

**Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de
agua en la producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada**

Carlos Ariel Castaño Trujillo

Dora Helena Rodríguez Hernández

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería- ECBTI

Programa de Ingeniería Industrial

La Dorada

2020

Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en la producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada

Carlos Ariel Castaño Trujillo

Dora Helena Rodríguez Hernández

Trabajo para optar al título de Ingeniero Industrial

Asesora:

Ing. Claudia Lorena Betancur Murillo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería- ECBTI

Programa de Ingeniería Industrial

La Dorada

2020

Página de Aceptación

Ing. Diego Andrés Tapias Pinto

Director Trabajo de Grado

Gloria Paulina Castellanos

Jurado

La Dorada-2020

Dedicatoria

Dedicatoria de Carlos Ariel Castaño.

A mis padres por los valores que me han inculcado y en especial a mi padre que desde el cielo estará orgulloso. A mi esposa e hijo por su apoyo durante la carrera.

Dedicatoria de Dora Helena Rodríguez.

A mi esposo Edison Zapata, que es mi mejor regalo de vida, a mis padres María Elena Hernández y Fredy de J. Rodríguez, que me enseñaron la importancia de cumplir con los compromisos adquiridos.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios, que es nuestro pilar fundamental en la vida. A nuestras familias, por su apoyo incondicional en todo momento, este logro también es de ellos. A la Chec S.A. E.S.P., por acogernos y permitirse conocer oportunidades de mejora en sus procesos. A la Unad, por entregarnos el conocimiento. A todos los que hicieron posible este proyecto, por su dedicación y acompañamiento.

Resumen

La consultoría es uno de los campos de acción del ingeniero industrial, en el cual se aplican todas las capacidades para abordar una situación que requiere un análisis detallado, una revisión y unas recomendaciones que dan lugar a oportunidades de mejora; conceptos que van muy ligados a la gestión de calidad de una organización.

La empresa Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. cuenta con una planta térmica con una capacidad de 50 MWH (Megavatios - Hora), que, por medio de la energía de gases calientes, producto de la combustión, se transforma la energía rotativa que produce movimiento a un generador que entrega la energía eléctrica al Sistema Nacional.

En la fase de combustión, en la generación térmica, se debe inyectar agua desmineralizada o agua ultrapura, la cual es producida en la planta como un proceso complementario; el agua que se utiliza es tomada del acueducto municipal y al pasar por el proceso de desmineralización se implementó un diseño para que, en la osmosis inversa, se obtenga un resultado aproximado del 65 % de agua ultrapura y un 35 % de pérdida de agua que sale del proceso como agua de rechazo y se direcciona al alcantarillado.

El objetivo fundamental de este proyecto, al aplicar el concepto de consultoría, es identificar la cantidad de agua de rechazo que es desperdiciada, con el fin de que proporcione las herramientas necesarias para el desarrollo de una propuesta que permita la recuperación del recurso hídrico. También, se pretende calcular las pérdidas económicas en la empresa por conservar el proceso bajo las condiciones actuales.

Es de resaltar que la propuesta está ligada al lineamiento de gestión ambiental integral de la organización y considera el desarrollo sostenible como factor ineludible, al enfocarse en el uso racional de los recursos naturales, además, por considerar la posibilidad de reutilizar el agua que

se desaprovecha, que en la actualidad corresponde a un 35 % aproximadamente, que de igual forma representa pérdidas económicas para la empresa.

Palabras clave: generación térmica, emisiones, agua desmineralizada, alcantarillado.

Abstract

Consulting is one of the fields of action of the industrial engineer, in which all the capacities are applied to tackle a situation that requires a detailed analysis, a review and recommendations that give rise to opportunities for improvement; concepts that are closely linked to the quality management of an organization.

The company Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P. has a thermal plant with a capacity of 50 MWH (Megawatts - Hour), which, by means of the energy of hot gases, product of the combustion, transforms the rotary energy that produces movement to a generator that delivers the electrical energy to the National System.

In the combustion phase, in thermal generation, demineralized water or ultrapure water must be injected, which is produced in the plant as a complementary process; the water used is taken from the municipal aqueduct and when passing through the demineralization process, a design was implemented so that, in reverse osmosis, an approximate result of 65% of ultrapure water and 35% of water loss that leaves the process as reject water and is directed to the sewerage system is obtained.

The fundamental objective of this project, when applying the concept of consulting, is to identify the amount of reject water that is wasted, in order to provide the necessary tools for the development of a proposal that allows the recovery of the water resource. Also, it is intended to calculate the economic losses in the company for preserving the process under current conditions. It should be noted that the proposal is linked to the organization's integral environmental management guidelines and considers sustainable development as an unavoidable factor, since it focuses on the rational use of natural resources, as well as considering the possibility of reusing the water that is wasted, which currently corresponds to approximately 35%, which also represents economic losses for the company.

Keywords: thermal generation, emissions, demineralised water, sewerage.

Glosario

Agua desmineralizada o ultrapura: agua a la que se le quitan los minerales y las sales disueltas, por tanto, su conductividad es baja.

Agua de alimentación: agua proveniente del acueducto municipal que alimenta el proceso.

Agua de producto: porción del agua de alimentación que, al pasar por las membranas de una osmosis inversa, la cual queda sin sólidos suspendidos y disueltos. (Edospina, 2007, p. 27).

Agua de rechazo: cantidad de agua de desecho, cargada de contaminantes, que se direcciona al alcantarillado. (Edospina, 2007, p. 27).

Alcantarillado: red de tubería que se utilizan para la evacuación de aguas residuales.

Osmosis inversa: a través de sus membranas ingresa agua a alta presión en donde se genera agua de producto y agua de rechazo. (Edospina, 2007, p. 27).

Planta de agua desmineralizada: planta en donde se produce agua desmineralizada o ultrapura.

Retrolavado: procedimiento de limpieza de filtros de arena, carbón activado y suavizador, de una planta desmineralizada, que consiste en aplicar flujo de agua en sentido contrario para que realice una limpieza por acción hidráulica.

Voltaje AC (Vac): tensión de corriente alterna, en la que existe un cambio periódico de la polaridad, es utilizada para la alimentación de equipos.

Contenido

Introducción.....	16
Problema.....	18
Descripción del Problema	18
Planteamiento del Problema.....	20
Sistematización del Problema	20
Justificación.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
Marco de referencia.....	23
Marco conceptual	23
¿Qué es una planta de generación térmica – Ciclo simple?.....	23
Sistema de combustión.....	24
Emisión de gases producidos durante la combustión.....	25
Permiso de emisiones atmosféricas para fuentes fijas	26
Planta de producción de agua desmineralizada.....	27
Inyección de agua desmineralizada.....	31
Marco teórico / conceptual.....	31
Evaluación de reutilización del agua de rechazo de la ósmosis inversa, México.	31

Desalación por ósmosis inversa y aprovechamiento en agricultura, México.	32
Tratamiento de agua de rechazo de plantas de osmosis, Argentina.	33
Recuperación de agua por ósmosis inversa, Colombia.	34
Marco legal.....	37
Marco histórico	38
Metodología.....	40
Método	40
Instrumento de investigación	41
Fase 1: Recolección de datos y cálculo de cantidad de agua vertida.	41
Fase 2: Propuesta para la implementación de un sistema de recuperación de agua .	46
Población y muestra	46
Resultado esperado	48
Conclusiones.....	57
Recomendaciones	58
Referencias	59
Anexos.....	62

Lista de tablas

Tabla 1. Marco legal en Colombia.....	37
Tabla 2. Aforo en drenaje de ósmosis con válvula del rechazo abierta.....	42
Tabla 3. Aforo en rechazo de ósmosis con válvula abierta.....	42
Tabla 4. Aforo al drenaje de ósmosis con válvula del rechazo cerrada.....	43
Tabla 5. Aforo en rechazo de ósmosis con válvula cerrada.....	44
Tabla 6. Aforo en rechazo de ósmosis con equipo EDI alineado y llenando Tk.....	44
Tabla 7. Aforo en rechazo del EDI llenando Tk.....	45
Tabla 8. Sumatoria de aforos en filtros de arena, carbón y en suavizador al hacer retrolavado..	46
Tabla 9. Pérdida mensual total de agua por drenaje de ósmosis con válvula del rechazo abierta	48
Tabla 10. Pérdida mensual total por rechazo de ósmosis con válvula abierta.....	49
Tabla 11. Pérdida mensual total de agua por drenaje de ósmosis con válvula del rechazo cerrada	49
Tabla 12. Pérdida mensual total de agua por rechazo de ósmosis con válvula cerrada.....	50
Tabla 13. Pérdida mensual total de agua por rechazo de ósmosis con EDI alineado y llenando Tk	50
Tabla 14. Perdida mensual total de agua por rechazo del EDI llenando Tk.....	51
Tabla 15. Perdida mensual total de agua en filtros cuando se está haciendo retrolavado.....	51
Tabla 16. Perdida mensual total de agua de retrolavado de la osmosis.....	52
Tabla 17. Cantidad total de agua y costo estimado.....	52

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama turbina de gas ciclo simple de un solo eje	23
Figura 2. Diagrama turbina de gas ciclo simple doble eje.....	24
Figura 3. Filtro de Arena.....	28
Figura 4. Filtro de Carbón.....	28
Figura 5. Suavizador	29
Figura 6. Osmosis Inversa	30
Figura 7. Electrodesionización	30
Figura 8. Aforo volumétrico	41
Figura 9. Sistema de neutralización	55
Figura 10. Segundo uso del agua recolectada.....	56

Lista de anexos

Anexo A. Toma de datos en drenaje y rechazo de la ósmosis con válvula abierta	62
Anexo B. Toma de datos en drenaje y rechazo de la ósmosis con válvula cerrada.....	63
Anexo C. Toma de datos en rechazo del EDI alineado y llenando tanque	64
Anexo D. Toma de datos en filtros y suavizador.....	65

Introducción

En la generación térmica, en la etapa de combustión, se utilizan combustibles fósiles, tales como el carbón mineral, combustóleos y gas natural. Cuando se culmina el proceso de combustión, se produce en la oxidación, dióxido de carbono y agua, también monóxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos como los óxidos de azufre (SO_2 y SO_3) que son directamente proporcionales a la cantidad de combustible utilizado, NO_x que son promotores de lluvia ácida, ácido clorhídrico, material particulado, entre otros, (López & Sánchez, 2007, p. 28 - 29). Considerando, además, que todos los gases contaminantes son emitidos a la atmósfera en la medida de la calidad del combustible y el diseño de la turbina de gas.

Una forma de mitigar la emisión de gases contaminantes en la generación de energía térmica es realizando inyección de agua desmineralizada durante el proceso de combustión. De esta manera se reducen en gran proporción los contaminantes perjudiciales para la salud humana y los causantes del calentamiento global. (PWPS, 2017, p. 215).

En la actualidad, las empresas necesitan innovar y conducir los procesos a que sean más rentables y productivos, por lo tanto, se debe recurrir a la consultoría, mediante la cual el ingeniero industrial puede realizar un estudio, con sumo detalle, sobre el estado actual de un proceso o situación, para luego proporcionar herramientas viables que mejoren y conduzcan a la optimización de los recursos.

El desarrollo de este proyecto se basa en un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en la producción de agua desmineralizada en la Planta Termodorada, que contribuye en el uso racional y eficiente del agua como recurso natural no renovable, para así disminuir el impacto ambiental y reducir costos económicos en la empresa.

Por lo cual, fue necesario recolectar datos para el cálculo de pérdidas cuando la planta térmica está generando energía y cuando no, puesto que la producción de agua desmineralizada

depende directamente de ello; lo que permite el cálculo de las pérdidas económicas con respecto al proceso de producción de agua desmineralizada. Finalmente, mediante un análisis completo del sistema, fue posible presentar una propuesta de recuperación de agua de rechazo en la producción de agua desmineralizada, en la osmosis inversa, con el fin de darle un segundo uso y evitar así su desperdicio.

Problema

Descripción del Problema

De acuerdo con los conceptos que comprende la termodinámica, una planta de generación térmica produce energía a partir de los gases calientes como producto de la combustión de fósiles y tal energía es aprovechada para hacer rotar un eje.

Termodorada es una planta de generación de energía térmica con una capacidad instalada de 50 MWH (Megavatios - Hora), que opera en un esquema de ciclo simple, compuesta por un Generador Eléctrico y dos Turbinas de Gas FT8 acopladas, denominada Twin Pack “Paquete gemelo”.

Como resultado del proceso de generación de energía térmica se obtiene la emisión de gases a la atmósfera, dentro de los que se encuentra el Óxido de Nitrógeno (NOx), que debe ser mitigado para dar cumplimiento con las normas ambientales y una forma de hacerlo es inyectando agua desmineralizada durante la etapa de combustión.

Para el proceso de producción de agua desmineralizada en la planta Termodorada se requiere tomar el agua del acueducto de La Dorada y hacerla pasar por dos filtros de arena, cuya función es remover las partículas en suspensión; luego pasa al filtro de carbón activado, que se encarga de remover el cloro libre; seguido el agua pasa al suavizador, que reduce la dureza del agua; continuando su trayecto el agua llega a la ósmosis inversa, en donde una fracción del agua de alimentación se denomina “Producto o Permeado”, en la que se remueven los sólidos suspendidos y disueltos y la otra se denomina “Rechazo”, que lleva los contaminantes fuera de las membranas, resaltando que la última fracción ocurre durante todo el tiempo en el que se está produciendo agua desmineralizada, además de que ésta es direccionada al alcantarillado.

La unidad de osmosis inversa al iniciar la producción de agua desmineralizada tiene un ciclo de diez minutos de acondicionamiento del agua, de los cuales tres minutos son de pre-enjuague, que se realiza antes de iniciar la producción en donde la válvula de rechazo está abierta totalmente, lo que significa que toda el agua que ingresa se conduce al alcantarillado con mayor flujo. Cabe anotar que al parar el proceso debe hacerse un ciclo de dos minutos de post-enjuague, en donde la válvula de rechazo se deja abierta.

Finalmente, el producto de la unidad de ósmosis inversa pasa al equipo de electrodesionización EDI, en donde se utilizan celdas diseñadas con resinas, que utilizando electricidad permite el intercambio iónico para producir agua ultra pura. Este equipo tiene como permisivo el estado de la conductividad del agua, por tanto, mientras el agua adquiere condiciones debe rechazarse toda el agua que ingresa, es decir que debe enviarse al alcantarillado, considerando además que durante el proceso de producción todo el tiempo existe una porción del agua que arrastra las impurezas de las celdas y ésta también se dirige al alcantarillado.

Como se describe anteriormente, durante el proceso de producción de agua desmineralizada de la planta Termodorada, se generan rechazos de agua que en la actualidad son llevados directamente a la alcantarilla. Se trata de un agua sin minerales y sales, que adicional, ya tuvo un tratamiento por tratarse de agua proveniente del acueducto municipal, lo que significa que es costosa y está siendo desperdiciada.

Se estima que, por hora, en el proceso de producción de agua desmineralizada, cuando la planta está generando, se arroja al alcantarillado 5,73 m³/hora de agua aproximadamente, que puede ser recuperada para reutilizarse en oficios varios y de esta forma volver sostenible un proceso que no puede ser modificado ni eludido en la generación de energía térmica.

Planteamiento del Problema

¿Qué impacto ambiental y económico tiene desarrollar un estudio sobre el uso del recurso hídrico en el proceso de producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada?

Sistematización del Problema

¿Qué cantidad de agua se arroja al alcantarillado en cada subproceso del proceso de producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada?

¿Cuál ha sido la afectación económica por arrojar agua al alcantarillado, producto del proceso de producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada?

¿Cuál es el impacto ambiental al realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en la producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada?

Justificación

El proceso de producción de agua desmineralizada es ineludible para una planta de generación de energía térmica. Considerando las fases del proceso de las cuales se obtiene al final un porcentaje de agua aprovechable y otro que debe desecharse, es necesario cuantificar la cantidad de agua que no puede ser reutilizada para ese proceso, pero que puede ser recuperada para un segundo uso en oficios varios, teniendo en cuenta que el agua es un recurso natural no renovable y que su procedencia es del acueducto municipal.

De acuerdo a lo anterior, es necesario realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en el proceso de producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada, en el cual, en primera instancia, será posible conocer la cantidad y el valor del agua que se está direccionando al alcantarillado; para luego, analizar la información que se convertirá en una herramienta importante para desarrollar la propuesta de recuperación del agua que se está desperdiciando, contribuyendo de esta manera en la conservación del medio ambiente y los recursos naturales y, a su vez generando valor a la organización, puesto que se va a dejar de desaprovechar 5,73 m³/hora.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar el estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en la producción de agua desmineralizada de la Planta Termodorada, el cual permita aportar al desarrollo sostenible de la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.

Objetivos específicos

Recolectar datos para calcular el desperdicio de agua, cuando la planta térmica está generando energía y cuando no está generando.

Calcular las pérdidas económicas con respecto al proceso de producción de agua desmineralizada.

Realizar una propuesta para el sistema de recuperación de agua de rechazo, en la osmosis inversa, en la producción de agua desmineralizada.

Marco de referencia

Marco conceptual

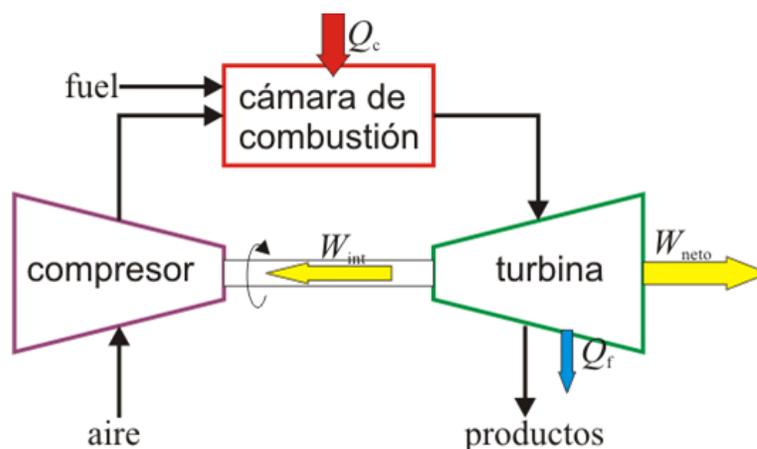
¿Qué es una planta de generación térmica – Ciclo simple?

Una planta de generación térmica convierte la energía calórica en energía mecánica, que finalmente es aprovechada para la producción de energía eléctrica. Desde lo básico, una planta de generación térmica en ciclo simple, la compone un generador de gas, una turbina y un generador eléctrico. (Fernández, 2009).

El generador de gas lo componen una etapa de compresión, que se encarga de comprimir el aire, una etapa de combustión donde se mezcla el aire comprimido con el combustible fósil (gas natural, derivados del petróleo como diésel o carbón mineral), al llevarse a cabo la ignición, se producen gases calientes que permiten el giro de una turbina que tiene su eje acoplado al eje de un generador eléctrico, el cual se encarga de la generación de energía eléctrica. En la figura 1 se muestra un diagrama de una turbina de gas de ciclo simple de un solo eje. (Fernández, 2009).

Figura 1.

Diagrama turbina de gas ciclo simple de un solo eje



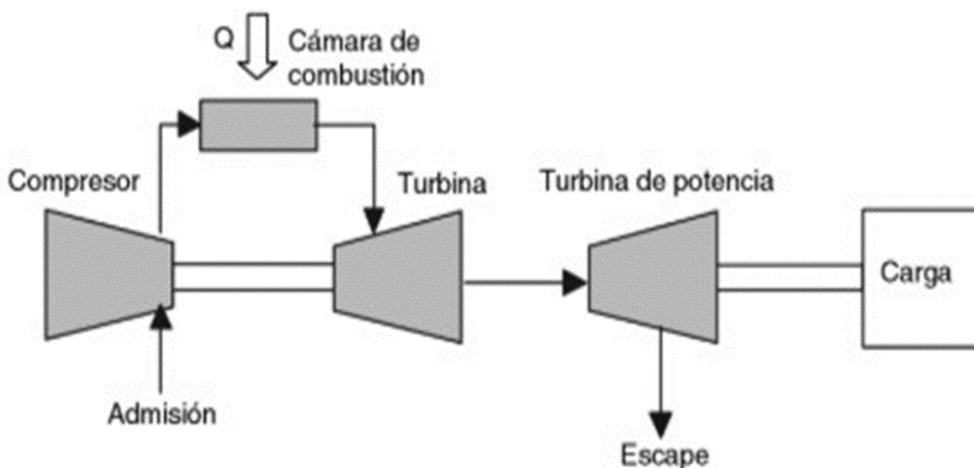
Fuente: Universidad de Sevilla, s.f.

Existen turbinas de un solo eje, en la cual existe un solo compresor, una sola turbina y en consecuencia giran a la misma velocidad, tienen apropiada respuesta a variaciones de carga y tiene la capacidad de sostener la frecuencia de giro.

También hay turbinas de eje doble, en la cual puede distinguirse una fracción de compresor de baja y otra de compresor de alta, a su vez una fracción de turbina de potencia de baja y otra de alta, en donde la turbina de baja tiene la potencia necesaria para mover el compresor de baja y la turbina de alta para mover el compresor de alta, con ejes independientes a velocidades diferentes, en la figura 2, se muestra el diagrama de turbina de gas ciclo simple doble eje. Finalmente, los gases calientes hacen girar una turbina de potencia que va acoplada al generador eléctrico con un único eje. (Álvarez & Callejón, 2002, p.303).

Figura 2.

Diagrama turbina de gas ciclo simple doble eje



Fuente: Álvarez & Callejón, 2002, p.304

Sistema de combustión

En una turbina de gas puede encontrarse sistemas de combustión monocámara o multicámaras, esto acuerdo al fabricante de la turbina.

El interés de los diseñadores de turbinas siempre ha sido lograr mayor eficiencia, como también disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, más precisamente de Óxidos de nitrógeno NOx, producto de la oxidación del combustible que se lleva a cabo a unas temperaturas elevadas de aproximadamente 3000 °F.

Dentro de la cámara de combustión se encuentran las siguientes funciones:

Estabilización de la llama con la alta velocidad de los gases calientes.

- Distribución homogénea de gases calientes hacia la turbina.
- Garantía de temperatura constante de los gases de combustión en la cámara.
- Producción del mínimo material particulado.

Por otro lado, el sistema de combustión lo conforman bujías de ignición, tubos comunicadores entre cámaras y detectores de llama (en algunos diseños).

Emisión de gases producidos durante la combustión

En la generación de energía térmica, en el proceso de combustión, se utilizan combustibles fósiles, tales como el carbón mineral, combustóleos y gas natural. Cuando se culmina el proceso de combustión, se produce en la oxidación, dióxido de carbono y agua, también monóxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos como los óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) que son directamente proporcionales a la cantidad de combustible utilizado, NOx que son promotores de lluvia ácida, ácido clorhídrico, material particulado, entre otros, (López & Sánchez, 2007, p.28 - 29). Considerando además que todos los gases contaminantes son emitidos a la atmósfera en la medida de la calidad del combustible y el diseño de la turbina de gas.

A continuación, se listan los posibles gases contaminantes que se producen al realizar la combustión con gas natural:

- Monóxido de carbono

- Plomo
- Óxidos de nitrógeno
- Partículas suspendidas
- Óxidos de azufre
- Metales pesados (cadmio, cromo, cobalto, mercurio, níquel) y sus compuestos
- Formaldehído
- Aromáticos (tolueno, benceno)

(López & Sánchez, 2007, p.30 – 33)

Una forma de mitigar la emisión de gases contaminantes en la generación de energía térmica es realizando inyección de agua desmineralizada durante el proceso de combustión.

De esta manera se reducen en gran proporción los contaminantes perjudiciales para la salud humana, ya que estos gases son los creadores de muchas enfermedades respiratorias.

Permiso de emisiones atmosféricas para fuentes fijas

“El permiso de emisión atmosférica para fuente fija, es el que concede la Autoridad ambiental competente, mediante acto administrativo, para que una persona natural o jurídica, pública o privada, dentro de los límites permisibles establecidos en las normas ambientales respectivas, pueda realizar emisiones al aire. El permiso sólo se otorgará al propietario de la obra, empresa, actividad, industria o establecimiento que origina las emisiones.” (ANLA, s.f.)

Para garantizar las condiciones ambientales adecuadas en cada central de generación térmica, se implementa un programa de medición directa en las fuentes de emisión y con él es posible dar certificado del cumplimiento con la legislación ambiental vigente.

Planta de producción de agua desmineralizada

El agua desmineralizada o agua ultra pura es el agua a la cual se le han sustraído las sales minerales, que además tiene la característica de poseer baja conductividad; el agua ultrapura tiene varios usos y a nivel industrial cumple con un trabajo importante en procesos en los cuales se requiere la disminución de material biológico y condiciones químicas adecuadas para la disminución de desgastes por oxidaciones y formaciones en materiales metálicos y no metálicos.

En una planta térmica es fundamental el uso de agua desmineralizada, ya que proporciona larga vida a los equipos, evitando corrosiones e incrustaciones, como también, permite el control de emisiones tras la combustión. El agua desmineralizada se puede producir mediante intercambio iónico con resinas catiónicas y aniónicas o con electrodesionización que combina electrodiálisis y un intercambio iónico.

Por otro lado, en la mayoría de los diseños de plantas de tratamiento, para la producción de agua desmineralizada o ultrapura, se encuentra una etapa inicial de pretratamiento que consta de Filtros de arena, Filtros de carbón y Suavizador. Luego está el paso de inyección de antiincrustante el cual previene el ensuciamiento por sílice de las membranas de la osmosis inversa, para finalmente pasar a la etapa final del proceso de producción de agua ultrapura.

- Filtros de arena. Son unidades diseñadas para el tratamiento de aguas en aplicaciones industriales donde se requiera eliminar partículas finas, material coloidal, turbiedad, óxido de hierro, manganeso y materia orgánica en suspensión incluyendo sustancias que dan color, algas, lamas y algunos microorganismos. (Edospina, 2006, p.4). La Figura 4 muestra la forma típica de un filtro de arena de una planta de tratamiento de agua desmineralizada.

Figura 3.*Filtro de Arena*

Fuente: Autores, 2020.

- Filtro de carbón activado. Están diseñados principalmente para la remoción de olores, sabores, cloro residual y materia orgánica presentes en el agua. (Edospina, 2006, p.10).
La Figura 5 muestra la forma típica de un filtro de carbón de una planta de tratamiento de agua desmineralizada.

Figura 4.*Filtro de Carbón*

Fuente: Autores, 2020

- Suavizador. Corresponde a una unidad de intercambio iónico, en la cual se remueve la dureza de agua libre de materia suspendida. (Edospina, 2006, p.15).

Figura 5.

Suavizador



Fuente: Autores, 2020.

- Osmosis inversa. Se encarga de producir la desalinización del agua, remueve materia orgánica y separa contaminantes del agua, a través de membranas semipermeables. Esta etapa de la producción de agua ultra pura requiere la garantía de una buena etapa de pretratamiento, por lo cual debe ser monitoreada durante todo el proceso. (Hidritec, 2016).

Figura 6.*Osmosis Inversa*

Fuente: Hidritec, 2016.

- Electrodesionización EDI. Combina electrodiálisis y un intercambio iónico. Es la última fase del proceso y se encarga de remover los iones del agua. Su ventaja es que sustituye los productos químicos necesarios para regenerar las resinas por corriente eléctrica. (García, I. & Sanz, J., 2011).

Figura 7.*Electrodesionización*

Fuente: García, I. & Sanz, J., 2011.

Inyección de agua desmineralizada

El propósito del sistema de inyección de agua en la generación de energía térmica es bajar la temperatura de llama en las cámaras de combustión para hacer un control de los óxidos en las emisiones de nitrógeno (NOx). Adicionalmente, se obtiene otro beneficio ya que incrementa la potencia de salida (debido a un mayor flujo de masa) a una temperatura de combustión reducida. Lo que significa que la inyección de agua desmineralizada es un proceso auxiliar fundamental dentro del proceso de generación de energía térmica.

El agua desmineralizada se extrae del tanque de almacenamiento, se presuriza, se mezcla con el combustible y se inyecta a través de las boquillas de combustible en las cámaras de combustión del generador de gas. La inyección del agua desmineralizada se realiza de manera automática, de acuerdo a los cálculos de control que posee la turbina de generación. (PW Power Systems, 2017).

Marco teórico / conceptual

La importancia de conservar el agua y realizar un uso responsable del recurso hídrico en procesos de la industria que utilizan ósmosis inversa, lleva a la búsqueda de realizar eficientemente las operaciones que requieren este recurso, así como cambios en conductas y estrategias para minimizar la cantidad de agua del rechazo o también aprovecharla en otros usos.

Tal y como se menciona en la evaluación de reutilización del agua de rechazo de la ósmosis inversa en México, en el año 2010, proyecto en donde Hernández (2010) hace una propuesta de evaluación costo – beneficio, en la reutilización del agua de rechazo de la ósmosis inversa, en la Central Termoeléctrica Ciclo Combinado El Sauz, que utiliza gas natural o diésel para la generación de energía. Para su desarrollo se usó el método analítico, en el cual se considera la recolección, medición y análisis de datos, dándole una dirección a este proyecto,

teniendo en cuenta que la Central Termoeléctrica El Sauz, requiere del uso de agua ultra pura en el proceso de combustión y para su producción utilizan ósmosis inversa; la obtención del agua para producirla en este caso es de pozos y surge la gran necesidad de recuperar el agua de rechazo en la ósmosis inversa, con el fin de optimizar el recurso hídrico, reducir costos del proceso y aportar a la gestión medioambiental. Por lo tanto, en el estudio se integran los consumos totales de agua en las diferentes fases del proceso y el costo en el cual debe incurrir la empresa; además el cálculo de las pérdidas económicas por no aprovechar el agua de rechazo.

Como resultado de la investigación realizada, Hernández (2010) pudo comprobar la oportunidad de utilizar mejor el agua dentro del proceso de la planta, como también realizar el planteamiento de realizar un aumento dimensional del tanque de agua de rechazo para evitar derrames y lograr procesar el agua en su totalidad.

Otro escenario en el cual se utiliza la ósmosis inversa es en el proceso de desalación en México. Proyecto que se desarrolló en el año 2016 y surge de la necesidad de posibilitar el abastecimiento del recurso hídrico a una de las regiones de México que se encuentra en segundo lugar en cultivos de irrigación en el país, pretendiendo tratar el agua de rechazo para ser usada en riego de cultivos. Para la ejecución del proyecto se utilizó el método cuantitativo, que permitió el bosquejo de la propuesta del modelo matemático.

Teniendo en cuenta que el sector agrónomo del valle del Yaqui se aprovisiona de agua de pozos que contienen altas concentraciones de sólidos disueltos, generados por la intrusión salina debido al uso descontrolado del manto acuífero; se pretende que con el uso de tecnología para la desalación (Ósmosis inversa) y mediante un modelo matemático de predicción, se pueda optimizar el recurso en el agua de producto y agua de rechazo. (Dévora et al., 2016).

Dentro del planteamiento se proyectó la reducción de agua de rechazo, que corresponde al agua que no puede ser aprovechada, por medio de recirculación hacia el agua de alimentación, encontrando de esta forma incremento del recurso para riego en las zonas áridas como lo es el estado de Sonora, México.

Este caso de estudio correspondió a una fase de simulación, que permitió evaluar el costo-beneficio de su aplicación, en donde se comprobó que, al recircular el agua de rechazo, se logrará extraer menos agua del pozo, reduciendo así las descargas de salmuera al ambiente.

Finalmente, Dévora et al. (2016) proponen una alternativa en la que el agua de rechazo que se deba arrojar al ambiente, la cual es agua salobre, sea dirigida a tanques de evaporación y así llevar la cifra a cero. Por lo anterior, los autores de este proyecto dan un aporte a la sostenibilidad, al proponer el uso racional del recurso hídrico en la ósmosis inversa y ocasionar el menor impacto ambiental.

En Argentina, también surge la necesidad de estudiar el aprovechamiento del agua de rechazo de plantas que utilizan ósmosis inversa y se encontró un proyecto desarrollado en 2017, que propone la recuperación de las aguas de rechazo de la ósmosis inversa, para que sean utilizadas en los lamederos, para así complementar la dieta del ganado, lo cual puede ser posible después de realizar tratamiento químico o químico térmico, que separe las sales tóxicas, como sulfatos o fluoruros, de las sales de cloruros que son de gran utilidad como complemento dietario. En este estudio Munuce et al., (2107) utilizan el método experimental y realizan el tratamiento de las aguas de rechazo de una de las plantas que actualmente están en funcionamiento para eliminar las sales tóxicas, obteniendo como resultado sales apropiadas para suministrar al ganado.

Dentro de la investigación fue encontrada la presencia de arsénico en las aguas de rechazo, lo cual requiere la implementación de una técnica que garantice su eliminación y las sales no sean nocivas para los bovinos.

Cabe anotar que, con los resultados obtenidos, se demuestra otro uso a las aguas de rechazo de la osmosis inversa, que al ser implementado y tecnificado se estaría impactando de manera positiva al medioambiente, con el uso adecuado del recurso hídrico, como también se estaría obteniendo un beneficio económico.

Por otro lado, Colombia también le apuesta a la recuperación de agua por ósmosis inversa y se halló un proyecto que fue ejecutado en la empresa Bio D S.A en el año 2017, que fue desarrollado bajo el concepto del método analítico; en el cual se recopilan los datos de consumo en el tratamiento del agua de proceso, purgas de torres y calderas que presentaban un desperdicio de agua con concentraciones de sales y partículas que debían ser tratadas en una empresa externa a un costo de \$158/kg, generando un gasto excesivo que fue posible disminuir instalando un sistema de tratamiento que permitió reutilizar parte de esta agua. (Moreno & Ortiz, 2017).

Según Moreno & Ortiz (2017), fue necesaria la instalación de una planta de tratamiento por osmosis inversa para aprovechar el agua de permeado y lograr su recuperación en el proceso para obtener un aprovechamiento de aproximadamente 55% del agua procesada. Por lo tanto, se realizaron las adecuaciones en las instalaciones de los sistemas existentes, incluyendo la división del tanque TK-14023, en 70% y 30%, en el cual se direccionará el agua a tratar y el agua de rechazo, respectivamente. También se acondicionó el tanque TK-14015 el cual recibe el agua tratada producto de la osmosis inversa.

Moreno & Ortiz (2017), hicieron la recomendación a la empresa Bio D S.A, para que implementen un sistema de recuperación del agua de rechazo en la osmosis inversa, que da lugar

al 32% del agua que no es aprovechada, lo que proporcionaría mayor valor al sistema de recuperación de agua implementado en la planta de tratamiento, puesto que se podría reutilizar el recurso hídrico en otros procesos de la empresa, lo que representaría un aporte económico importante para la organización y una reducción en el impacto ambiental mediante la implementación de nuevas tecnologías.

Del mismo modo se encontró una propuesta en Colombia en el área de la salud, para la reutilización de agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa del tratamiento de hemodiálisis en un hospital de tercer nivel.

Este estudio fue realizado en un hospital de tercer nivel, en el año 2019, propuesta que fue fundamentada en el método cuantitativo, en el cual se recopila, mide y analizan los datos en la planta de osmosis inversa del hospital el tunal, identificando que se vierte gran cantidad de agua diariamente por sección de diálisis, donde el promedio es de 120 a 150 litros. Con base en ello, Peñaloza & Morales (2019) consideran necesario implementar una serie de medidas de conservación, reutilización y recirculación de agua para reducir los consumos y hacer un uso y ahorro eficiente de los recursos naturales.

Dados los resultados de la investigación se estiman las condiciones para que esta agua pueda ser reutilizada, comprobando condiciones similares a la del agua potable, dejando un gran espacio para una finalidad adecuada, entre ellas consideraron alternativas como el riego en zonas de jardín o parques y descargas de sanitarios del hospital. (Peñaloza & Morales, 2019).

Otra industria que se exploró fue la de insumos para el automóvil, hallando una propuesta para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de osmosis inversa utilizada en una empresa de refrigerantes en Colombia, que fue realizada en el año 2020. En ella se presentaron

alternativas que posibilitan el aprovechamiento del agua de rechazo dentro de la empresa productora de refrigerantes automotrices ubicada en el municipio de Zipaquirá.

En la empresa se encuentra implementado un sistema de ósmosis inversa que tiene como finalidad procesar aproximadamente 714.28 L/día de agua, de los cuales cerca del 60% es utilizado en la producción de los refrigerantes mientras que el porcentaje restante representa al agua de rechazo. En donde el volumen de agua de rechazo representa mayor costo de disposición de sus aguas residuales, ya que la empresa no cuenta con una planta de tratamiento de agua y se ve obligada a pagar a terceros. (Benítez, D., & Duarte, G., 2020).

Existe un porcentaje de agua de rechazo de más o menos el 38.46%, lo que representa un caudal de 10 L/min con una conductividad de 148.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una concentración de sólidos disueltos totales de 74.16 mg/L. De acuerdo a lo anterior, se establecieron tres alternativas, alternativa 1 (agua de riego), alternativa 2 (recirculación y descarga de aparatos sanitarios) y alternativa 3 (evaporización y cristalización), así pues Benítez & Duarte (2020), detallan la información incluyendo balances de materia, diagrama de flujo de procesos y análisis preliminares de costos, con los que realizaron la evaluación para su futura selección, considerando además las características fisicoquímicas del agua de rechazo.

Con este estudio Benítez & Duarte (2020), establecieron el costo beneficio de recuperar el agua de rechazo de la osmosis inversa, lo cual representa un balance económico positivo para la empresa y a su vez un uso adecuado del recurso hídrico.

Marco legal

En la Tabla 1 se sintetiza el ordenamiento legal ambiental asociadas al caso de estudio.

Tabla 1.

Marco legal en Colombia

Norma	Descripción	Incidencia en el proyecto
Resolución 0631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.	Esta resolución se utiliza para realizar la valoración de resultados de la caracterización del agua de rechazo de la osmosis inversa, a conformidad con la Autoridad Ambiental competente.
Resolución 1207 de 2014	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.	Esta resolución se utiliza para evaluar los diferentes usos que se pueden dar al agua de rechazo de la ósmosis inversa.
Resolución 909 de 2008	Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.	Esta resolución se utiliza para evaluar el cumplimiento de emisiones admisibles para la planta Térmica Termodorada, en cumplimiento con la normatividad de los estándares establecidos y regulados por la Autoridad Ambiental

Nota. Fuente: Autores (2020)

Marco histórico

Chec S.A. E.S.P. es una empresa que hace presencia en la región caldense y está dedicada al negocio de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica, es propietaria de 7 plantas de generación hidráulica y una térmica y de todos los negocios se hace cargo de la operación y el mantenimiento. Se resalta el compromiso y la responsabilidad que tiene la empresa en el territorio, al mantener el equilibrio económico, ambiental y social en su actuar.

Tal y como se refiere la Chec S.A. E.S.P. en su política ambiental:

Buscamos incentivar prácticas ambientales según las posibilidades tecnológicas y económicas de la organización, orientadas a la **prevención de la contaminación y al uso racional de los recursos**; que cumplan la legislación ambiental y los convenios voluntarios, fortalezcan una cultura ambiental en los grupos de interés y propicien su participación, de manera que se mejore y comunique el desempeño ambiental y se adopten acciones frente a cambio climático.

(CHEC S.A. E.S.P., 2017).

A raíz del apagón generado por el Fenómeno del Niño del año 1992 y por las necesidades energéticas, las cuales no se alcanzaban a abastecer con las plantas existentes, se acogen varias plantas las Térmicas a la oferta de generación en Colombia. Dentro de ellas se encuentra Termodorada que inicia su operación en el año 1997, con una oferta de 50 Mw, desde la fecha hasta completar 15 años, es operada y mantenida por la Sociedad Termodorada S.A., con la cual Chec S.A. E.S.P. establece un contrato PPA, en donde Chec S.A. E.S.P. se compromete a comprar la energía que ésta genere. Manteniendo dentro del contrato que, pasado el tiempo

pactado, es decir en 2012, la Chec S.A. E.S.P. pasaría a ser propietaria y se encargaría de la operación y el mantenimiento de la planta.

Hasta hoy la empresa Chec S.A. E.S.P. ha realizado sus mayores esfuerzos por contribuir al desarrollo del país.

Metodología

El proyecto que tuvo como finalidad realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recuperación de agua en la producción de agua desmineralizada de la planta Termodorada, el cual fue efectuado mediante una investigación experimental, en la que se recolectaron datos concretos y reales relacionados con la cantidad de agua que se direccionó al alcantarillado en fracciones de tiempo, lo que permitió realizar un análisis de la información para poder calcular los promedios de la cantidad de agua de rechazo, además se realizó el cálculo de las pérdidas económicas en las cuales está incidiendo la empresa y finalmente se presentó una propuesta que permitirá el uso del agua del proceso de desmineralización de agua de manera más racional y reducirá el costo de consumo en la planta.

Método

Se utilizó el método cuantitativo, bajo técnicas de conteo y medición de variables, lo que condujo a tener mayor certeza en los análisis de los datos recolectados, en los aforos realizados del agua de rechazo en la osmosis inversa, a su vez se conoció la porción de agua de rechazo que se arroja al alcantarillado mientras la planta térmica está generando energía y cuando no está generando.

Para calcular el agua que vertimos al alcantarillado utilizamos el método de aforo volumétrico que consistió en medir el tiempo que tarda en llenarse de agua un balde de volumen conocido, esta toma de muestra la realizamos en varias repeticiones para reducir el margen de error y de esta forma realizar el promedio de la muestra.

$$\text{Muestra promedio Total} = (\text{Muestra1} + \text{Muestra2} + \dots + \text{Muestra.N}) / N$$

$$\text{CAUDAL (L/S)} = \text{volumen del balde (Litros)} / \text{muestra promedio total (segundos)}$$

Figura 8.*Aforo volumétrico*

Fuente: Autores, 2020.

Instrumento de investigación

Como instrumento técnico se manejó la observación directa, mediante la cual fue posible realizar la recolección de datos de todo el proceso de agua desmineralizada, con el aforo de agua, que permitió el cálculo de la cantidad de agua que se direcciona al alcantarillado, lo que permitió conocer el costo en el cual está incurriendo la empresa por esa cantidad de agua vertida, al producir agua desmineralizada o ultrapura.

Recolección de datos y cálculo de cantidad de agua vertida.

En la recolección de datos, fue necesario realizar un aforo del agua de rechazo en el proceso de producción de agua desmineralizada, en la osmosis inversa.

En la Tabla 2, se recopilaron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el drenaje de la ósmosis, con la válvula de rechazo abierta, los cuales corresponden a la cantidad de agua que se genera los primeros 3 minutos de estar en servicios la planta de agua desmineralizada, mientras se realiza el enjuague inicial y se obtienen las condiciones de dureza apropiadas del agua.

Tabla 2.*Aforo en drenaje de ósmosis con válvula del rechazo abierta*

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	2,71	9
Aforo 2	2,56	9
Aforo 3	2,41	9
Aforo 4	2,61	9
Aforo 5	2,82	9
Promedio	2,622	9
Total (Litros*segundo)		3,43

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 3, se recopilaron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el rechazo de la ósmosis, con la válvula de rechazo abierta, los cuales corresponden a la cantidad de agua que se genera los primeros 3 minutos de estar en servicios la planta de agua desmineralizada, mientras se realiza el enjuague.

Tabla 3.*Aforo en rechazo de ósmosis con válvula abierta*

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	2,40	9
Aforo 2	2,34	9
Aforo 3	2,08	9
Aforo 4	2,40	9

Aforo 5	2,01	9
Promedio	2,25	9
Total (Litros*segundo)		4,01

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 4 se recopilieron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el drenaje de la ósmosis, con la válvula de rechazo cerrada, los cuales corresponden a la cantidad de agua que se genera los primeros 7 minutos de estar en servicios la planta de agua desmineralizada, mientras se realiza el enjuague inicial y se obtienen las condiciones de dureza apropiadas del agua.

Tabla 4.

Aforo al drenaje de ósmosis con válvula del rechazo cerrada

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	1,57	9
Aforo 2	1,32	9
Aforo 3	1,59	9
Promedio	1,49	9
Total (Litros*segundo)		6,03

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 5 se recopilieron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el rechazo de la ósmosis, con la válvula de rechazo cerrada, los cuales corresponden a la cantidad de agua que se genera por 7 minutos, después de hacer los 3 minutos de enjuague, al estar en servicios la planta de agua desmineralizada, mientras se obtienen las condiciones de dureza apropiadas del agua.

Tabla 5.*Aforo en rechazo de ósmosis con válvula cerrada*

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	5,86	9
Aforo 2	6,21	9
Aforo 3	5,74	9
Promedio	5,94	9
Total (Litros*segundo)		1,52

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 6 se recopilieron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el rechazo de la ósmosis, con la válvula de rechazo cerrada y el equipo de electrodesionización en línea llenando el tanque de almacenamiento de agua desmineralizada, esta cantidad de agua corresponde a la que se direcciona al alcantarillado en condiciones normales de operación.

Tabla 6.*Aforo en rechazo de ósmosis con equipo EDI alineado y llenando Tk*

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	8,36	9
Aforo 2	8,44	9
Aforo 3	8,78	9
Aforo 4	9,40	9
Promedio	8,75	9

Total (Litros*segundo)	1,03
-------------------------------	------

Nota. Fuente: Autores (2020).

En la Tabla 7 se recopilaron los datos en litros, del aforo realizado al agua que sale por el rechazo del EDI, con la válvula de rechazo cerrada y el equipo de electrodesionización (EDI) en línea llenando el tanque (Tk) de almacenamiento de agua desmineralizada, esta cantidad de agua corresponde a la que se direcciona al alcantarillado en condiciones normales de operación.

Tabla 7.

Aforo en rechazo del EDI llenando Tk

Aforo	Tiempo en segundos	Litros
Aforo 1	15,28	9
Aforo 2	15,89	9
Aforo 3	15,89	9
Promedio	15,69	9
Total (Litros*segundo)		0,57

Nota. Fuente: Autores (2020).

Es importante tener en cuenta, en el proceso se encuentran dos filtros de arena, un filtro de carbón y un suavizador, en los cuales debe realizarse retrolavados diarios, que consisten en la utilización del flujo de agua del acueducto en contraflujo para lograr su limpieza y se logra invirtiendo un juego de válvulas en los elementos, este procedimiento puede durar 3 minutos en cada componente; de lo anterior se realizó un cálculo aproximado de desperdicio de agua de buena calidad, como se describe en la Tabla 8.

Tabla 8.

Sumatoria de aforos en filtros de arena, carbón y en suavizador al hacer retrolavado

Aforos	Tiempo en segundos	Litros
Filtro de arena # 1	1	27
Filtro de arena # 2	1	27
Filtro de carbón	1	18
Suavizador	1	6
Total (Litros*segundo)		76

Nota. Fuente: Autores (2020).

De acuerdo con la tabla anterior, es considerable la cantidad de agua que también se dirige al alcantarillado, si bien en algunas ocasiones en los filtros de arena el agua sale turbia en el procedimiento de retrolavado, por ser los encargados de atrapar lodos, es conveniente valorar estas fracciones de agua que se desperdician y que también pueden tener otros usos, esto con el fin de que sea aprovechada la mayor cantidad de agua que se está llevando a la alcantarilla.

Población y muestra

La población del caso de estudio permitió conocer las cantidades de agua que se dirigen al alcantarillado de los equipos asociados en el proceso de producción de agua desmineralizada, como son los filtros de arena #1 y #2, el filtro de carbón activado, el suavizador, la osmosis inversa y el equipo de electrodesionización (EDI).

La muestra aleatoria sistémica direccionó la investigación mediante los aforos realizados, lo que permitió realizar una selección con buenas propiedades de representatividad, de una manera rápida y simple. Por lo tanto, se siguió el proceso:

$$A_n = N/n$$

En donde;

A_n : es el aforo realizado, número de sistematización

N: total de aforos

n : número de muestras

Cabe resaltar que con la metodología que se utilizó en el presente caso de estudio, se pudo establecer los pasos y herramientas para alcanzar los objetivos propuestos.

Resultado esperado

A partir de los datos recolectados, se determinó el promedio mensual de la cantidad de agua que no es aprovechada en el proceso de producción de agua desmineralizada de la planta Termodorada, lo que permitió conocer un estimado de las pérdidas económicas en las cuales incurre la empresa y finalmente se realiza la presentación de una propuesta para la implementación de un sistema de recuperación de agua que se convierte en un aporte significativo en el entorno ambiental y económico de la organización, ya que busca la conservación del recurso hídrico, la optimización de equipos existentes y un ahorro en el gasto por pago de servicios de acueducto.

Pérdidas mensuales de agua en proceso de producción de agua desmineralizada

En la Tabla 9 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en el aforo en drenaje de ósmosis con válvula del rechazo abierta. Para los cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 9.

Pérdida mensual total de agua por drenaje de ósmosis con válvula del rechazo abierta

Metros cúbicos			
Perdida en 1 segundo	Perdida en 1 minuto	Perdida en 3 minutos	Pérdida mensual
0,00343	0,21	0,62	6,18

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 10 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en el aforo en rechazo de ósmosis con válvula abierta. Para los

cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 10.

Pérdida mensual total por rechazo de ósmosis con válvula abierta

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 3	Pérdida
1 segundo	minuto	minutos	mensual
0,0040	0,24	0,72	7,21

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 11 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en el aforo en drenaje de ósmosis con válvula del rechazo cerrada. Para los cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 11.

Pérdida mensual total de agua por drenaje de ósmosis con válvula del rechazo cerrada

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 10	Pérdida
1 segundo	minuto	minutos	mensual
0,0060	0,362	3.616	36,161

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 12 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual, en metros cúbicos, de acuerdo con los resultados obtenidos en el aforo en rechazo de ósmosis con válvula cerrada. Para

los cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 12.

Pérdida mensual total de agua por rechazo de ósmosis con válvula cerrada

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 7	Pérdida
1 segundo	minuto	minutos	mensual
0,0015	0,09	0,64	63,67

Nota. Fuente: Autores (2020)

En la Tabla 13 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en el aforo en rechazo de ósmosis con equipo EDI alineado y llenando el tanque. Para los cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 13.

Pérdida mensual total de agua por rechazo de ósmosis con EDI alineado y llenando Tk

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 24	Pérdida
1 segundo	minuto	horas	mensual
0,0010	0,062	88,92	2489,74

Nota. Fuente: Autores (2020).

En la Tabla 14 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual de agua, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en el aforo en rechazo EDI alineado y llenando el tanque

Tk. Para los cálculos se tuvo en cuenta que en generación continua debe salir de línea la planta de tratamiento de agua cada 3 días para realizar regeneración del suavizador.

Tabla 14.

Perdida mensual total de agua por rechazo del EDI llenando Tk

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 3	Pérdida
1 segundo	minuto	minutos	mensual
0,0010	0,0344	49,57	1387,98

Nota. Fuente: Autores (2020).

En la Tabla 15 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual de agua, en metros cúbicos, de acuerdo a los resultados obtenidos en los aforos realizados en los filtros de arena, filtro de carbón y en suavizador al hacer el retrolavado

Tabla 15.

Perdida mensual total de agua en filtros cuando se está haciendo retrolavado

Metros cúbicos			
Perdida en	Perdida en 1	Perdida en 3	Pérdida
1 segundo	minuto	minutos	mensual
0,0760	4,560	13,68	136,80

Nota. Fuente: Autores (2020).

En la Tabla 16 se encuentra el cálculo de la pérdida mensual de agua, en metros cúbicos, cuando se realiza la operación de conservación de las membranas de la osmosis, este proceso se realiza diariamente durante 15 minutos.

Tabla 16.*Perdida mensual total de agua de retrolavado de la osmosis*

Osmosis inversa Recirculación			
Perdida en 1 segundo	Perdida en 1 minuto	Perdida en 15 minutos	Pérdida mensual
0,0040	0,24	7,21	108,19

Nota. Fuente: Autores (2020).

Pérdidas económicas estimadas

Una de las finalidades del presente estudio fue conocer las pérdidas económicas en referencia al agua que se vierte al alcantarillado en el proceso de producción de agua desmineralizada de la planta Termodorada, para ello se consideran los datos de facturación de un determinado mes de la empresa de servicios de acueducto y los datos obtenidos de las pérdidas de agua.

La Tabla 17 contiene la sumatoria de las pérdidas de aguas en la producción de agua desmineralizada y su precio estimado.

Tabla 17.

Cantidad total de agua y costo estimado

Resultado	Cantidad [%]	Cantidad mensual [m³]	Precio estimado por m³	Precio total estimado [\$]
Rechazo Total	46	4127,25	\$ 1300	\$ 5.366.073
Agua Desmineralizada	54	4472,25	\$ 1300	\$ 5.813927

Total	100	8600	\$ 11.180.00
--------------	------------	-------------	---------------------

Nota. Fuente: Autores (2020).

El rechazo total es igual a la sumatoria de todas las pérdidas de agua que se presentan durante el proceso de agua desmineralizada cuando la planta está en producción en un mes.

Por otro lado, de acuerdo a la información que suministra el operador de servicio de acueducto, se han registrado consumos de agua de hasta 8600 m³ en producción continua de agua desmineralizada en un mes,

La Tabla 18 contiene la sumatoria de las pérdidas de aguas y su precio estimado.

en el proceso de preservación de los equipos cuando no se encuentran en producción de agua desmineralizada. Esto consiste en llevar el agua en todo el proceso hasta la ósmosis inversa por 15 minutos diarios.

Tabla 18.

Resultado de retrolavado de los equipos cuando no está generando

Resultado	Cantidad [%]	Perdida mensual [m³]	Precio estimado [m³]	Precio total estimado [\$]
Osmosis	44	108,192	\$ 1.300	\$ 140,650
Filtros	56	136,80	\$ 1.300	\$ 177,840
Total	100	244,99	\$ 1.300	\$ 318,490

Nota. Fuente: Autores (2020).

Teniendo en cuenta las Tablas 17 y 18 se evidencian los consumos de agua que se desperdicia actualmente y la empresa debe pagar por esos consumos, teniendo en cuenta que las pérdidas económicas actuales al mes se encuentran estimadas en \$ 5.366.073 cuando se encuentra

en producción continua de agua desmineralizada y \$ 318,490 cuando se encuentra en preservación.

Propuesta para la implementación de un sistema de recuperación de agua

De acuerdo con el estudio realizado en el proceso de obtención de agua desmineralizada de la Planta Termodorada, el cual consistió en el análisis de la cantidad de agua de rechazo que se direcciona al alcantarillado, como resultado de la producción del agua desmineralizada, se realiza la siguiente propuesta que permitirá recuperar el agua de rechazo, para disponerla en un tanque y darle un segundo uso, como en riego, oficios varios y uso de baños.

En la planta de agua desmineralizada se encuentra un sistema de neutralización, el cual se requería para la regeneración de un lecho mixto que hacía parte de la etapa final del proceso pero que fue reemplazado por el equipo de electrodeionización, esto ocurrió hace aproximadamente tres años, por lo que al salir de servicio lecho mixto, los elementos del sistema de neutralización quedaron disponibles para ser utilizados, recurso que se puede utilizar en la propuesta de recuperación de agua de rechazo y de esta manera se aprovechan los recursos existentes y se genera un impacto económico menor al momento de llevar a cabo la implementación.

Del sistema de neutralización es posible reutilizar el tanque y la bomba, teniendo en cuenta que el tanque de neutralización es de fibra de vidrio, de fondo plano y tiene una capacidad para almacenar aproximadamente 11,4 m³ (3000 galones) y la bomba tiene un motor trifásico, de 1.5 HP, el cual trabaja a una tensión de 480 Vac y a una frecuencia de 60 Hz. (Edospina, 2006, p. 72). Aclarando que este es un sistema de almacenamiento de agua que va a tener rotación diaria, por lo tanto, va a variar las cantidades de agua de rechazo en almacenamiento.

Para que el sistema de recuperación funcione, la bomba debe ubicarse en un dique de recolección de agua, para que tenga el contenido suficiente y se eviten daños en la bomba, la cual

va a operar automáticamente con un suiche de nivel que debe ser comprado y proporcionado por la empresa. Para el dique se debe solicitar al área de mantenimiento y obras civiles que realicen la intervención y para la compra del suiche de nivel es necesario contar con la asesoraría del personal del área de instrumentación. Adicionalmente, es preciso comprar accesorios y tubería en PVC, para direccionar el agua que sale del rechazo y la descarga de la bomba al tanque de neutralización.

Lo anterior, corresponde a una idea enfocada a mejorar la sostenibilidad del proceso de producción de agua desmineralizada, ya que se va a recuperar el agua, que es un recurso no renovable, posibilitando un segundo uso del agua recolectada.

También es preciso considerar que el tanque de limpieza puede conectarse con el tanque de neutralización, para que una vez que el tanque de neutralización se encuentre en alto nivel, el agua continúe almacenándose en el tanque de limpieza. Para que esto sea posible, se debe instalar algunos metros de tubería y una válvula, ambas de bajo costo.

Figura 9.

Sistema de neutralización

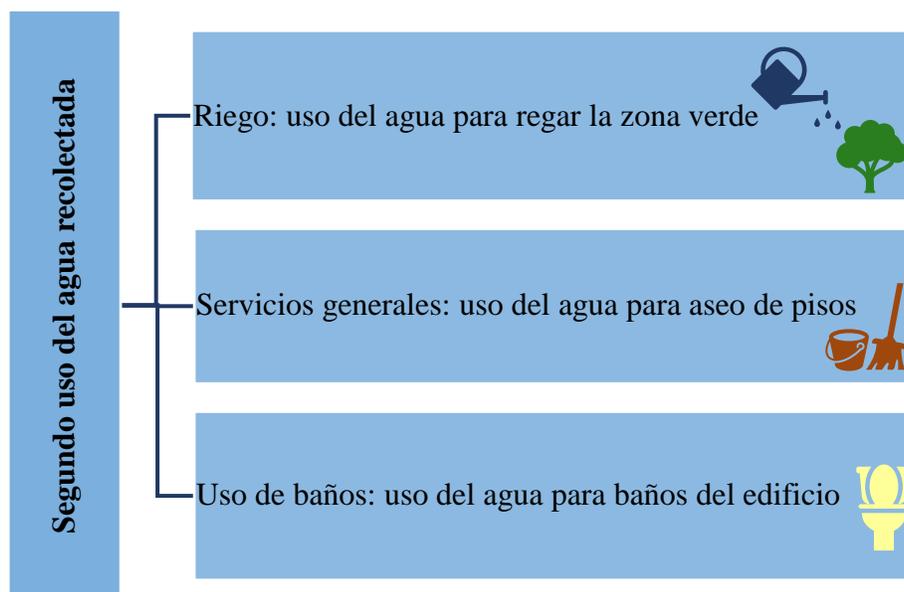


Fuente: Autores, 2020.

Usos del agua de rechazo recolectada

Figura 10.

Segundo uso del agua recolectada



Fuente: Autores, 2020.

Es así como en esta investigación, basada en la consultoría, fue posible aplicar los conocimientos específicos de la ingeniería industrial, para analizar una situación problemática ambiental y financiera en la planta Termodorada y del mismo modo proponer una oportunidad de mejora con la optimización de recursos que logre disminuir y administrar adecuadamente el recurso hídrico bajo el criterio de la sostenibilidad.

Conclusiones

- El desarrollo de este caso de este proyecto permitió identificar que, en la producción de agua desmineralizada de la planta Termodorada se aprovechan 4472,25 m³/mensual del agua que ingresa al proceso y 4127,25 m³/mensual se direcciona al alcantarillado, en producción continua. Se encontró además que, por la necesidad de preservar los equipos se debe arrojar al alcantarillado un total de 244,99 m³/mensual.
- Se logró calcular que, en un mes de producción continua de agua desmineralizada, es decir en generación continua de energía, la cantidad total de agua de rechazo que se dirige a la alcantarilla corresponde a \$5.366.073 de pérdidas económicas. También se calculó un pago de \$318,490 cuando no se está generando energía, por preservación de los equipos.
- A partir de un análisis general de los sistemas de la planta de agua desmineralizada de Termodorada, se presenta una propuesta de recuperación del agua de rechazo con el fin de darle un segundo uso, logrando la optimización de los recursos humanos y financieros de la empresa, lo cual lleva a generar valor y proporcionar garantías en la viabilidad de la planta.

Recomendaciones

El uso racional del agua es indispensable, ya que el líquido vital cada vez escasea más y es no renovable. Por lo anterior y los resultados obtenidos en el presente caso de estudio, es necesario que la empresa tome decisiones en cuanto a la implementación de la propuesta para la recuperación de agua de rechazo en el proceso de agua desmineralizada de la Planta Termodorada. Teniendo en cuenta que se van a poder recuperar 4127,25 m³/mensual, cuando la hay producción continua de agua desmineralizada, o en el otro escenario se podrán recuperar 244,99 m³/mensual, por la preservación de los equipos; cantidad de agua que se podrá disponer en un tanque de almacenamiento para un segundo uso en riego, limpieza y servicios sanitarios. Dando oportunidad a un plan de ahorro y uso responsable del agua en el proceso de desmineralización, en el que se pretende aprovechar la mayor cantidad del recurso hídrico. Es de resaltar que la propuesta tiene la posibilidad de reutilizar materiales existentes en la empresa para materializarla.

Referencias

- Álvarez, J. & Callejón, I. (2002). Máquinas térmicas motoras – 2 (pp. 303 - 309) Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=WGZrMVDJNUAC&pg=PA304&dq=compresor+de+un+generador+de+gas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjHmc-i1dHoAhV4J7kGHskWA4sQ6AEIMjAB#v=onepage&q=eje&f=false>
- Arranz, F. (s.f.). Manual de termodinámica. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=dvFihZpqPbgC&pg=PA95&dq=ciclo+brayton&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwIU2fSVj83oAhVLzqQKHYYQnBnYQ6AEITTAE#v=onepage&q=ciclo%20brayton&f=false>
- Benítez, D. & Duarte, G. (2020). Propuesta para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de osmosis inversa utilizada en una empresa de refrigerantes (Tesis de grado). Universidad de La Salle, Bogotá.
- Congreso de la República de Colombia. (5 junio de 2008). Artículo 9 [Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas existentes con capacidad instalada igual o superior a 20 MW]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible [Resolución 909]. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resoluci%C3%B3n%20909%20de%202008%20%20-%20Normas%20y%20estandares%20de%20emisi%C3%B3n%20Fuentes%20fijas.pdf>
- Congreso de la República de Colombia. (13 agosto de 2014). Artículo 6 [De los usos establecidos para agua residual tratada]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible [Resolución 1207]. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

- Congreso de la República de Colombia. (7 de marzo de 2015). Artículo 16 [Vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ArnD al acantarillado público]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible [Resolución 0631]. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- CHEC S.A. E.S.P. (2017). Política y lineamientos de la gestión ambiental integral. Recuperado de <https://www.chec.com.co/sostenibilidad/gestion-ambiental-integral/lineamiento-ambiental>
- Dévora, G., López, M., Fiambrés, G. Sánchez, J. & Trejo, S. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. Tecnologías y ciencias del agua, vol.7 No.3 Jiutepec may./jun.
- Edospina S.A. (1997). Planta de tratamiento de agua Termodorada (pp. 1-72). Bogotá, Colombia: Tipiel S.A.
- Fernández, J. (2009). Ciclo Brayton - Turbinas a gas. Recuperado de http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/03-turbina_a_gas.pdf
- García, I & Sanz, J. (2011). Electrodesionización en Continuo (CEDI) para aplicaciones industriales: calderas de alta presión. Recuperado de <https://docplayer.es/2154156-Electrodesionizacion-en-continuo-cedi-para-aplicaciones-industriales-calderas-de-alta-presion-electrodesionizacion-en-continuo.html>
- Hernández, F. (2010). Evaluación de reutilización del agua de rechazo de la ósmosis inversa (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Colima, México.
- Hidritec. (2016). Osmosis inversa y desaladoras. Recuperado de <http://www.hidritec.com/hidritec/osmosis-inversa>

- López, C. & Sánchez, M. (2007). Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1634&context=ing_ambiental_sanitaria
- Munuce, A., Mercado, M., Julián, S., Calbo, V., Alitta, M., Baldo, C., Soulé, C. & Díaz, E. (2017). Tratamiento de agua de rechazo de plantas de osmosis. Estudio de un caso. Universidad Tecnológica Nacional, PROIMCA – PRODECA.
- Moreno, D & Ortiz, J. (2017). Instalación de un sistema de recuperación de agua de purgas caldera, torres de enfriamiento y enjuague suavizadores aplicando la tecnología de osmosis inversa (Tesis de pregrado). Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Peñaloza, N. & Morales, S. (2019). Propuesta para la reutilización de agua de rechazo del proceso de ósmosis inversa del tratamiento de hemodiálisis en un hospital de tercer nivel (Trabajo de grado). Universidad de La Salle, Bogotá.
- PW Power Systems LLC. (2017). Procedimiento 36 – Sistema de inyección de agua. Manual de comisionamiento de Unidades SWIFTPAC y MOBILEPAC de turbinas de gas FT8 Revisión F pp. 215. Gastombury, Inglaterra: PW Power Systems LLC

Anexos

Anexo A.

Toma de datos en drenaje y rechazo de la ósmosis con válvula abierta

www.syz.com.co EQUIPOS, SISTEMAS Y SERVICIOS PARA MANEJO Y CONTROL DE FLUIDOS

Δf_o en drenaje de Ósmosis con válvula de rechazo abierta

Δf _o	tiempo	
1	2.71	
2	2.56	9 Litros.
3	2.41	
4	2.61	
5	2.82	
<u>Promedio</u>	<u>2.622</u>	

Δf_o en rechazo de ósmosis

Δf _o	tiempo	
1	2.40	
2	2.34	9 litros
3	2.08	
4	2.40	
5	2.01	
<u>Promedio</u>	<u>2.25</u>	

Anexo B.

Toma de datos en drenaje y rechazo de la ósmosis con válvula cerrada

EQUIPOS, SISTEMAS Y SERVICIOS PARA MANEJO Y CONTROL DE FLUIDOS www.syz.com.c

Atoro al drenaje de la ósmosis
válvula rechazo cerrada

Atoro	tiempo	
1	1.57	9 Litros.
2	1.32	
3	1.59	
<hr/>		
Promedio	1.49	

Atoro en rechazo de la ósmosis
válvula cerrada

Atoro	tiempo	
1	5.86	9 litros
2	6.21	
3	5.74	
<hr/>		
Promedio	5.94	

Calculo $\frac{\text{Litros}}{\text{tiempo}} = L \times s$

Anexo C.

Toma de datos en rechazo del EDI alineado y llenando tanque

Aforo en rechazo con equipo EDI
Alineado y llenando tanque

Aforo	tiempo	
1	8.36	9 Litros
2	8.44	
3	8.78	
4	9.40	
<hr/>		
Promedio	8.75	

Aforo en rechazo del EDI
llenando tanque

Aforo	tiempo
1	15.28
2	15.89
3	15.89
<hr/>	
Promedio	15.69

Anexo D.

Toma de datos en filtros y suavizador

Asunto:		SYZ	
EQUIPOS, SISTEMAS Y SERVICIOS PARA MANEJO Y CONTROL DE FLUIDOS		www.syz.com.co	
Aforos filtros.			
filtro Arena #1	Aforo	Litros	1 segundo
	1	26.5	
	2	27.4	
	Promedio		27s.
filtro Arena #	Promedio 27s.		
filtro carbón			
	Aforo	Litros	1 segundo
	1	19.	
	2	18	
	3	17	
	4	18	
	Promedio		18
Suavizador			
	Aforo	Litros	
	1	5.5	
	2	6.2	
	3	6.1	
	Promedio		6