

## **ESTABLECIENDO UN MÉTODO PARA AHORRAR ENERGÍA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE DATOS**

ADRIANO ARAUJO CARVALHO <sup>(1)</sup>; ARTURO ALATRISTA CORRALES <sup>(2)</sup>  
TRESKO Engenharia e Gestão, Rio de Janeiro/RJ, Brasil <sup>(1)</sup> CEEP, Arequipa, Perú <sup>(2)</sup>  
adriano.carvalho@treskoeng.com <sup>(1)</sup>; arturo.alatrista@eficienciaenergetica.com.pe <sup>(2)</sup>

### **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo establecer una metodología para ahorrar energía considerando las actividades necesarias – desde la ingeniería hasta el análisis de datos de la operación – que permitan identificar e entender el consumo energético de una planta de tratamiento de aguas residuales y, a través del análisis de estos datos, generar *insights* para reducir el consumo energético.

### **Introducción**

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Taboada es una de las mayores de su tipo en Sudamérica. Bajo su demanda nominal, procesa cerca de 14m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, número correspondiente a casi 70% del producido por Lima y Callao, la mayor región metropolitana del Perú. La planta tiene el objetivo de eliminar sólidos de tal manera que el agua residual puro no sea vertido en el ambiente natural, en este caso, el Océano Pacífico, uno de los más ricos ambientes naturales del mundo. El producto final de la planta, agua tratada, para ser vertido en este local después de pasar por todo el proceso de tratamiento, debe ser aprobado según criterios restrictos. Los parámetros son definidos en la Ley General de Aguas, la cual describe los análisis de laboratorios y los resultados aceptables. Caso aprobados, se permite que el agua debidamente tratado sea despedido en el Océano. Caso no sean

cumplidos los estándares, pesadas multas pueden ser aplicadas.

El proceso de tratamiento de la PTAR Taboada es básicamente mecánico. De acuerdo a Memoria Descriptiva de la Planta, la misma posee un sistema de tratamiento integrado que remueve sólidos de hasta pocos milímetros de diámetro incluyendo sedimentos sólidos y grasas, de tal forma que solamente sustancias coloidales, fácilmente asimiladas por el ambiente marino, son descargadas en el mar. El proceso empieza con el agua residual siendo bombeada hacia un nivel más alto, ganando energía potencial. Entonces, el agua pasa por un filtro de 6mm y luego por un proceso de remoción de grasa a través de aeradores. El agua es enviada a un canal en donde nuevamente es elevada para que pueda pasar por filtros de 1mm. El producto final, entonces, está listo para ser enviado a través de un emisario submarino, cuya salida está a 3900m de distancia de la costa. Las bombas accionadas por motores eléctricos, sean en baja tensión o media tensión, son alimentadas por dos subestaciones, cuya carga instalada es de 8MW y el total de agua procesada es de aproximadamente 29 000 000 m<sup>3</sup> mensuales.

En este contexto, el objetivo del estudio presentado en este artículo es la reducción de costos y energía eléctrica, considerando que el parámetro “disponibilidad de operación” debe ser el más alto posible, debido a la importancia de la planta para la capital peruana y por esta motivación, no se considera el reemplazo de equipos para minimizar el consumo de energía, ya que esto significaría reducción de la disponibilidad.

Para lograr los resultados que serán mostrados adelante, el equipo de ingeniería involucrado en el proyecto utilizó el formato de la [2] ISO 50002 para realizar auditoría energética con foco en implementar un Sistema de Gestión Energética (SGE) basada en la [1] ISO 50001. Con estos conceptos y base sólida en ingeniería de procesos, instrumentación e eléctrica, una línea de base energética fue creada para el proceso, así como un indicador de desempeño energético (IDE) asociado a cada turno y proceso.

Para desarrollar esta línea de base y los IDEs, los datos han sido extraídos, como indicados anteriormente, de redes de datos independientes. De la primera red, de instrumentación, fueron sacados datos de caudal de entrada y salida de cada proceso en un determinado rango de tiempo. De la segunda red, de energía eléctrica, fueron sacados datos de consumo de energía y demanda en acuerdo al conjunto de cargas eléctricas de cada proceso. Del análisis de esta data, del proceso y de la filosofía de alimentación de las cargas, ha sido posible encontrar oportunidades ocultas para mejora del desempeño energético.

Finalmente, como conclusión del estudio, este artículo presenta la metodología utilizada en este estudio de caso para que pueda ser utilizada en otras industrias. Presenta, también, sus resultados como una motivación para que estrategias similares sean implementadas en otras PTAR.

## **Objetivo**

El objetivo de este artículo es presentar la metodología y los resultados obtenidos a través de la aplicación de la ISO 50002 e ISO 50001 en una PTAR en Callao, área metropolitana de Lima, Perú.

La intención es mostrar, a través de un caso real, la metodología utilizada para que pueda ser aplicada en otras PTAR, considerándose la existencia de instrumentación adecuada que, por su vez, entregarán data relevante para ser analizada bajo las anteriormente mencionadas

normas, además de análisis estadísticos y computacionales.

## **Métodos**

La norma ISO 50001 tiene como objetivo establecer un Sistema de Gestión Energética (SGE), que establezca un plan para entender quién consume, cómo consume y cuándo consume energía. Este es el primer paso para reducir el consumo energético. La forma con que esta reducción ocurrirá puede ser realizada de distintas formas, sin embargo, cuando hecho a través del análisis de datos, análisis estadístico y computacional, asociado a cambios operacionales, en oposición al cambio directo de equipos, los resultados suelen ser más contundentes debido a la baja inversión de capital. Obviamente, dependiendo del contexto de la planta – disponibilidad, ciclo de vida de las máquinas y presupuesto de inversión – unas acciones pueden ser más adecuadas que otras. Conocer este contexto puede ser vital para definir la estrategia correcta y, así, obtener los resultados deseados.

En este sentido, debido a su importancia en la operación de la ciudad – recordemos que la PTAR procesa un 70% del agua vertida en el sistema de alcantarillado de Lima y Callao – la PTAR Taboada es, prácticamente, prohibida de parar. Debido a las devastadoras consecuencias para la naturaleza en caso de paro del sistema, la sustitución de equipos no es una opción aceptable. Por esta razón, una premisa para la implementación de las acciones de ahorro energético es que estas deben involucrar, solamente, cambios en el proceso y operación. Estos cambios abarcan distintas acciones y van desde la identificación de mejores prácticas de operación, comportamiento orientado al ahorro hasta la creación de cultura para el cumplimiento de metas.

El primer paso, en el camino hacia la certificación del SGE, fue la identificación de la instrumentación existente en la planta. Con datos accesibles, ha sido posible establecer, IDEs

generales y específicos para cada proceso, así como líneas de base energéticas y de procesos, que permitieron, cuando cruzadas entre sí, identificar oportunidades ocultas de mejora y ahorro.

Los siguientes IDEs fueron considerados durante el estudio:

- Consumo de energía total por hora
- Consumo de energía por proceso por hora
- Caudal de ingreso total por hora
- Caudal de salida total por hora
- Caudal de ingreso por proceso por hora
- Caudal de salida por proceso por hora

Utilizando las consideraciones descriptas en [4] CARVALHO et al. (2016) para definir los IDEs, se ha seleccionado el IDE kWh/m<sup>3</sup> de agua procesada, es decir, agua bombeada a través del emisario como indicador principal, ya que el objetivo de la PTAR es procesar agua bruta y enviar agua tratada en buenas condiciones en el océano. De la misma forma, para cada uno de los procesos que componen la planta – elevación, filtros de 6mm, aeradores, filtros de 1mm – fue calculado un indicador similar, es decir, una razón en donde la parte inferior es dado por el caudal de salida y el numerador es dado por el consumo de energía, para caracterizar el consumo energético.

Una vez que el equipo tuvo acceso a la data, fue posible aplicar técnicas de *data mining* y estadística, tales como *clustering* y regresión. La primera fue utilizada para identificar en que forma la variación de salida de agua, en cada proceso, cambia de acuerdo con el consumo de energía. La última, para identificar como una variable debe comportarse de acuerdo a otra variable y, en este sentido, identificar desviaciones entre valores reales y valores esperados. Para facilitar el entendimiento, fueron creados gráficos que representaban los resultados de estos análisis, presentados en el apartado de Resultados.

Con base en estos estudios, conociendo cada proceso y sus restricciones, ha sido posible identificar, con facilidad, que la relación entre el

consumo de energía y el agua procesado era incongruente, representando un potencial de ahorro

En resumen, la metodología puede ser dividida en los siguientes pasos:

- 1 - Entendimiento del contexto del negocio.
- 2 - Entendimiento del objetivo del negocio.
- 3 - Entendimiento del valor de la energía en la operación.
- 4 – Evaluación de la instrumentación disponible.
- 5 – Evaluación del acceso a los datos.
- 6 - Identificación y entendimiento del proceso.
- 7 – Identificación de las cargas eléctricas y tableros eléctricos.
- 8 – Cruzamiento de datos y evaluación estadística de datos de proceso y energía.
- 9 – Proposición de cambios.
- 10 – Involucramiento de personas.

## Resultados

Esta sección presenta, además de los resultados, respuestas para cada uno de los nueve pasos considerados en la aplicación del SGE en la PTAR Taboada. Para cada caso, se recomienda contestar de forma análoga y contextual.

- 1 - Entendimiento del contexto del negocio → Para ahorrar energía, la PTAR Taboada, por sus restricciones operacionales, no puede aplicar de forma inmediata cambios de equipos, siendo posible aplicar cambios operacionales.
- 2 - Entendimiento del objetivo del negocio → El objetivo de la PTAR es procesar agua bruta, removiendo partículas sólidas de tal forma que el agua pueda ser enviada al ambiente marino. Por esta razón, el IDE kWh/m<sup>3</sup> de salida ha sido seleccionado como el indicador primario.

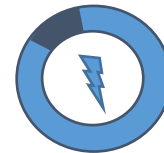
- 3 - Entendimiento del valor de la energía en la operación → Energía eléctrica representa la principal utilidad consumida en la planta. La electricidad es utilizada en todos los principales procesos de elevación, filtraje, aerado y bombeo y representa los mayores costos operacionales.
- 4 - Evaluación de la instrumentación disponible → PTAR Taboada es muy bien instrumentada y adecuada para la implementación de un SGE. Medidores de caudal, transformadores de corriente y tensión, multimedidores eléctricos estaban disponibles para obtención de data. Además, las cargas de proceso estaban separadas por circuitos, permitiendo fácil correspondencia entre las variables de procesos y las variables eléctricas.
- 5 - Evaluación del acceso a los datos → Data disponible a través de un sistema de supervisión, con datos extraídos en acuerdo a los requerimientos del SGE.
- 6 - Identificación y entendimiento del proceso → Expertos en la operación de la planta fueron entrevistados y la documentación de ingeniería de la planta fue estudiada para identificar y entender el proceso y su relación con las principales variables energéticas y de proceso.
- 7 - Identificación de las cargas eléctricas y tableros eléctricos → Principales cargas eléctricas fueron identificadas en los tableros, así como los multimedidores.
- 8 - Cruzamiento de datos y evaluación estadística de datos de proceso y energía → Datos correspondientes a los ciclos de operación fueron cruzados y separados en *clusters* para evaluar sus relaciones estadísticas.
- 9 - Proposición de cambios → Fueron propuestos cambios operacionales con foco en reducir el consumo energético, demanda e IDE, con base en las informaciones accesibles vía instrumentación.
- 10 – Involucramiento de personas → El equipo ha sido entrenado en conceptos básicos y avanzados de gestión energética,

permitiendo cumplir y superar las metas de ahorro.



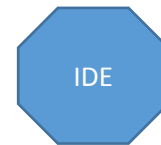
-35% (PEN)

Reducción de costos con compra de electricidad



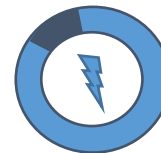
-20.3% (kW)

Reducción de pico de demanda eléctrica



-5.3% (kWh/m<sup>3</sup>)

Reducción de IDE



-5.8% (kWh)

Reducción de energía eléctrica

Figura 1 – Resultados obtenidos con la implementación del SGE en la PTAR Taboada, después de 6 meses (desarrollado por los autores)

## Discusión

De acuerdo a la figura 1, es posible afirmar que los resultados fueron excelentes, tanto desde la

mirada financiera cuanto desde la mirada energética. Los resultados financieros fueron obtenidos utilizando dos estrategias: primero, a través de la renegociación del contrato con la concesionaria, segundo con la reducción del uso de energía y los picos de demanda en horas punta. Es importante mencionar que además de la reducción en los horarios específicos, la energía específica ha sido reducida en 5,3%.

Para ejemplificar el proceso de análisis de data en la práctica, será presentado el caso de los aeradores. Ha sido observado que el consumo de energía posee alta correlación con el caudal de salida, así como en diversos otros procesos. Por otro lado, en el caso de los aeradores, la correlación entre el consumo energético y el caudal era casi nulo, como enseñado en la figuras abajo:

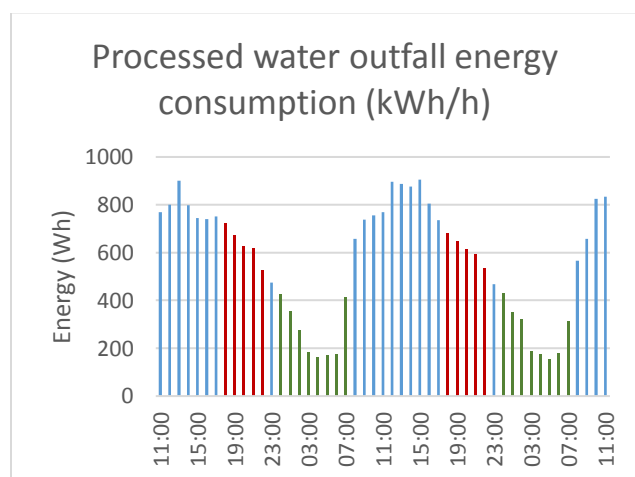


Gráfico 1 – Energía (kWh/h) consumida de 3 a 5/11/17 por las bombas del emisario submarino durante la auditoría energética realizada para implementar la un SGE (desarrollado por los autores)

De acuerdo al gráfico 1, uno puede entender que el consumo energético varía de acuerdo al caudal de salida, el cual posee su pico diario alrededor de las 11AM, ya que más agua entra en la PTAR. La correlación estadística entre el caudal de salida y el consumo energético total ha sido calculada y como el valor se acerca a la unidad, se concluye que muy poco podría hacerse para mejorar la performance de este proceso.

Por otro lado, la correlación estadística entre el caudal de salida en el emisario y el consumo energético en el proceso de aeración se acerca al cero, es decir, estadísticamente, la variación en una de las variables explica muy poco la variación en la otra. El gráfico 2 ilustra:

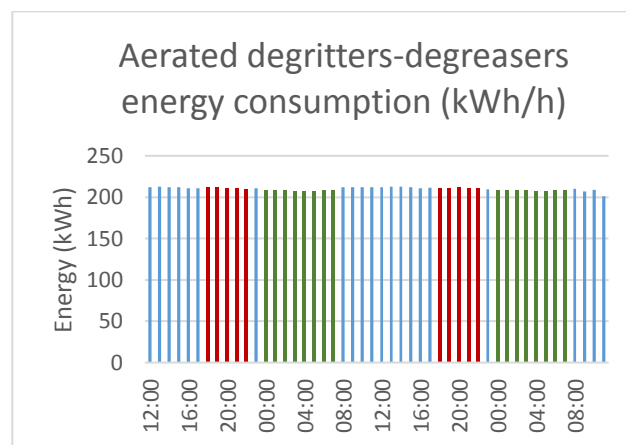


Gráfico 2 – Energía (kWh/h) consumida de 3 a 5/11/17 por las bombas del aerador durante la auditoría energética realizada para implementar la un SGE (desarrollado por los autores)

Intuitivamente, considerando el gráfico 2, uno podría esperar que la energía utilizada para mover los compresores que insertan aire en el proceso de aeración debería modular de acuerdo a la salida de agua, lo que significa, en otras palabras, que también depende del caudal de entrada, como en los demás procesos. Sin embargo, mantiene un valor constante, lo que significa que hay oportunidades de ahorro que deben ser exploradas, considerando la posibilidad de mejorar la correlación entre las variables y modular su comportamiento, disminuyendo el pico de demanda y el consumo de energía eléctrica.

Esta misma estrategia ha sido implementada en diversas ocasiones durante este proyecto, llevando a los resultados presentados anteriormente.

## Conclusión

La aplicación de la mencionada metodología por el equipo de ingeniería ha permitido identificar, entre las diversas oportunidades encontradas para ahorrar energía, aquellas que encajaban con los objetivos de la empresa y sus restricciones.

Utilizando el abordaje estructurado presentado en la sección de metodología, fue posible identificar, claramente, las oportunidades de ahorro. Conforme explicación, una de las primeras acciones a ser realizadas para reducir el consumo energético ha sido entender cómo se consume la energía activa. Eso llevó a la necesidad de chequear de qué forma los cambios en el consumo de energía son explicados por los cambios en la producción. Matemáticamente, si la correlación estadística entre las variables es próximas a la unidad positiva o negativa, eso significa que pocas acciones relacionadas con operación pueden ser implementadas. Entonces, cualquier dos variables que presenten correlación cerca del cero pueden ser entendidas como un caso en que hay oportunidades ocultas. En ese caso, el proceso debe ser estudiado detalladamente para entender si hay oportunidades y cómo hacer para que se transformen en acción y, finalmente, ahorro.

Para obtener la data, es condición *sine qua non* una estructura adecuada de instrumentación de procesos y del sistema eléctrico es necesaria, así como la división de circuitos y sus cargas en acuerdo al proceso. En el caso estudiado, la existencia de una red de medición y recolección de data, definida desde el proyecto de ingeniería, ha tornado la extracción de data una tarea sencilla, aunque no lo sea en muchos casos. La ejecución de los proyectos de ingeniería que consideren, durante la operación, la posibilidad de extraer datos para componer un SGE será cada vez más un diferencial, ya que los costos de implementación de esta filosofía suelen ser más costosos en fases más avanzadas del ciclo de vida de la planta.

Trabajos futuros pueden considerar la aplicación de esta metodología en industrias de otro tipo, así

como utilizar otras herramientas para identificar comportamientos anómalos con base en la existencia de datos, tales como las redes neuronales artificiales, mejorando así la detección de desviaciones.

## Bibliografía

- [1] ABNT NBR ISO 50001:2011, *Sistema de gestão de energia – requisitos com orientações para uso*, Rio de Janeiro, 2011
- [2] ABNT NBR ISO 50002:2014, *Diagnósticos energéticos – requisitos com orientações para uso*, Rio de Janeiro, 2014
- [3] BUSSAB, Wilson, MORETIN, Pedro. *Estatística básica*, Saraiva, 2013.
- [4] CARVALHO, Adriano Araujo et al., “Modelagem do consumo elétrico de um clube com base em indicadores de desempenho energético”, In: 3ª Conferência Internacional de Energias Inteligentes – CIEI&EXPO2016. Curitiba, 2016, p.p. 169-174

## Hoja de Vida

ADRIANO ARAUJO CARVALHO es ingeniero electricista, graduado en la Universidad Federal de Río de Janeiro (Brasil) en 2007, con especialización en ingeniería eléctrica industrial por el PROMINP/UERJ (Brasil) en 2008, MBA con mención en gestión de proyectos por el IBMEC (Brasil) en 2013 y máster en Smart Grids por la Universitat Ramón Llull (España) en 2018. Co-founder de la empresa TRESCO, donde trabaja desde 2015 en las áreas de desarrollo de proyectos de ingeniería y gestión de energía. Es también investigador voluntario del CTSmart, de

Niterói, Brasil. Posee, aún, experiencia en el sector de petróleo y gas, donde actúa hace más de 10 años en Brasil y en el exterior.

ARTURO ALATRISTA CORRALES es ingeniero de procesos, graduado pela Universidad Nacional San Augustin (Perú), en 2002, posee una maestría en ingeniería de procesos industriales, por la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú), en 2008 y una maestría en gestión de innovación por la Universidad de Chalmers (Suecia), en 2010. Fundador de la empresa CEEP, donde trabaja desde 2010 en el área de eficiencia energética.

### **Contacto**

1. Nombre: Adriano Araujo Carvalho
2. Teléfono:
  - a. +55 21 972 931 818
3. Dirección:
  - a. Rua Dona Maria, 107, Vila Isabel, Rio de Janeiro/RJ, Brasil
  - b. Oficina
  - c. [adrianoacarvalho82@gmail.com](mailto:adrianoacarvalho82@gmail.com)
  - d. Rio de Janeiro
  - e. Brasil