



REPUBLICA DE PANAMÁ

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍAS

FACULTAD DE CIENCIAS LOGÍSTICAS

OPCIÓN DE TITULACIÓN: MONOGRAFÍA

**“PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA Y DESMINERALIZADA EN LA PLANTA
GENERADORA GATÚN Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD DEL
PROCESO ENERGÉTICO”**

**PROYECTO DE TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL CON ÉNFASIS EN CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD.**

AUTOR: ANYELA RIVERA

TUTOR: MICHAEL CASTILLO

CIUDAD DE PANAMÁ, JULIO 2025.

INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA DE OPCIÓN DE TITULACIÓN (ATOT)

FACULTAD DE CIENCIAS LOGÍSTICAS

Carrera o Programa: Trabajo de Grado

Estudiante: Anyela Rivera.

Cédula:3-740-1291

Tutor(a): Michael Castillo.

Cédula de identidad o pasaporte No.: 8-765-1560.

Título del TG o PG: PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA Y DESMINERALIZADA EN LA PLANTA GENERADORA GATÚN Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD DEL PROCESO ENERGÉTICO

SESIÓN	FECHA	HORA REUNIÓN	MODALIDAD (VIRTUAL)	ASPECTO TRATADO	OBSERVACIÓN
1	23-junio-2025	7:30 PM	virtual	Primera revisión	
2	27-julio-2025	7:00 PM	virtual	Segunda revisión	
3	29-julio-2025	7:00 PM	virtual	Tercera revisión	
4	3-agosto-2025	7:00 PM	virtual	Revisión final	
5	5-agosto-2025	8:00 PM	virtual	Aprobación final	

Declaramos que las especificaciones anteriores representan el proceso de dirección de la Opción de Titulación arriba mencionada

Firma del Tutor 	Firma del Estudiante: 
Firma del(la) Profesor(a) de Opción de Titulación	Fecha (05/08/2025)

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
AGRADECIMIENTOS	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I	12
1. Planteamiento del problema	12
1.1 Justificación del estudio	12
1.2 Objetivo general	13
1.3 Objetivos específicos	13
1.4 Metodología	13
CAPÍTULO II	14
2. Marco Teórico	14
2.1 Importancia del agua en procesos termoeléctricos	14
2.2 Desalinización del agua	14
2.3 Desmineralización del agua	15
2.4 Impacto de la calidad del agua en la productividad energética	15
2.5 Normas y parámetros de calidad del agua	16
CAPÍTULO III	17
3. Descripción de la Planta Generadora Gatún	17
3.1 Ubicación y propósito del proyecto	17
3.2 Necesidad de tratamiento de agua	17
3.3 Sistemas de tratamiento de agua en la planta	17
3.3.1 Sistema de pretratamiento	18
3.3.2 Planta de desalinización (SWRO)	18

3.3.3 Sistema de desmineralización	18
3.3.4 Producción de agua potable y servicios generales	19
3.3.5 Sistema de tratamiento de aguas residuales	19
3.4 Automatización y control	19
CAPÍTULO IV	20
4. Producción de agua desalada y desmineralizada en la planta Generadora Gatún	20
4.1 Introducción al proceso	20
4.2 Flujo general del proceso de tratamiento	20
4.3 Equipos y tecnologías utilizadas	20
4.3.1 Ósmosis inversa de agua de mar (SWRO)	20
4.3.2 Ósmosis inversa de segundo paso (BWRO)	21
4.3.3 Sistema de electrodeionización (EDI)	21
4.3.4 Pulidor de lecho mixto (MBP)	21
4.4 Parámetros de calidad del agua	21
4.5 Automatización del proceso	22
4.6 Manejo de productos químicos	22
4.7 Impacto en la operación de la planta	23
CAPÍTULO V	24
5. Impacto en la calidad y productividad del proceso energético	24
5.1 Contexto: capacidad, combustibles y marco operativo	24
5.2 Efecto en la calidad del proceso energético	24
5.2.1 Mejora de eficiencia y confiabilidad	24
5.2.2 Cumplimiento de normas ambientales y sostenibilidad	24
5.3 Impactos ambientales y sociales de acuerdo con el EIA:	25

5.4 Influencia del tratamiento de agua sobre la productividad La disponibilidad constante de agua de alta pureza permite:	25
5.5 Contribución al desarrollo energético de Panamá	25
CAPÍTULO VI	27
6. Análisis del rendimiento del sistema de tratamiento de agua en la planta	
Generadora Gatún	27
6.1 Indicadores clave de rendimiento	27
6.2 Resultados operativos	27
6.3 Evaluación del impacto en la operación energética	28
6.4 Observaciones de campo: visita técnica al sistema de tratamiento de agua	28
6.5 Retos y oportunidades de mejora	30
CAPÍTULO VII	31
Conclusiones	31
CAPÍTULO VII	33
Recomendaciones	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
ANEXOS	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de calidad del agua potable	21
Tabla 2: Valores de referencia de operación para sistemas SWRO y EDI	27

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Proyecto generadora Gatún	35
Anexo 2: Tina de floculación y tina de coagulación	35
Anexo 3: Tina de lodo y rascador de DAF	36
Anexo 4: Filtro auto limpiante	36
Anexo 5: Módulos de ultrafiltración	37
Anexo 6: Unidad de SWRO los cilindros blancos se les llama membrana	37
Anexo 7: unidad del BWRO	38
Anexo 8: Unidad EDI	38
Anexo 9: Pulidor de lecho mixto el agua que sale de EDI pasa por aquí y el resultado es el agua desmineralizada.	39
Anexo 10: Filtros de carbón activo para la producción de agua potable	39



REPÚBLICA DE PANAMÁ

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS LOGÍSTICAS

**“PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA Y DESMINERALIZADA EN LA PLANTA
GENERADORA GATÚN Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD DEL
PROCESO ENERGÉTICO”**

Autor: Anyela Rivera

Tutor: Michael Castillo

Año: 2025

RESUMEN

Esta investigación analiza la producción de agua desalada y desmineralizada en la planta Generadora Gatún y su impacto en la calidad y eficiencia del sistema energético. El agua tratada es esencial para diversas etapas críticas del ciclo de generación, garantizando un funcionamiento seguro y continuo. El estudio describe los procesos de clarificación, ultrafiltración, ósmosis inversa de agua de mar (SWRO), ósmosis inversa de agua salobre (BWRO), electrodeionización (EDI), pulidor de lecho mixto (MBP) y producción de agua potable. La metodología fue cualitativa y descriptiva, basada en fuentes técnicas, normativas y en una visita directa a la planta.

Palabras clave: Agua desalada, agua desmineralizada, Generadora Gatún, ósmosis inversa, producción energética.



REPUBLIC OF PANAMA

INTERNATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

FACULTY OF LOGISTICS SCIENCES

**“PRODUCTION OF DESALINATED AND DEMINERALIZED WATER AT THE GATÚN
GENERATING PLANT AND ITS IMPACT ON THE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF
THE ENERGY PROCESS”**

Author: Anyela Rivera

Tutor: Michael Castillo

Year: 2025

ABSTRACT

This research analyzes the production of desalinated and demineralized water at the Gatun Power Plant and its impact on the quality and efficiency of the energy system. Treated water is essential for various critical stages of the generation cycle, ensuring safe and continuous operation. The study describes the processes of clarification, ultrafiltration, seawater reverse osmosis (SWRO), brackish water reverse osmosis (BWRO), electrodeionization (EDI), mixed bed polishing (MBP), and potable water production. The methodology was qualitative and descriptive, based on technical sources, regulations, and a direct visit to the plant.

Keywords: Desalinated water, demineralized water, Gatún Power Plant, reverse osmosis, energy production

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de este proceso además de recopilar datos y vivencias, reflexioné profundamente sobre el valor de cada experiencia y el aprendizaje que conlleva, sino que también enfrenté momentos de reflexión profunda sobre todo lo vivido en los proyectos AES Colón y Generadora Gatún. Por ello, quiero agradecer a quienes, de una u otra manera, fueron parte de esta experiencia.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la claridad mental para superar cada desafío y culminar este importante paso en mi vida profesional.

Agradezco también a mi hija Arlet Eloise por ser mi motivación para siempre dar lo mejor de mí y a mi familia, especialmente a quienes me apoyaron durante mis jornadas más largas, cuando el cansancio y la presión laboral se apoderaban de mí. A los supervisores, compañeros y colaboradores con quienes trabajé en Woongnam, CB&I y Pacoda Panamá S.A., por las lecciones aprendidas a través del trabajo diario y los desafíos compartidos. Y finalmente, agradezco a mi tutor Michael Castillo y al equipo académico que me ha orientado durante esta monografía.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para el funcionamiento de las plantas termoeléctricas modernas, especialmente aquellas que operan bajo un sistema de ciclo combinado, donde se requiere vapor de alta calidad y sistemas de enfriamiento eficientes. La calidad del agua utilizada influye directamente en el rendimiento térmico, la seguridad operativa, la vida útil de los equipos y el cumplimiento de los estándares ambientales. En este contexto, la planta Generadora Gatún, ubicada en la provincia de Colón, Panamá, representa una infraestructura clave para el sistema energético nacional. Con una capacidad instalada de 670 MW y una operación basada principalmente en gas natural, esta planta incorpora un sistema de tratamiento de agua altamente especializado. Dicho sistema integra tecnologías como la ósmosis inversa de agua de mar (SWRO), ósmosis inversa de segundo paso (BWRO), electrodeionización (EDI) y pulidores de lecho mixto (MBP), lo que permite transformar agua de mar en agua desalada, y posteriormente en agua desmineralizada de alta pureza, indispensable para un desempeño energético eficiente y seguro.

El objetivo del estudio es entender cómo funciona este proceso y cuál es su impacto en la calidad y eficiencia de la operación. Desde un enfoque técnico y académico, se abordan los fundamentos del tratamiento, los parámetros de calidad más importantes, el rendimiento del sistema y posibles mejoras, aportando una visión útil para la ingeniería industrial y la gestión sostenible del agua.

CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema

En las plantas termoeléctricas de ciclo combinado, como la planta Generadora Gatún, el agua juega un papel fundamental en la generación de energía eléctrica. Este recurso es utilizado en diversas etapas operativas como la producción de vapor, enfriamiento, limpieza y otras aplicaciones auxiliares. No obstante, el agua de mar aunque abundante en el entorno costero donde se ubica la planta no puede utilizarse directamente sin someterse a un proceso riguroso de tratamiento.

La falta de un sistema de tratamiento eficiente comprometería la calidad del agua utilizada, afectando la operación de calderas, turbinas, sistemas de refrigeración y, en consecuencia, la productividad del sistema energético. "Por eso, es necesario contar con un sistema confiable que garantice el tratamiento adecuado del agua de mar, convirtiéndola en agua desalada y desmineralizada con la pureza requerida para operar eficientemente. Comprender cómo funciona este sistema permite entender mejor su impacto en el rendimiento de toda la planta."

1.1 Justificación del estudio

La planta Generadora Gatún constituye una de las inversiones energéticas más importantes de Panamá en los últimos años. Su operación eficiente depende en gran medida del sistema de tratamiento de agua implementado, que permite garantizar un suministro continuo de agua de alta calidad para los procesos de generación eléctrica.

Este estudio se justifica en la necesidad de entender a profundidad cómo la producción de agua desalada y desmineralizada contribuye a la productividad, sostenibilidad y confiabilidad del sistema energético nacional. Además, aporta conocimientos relevantes para la ingeniería industrial, específicamente en las áreas

de calidad, productividad, gestión de procesos y sostenibilidad ambiental.

1.2 Objetivo general

Analizar el proceso de producción de agua desalada y desmineralizada en la planta Generadora Gatún y su impacto en la calidad y productividad del proceso energético.

1.3 Objetivos específicos

Describir las tecnologías utilizadas en el tratamiento de agua en la planta.

Identificar los parámetros de calidad del agua requerida para la operación energética.

Evaluar el rendimiento del sistema de tratamiento de agua y su influencia en la eficiencia de la planta.

1.4 Metodología

El presente trabajo se basa en una metodología de tipo descriptiva, sustentada en revisión documental y análisis técnico de fuentes primarias y secundarias. Las principales fuentes incluyen el manual de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de agua de la planta Generadora Gatún, elaborado por POSCO E&C y Welcron Hantec (2024), documentos oficiales del proyecto, información de organismos internacionales como la OMS, y referencias técnicas del sector energético. "Además, se consultó información disponible en sitios oficiales como www.generadoragatun.com y el Estudio de Impacto Ambiental aprobado para el proyecto.

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1 Importancia del agua en procesos termoeléctricos

El agua es un recurso crítico en la industria energética, particularmente en plantas termoeléctricas, donde es utilizada en grandes volúmenes para procesos como la generación de vapor, enfriamiento, limpieza de equipos y producción de energía eléctrica. La eficiencia y seguridad de estos procesos dependen, en gran medida, de la calidad del agua utilizada. El uso de agua no tratada o con altas concentraciones de minerales puede generar incrustaciones, corrosión en calderas, intercambiadores de calor y turbinas, provocando daños costosos y paradas no programadas (Hernández & Rojas, 2020).

2.2 Desalinización del agua

La desalinización es un proceso mediante el cual se eliminan las sales y otros minerales del agua salobre o marina, transformándola en agua apta para el consumo humano o uso industrial. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentra la ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés), la cual fuerza el paso del agua a través de una membrana semipermeable que retiene sales y contaminantes (Shannon et al., 2008).

El proceso de desalinización mediante ósmosis inversa de agua de mar (SWRO, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una solución eficiente en proyectos industriales ubicados en zonas costeras, como es el caso de la planta Generadora Gatún. Este sistema permite reducir la dependencia del agua dulce proveniente de fuentes terrestres, aprovechando la abundancia del recurso marino de forma controlada.

2.3 Desmineralización del agua

La desmineralización es el proceso de remoción de iones disueltos en el agua, tales como calcio, magnesio, sodio, cloruros, sulfatos, entre otros. En plantas termoeléctricas, se requiere agua ultrapura para alimentar las calderas y sistemas de ciclo cerrado, con el fin de evitar la formación de incrustaciones o depósitos que comprometan la eficiencia térmica del sistema. Entre los métodos más eficaces para este fin se encuentran:

- Ósmosis inversa de segundo paso (BWRO)
- Electrodeionización (EDI)
- Pulidores de lecho mixto (MBP)

El proceso EDI combina la deionización convencional con el uso de membranas y electricidad, eliminando así la necesidad de regeneración química, lo que mejora la continuidad del servicio y reduce el impacto ambiental (González & Méndez, 2019).

2.4 Impacto de la calidad del agua en la productividad energética

La calidad del agua utilizada en los procesos energéticos tiene un impacto directo sobre la productividad, la vida útil de los equipos y los costos operativos. El uso de agua con altos niveles de dureza, sílice o sólidos disueltos puede provocar acumulación de incrustaciones en tuberías y calderas, lo cual reduce el intercambio térmico y obliga a realizar mantenimientos más frecuentes. En contraste, el uso de agua tratada mediante tecnologías avanzadas (como EDI o SWRO) contribuye a mantener altos niveles de eficiencia operativa, disminuyendo el consumo energético del sistema y maximizando la disponibilidad de la planta (POSCO E&C y Welcron Hantec, 2024).

2.5 Normas y parámetros de calidad del agua

Los requerimientos de calidad del agua para uso industrial están definidos por normativas internacionales y los estándares técnicos de los fabricantes de turbinas y calderas, como GE. Estos especifican límites de conductividad, sílice, dureza total, cloruros, entre otros.

En la planta Generadora Gatún, el sistema de tratamiento de agua ha sido diseñado para cumplir tanto con los parámetros exigidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable, como con los requerimientos de alta pureza exigidos para agua de ciclo en plantas termoeléctricas (POSCO E&C y Welcron Hantec, 2024).

CAPÍTULO III

3. Descripción de la Planta Generadora Gatún

3.1 Ubicación y propósito del proyecto

La planta Generadora Gatún está ubicada en el área de Isla Telfers, Colón, en la costa caribeña de Panamá. Forma parte de un ambicioso proyecto energético nacional orientado a garantizar el suministro confiable de energía eléctrica en el país, diversificando la matriz energética y fortaleciendo la capacidad instalada a través del uso de gas natural como combustible principal.

Este complejo de generación termoeléctrica opera como una central de ciclo combinado, es decir, emplea tanto turbinas de gas como turbinas de vapor, optimizando el uso del calor residual. La eficiencia del ciclo combinado está directamente relacionada con el uso de agua de alta calidad, necesaria para el proceso de generación de vapor y enfriamiento.

3.2 Necesidad de tratamiento de agua

La planta está situada junto al mar, lo cual representa una ventaja logística para la captación de agua, pero también un desafío técnico: el agua de mar no puede ser utilizada directamente en procesos industriales de alta precisión sin un tratamiento riguroso. Por ello, Generadora Gatún cuenta con un complejo sistema de tratamiento de agua y aguas residuales que permite obtener agua desalada y desmineralizada de alta pureza, vital para proteger los equipos, garantizar la eficiencia del proceso y cumplir con las regulaciones ambientales (POSCO E&C y Welcron Hantec, 2024).

3.3 Sistemas de tratamiento de agua en la planta

El sistema de tratamiento está compuesto por varias unidades que operan de forma secuencial y automatizada para transformar el agua de mar en agua apta para

distintos usos industriales. A continuación, se describen sus principales componentes:

3.3.1 Sistema de pretratamiento

Este sistema incluye procesos de:

- Filtración mecánica: remueve partículas grandes del agua de mar.
- Sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF): elimina sólidos suspendidos, aceites y microorganismos.
- Ultrafiltración (UF): filtra partículas submicrométricas y microorganismos, protegiendo las membranas de ósmosis inversa.

3.3.2 Planta de desalinización (SWRO)

El sistema SWRO (Seawater Reverse Osmosis) utiliza alta presión para hacer pasar el agua de mar a través de membranas semipermeables que retienen sales y minerales. Este proceso genera dos corrientes:

- Permeado: agua desalada, que pasa a la siguiente etapa de tratamiento.
- Concentrado o salmuera: rechazada al mar de forma controlada, cumpliendo normas ambientales.

3.3.3 Sistema de desmineralización

El agua desalada es tratada posteriormente para alcanzar niveles de pureza muy altos. El sistema incluye:

- Ósmosis inversa de segundo paso (BWRO): mejora la conductividad del agua.
- Electrodeionización (EDI): elimina iones residuales sin necesidad de químicos regenerantes.
- Pulidores de lecho mixto (MBP): como etapa final, aseguran una calidad del agua ultrapura, ideal para alimentar las calderas y sistemas de vapor.

3.3.4 Producción de agua potable y servicios generales

Además del uso industrial, el sistema produce agua potable para consumo humano dentro del proyecto, cumpliendo los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). También se abastece agua para limpieza, riego, y otros usos auxiliares.

3.3.5 Sistema de tratamiento de aguas residuales

La planta incluye un sistema de tratamiento de aguas negras y grises, compuesto por:

- Tanques de recolección
- Sistema de aireación
- Decantadores y filtros biológicos

Este sistema garantiza que las aguas residuales sean tratadas antes de su descarga, cumpliendo con los estándares ambientales establecidos por las autoridades panameñas.

3.4 Automatización y control

Todos los procesos del sistema de tratamiento están monitoreados y controlados mediante un sistema automatizado de supervisión y adquisición de datos (SCADA), conectado a PLC's que permiten el ajuste preciso de variables como presión, caudal, niveles de pH y conductividad. Esto asegura eficiencia, confiabilidad y cumplimiento normativo en todo momento (POSCO E&C y Welcron Hantec, 2024).

CAPÍTULO IV

4. Producción de agua desalada y desmineralizada en la planta Generadora Gatún

4.1 Introducción al proceso

El tratamiento del agua en la planta Generadora Gatún constituye una parte esencial de su operación. El objetivo es convertir el agua de mar en agua desalada y, posteriormente, en agua desmineralizada de alta pureza, necesaria para procesos como la generación de vapor, refrigeración de equipos y producción de agua potable. La calidad del agua tratada incide directamente en la eficiencia energética, la durabilidad de los equipos y el cumplimiento de estándares ambientales e industriales (POSCO E&C & Welcron Hantec, 2024).

4.2 Flujo general del proceso de tratamiento

El sistema de tratamiento de agua está diseñado en secuencia lógica e interdependiente, comenzando con la captación de agua de mar y finalizando con la entrega de agua ultrapura. Las etapas clave del proceso son:

1. Captación de agua de mar
2. Pretratamiento (filtración, flotación y ultrafiltración)
3. Desalinización mediante ósmosis inversa (SWRO)
4. Desmineralización (BWRO, EDI, MBP)
5. Producción y distribución de agua desmineralizada
6. Rechazo de salmuera y aguas residuales tratadas

4.3 Equipos y tecnologías utilizadas

El sistema incorpora tecnologías de punta que permiten cumplir con los exigentes parámetros de calidad requeridos para una planta de ciclo combinado.

4.3.1 Ósmosis inversa de agua de mar (SWRO)

Este sistema se compone de bombas de alta presión, cartuchos filtrantes,

membranas semipermeables y sensores de control. La presión de operación es de aproximadamente 60 bar. El rendimiento de recuperación del sistema SWRO está estimado entre 40 % y 45 %, con una producción promedio de **1,200 m³/día** de agua desalada (POSCO E&C & Welcron Hantec, 2024).

4.3.2 Ósmosis inversa de segundo paso (BWRO)

El agua desalada pasa por un segundo paso de ósmosis inversa de menor presión, que reduce aún más la carga iónica. Este sistema opera a presiones entre 10 y 15 bar, alcanzando una conductividad inferior a 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como parte del requisito para ingresar al sistema EDI.

4.3.3 Sistema de electrodeionización (EDI)

El EDI combina membranas de intercambio iónico, resinas y corriente eléctrica para remover los iones restantes. El agua tratada alcanza niveles de conductividad menores a 0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cumpliendo con los requerimientos técnicos de fabricantes como GE para alimentación de calderas de alta presión.

4.3.4 Pulidor de lecho mixto (MBP)

Se utiliza como una última etapa de seguridad para garantizar que cualquier impureza residual sea removida antes de alimentar sistemas críticos. El sistema MBP utiliza resinas de intercambio iónico regenerables.

4.4 Parámetros de calidad del agua

El agua producida debe cumplir con parámetros técnicos establecidos tanto por la Organización Mundial de la Salud para agua potable como por fabricantes de equipos termoeléctricos para agua de ciclo. Algunos valores de referencia son:

Tabla 1: parámetros de calidad del agua potable (Fuente: POSCO E&C & Welcron Hantec, 2024; OMS, 2017)

Parámetro	Agua Potable (OMS)	Agua Desmineralizada (GE)
pH	6.5 - 8.5	6.8 - 7.5
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 1000	< 0.2
Dureza total (mg/L)	< 200	0
Cloruros (mg/L)	< 250	0
Sílice (mg/L)	< 10	< 0.02

4.5 Automatización del proceso

El proceso completo es monitoreado por un sistema SCADA integrado con controladores PLC, que permiten el monitoreo en tiempo real de variables como presión, caudal, temperatura, pH y conductividad. Además, se integran alarmas de operación y registros históricos para el análisis técnico. El sistema incluye pantallas HMI para operación local y paneles de control centralizados en la sala de control.

4.6 Manejo de productos químicos

Durante el proceso se utilizan productos químicos cuidadosamente dosificados, incluyendo:

- Anti-incrustantes: para evitar acumulación de sales en membranas
- Hipoclorito de sodio (NaClO): para desinfección inicial
- Ácido clorhídrico (HCl) y hidróxido de sodio (NaOH): para ajuste de pH y limpieza química de membranas
- Metabisulfito de sodio (SMBS): para eliminar cloro libre
- Resinas de intercambio iónico: para el sistema MBP

Estos productos son almacenados en áreas seguras con sistemas de contención secundaria y protocolos de seguridad industrial.

4.7 Impacto en la operación de la planta

La disponibilidad de agua de alta pureza permite mantener en óptimas condiciones los generadores de vapor, turbinas, condensadores y torres de enfriamiento. Esto se traduce en:

- Mayor eficiencia térmica
- Reducción de paradas por mantenimiento
- Disminución del uso de productos químicos correctivos
- Mayor vida útil de los equipos La inversión en tecnología de tratamiento de agua ha contribuido significativamente a la calidad y productividad del proceso energético en la planta Generadora Gatún.

CAPÍTULO V

5. Impacto en la calidad y productividad del proceso energético

5.1 Contexto: capacidad, combustibles y marco operativo

La planta Generadora Gatún, con una capacidad instalada de 670 MW en configuración 2x1 (dos turbinas de gas y una de vapor), utiliza gas natural como fuente primaria y diésel como respaldo. Inició sus operaciones comerciales con una generación inicial de 440 MW, proyectando alcanzar su capacidad total en fases posteriores. Esta planta es clave en la diversificación de la matriz energética nacional por su alta eficiencia y menor impacto ambiental.

5.2 Efecto en la calidad del proceso energético

5.2.1 Mejora de eficiencia y confiabilidad

El tratamiento de agua desalada y desmineralizada permite alimentar calderas, turbinas y condensadores con agua de ultra pureza, lo cual:

- Optimiza el intercambio térmico y mantiene la eficiencia del ciclo combinado.
- Disminuye las paradas por limpieza o mantenimiento, reduciendo tiempos muertos operativos.
- Extiende la vida útil de los equipos y reduce costos derivados de la corrosión e incrustaciones.

5.2.2 Cumplimiento de normas ambientales y sostenibilidad

La planta opera con estándares internacionales y permisos que regulan la descarga de agua de mar (salmuera) y de aguas residuales tratadas. El Estudio de Impacto Ambiental (2021) destaca la incorporación de medidas de mitigación, monitoreo y control para proteger los recursos marinos, suelo y aire, lo que fortalece la sostenibilidad operativa del sistema.

5.3 Impactos ambientales y sociales de acuerdo con el EIA:

- Impactos positivos en operación: incluyen generación de empleo, desarrollo económico local y fortalecimiento de la seguridad energética.
- Impactos ambientales: la calidad de las aguas marinas y subterráneas podría verse afectada (categoría negativa moderada), mitigada a través de protocolos de manejo y descarga controlada.
- Impactos sociales: generó opiniones mixtas, pero la mayoría apoyó el proyecto por su aporte al empleo y la estabilidad energética.

La ASEP también inspeccionó las instalaciones, reconociendo el beneficio de tarifa eléctrica, confiabilidad y operación regulatoria conforme a los marcos de agua potable, alcantarillado y electricidad.

5.4 Influencia del tratamiento de agua sobre la productividad La disponibilidad constante de agua de alta pureza permite:

- Mantener los parámetros operacionales dentro de rangos óptimos (pH, conductividad, sílice).
- Reducir consumo de químicos correctores y frecuencia de limpieza de membranas y calderas.
- Estabilizar la producción energética, evitando variabilidad y pérdidas de carga térmica.

Estas mejoras se traducen en un incremento real en la disponibilidad de la planta y una reducción en el OPEX (gastos operativos).

5.5 Contribución al desarrollo energético de Panamá

La entrada en operación de Generadora Gatún representa:

- Aporte significativo (670 MW) al parque de generación nacional.
- Energía más limpia y económica gracias al uso de gas natural.

- Desarrollo económico en Colón, con generación de empleo e inversión estimada en USD 1 200 millones.
- El tratamiento de agua garantiza la continuidad de estos beneficios al mantener el desempeño técnico e industrial de la planta.

CAPÍTULO VI

6. Análisis del rendimiento del sistema de tratamiento de agua en la planta

Generadora Gatún

La eficiencia del sistema de tratamiento de agua es determinante para garantizar la calidad del agua requerida en la operación de una planta termoeléctrica de ciclo combinado. Este capítulo analiza el rendimiento del sistema de tratamiento de agua de la planta Generadora Gatún, con base en los parámetros de diseño, la calidad del agua obtenida y la estabilidad operativa del sistema.

6.1 Indicadores clave de rendimiento

El sistema de tratamiento implementado en Generadora Gatún incluye tecnologías de punta como la ósmosis inversa de agua de mar (SWRO), la ósmosis inversa de segundo paso (BWRO), la electrodeionización (EDI) y los pulidores de lecho mixto (MBP). La eficiencia de cada etapa puede medirse mediante indicadores como:

- Tasa de recuperación (porcentaje de agua producida respecto al agua de entrada)
- Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- Remoción de sílice
- Estabilidad del pH
- Consumo de químicos por metro cúbico producido
- Frecuencia de limpiezas químicas (CIP)

6.2 Resultados operativos

Según el manual de operación y mantenimiento, los valores de referencia para un funcionamiento óptimo son los siguientes:

Tabla 2: Valores de referencia de operación para sistemas SWRO y EDI

Parámetro	Valor esperado
Recuperación en SWRO	40 – 45 %
Conductividad del agua post-EDI	< 0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Remoción de cloruros y dureza total	100 %
Consumo de químicos (NaOH, HCl, SMBS)	Bajo, dosificación automática
Frecuencia de limpieza de membranas	< 1 vez por mes (por sistema)

(Fuente: POSCO E&C & Welcron Hantec, 2024)

Estos valores muestran una operación eficiente, controlada y automatizada. La reducción en la necesidad de mantenimientos correctivos, gracias a un diseño optimizado, repercute positivamente en la productividad general de la planta.

6.3 Evaluación del impacto en la operación energética

El uso de agua de alta pureza permite mantener constantes los parámetros de operación en calderas, condensadores y sistemas de generación de vapor, resultando en:

- Menor pérdida de energía por transferencia térmica deficiente.
- Reducción del uso de productos químicos correctores en calderas.
- Aumento de la disponibilidad operativa de las turbinas.
- Menor desgaste en sistemas de control y sensores por incrustaciones.

Además, la producción autónoma y constante de agua de calidad evita depender de fuentes externas, garantizando autosuficiencia operativa, especialmente en condiciones de alta demanda o mantenimientos correctivos no programados.

6.4 Observaciones de campo: visita técnica al sistema de tratamiento de agua

Como parte del desarrollo de esta monografía, realicé una visita técnica a la planta Generadora Gatún, donde tuve la oportunidad de recorrer personalmente las áreas encargadas del tratamiento de aguas. Esta experiencia fue muy enriquecedora, ya que pude observar en sitio el funcionamiento de cada una de las etapas del sistema, desde la captación del agua de mar hasta la obtención de agua desmineralizada y

potable.

El recorrido comenzó en el área del INTAKE, donde se capta el agua de mar y se aplica dióxido de cloro como primer paso para el control de microorganismos. Esta agua es conducida hacia el sistema DAF (Disolved Air Flotation), donde observé el proceso de coagulación y floculación. En esta etapa, se dosifican productos como dióxido de cloro, hipoclorito de sodio y cloruro férrico. Posteriormente, en la tina de floculación, se inyecta un polímero que permite agrupar los sólidos y residuos, que luego son extraídos por un sistema mecánico tipo scraper. El resultado es un agua pretratada que continúa su recorrido hacia la siguiente etapa.

Luego, observé el equipo de ultrafiltración, el cual utiliza filtros automáticos y membranas que eliminan sustancias con alto peso molecular. Este paso produce agua ultra filtrada que continúa su tratamiento en la unidad SWRO (ósmosis inversa de agua de mar). Aquí me llamó la atención la precisión con la que se controla el proceso: hay analizadores que miden en tiempo real la conductividad, ORP, pH y temperatura. También se inyectan químicos como antiincrustantes y ácido para proteger las membranas. Cuando el sistema indica que los parámetros son adecuados, se inicia la producción de agua desalada.

Posteriormente, esta agua alimenta al sistema BWRO (ósmosis inversa de agua salobre), donde se afina aún más el tratamiento. En esta etapa también se utilizan microfiltros y sensores que controlan la calidad del agua. Si algo no está dentro de los parámetros, el sistema recircula el agua hacia la ultrafiltración para evitar fallas. Cuando todo está en orden, el agua se dirige hacia el sistema EDI (electrodeionización), que retira los iones remanentes utilizando resina de intercambio iónico y corriente directa.

Finalmente, observé que el agua desmineralizada pasa por un pulidor de lecho

mixto (MBP), y se almacena en un tanque especial. Me explicaron que, si el sistema detecta problemas en la calidad del agua (por ejemplo, un aumento en la sílice o una conductividad elevada), se activan alarmas automáticas y el sistema se detiene para evitar riesgo en el proceso energético. También conocí el sistema de agua potable, el cual utiliza filtros de carbón activo activado y adición de productos como hipoclorito de sodio, bicarbonato de sodio y cloruro de calcio. Este proceso garantiza el cumplimiento con las normativas nacionales de calidad de agua potable (DGNTI-COPANIT 23-395-99). Poder ver todo esto funcionando me ayudó a comprender mejor cómo cada etapa se conecta con la siguiente y cómo todo el sistema está diseñado para garantizar la calidad del agua que se utiliza en la planta. Esta experiencia aportó una perspectiva práctica que complementa la revisión documental y técnica realizada en este trabajo.

6.5 Retos y oportunidades de mejora

A pesar del alto nivel de eficiencia alcanzado, el sistema podría beneficiarse de:

- Monitoreo predictivo para la limpieza de membranas (uso de IA o algoritmos de tendencia).
- Recuperación parcial de salmuera para minimizar el rechazo y aumentar la eficiencia hídrica.
- Reaprovechamiento energético en bombas de alta presión mediante sistemas de recuperación de energía (ERD).
- Optimización del consumo de químicos, automatizando aún más la dosificación por retroalimentación de sensores.

Estas medidas fortalecerían aún más el rendimiento del sistema y su sostenibilidad en el largo plazo.

CAPÍTULO VII

Conclusiones

El presente estudio permitió analizar en profundidad el proceso de producción de agua desalada y desmineralizada en la planta Generadora Gatún, así como su impacto directo en la calidad y productividad del proceso energético. A partir del análisis realizado, se concluye lo siguiente:

La planta Generadora Gatún representa una infraestructura energética estratégica para Panamá, al aportar 670 MW al sistema interconectado nacional y operar bajo un modelo de ciclo combinado, con gas natural como combustible principal ([Generadora Gatún, s.f.]).

El sistema de tratamiento de agua está diseñado con tecnologías de última generación que garantizan agua de alta pureza para alimentar calderas, turbinas y condensadores. Las tecnologías utilizadas, como SWRO, BWRO, EDI y MBP, permiten alcanzar parámetros de calidad muy por debajo de los límites exigidos por organismos internacionales como la OMS y fabricantes como GE.

La disponibilidad constante de agua desmineralizada, con niveles de conductividad inferiores a $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ y sílice menor a $0.02 \text{ mg}/\text{L}$, ha sido clave para asegurar la eficiencia térmica de la planta y minimizar el desgaste de los equipos, reduciendo así los costos operativos y extendiendo la vida útil de los sistemas críticos (POSCO E&C & Welcron Hantec, 2024).

El sistema cuenta con una alta automatización mediante SCADA y PLCs, lo que garantiza un monitoreo y control preciso, disminuyendo riesgos operativos y mejorando la trazabilidad del proceso.

Desde el punto de vista ambiental, el diseño incluye protocolos para la descarga responsable de salmuera y aguas residuales, en cumplimiento con el Estudio de

Impacto Ambiental aprobado para el proyecto (URS, 2021). Esto refuerza su carácter sostenible y su compromiso con la regulación panameña.

En términos de productividad, la calidad del agua generada es un pilar técnico que permite mantener la planta operando de forma continua, eficiente y confiable, contribuyendo así a la estabilidad del sistema energético nacional.

CAPÍTULO VII

Recomendaciones

A partir del análisis realizado, se proponen las siguientes recomendaciones para potenciar aún más la eficiencia del sistema de tratamiento de agua en la planta:

Incorporar herramientas de mantenimiento predictivo basadas en inteligencia artificial o análisis de datos históricos que permitan anticipar la necesidad de limpieza de membranas, optimizando la vida útil de los equipos y reduciendo tiempos muertos.

Revisar la posibilidad de aprovechar energía residual en el sistema SWRO mediante la instalación de dispositivos de recuperación de energía (ERD), lo cual podría mejorar la eficiencia energética general del sistema.

Evaluar la reutilización parcial de la salmuera concentrada, mediante tratamientos complementarios o su uso en otras aplicaciones industriales no críticas, reduciendo así el volumen de descarga.

Fortalecer el monitoreo ambiental continuo, incluyendo sensores en línea para evaluar la calidad del agua de rechazo en tiempo real, y así garantizar que las descargas cumplan permanentemente con los parámetros establecidos por las autoridades regulatorias.

Capacitar constantemente al personal técnico-operativo en nuevas tecnologías de tratamiento de agua y actualizaciones normativas, asegurando una operación responsable, segura y alineada con avances globales en gestión hídrica industrial.

Mantener la documentación técnica actualizada y sistematizada, incluyendo los registros de operación, calibración de sensores, mantenimientos y consumos de químicos, lo cual contribuye a auditorías, toma de decisiones y cumplimiento de normas de calidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASEP. (2025). *Administrador de ASEP inspecciona planta Generadora Gatún*. Autoridad Nacional de los Servicios Públicos.
- Generadora Gatún. (s. f.). *Generadora Gatún* <https://generadoragatun.com>
- González, M., & Méndez, L. (2019). *Tecnologías de desmineralización para la industria energética*. Editorial Técnica Industrial.
- Hernández, F., & Rojas, J. (2020). *Gestión del agua en plantas termoeléctricas*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Guías para la calidad del agua potable* (4.ª ed.). Organización Mundial de la Salud.
- POSCO E&C, & Welcron Hantec. (2024). *Manual de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de agua y aguas residuales del Proyecto Generadora Gatún*. Autor.
- Swissinfo / EFE. (2024, 3 de octubre). *Arranca en Panamá operación comercial de generadora eléctrica de 1 200 millones de dólares*. Swissinfo.
<https://www.swissinfo.ch/spa/arranca-en-panam%C3%A1-operaci%C3%B3n-comercial-de-generadora-el%C3%A9ctrica-de-1-200-millones-de-d%C3%B3lares/87664752>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- URS Holdings, Inc. (2021). *Estudio de Impacto Ambiental – Proyecto de construcción de una central térmica de ciclo combinado de 670 MW*. Auto

ANEXOS

1-Proyecto Generadora Gatún



2-Tina de floculación y tina de coagulación



3-Tina de lodo y rascador de DAF



4- Filtro auto limpiante



5- Módulos de ultrafiltración



6- Unidad de SWRO los cilindros blancos se les llama membrana



7- Unidad del BWRO



8- Unidad EDI



9- Pulidor de lecho mixto el agua que sale de EDI pasa por aquí y el resultado es el agua desmineralizada.



10- Filtros de carbón activo para la producción de agua potable

