclarando llegando a ser similar al agua utilizada en el

lavado. Este control es realizado de manera visual (Termoeléctrica, 2000a, 2000b).

El resultado de los balances de materiales durante el lavado químico al generador de vapor se presenta en la Figura 3.

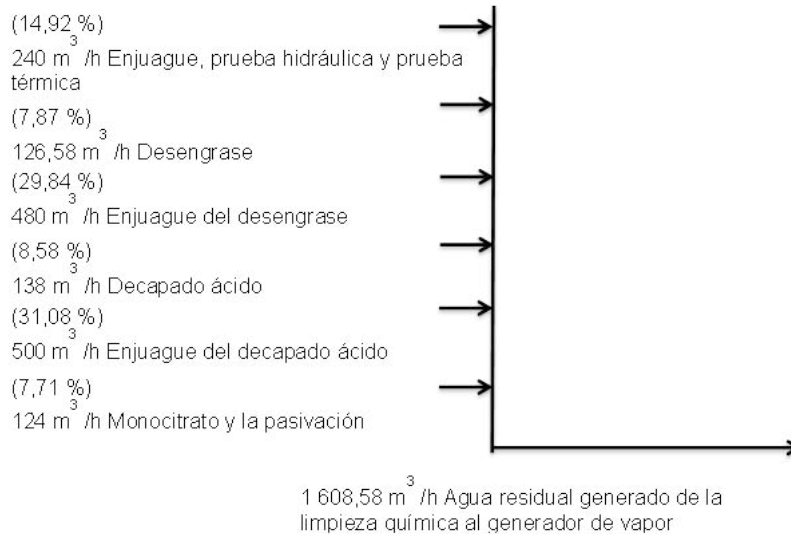


Figura 3. Mapa de desperdicios del agua durante la realización de la limpieza química al generador de vapor.

Fuente: Elaborada por los autores.

En este proceso son utilizados diferentes compuestos químicos altamente agresivos. En esta figura se aprecia que los residuales de agua son generados en diferentes etapas de proceso siendo las mayores en los dos enjuagues previstos, los de agua de engrase y las de lavado después del decapado ácido, con 480 m³/h para un 29,84 % en el agua de engrase y en el enjuague del decapado ácido con 500 m³/h, 31,08 %. Los menores niveles corresponden a los procesos de desengrase y monocitrato y pasivación (Ver Figura 3).

La Figura 4 muestra los resultados del mapa de consumo del agua desmineralizada y sus diferentes usos.

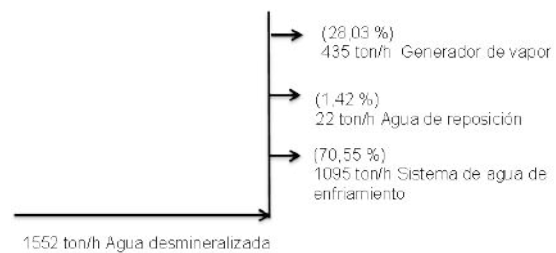


Figura 4. Mapa de consumo del agua desmineralizada

Fuente: Elaborado por los autores.

El agua desmineralizada se le suministra a las calderas desde la planta de tratamiento químico, donde se almacena en tres tanques de 1 000 m³ cada uno. Esta agua tiene un costo adicional ya que requiere dureza nula para evitar las peligrosas incrustaciones en los generadores que son dadas por la presencia de dureza y la alta presión de trabajo. En esta figura se aprecia que los mayores consumos son para el agua de enfriamiento, seguido del consumo del generador de vapor. Debido a las pérdidas del sistema, se hace necesario la inyección de 22 ton/h extras para poder

mantener en correcta explotación estos sistemas de enfriamiento, lo que indica un sobre consumo adicional de este recurso. En la Figura 5 se encuentran los diferentes consumidores de este sistema de agua de enfriamiento. Los mayores consumidores son el agua para el enfriamiento del aceite de lubricación de la turbina (45,56 %), el agua para el enfriamiento del hidrógeno del generador (34,70 %) y el agua del sistema de enfriamiento del sistema de alimentación (10,96 %).

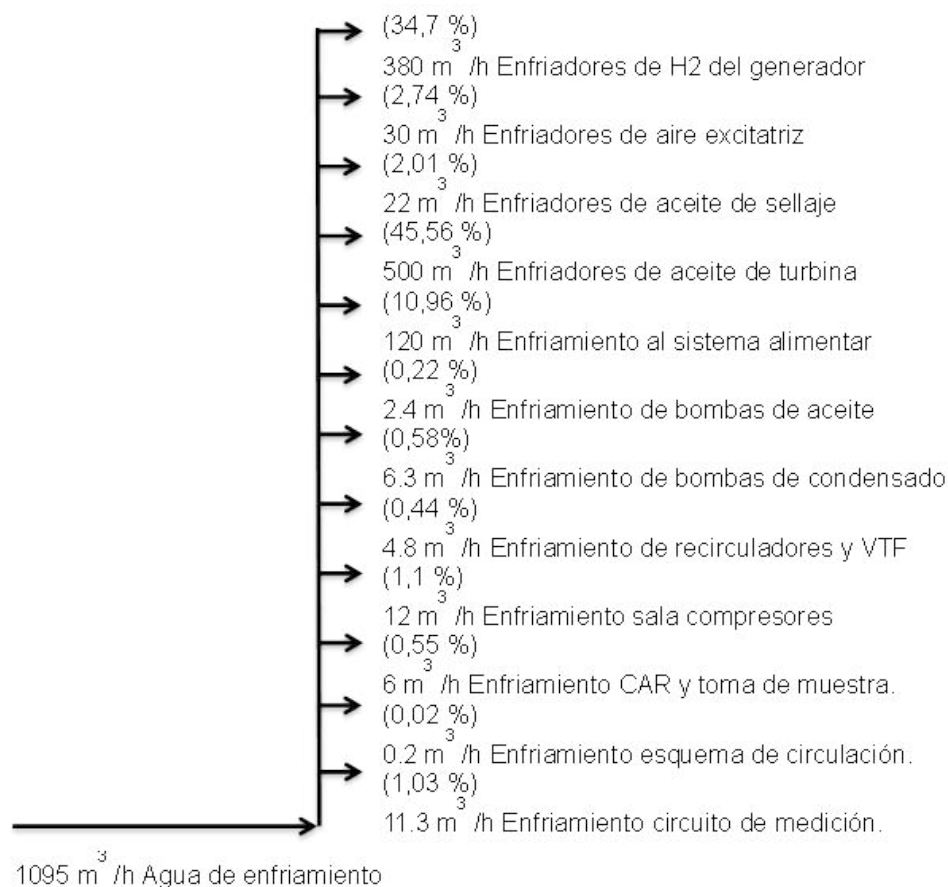


Figura 5. Consumo de agua de enfriamiento

Fuente: Elaborada por los autores.

En el caso de la Figura 6 se observa a los dos consumidores de agua de mar. En la misma se aprecia que esta agua es utilizada en los procesos de enfriamiento siendo el principal consumidor los sistemas de condensado de vapor, este sistema utiliza el agua de mar para condensar el vapor de escape de la turbina y ser utilizada nuevamente en el proceso de generación

de electricidad. Los sistemas de agua de mar son diseñados con aceros inoxidable o materiales resistentes a la corrosión por el agua de mar. Esta agua entra a temperatura ambiente, intercambia calor con el vapor que condensa para su reutilización en el generador de vapor y sale de la planta a altas temperaturas, constituyendo una fuente de contaminación térmica.

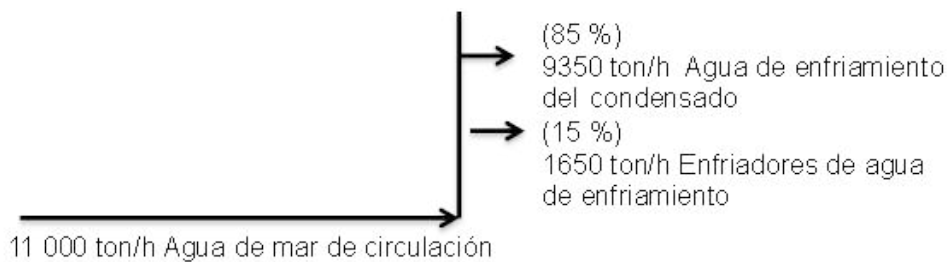


Figura 6. Mapa de consumo de agua de mar

Fuente: Elaborado por los autores.

Las Figuras 7 y 8 muestran los principales consumidores de agua desmineralizada y agua cruda respectivamente en este

proceso de limpieza, que en conjunto con las soluciones constituyen el volumen de agua residual generado.

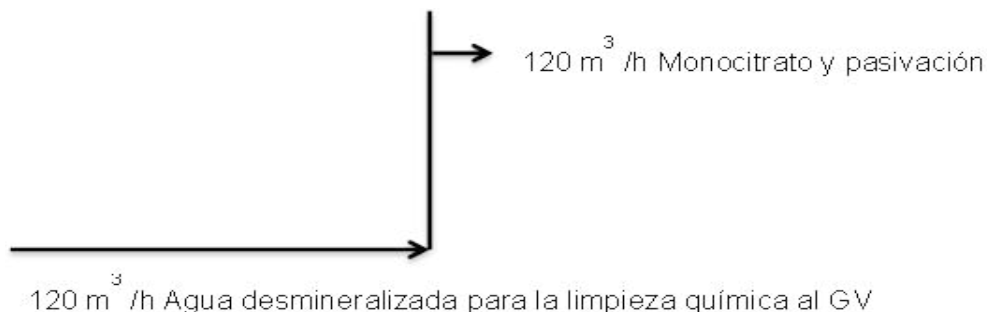


Figura 7. Consumo de agua desmineralizada en el proceso de limpieza química del generador de vapor

Fuente: Elaborada por los autores.

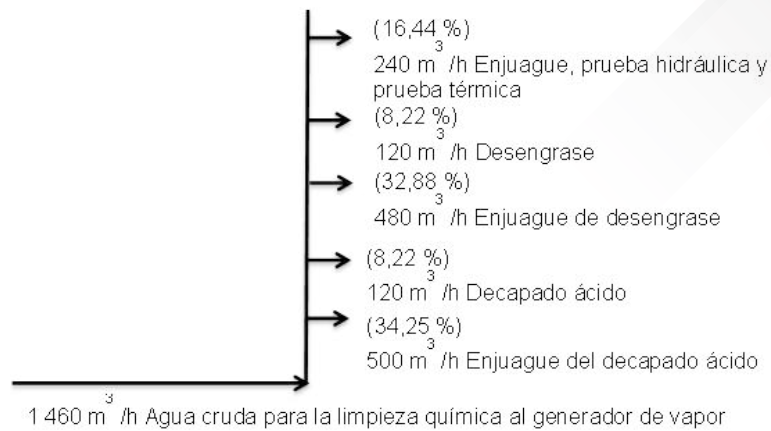


Figura 8. Consumo de agua cruda en el proceso de limpieza química del generador de vapor

Fuente: Elaborada por los autores.

El consumo total de agua cruda en los procesos está representado por los procesos de lavado de los CAR, el eje convectivo y las siete primeras etapas del proceso de limpieza química del generador de vapor, como se muestra en la Figura 9.

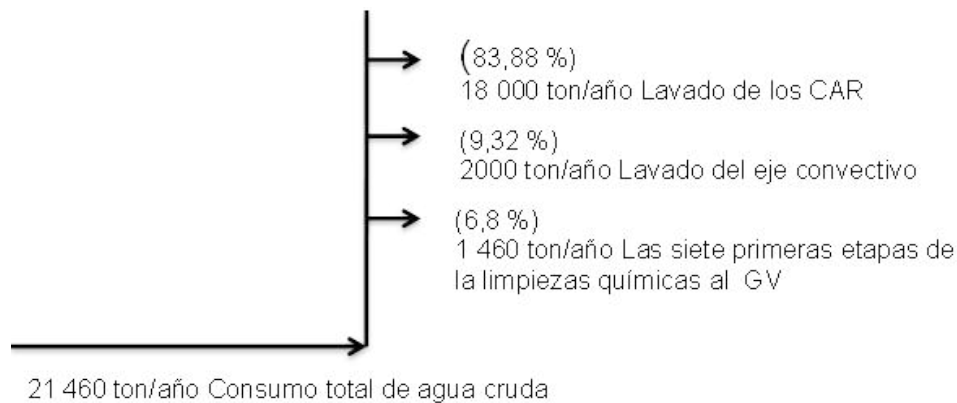


Figura 9. Consumo total de agua cruda

Fuente: Elaborada por los autores.

El volumen total de agua residual generado al año por los diferentes procesos de lavado y limpieza se manifiestan en la Figura 10. No toda esta agua residual es vertida al mar, ya que las aguas residuales del lavado químico al generador de vapor se vierten en los fosos de neutralización y luego a los fosos de secado.

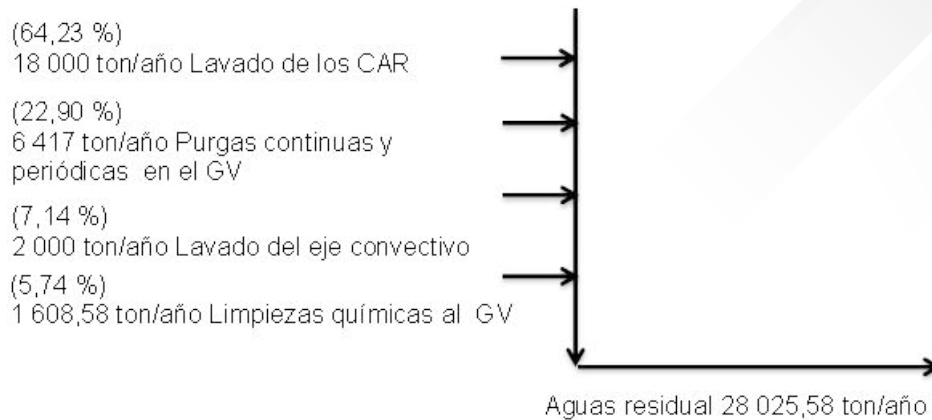


Figura 10. Volumen total de agua residual

Fuente: Elaborada por los autores.

Los principales residuales acuosos generados se obtienen producto de los procesos de limpieza de los CAR, el eje convectivo y las limpiezas químicas al generador de vapor y las purgas continuas y periódicas. Con excepción de las aguas residuales producidas durante las limpiezas químicas, las cuales se vierten a los fosos de neutralización y de secado, las otras son vertidas a la bahía, provocando la contaminación del mismo, por lo que constituye un problema ambiental.

Se determina que las aguas de lavado de los CAR y las aguas de las purgas continuas y periódicas representan más del 80 % del problema ambiental de la entidad, al obtenerse el mayor volumen de agua residual. Los residuales del lavado de los CAR y del eje convectivo poseen un grado de agresividad al medio ambiente similar, y el volumen total generado entre ambos es de 20 000 m³/año, correspondiendo el 90 % de este a los CAR.

Propuesta de Mejora Aplicando PML

De forma general, se aprecia que los volúmenes de agua consumidos en las diferentes etapas y procesos en la generación de electricidad en una unidad de 125 MW son muy altos. Con el objetivo de minimizar el impacto que tienen las aguas residuales vertidas a la bahía se proponen dos alternativas de solución a partir de la aplicación de las PML.

Como las aguas de las purgas del generador de vapor y de lavado de los CAR, constituyen más del 80 % del volumen de agua residual, y siendo las características de esta última similar a la del eje convectivo en el grado de agresividad al medio ambiente, es conveniente la reutilización de uno de estos residuales para así disminuir la contaminación a la bahía. Por lo tanto, se proponen como alternativas de solución mediante la aplicación de PML:

1. Recolectar las aguas procedentes de las purgas continuas y periódicas en depósitos: Esto permitiría la reutilización de estas aguas para el lavado de los CAR.
2. Independizar el sistema de lavado de los CAR y el eje convectivo: Se lograría contar con dos sistemas de lavados independiente, el sistema de lavado de los CAR utilizaría el agua procedente de las purgas, el sistema de lavado del eje convectivo se mantendría por el sistema contra incendio con el agua cruda, con esta variante se logra disminuir el consumo de agua cruda en 6 417 ton/año, correspondiente al agua recuperada de las purgas continuas y periódicas.
3. Utilizar el agua de las purgas continuas y periódicas en el lavado de los CAR: Estas aguas tienen un pH entre de 8 y 9 y, actualmente, se vierten al mar. Por tanto, su reutilización en el lavado de los CAR ayudaría a neutralizar el carácter ácido del agua residual de los CAR, acortando el tiempo de lavado de 4 a 3 horas, disminuyendo el volumen de agua residual de 18 000 a 13 500 ton/año, dejándose de verter al mar 4 500 ton/año, disminuyendo el impacto al medio ambiente y los costos de la central termoeléctrica.

El efecto ambiental obtenido por la reutilización de las aguas de las purgas se puede mejorar, restableciendo el trabajo de los fosos de neutralización existentes en la central, los cuales permitirían el tratamiento de las aguas residuales de los procesos de lavado antes de ser enviadas al mar.

Estas tres alternativas de soluciones propuestas, parten de la reutilización del agua de las purgas del generador de vapor agua que presentan una alcalinidad mucho mayor al agua cruda y contribuye a la limpieza y neutralización de la acidez de los residuales del lavado del CAR.

En la central existe otra propuesta para el lavado de los CAR la cual propone un sistema de almacenamiento y preparación del agua cruda, la cual debe de tener un pH entre 10 y 12 y una temperatura de 80 °C, las desventajas de esta propuesta consisten en la utilización de productos químicos adicionales para lograr un pH del agua cruda con estos valores, además es necesario una fuente de calor para el calentamiento del agua y el aislamiento térmico del recipiente de almacenamiento.

Con la propuesta desarrollada en este trabajo los productos químicos son los utilizados en el proceso de generación de vapor y el agua residual del proceso, esto hace más económico y factible su implementación.

Los ahorros generados al año por la reutilización del agua residual generada durante las purgas continuas y periódicas al generador de vapor para los procesos de lavado y limpieza ascienden a 6 417 m³/año de agua cruda procedente de fuentes naturales que se dejarían de utilizar.

Análisis Económico

Para la determinación del efecto económico de la reutilización del agua residual de las purgas continuas y periódicas por concepto de reducción del consumo de

agua cruda, se parte del costo de esta, que asciende a USD \$ 1,55/m³. Con este precio, multiplicado por los consumos individuales en cada etapa y área del proceso, se obtienen

los costos invertidos en la compra de agua dulce. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Costo total de agua cruda

Partidas del costo del agua cruda utilizada en el lavado del generador de vapor y sus agregados	Costo (USD \$/a)
Costo de agua cruda en el lavado de los CAR	27 900
Costo de agua cruda en el eje convectivo	3 100
Costo de agua cruda en los lavados químicos al generador de vapor	2 263
Costo total del agua cruda	33 263

Fuente: Elaborada por los autores.

Los ahorros obtenidos al año por la reutilización de agua residual generada durante las purgas continuas y periódicas al generador de vapor para los procesos de lavado y limpieza, se determinan multiplicando el valor de estas purgas (6 417 m³/a) por el costo del agua, lo cual asciende a \$ USD 9 946/a. Por tanto, la diferencia entre el valor total de agua cruda y el agua cruda ahorrada estaría en el orden de los 15 043 m³/a, lo que reduciría el costo del agua hasta USD \$ 20 308/a.

La propuesta de reutilizar el agua de las purgas continuas y periódicas del generador de vapor, como agua de lavado de los CAR, permitirá a la termoeléctrica reducir considerablemente el consumo de agua cruda procedente de fuentes naturales que entra a la entidad, así como reducir las emisiones de esta agua de purga a la bahía. De esta forma se logra un doble efecto ambiental: por una parte, se reduce el consumo de

esta agua cruda que proviene de las fuentes de suministro del municipio, pudiéndose utilizar la misma en el consumo humano, y se reducen los impactos negativos al poder neutralizarse en el proceso de lavado.

Discusión

La reutilización del agua procedentes de las extracciones continuas y periódicas para el lavado de los CAR y eje convectivo tiene un efecto positivo sobre el consumo de agua de la CTE, y por lo tanto un efecto económico directo al disminuir su consumo, no obstante estos beneficios se continúa trabajando en la recuperación de los fosos de neutralización lo que permitirá el tratamiento de las aguas residuales de los lavados antes de ser enviada al mar, y con esto se estaría contribuyendo al cuidado y conservación del ecosistema marino.

Conclusiones

Los principales volúmenes de agua residual contaminada son generados en el lavado del eje convectivo, las purgas continuas y periódicas al generador de vapor y en los procesos de limpieza de los CAR, constituyendo estos últimos los de mayor impacto, tanto por su composición como por su volumen.

Los consumos de agua desmineralizada constituyen un consumo significativo en el proceso. Aunque trabajen a ciclo cerrado, las pérdidas en el proceso exigen de reponer unas 22 t/h que deben extraerse de la naturaleza.

En cuanto a los consumos de agua de mar, alrededor de las 11 000 t/h, traen un impacto negativo sobre la vida acuática, ya que salen a altas temperaturas provocando contaminación térmica (Termoeléctrica, 2017c).

La propuesta de reutilización de las purgas en el agua de limpieza de los CAR permitirá un importante ahorro del recurso agua, así como un impacto económico y medioambiental positivo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Central Termoeléctrica “10 de Octubre” de Nuevitas, Cuba, por todo el apoyo e interés para la realización del trabajo.

Referencias

Bolognesi, T., Gerlak, A. K., & Giuliani, G. (2018). Explaining and Measuring

Social-Ecological Pathways: The Case of Global Changes and Water Security. *Sustainability*, 10(12), 4378. <https://doi.org/10.3390/su10124378>

Colla, V., Matino, I., Branca, T. A., Fornai, B., Romaniello, L., & Rosito, F. (2017). Efficient Use of Water Resources in the Steel Industry. *Water*, 9(11), 874. <https://doi.org/10.3390/w9110874>

Fan, M., Xu, J., Chen, Y., Li, D., & Tian, S. (2020). How to Sustainably Use Water Resources—A Case Study for Decision Support on the Water Utilization of Xinjiang, China. *Water*, 12(12), 3564. <https://doi.org/10.3390/w12123564>

Fernández, M.A., Rodríguez, L.D., García, I., Santana, M.A., & Córdova, V. (2015). Comportamiento de la contaminación orgánica de la bahía de Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, 1(1), 29-42.

Liu, H., Ren, L., Zhuo, H., & Fu, S. (2019). Water Footprint and Water Pinch Analysis in Ethanol Industrial Production for Water Management. *Water*, 11(3), 518. <https://doi.org/10.3390/w11030518>

Miglietta, P. P., Morrone, D., & Leo, F. D. (2018). The Water Footprint Assessment of Electricity Production: An Overview of the Economic-Water-Energy Nexus in Italy. *Sustainability*, 10(1), 228. <https://doi.org/10.3390/su10010228>

Nunes, J. R. R., Silva, J. E. A. R. d., Moris, V. A. d. S., & Giannetti, B. F. (2019). Cleaner Production in small companies: Proposal of a management methodology. *Journal of Cleaner*

- Production*, 218, 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.219>
- Ocampo, S. C., & Pérez, A. J. (2017). Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: implicaciones en el contexto colombiano. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(1), 135-164. <https://doi.org/10.18359/rcin.2549>
- Quevedo, O., Gómez, J., Ramírez, C., Estrada, T., Moreno, C., Mendiguchía, C., Villanueva, M. E., & Pomares, M.S. (2012). Estudio de la contaminación por metales en sedimentos acuáticos de la bahía de Matanzas. *Química Nova*, 35(5), 924-931. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170053>
- Rojas, M., & Espinosa, C. (2015). Contaminantes químicos en agua y aire en Venezuela (2006-2013). *Salus*, 19(2), 44-52.
- Rodríguez, D., & Santana, M. A. (2017). Evaluación de la contaminación por grasas y aceites en balnearios de la bahía de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 37(2), 339-348.
- Saidan, M. N., Al-Addous, M., Al-Weshah, R. A., Obada, I., Alkasrawi, M., & Barbana, N. (2020). Wastewater Reclamation in Major Jordanian Industries: A Viable Component of a Circular Economy. *Water*, 12(5), 1276. <https://doi.org/10.3390/w12051276>
- Shen, W., Liu, Y., Yan, B., Wang, J., He, P., Zhou, C., Huo, X., Zhang, W., Xu, G., & Ding, Q. (2017). Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 618-628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.033>
- Termoeléctrica, (2000a) GO-PR – 4404. Procedimiento de lavado de los CAR. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Termoeléctrica, (2000b) GO-PD – 2309.A2. Modelo de control lavado de los CAR. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Termoeléctrica, (2000c) GO-PR – 4403. Procedimiento lavado químico caldera. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Termoeléctrica, (2017a) TDPE 0503. Instrucción de operación Sistema aire y gases generador de vapor. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Termoeléctrica, (2017b) TDPE 0519. Instrucción de operación Sistema agua de enfriamiento. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Termoeléctrica, (2017c) TDPE 0522. Instrucción de operación Sistema agua de mar. Nuevitas, Cuba: Termoeléctrica “10 de Octubre”.
- Wang, H., Xu, J., Wang, D., Zhang, T., & Liu, Y. (2015). Cleaner Production Based on Sustainable Development in Chinese Power Plants. *Environmental Engineering Science*, 32(6). <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0042>

- Ye, M., Sun, J., & Huang, S. (2019). Comprehensive evaluation of cleaner production in thermal power plants based on an improved least squares support vector machine model. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 559-565. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.344>
- Yong, J. Y., Klemeš, J. J., Varbanov, P. S., & Huisingh, D. (2016). Cleaner energy for cleaner production: modelling, simulation, optimization and waste management. *Journal of Cleaner Production*, 111, Part A, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.062>
- Zhao, X., Peng, B., Elahi, E., Zheng, C., & Wan, A. (2020). Optimization of Chinese coal-fired power plants for cleaner production using Bayesian network. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122837>