



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS MEDICIONES DEL AGUA DESIONIZADA MEDIANTE UN ESTUDIO R&R LARGO”.

Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero en Ejecución en Gestión de
la Calidad

Alumno:

Catalina Javiera Gómez Soto

Profesor Guía:

Miguel Zazópulos Garay

2024

RESUMEN

Este estudio analiza la calidad de las mediciones del agua desionizada en la planta productiva de Empresas Demaria S.A., considerando la relevancia crucial de este recurso en los procesos industriales. A través de la aplicación de un análisis R&R largo, se evaluaron la repetitividad y reproducibilidad del sistema de medición empleado, esto con el fin de identificar las fuentes principales de variabilidad y proponer mejoras.

Dentro de las causas de variabilidad sobresalen el equipo de medición, los operadores y la interrelación entre estos. Pese a que el sistema cumple con ser funcional, se detectó un notable potencial de mejora en cuanto a consistencia entre los operadores. La investigación mostró que la variabilidad combinada llegó a un grado del 17,58%, categorizándose como aceptable pero próximo al límite máximo sugerido. Adicionalmente, el índice de precisión/tolerancia señaló la necesidad de optimizar la consistencia del sistema.

Las conclusiones resaltan la relevancia de poner en marcha acciones tales como capacitación de los operadores, normalización de procedimientos y mantenimiento preventivo del equipo. Al tomar estas medidas no solo disminuirán la variabilidad, sino que también incrementarán la fiabilidad de los datos, permitiendo una toma de decisiones más acertadas y reduciendo los gastos relacionados con reprocesos.

INDICE

SIGLA..... 5

SIMBOLOGÍA..... 5

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 2

ALCANCE..... 3

1. FUNDAMENTO TEÓRICO..... 4

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA. 6

1.1.1. *Historia y evolución. 7*

1.1.2. *Giro y actividad económica. 7*

1.1.3. *Visión y misión..... 7*

1.1.4. *Contexto industrial y relevancia. 8*

1.2. AGUA DESIONIZADA 8

1.2.1. *Importancia del agua desionizada en la industria..... 8*

1.3. TRATAMIENTO DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL..... 9

1.3.1. *Descripción del proceso. 9*

1.3.2. *Ventajas del uso de agua desionizada. 11*

1.4. PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA DESIONIZADA 12

1.4.1. *Proceso de monitoreo de calidad. 12*

1.4.2. *Requerimiento de calidad para el agua desionizada 13*

1.4.3. *Determinación de pH..... 13*

1.4.4. *Determinación de cloro libre. 13*

1.4.5. *Determinación de la Conductividad eléctrica..... 14*

1.4.6. *Importancia del control de calidad. 14*

1.5. CALIDAD DE LAS MEDICIONES..... 15

1.5.1. *Conceptos básicos 16*

1.5.2. *Estudio largo de Reproducibilidad & Repetibilidad 18*

1.6. HERRAMIENTAS DE CALIDAD COMPLEMENTARIAS..... 19

1.6.1. *Diagrama de Ishikawa 19*

1.6.2. *Técnica de los 5 por qué..... 19*

1.6.3. *Impacto de los estudios de variabilidad en el control de procesos 20*

2. ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD & REPRODUCIBILIDAD. 21

2.1. APLICACIÓN DEL ESTUDIO R&R..... 23

2.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS R&R. 24

2.2.1. *Rangos de mediciones por operador. 26*

2.2.2.	<i>Promedio de los rangos y media de las mediciones realizadas por operador.</i>	27
2.2.3.	<i>Media de los rangos promedio y rango de las medias.....</i>	29
2.2.4.	<i>Límite superior de la carta de los rangos.</i>	31
2.2.5.	<i>Repetibilidad (Variación expandida del equipo).....</i>	31
2.2.6.	<i>Reproducibilidad (variación expandida del operador).</i>	33
2.2.7.	<i>R&R (variación combinada).</i>	34
2.2.8.	<i>Análisis en porcentaje de tolerancia.....</i>	36
2.2.9.	<i>Número de categorías distinguibles.</i>	39
2.3.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	40
2.3.1.	<i>Repetibilidad</i>	41
2.3.2.	<i>Reproducibilidad</i>	42
2.3.3.	<i>Reproducibilidad & Repetividad</i>	42
2.3.4.	<i>Índices de precisión</i>	43
2.3.5.	<i>Número de partes y resolución.....</i>	43
3.	PROPUESTAS DE MEJORA EN LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	44
3.1	DIAGRAMA DE ISHIKAWA	45
3.1.1	PROCEDIMIENTO	46
3.1.2	DIAGRAMA ISHIKAWA DE LA CALIDAD DE LAS MEDICIONES	47
3.2	CUESTIONAMIENTO DE LOS CINCO PORQUÉS	49
3.3	PROPUESTAS DE MEJORA BASADAS EN EL ANÁLISIS.	51
3.4	IMPACTO DE LAS MEJORAS DE PROPUESTAS.....	52
	CONCLUSIÓN	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	54

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 IMAGEN UBICACIÓN EMPRESAS DEMARIA S.A. 6

FIGURA 2 - 1. FÓRMULA MEDIA DE LOS RANGOS PROMEDIO. 29

FIGURA 2 - 2 FÓRMULA DEL RANGO DE LAS MEDIAS. 30

FIGURA 2 - 3 FÓRMULA DE LA VARIACIÓN EXPANDIDA..... 31

FIGURA 2 - 4 ECUACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ERROR DEL EQUIPO. 32

FIGURA 2 - 5 RESULTADOS DE LA REPETIBILIDAD. 32

FIGURA 2 - 6 FÓRMULA DE LA VARIACIÓN EXPANDIDA DEL OPERADOR..... 33

FIGURA 2 - 7 FÓRMULA DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA REPRODUCIBILIDAD..... 34

FIGURA 2 - 8 RESULTADOS DE LA REPRODUCIBILIDAD. 34

FIGURA 2 - 9 FÓRMULA DE LA VARIACIÓN COMBINADA. 35

FIGURA 2 - 10 FÓRMULA DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA REPETITIVIDAD Y REPRODUCIBILIDAD..... 35

FIGURA 2 - 11 RESULTADOS DEL ERROR COMBINADO EXPANDIDO R&R..... 35

FIGURA 2 - 12 FÓRMULA DEL PORCENTAJE DE VARIABILIDAD. 36

FIGURA 2 - 13 FÓRMULA DEL PORCENTAJE DE VARIABILIDAD. 37

FIGURA 2 - 14 FÓRMULA ÍNDICE DE PRECISIÓN/TOLERANCIA. 37

FIGURA 2 - 15 FÓRMULA ÍNDICE PRECISIÓN/ VARIACIÓN TOTAL..... 37

FIGURA 2 - 16 FÓRMULA DESVIACIÓN TOTAL..... 38

FIGURA 2 - 17 TABLA DE CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ÍNDICES DE TOLERANCIA..... 38

FIGURA 2 - 18 FÓRMULA NÚMERO DE CATEGORÍAS DISTINGUIBLES. 39

FIGURA 2 - 19 ESTUDIO R&R LARGO DE LAS MEDICIONES DE AGUA DESIONIZADA. 41

FIGURA 3- 1 FÓRMULA NÚMERO DE CATEGORÍAS DISTINGUIBLES. 45

FIGURA 3- 2 CAUSA-EFECTO DE LAS MEDICIONES DE AGUA DESIONIZADA EN EDSA. 47

FIGURA 3- 3 CINCO PORQUÉS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. 50

INDICE DE TABLAS

TABLA 1-1 REQUISITOS PARA LAS CLASES DE AGUA DESTINADA A ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO 13

TABLA 2- 1 TABLA RESULTADOS APLICACIÓN R&R LARGO. 25

TABLA 2- 2 RANGO DE MEDICIONES POR OPERADOR..... 26

TABLA 2- 3 PROMEDIO DEL RANGO DE MEDICIONES POR OPERADOR..... 27

TABLA 2- 4 MEDIA DE LAS MEDICIONES REALIZADAS POR OPERADOR. 28

TABLA 2- 5 MEDIA DE LOS RANGOS POR OPERADOR. 29

TABLA 2- 6 RANGO DE LAS MEDIAS. 30

TABLA 2- 7 RANGO DE LAS MEDIAS. 31

TABLA 2- 8 TABLA DE RESULTADOS EN ANÁLISIS DE TOLERANCIA. 38

TABLA 2- 9 FÓRMULA NÚMERO DE CATEGORÍAS DISTINGUIBLES. 40

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

- R&R:** Repetibilidad y Reproducibilidad
- pH:** Potencial de Hidrógeno
- P/T:** Porcentaje de Tolerancia
- EM/VarTot:** Error de Medición respecto a la Variación Total
- EDSA:** Empresas Demaria S.A.
- NCh 426/2 of 97:** Norma Chilena 426/2 del año 1997
- ppm:** Partes por millón
- VE:** Varianza del Error
- EM:** Error de Medición
- ES:** Especificación Superior
- EI:** Especificación Inferior
- Nc:** Número de partes
- POE:** Procedimientos operativos estandarizados.

SIMBOLOGÍA

- H⁺:** Ion Hidrógeno
- OH⁻:** Ion Hidróxido
- H₂O:** Agua
- µS/cm:** Micro siemens por centímetro (Unidad de conductividad eléctrica)
- cl⁻:** Ion Cloruro
- UV:** Ultravioleta
- R⁻:** Rango
- X⁻:** Promedio
- σ:** Desviación estándar
- k₁:** Constante del número de ensayos
- k₂:** Constante del número de operadores
- n:** Número de partes
- t:** Número de ensayos

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua desionizada es un factor clave en la industria, especialmente en la producción de productos de higiene, donde su pureza afecta directamente la estabilidad y el desempeño del producto final. En Empresas Demaria S.A., ubicada en Viña del Mar, la variabilidad en los sistemas de medición ha generado incertidumbre sobre la confiabilidad de los datos obtenidos, impactando negativamente en los controles de calidad y ocasionando reprocesos.

El propósito principal de este trabajo es evaluar la calidad de las mediciones realizadas en el agua desionizada a través de un estudio extenso de repetitividad y reproducibilidad (R&R), con el objetivo de asegurar la exactitud de los datos y robustecer los procedimientos de control de calidad. Para alcanzar este objetivo, se escogen muestras representativas de agua desionizada, que son sometidas a mediciones reiteradas bajo condiciones idénticas y reguladas. Luego, los datos son examinados a través de instrumentos estadísticos de calidad que facilitan la identificación de las principales fuentes de variabilidad que influyen en la calidad de las mediciones del agua desionizada.

El estudio se desarrolla en el contexto actual de las operaciones de Empresas Demaria S.A., considerando la necesidad inmediata de mejorar la precisión de las mediciones y de prepararse para futuros desafíos, como la instalación de una segunda planta desionizadora. Este análisis se realiza en la planta de producción de Empresas Demaria S.A., específicamente en su laboratorio de control de calidad, donde se monitorea el agua desionizada utilizada como insumo en los procesos productivos.

La investigación es crucial debido a que, la evaluación de los sistemas de medición permite asegurar datos confiables, los cuales son esenciales para garantizar decisiones operativas acertadas. Además, el conocer con certeza la calidad del agua desionizada generada en la industria refuerza la importancia de este estudio para mantener estándares de calidad elevados y reducir costos asociados a productos fuera de especificación.

Este trabajo no solo busca resolver problemas actuales relacionados con la confiabilidad de las mediciones, sino que también sienta las bases para la mejora continua y la expansión futura de la capacidad productiva de Empresas Demaria S.A.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad de las mediciones del agua desionizada generada en la planta de producción mediante un estudio largo de repetitividad y reproducibilidad, con el fin de asegurar la precisión de los datos obtenidos en el proceso productivo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar un análisis R&R en la variable de conductividad del agua desionizada con el fin de determinar la capacidad de los sistemas de medición.
2. Analizar los resultados del estudio R&R con el objetivo de verificar si los sistemas de medición actuales garantizan el nivel de precisión requerido en el proceso productivo.
3. Sugerir mejoras en los métodos empleados para medir el agua desionizada, basadas en los resultados obtenidos del análisis R&R, a fin de optimizar la exactitud y confiabilidad de los datos.

ALCANCE

La calidad del agua desionizada es crucial para diversas industrias, especialmente en la producción de productos de limpieza, como lo es Empresas Demaria S.A. en Viña del Mar. Sin embargo, la falta de control sobre la estabilidad del producto genera incidentes que afectan e impactan en la productividad, la calidad y la satisfacción del cliente.

El objetivo de este proyecto es valorar la calidad de las mediciones realizadas al indicador de conductividad en el agua desionizada producida en la fábrica mediante un estudio estadístico de repetibilidad y reproducibilidad. Este estudio se centra en identificar las fuentes de variabilidad y valorar su impacto para garantizar que los sistemas de medición actuales cumplan con los requisitos de exactitud requeridos.

El agua desionizada es importante en los productos de higiene porque su pureza reduce la presencia de contaminantes. Las características que muestran la cantidad de iones disueltos son uno de los factores importantes en el control de la calidad. A través de esta investigación será posible mejorar el control de calidad y reducir el costo de productos no especificados, mejorando así las mediciones actuales.

Este programa se centra únicamente en mediciones del parámetro conductividad y no aborda otras variables del agua ni otros aspectos del proceso de producción. El objetivo es evaluarla calidad del método de medición, en caso de ser deficiente, realizar las propuestas de mejoras necesarias para optimizar los resultados.

1. **FUNDAMENTO TEÓRICO**

Este proyecto se enfoca en la evaluación de la calidad de las mediciones del agua desionizada en la planta de producción de Empresas Demaria S.A., mediante un estudio largo de repetitividad y reproducibilidad. El propósito del estudio es identificar fuentes de variación en el sistema de medición de conductividad, parámetro clave que refleja la pureza del agua y su impacto en la calidad de los productos de higiene.

En la fabricación de los productos base agua es determinante contar con un suministro constante de agua de alta pureza. Para ello, las instalaciones de la empresa cuentan con su propia planta generadora de agua desionizada, la cual se monitorea diariamente en el laboratorio de control de calidad, mediante análisis de pH, cloro residual total y conductividad.

“Un punto de partida clave es entender que cualquier proceso de medición genera un error” (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 266). En el caso del agua desionizada, podría resultar en contaminaciones o productos fuera de especificación. Por ello un análisis R&R es determinante para evaluar la repetitividad, entendiéndose como “variación o error de las mediciones sucesivas sobre el mismo objeto con un instrumento bajo las mismas condiciones (un operador)” (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 286) y la reproducibilidad como “variabilidad o error de las mediciones sobre el mismo objeto con un instrumento bajo condiciones cambiantes (diferentes operadores)” (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 286) asegurando así la confiabilidad de las mediciones.

Este análisis no solo busca garantizar que las mediciones cumplan con los estándares requeridos, sino que también propone fortalecer los procesos de control de calidad, permitiendo que los hallazgos puedan contribuir a reducir reprocesos y asegurar la satisfacción del cliente.

Un desafío clave en este proyecto es lograr un conocimiento certero de la calidad del agua generada en la planta, permitiendo distinguir la desviación propia del proceso productivo, de la desviación derivada de las mediciones. Estos datos no solo serán determinantes para mejorar los sistemas de control actuales, sino también para servir como base en futuros proyectos, como la inminente instalación de una segunda planta desionizadora.

En resumen, el análisis R&R largo proporcionará datos esenciales para optimizar las mediciones, reducir la variabilidad y mejorar la gestión de la calidad en la producción.

Esto asegurará que los sistemas de medición actuales sean confiables, y permitirá a la empresa abordar desafíos futuros con una base sólida de información.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.

Empresas Demaria S.A. es una reconocida empresa nacional fundada hace más de 120 años, con sede en calle Limache 3535 en la ciudad de Viña del Mar, Región de Valparaíso. La manufacturera se ha consolidado como un actor clave en la industria de productos de consumo masivo, abarcando áreas como limpieza, higiene personal y productos para el cuidado del hogar. (Empresas Demaria S.A., 2024)

Con una sólida trayectoria, Empresas Demaria ha demostrado un compromiso constante con la calidad, innovación y la sostenibilidad en sus operaciones. Sus productos son ampliamente reconocidos y distribuidos tanto en el mercado nacional como en algunos mercados internacionales. (Empresas Demaria S.A., 2024)



Figura 1-1 Imagen Ubicación Empresas Demaria S.A.

Fuente: Google Maps.

1.1.1. Historia y evolución.

La historia de Empresas Demaria tiene su origen a inicios del siglo XX, cuando se da inicio a un pequeño emprendimiento familiar en la ciudad de Viña del Mar. A lo largo de los años, la empresa experimentó un notable crecimiento, adaptándose a las demandas de un mercado cada vez más competitivo y globalizado. (Empresas Demaria S.A., 2024)

Un factor clave en su evolución ha sido la capacidad de diversificar su portafolio de productos, abarcando marcas líderes en diversas categorías como detergentes, jabones y productos de cuidado personal. Su enfoque en la excelencia operativa y la cercanía con los consumidores ha sido un pilar fundamental en su éxito. (Empresas Demaria S.A., 2024)

1.1.2. Giro y actividad económica.

Empresas Demaria se dedica principalmente a la fabricación, distribución y comercialización de productos de consumo masivo. Su portafolio incluye reconocidas marcas, como son: Virginia, Arom, Igenix, y Brillina, líneas de productos ampliamente usados por los hogares chilenos. (Virginia, 2024)

El modelo de negocio de la empresa está basado en desarrollo de productos accesibles y de alta calidad, en conjunto con estrategias de distribución eficaces que garantizan una amplia cobertura en el mercado del territorio nacional. Además, EDSA ha implementado iniciativas orientadas a la sostenibilidad, destacándose por reducir el impacto ambiental en sus procesos productivos. (Virginia, 2024)

1.1.3. Visión y misión.

La manufacturera nacional mantiene expresa públicamente su misión y visión en sus canales de difusión. En su visión se establece “Ser la mejor empresa en democratizar el acceso a los productos de consumo masiva, con marcas confiables y cercanas a los consumidores.” (Empresas Demaria S.A., 2024)

Mientras que en la misión se define “Democratizar el uso de los productos de consumo masivo, entregando soluciones efectivas y eficientes, mejorando la calidad de vida de las personas”. (Empresas Demaria S.A., 2024)

1.1.4. Contexto industrial y relevancia.

Empresas Demaria opera en un sector altamente competitivo y dinámico, donde la diferenciación por calidad, precio y sostenibilidad son factores críticos. En este contexto la manufacturera se ha posicionado como un referente, gracias a su capacidad de entender las necesidades del consumidor y responder a las tendencias del mercado combinando la tradición y la innovación para mantener su liderazgo.

Gracias a su experiencia en el rubro EDSA ha desarrollado múltiples proyectos a lo largo de sus décadas de operación para mejorar la calidad de sus productos, especialmente aquellos que proporcionan estabilidad a sus formulaciones. Para conseguir este cometido se ha puesto foco en la calidad de las materias primas y en la inversión en equipamiento para su obtención como es el caso de la planta de tratamiento de agua para la obtención de agua desionizada.

1.2. **AGUA DESIONIZADA**

“El agua desionizada es un tipo de agua purificada a la que se le han eliminado prácticamente todos los iones minerales, como el calcio, magnesio, sodio, cloruros y sulfatos, mediante procesos como la ósmosis inversa o el intercambio iónico” (Robert, 2000).

La alta pureza del agua desionizada la hace ideal para aplicaciones industriales, de laboratorio y en procesos donde la presencia de impurezas puede interferir con la calidad del producto final, como en la fabricación de productos químicos, farmacéuticos y electrónicos. “Al carecer de conductividad eléctrica significativa, el agua desionizada es especialmente útil en sistemas de enfriamiento, calderas y equipos de precisión, asegurando un rendimiento óptimo y evitando acumulaciones de residuos minerales”. (Robert, 2000)

1.2.1. Importancia del agua desionizada en la industria

El agua desionizada es un insumo fundamental en la industria debido a su alto nivel de pureza, el cual permite evitar impurezas y contaminantes que podrían interferir con procesos críticos. En la industria farmacéutica y química, se utiliza para garantizar la

calidad y seguridad de productos al eliminar posibles reacciones indeseadas. En el sector electrónico, es esencial para la limpieza y fabricación de componentes sensibles que requieren ambientes libres de iones que puedan causar fallos. Asimismo, en aplicaciones industriales como calderas y sistemas de enfriamiento, su uso evita incrustaciones y corrosión, prolongando la vida útil de los equipos y el correspondiente impacto que esto podría tener en la calidad de los productos elaborados en ella. “Su importancia radica en su capacidad para asegurar eficiencia, precisión y calidad en procesos productivos, donde cualquier contaminación puede comprometer resultados finales”. (Robert, 2000)

1.3. TRATAMIENTO DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL

El agua es un recurso fundamental para diversas actividades industriales, ya que influyen directamente en la calidad de los productos y la eficiencia de los procesos. En el caso de Empresas Demaria S.A., el agua desionizada es un insumo crítico, especialmente en la elaboración de productos que requieren altos estándares de pureza para darle estabilidad a su formulación, como es el caso de detergentes, lavalozas y productos clorados, entre otras formulaciones de consumo masivo.

Para cubrir esta demanda, la compañía dispone de una planta de tratamiento de agua basada en procesos de intercambio iónico, creada específicamente para generar agua desionizada a partir de agua potable. Este procedimiento garantiza la remoción de impurezas iónicas y controla parámetros como el pH, asegurando así que el agua producida satisfaga las características necesarias para su utilización en la industria. (Robert, 2000, págs. 16-45)

1.3.1. Descripción del proceso.

La planta desionizadora de EDSA utiliza un sistema de intercambio iónico compuesto por varias etapas que transforman el agua potable en agua desionizada. A continuación, se describen cada una de sus etapas:

- **Entrada de agua potable.** El proceso inicia con el abastecimiento de agua potable a la planta, proveniente de la red de alcantarillado. Esta agua ya ha sido tratada para ser apta para el consumo humano, pero contiene minerales

y otros iones disueltos que deben ser eliminados para cumplir con los requerimientos industriales.

- **Columna de resina para descationización.** El agua potable tras hacer su ingreso a la planta de tratamiento inicia el proceso de descationización, donde el agua pasa a través de una columna de resina cargada con iones de hidrógeno (H^+). Esta resina intercambia los cationes presentes en el agua, como el calcio, magnesio, sodio y potasio, por iones de hidrógeno, de esta manera logra eliminar los cationes presentes en el agua.
- **Columna de resina para desmineralización.** En esta fase, el agua atraviesa una columna de resina llena de iones de hidróxido (OH^-), los cuales tienen la tarea de intercambiarse con los aniones que se encuentran en el agua, tales como cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Cuando los iones H^+ y OH^- se combinan, se produce agua pura (H_2O), lo que suprime casi completamente los minerales disueltos. Este procedimiento se denomina desmineralización y tiene como objetivo disminuir la conductividad eléctrica del agua a niveles mínimos, lo que señala una elevada pureza.
- **Columna tampón o de regulación de pH.** Esta constituye la fase final del proceso, en ella el agua pasa por una columna que regula el pH de salida para asegurar que se mantengan los niveles óptimos, típicamente cercanos a la neutralidad (pH 7). Esta regulación es esencial para evitar problemas de corrosión en las tuberías y equipos, así como para cumplir con los requisitos específicos de los procesos industriales.
- **Salida de agua desionizada.** Una vez completadas estas etapas, se obtiene agua desionizada de alta pureza, lista para su utilización en los procesos de producción de Empresas Demaria. Esta agua se caracteriza por su baja conductividad eléctrica, ausencia de minerales y equilibrio en su pH, lo que la hace ideal para aplicaciones industriales exigentes.



Figura 1- 2 Planta desionizadora de aguas Empresas Demaria S.A.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.2. Ventajas del uso de agua desionizada.

Las aguas de alta pureza ofrecen múltiples beneficios en aplicaciones industriales, entre, como proporcionar calidad y consistencia en los productos terminados, al evitar la presencia de impurezas que puedan interferir en las formulaciones químicas. Esto a su vez, facilita el cumplimiento de estándares ambientales y de calidad esenciales para mantener la competitividad en el mercado.

Otra ventaja considerable es la reducción de costos operativos y de mantención, ya que las aguas de alta pureza evitan la formación de incrustaciones y corrosión en equipos y tuberías prolongando la vida útil de estos. Además, se evitan reprocesos y retrabajos derivados del arrastre de óxido y minerales derivados de esta misma causal.

En este contexto la planta desionizadora es una pieza clave para garantizar la eficiencia de los procesos de producción y la calidad de los productos. La implementación de esta tecnología refuerza el compromiso de la empresa con la innovación y la

sostenibilidad, asegurando un uso responsable de los recursos. (Robert, 2000, págs. 16-45)

1.4. PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA DESIONIZADA

El control de calidad del agua desionizada es una etapa crucial para garantizar que el agua utilizada en los procesos productivos cumpla con las especificaciones necesarias. En el caso de EDSA este proceso asegura que el agua desionizada generada por la planta cumpla con los estándares internos basados en los requerimientos de calidad de la Norma Chilena NCh 426/2 of 97 para agua desionizada, requisitos necesarios para preservar la integridad y calidad de los productos fabricados y evitar problemas técnicos en los equipos.

1.4.1. Proceso de monitoreo de calidad.

El monitoreo de la calidad del agua desionizada generada por la planta es un proceso que se realiza de manera sistemática, y se ejecuta siguiendo un procedimiento bien definido que garantiza resultados precisos y confiables. Este proceso se desarrolla en las siguientes etapas:

- **Muestreo de agua.** Cada lote de agua desionizada producido por la planta es sometido a un proceso de muestreo riguroso. Una muestra representativa del agua es tomada de la llave de salida de la planta y enviada al laboratorio de calidad, donde se analizan los parámetros críticos que determinan su conformidad con las especificaciones internas establecidas para su aprobación.
- **Análisis en el laboratorio de control de calidad.** La muestra de agua desionizada se recepciona en envase de vidrio de 1 litro, se realiza una inspección visual donde se observa que no exista turbidez o presencia de precipitado, inmediatamente después se realizan los análisis correspondientes. Los parámetros que se evalúan son: conductividad eléctrica, pH y cloro libre.
- **Comparación con los requisitos dos.** Se comparan los resultados logrados en el laboratorio con los parámetros internos establecidos. Estos definen estándares concretos para asegurar la calidad del agua desionizada para usos industriales. Si

los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites permitidos, el lote de agua es autorizado para su utilización en la fabricación. Si algún indicador no se ajusta a los estándares, se implementan acciones correctivas y se verifica el rendimiento de la planta.

1.4.2. Requerimiento de calidad para el agua desionizada

Requisito interno basado en la norma 426/2. Of97 que clasifica y establece los niveles de calidad del agua desionizada para diferentes usos según su calidad, se observa un extracto de las clases de agua desionizada en la tabla 1-1. En función de ella se establece como requisito interno pH entre 5,0 y 7,0 conductividad menor a 5µS/cm y cl⁻ libre menor a 0,1ppm. Esta agua no solo alimenta los sistemas productivos, además es utilizada ampliamente en los laboratorios de desarrollo y control de calidad por su nivel de pureza y la capacidad de cumplir con los requisitos establecidos en la norma de Agua desionizada para análisis fisicoquímicos.

Requisitos de calidad		Unidad	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Métodos de ensayo
1	pH a 25°C	-	-	-	5 - 7	Manual SISS
2	Conductividad, a 25°C, máxima	µS/cm	2	5	10	2510 B

Tabla 1-1 Requisitos para las clases de agua destinada a análisis físico químico
Fuente: Norma Chilena NCh426/2. Of.97.

1.4.3. Determinación de pH.

El análisis de pH en agua desionizada se realiza para verificar que se mantenga dentro de rango 5,0 – 7,0 cercano a la neutralidad. El análisis se realiza con un potenciómetro y el procedimiento se encuentra estandarizado según el paso a paso indicado en el documento interno RE-CAL-113. Es fundamental contar con el equipo previamente calibrado según los requerimientos indicados en el instructivo de calibración IT-CAL-051.

1.4.4. Determinación de cloro libre.

Este análisis asegura que los niveles de cloro libre en el agua sean mínimos o nulos. La cuantificación de cloro libre se realiza por colorimetría mediante el uso de un

espectrofotómetro UV visible y un kit de análisis de cloro libre, dicho procedimiento se encuentra estandarizado y su paso a paso está disponible en el documento interno DOI-CAL- 109.

1.4.5. Determinación de la Conductividad eléctrica.

Este parámetro mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, lo cual está directamente relacionado con la presencia de iones disueltos. Dicho análisis se realiza con un Conductímetro modelo Orion A212 y este debe estar previamente calibrado.



Figura 1- 3 Conductímetro modelo Orion A212.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.6. Importancia del control de calidad.

La supervisión de la calidad del agua desionizada influye notablemente en varios aspectos del proceso de producción de Empresas Demaria, en particular en la calidad del producto final. Esto se debe a que el agua desionizada empleada en la producción de productos no contenga impurezas que puedan perjudicar su estabilidad, rendimiento o aspecto. Por otro lado, el seguimiento continuo evita inconvenientes como la corrosión o el deterioro prematura de los sistemas industriales. Así, la compañía reafirma su dedicación hacia la excelencia en las operaciones y la satisfacción del cliente.

1.5. CALIDAD DE LAS MEDICIONES.

El control estadístico de la calidad se fundamenta en la aplicación de herramientas y metodologías matemáticas para supervisar y optimizar procedimientos. En el ámbito industrial, resulta crucial asegurar que los procesos se ajusten a los criterios de calidad establecidos, minimizando los residuos y garantizando la satisfacción del consumidor.

La gestión de la calidad no solo implica medir parámetros, para que esta sea efectiva también debe comprender las causas subyacentes de la variabilidad en los sistemas de medición. Mediante la comprensión y la utilización del pensamiento estadístico, además de la aplicación de conceptos y técnicas estadísticas se puede entre otras aplicaciones realizar un monitoreo eficaz de los procesos, es decir, detectar con rapidez y a bajo costo anormalidades en los procesos y sistemas de medición. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 11)

Entre los métodos para evaluar el funcionamiento de un sistema de mediciones el estudio R&R cumple un rol fundamental, ya que esta técnica permite analizar tanto la repetibilidad como la reproducibilidad, aspectos claves para garantizar que los sistemas de medición sean confiables y precisos. En la figura 1-4 se puede observar un mapa conceptual que resume alguna de las distintas técnicas para evaluar los sistemas de calidad de las mediciones, entre ellas se encuentra la herramienta denominada estudio de R&R Largo, técnica que mediante el cálculo de medias y rangos permite un profundo análisis respecto de los sistemas de medición aplicados a los procesos, y a su vez permite realizar inferencia estadística respecto a los factores que generan mayor variabilidad en el procesos de medición. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 266)

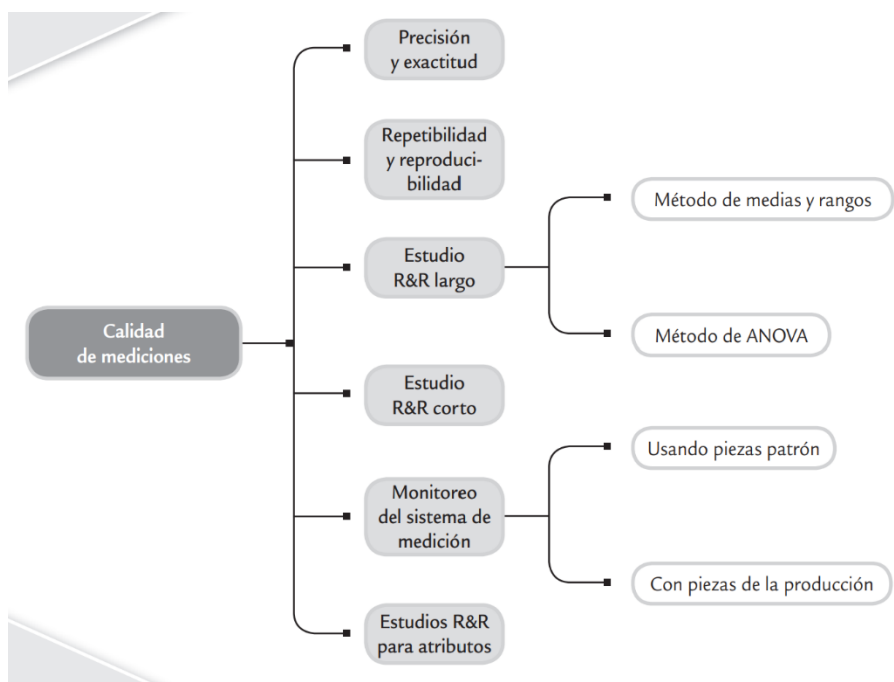


Figura 1- 4 Diagrama de la desviación estándar del error del equipo.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

1.5.1. Conceptos básicos

Es frecuente que al realizar una medición respecto de una variable se tienda a creer ciegamente en la veracidad de estos datos, sin embargo, las mediciones no están exentas de errores y es crucial en cualquier proceso de medición cuestionarse cuál es el grado de error que aportan los sistemas de medición a los procesos. En función de esta premisa se puede entender que los sistemas de mediciones se ven afectados tanto por la variabilidad propia del producto más el error del proceso de medición. Los principales factores que contribuyen al error del proceso de medición son el equipo utilizado para obtener las mediciones, los operadores que realizan dicho proceso y la variación dentro de la muestra. (Gutierrez & Vara, 2018, págs. 267-269)

La variabilidad de la muestra puede verse afectada por la diversidad del material, desviaciones en los procesos de producción, condiciones de almacenaje y gestión, selección no representativa de las muestras y deterioro a lo largo del tiempo. Estas variaciones influyen en las características de las muestras y, en consecuencia, en la uniformidad de las mediciones. Para reducir esta variabilidad, es esencial supervisar los procesos productivos, asegurar un almacenamiento apropiado y garantizar una selección representativa de las muestras. La variabilidad del operador se puede ver afectada principalmente por factores como la experiencia y habilidad del operador, la adherencia a procedimientos estandarizados, las condiciones del entorno de trabajo y la fatiga o

distracción del operador. Estos factores son los más comunes y los que tienen mayor influencia en la consistencia de las mediciones. (Gutierrez & Vara, 2018, págs. 267-269)

La variabilidad del equipo se puede ver afectada directamente por los siguientes factores:

- Calibración, resultado relación entre el resultado de la medición de un patrón y la magnitud verdadera de este.
- Estabilidad, cambio del instrumento con el transcurso del tiempo. El instrumento no debería tener variaciones significativas en el tiempo respecto de sus mediciones.
- Repetibilidad, la variación observada cuando un operador mide de manera repetida la misma pieza con el mismo instrumento.
- Linealidad, la exactitud a lo largo del rango de operación del instrumento.
- Sensibilidad del equipo o resolución del equipo, hace referencia a la capacidad del equipo de medición para discriminar entre piezas similares. La resolución del equipo se puede estimar y reportar mediante la obtención del número de categorías diferente.

Estas variables que afectan la variabilidad del equipo impactan directamente en la precisión y exactitud de las mediciones que son dos manifestaciones del error

- Precisión, es la variación o error que presentan las mediciones repetidas del sistema de medición sobre el objeto o parte que se quiere medir. Se conforma de la repetibilidad y la reproducibilidad.
- Exactitud, se entiende como el desfase producido entre las mediciones respecto del valor verdadero que se supone conocido (estándar)

Es importante que el sistema de medición sea preciso y exacto, es decir, que al medir el mismo objeto arroje resultados similares o de poca dispersión y que al generar mediciones, tanto individuales como promedio de estas, tengan una magnitud muy similar al valor verdadero. (Gutierrez & Vara, 2018, págs. 267-269)

1.5.2. Estudio largo de Reproducibilidad & Repetibilidad

La repetitividad y la reproducibilidad son los dos componentes principales que determinan la precisión de un sistema de medición. La repetitividad representa la consistencia de un instrumento de medición cuando realiza varias mediciones del mismo objeto bajo condiciones idénticas (mismo operador y entorno). Mientras que la reproducibilidad determina la consistencia del sistema cuando se mide el mismo objeto utilizando distintos operadores. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 268)

En los estudios sobre Repetitividad y Reproducibilidad (R&R), se examina de manera experimental qué porcentaje de la variabilidad total detectada en los datos se deriva del error de medición. Esto posibilita establecer si ese error es relevante al contrastarlo con la variabilidad intrínseca del producto y las tolerancias definidas para el atributo de calidad que se evalúa. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 268)

“Los estudios R&R largos identifican tres fuentes principales de variabilidad: el producto, el instrumento y los operadores” (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 269). El producto aporta la variación natural entre las piezas o muestras analizadas. El instrumento contribuye con la variabilidad debido al error inherente al equipo de medición. El operador la variabilidad introducida por las diferencias entre las personas que realizan las mediciones. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 269)

La variabilidad total observada se compone de estas tres variabilidades y se representa mediante la fórmula representada en la figura 1-5 Ecuación de la variabilidad total observada. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 269)

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{prod}^2 + \sigma_{instr}^2 + \sigma_{oper}^2$$

Figura 1- 5 Ecuación de la variación total.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018

De la fórmula anterior se puede considerar la variación del instrumento como la variación de la repetibilidad y la variación del operador como la variación de la reproducibilidad. En función de esto se puede entender la variabilidad o el error de las

mediciones debido a la repetibilidad y reproducibilidad, tal como lo muestra la figura 1-6 variabilidad de las mediciones. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 269)

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repeti}^2 + \sigma_{reprod}^2$$

Figura 1- 6 Ecuación de la variación total.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

1.6. HERRAMIENTAS DE CALIDAD COMPLEMENTARIAS.

1.6.1. Diagrama de Ishikawa

Es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con sus posibles causas. El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado es de suma importancia para encontrar las diferentes causas que afectan el problema bajo análisis y de esta forma se busca evitar errores de manera directa las soluciones sin cuestionar cuales son las verdaderas causas. El uso de este diagrama en conjunto con los cinco por qué, ayudará a ver el problema desde diferentes perspectivas. Dependiendo de cómo se buscan y se organizan las causas en la gráfica los diagramas se pueden clasificar en tres tipos: método de las 6M, flujo de proceso, estratificación (también llamado enumeración de causas). (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 148)

El método de las 6M consiste en agrupar las causas potenciales en seis ramas, estas son: métodos de trabajo, mano de obra, materiales, maquinaria, mediciones y medio ambiente. Estos seis elementos definen de manera global los procesos y aportan parte de la variabilidad del producto final, por lo que es natural esperar que la causa de la variabilidad de los procesos se encuentre contenida en alguno de estos seis aspectos. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 148)

1.6.2. Técnica de los 5 por qué

Es una herramienta de análisis que se utiliza para identificar la causa raíz de un problema mediante un enfoque repetitivo y estructurado. Consiste en formular repetidamente la pregunta “¿Por qué?” para profundizar en las causas subyacentes del

problema, usualmente hasta cinco niveles de cuestionamiento, aunque pueden ser más o menos dependiendo de la complejidad del problema. (Carrasco, 2009, pág. 122)

1.6.3. Impacto de los estudios de variabilidad en el control de procesos

El estudio R&R ayuda a comprender y cuantificar qué parte del error total observado en las mediciones proviene del instrumento, los operadores o la variabilidad del producto. Esto es crucial para determinar si un sistema de medición es lo suficientemente confiable para un proceso de control de calidad. Además, es una base para la optimización de métodos y procedimientos o la estandarización de estos.

Detectar y reducir las fuentes de variabilidad en el sistema de medición en los estudios R&R potencia la precisión de las mediciones. Para preservar una correcta interpretación de los datos, y tomar decisiones informadas, también desalentando que mediciones inexactas lleguen a conclusiones erróneas acerca del proceso. La metrología juega un rol esencial en la estadística para el análisis de las mediciones, así como asegura y expresa las variaciones que se han derivado en el equipo de medición como el conductivímetro

Esta clase de estudios suelen tener impacto los estudios de variabilidad son la inversión en capacitación y estandarización de procesos. Aspectos que suelen ser desplazados en función de otras necesidades pero que pueden tener fuertes repercusiones en la calidad de las mediciones y se pueden evidenciar mediante la correcta aplicación de un estudio de variabilidad.

En resumen, la correcta aplicación de un estudio largo de repetibilidad y reproducibilidad es fundamental para la fase de recopilación de datos. Su importancia radica en que posterior a la aplicación se ejecuta el análisis de la data obtenida, de la cual se desprende el sustento de la presente investigación, por ende, esta fase es fundamental para poder realizar un correcto análisis crítico respecto de la calidad de las mediciones obtenidas en el laboratorio de control de calidad.

2. **ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD & REPRODUCIBILIDAD.**

La metodología del proyecto se estructura en tres fases, cada una de ellas en concordancia con los objetivos específicos planteados para cumplir el cometido de evaluar la calidad de las mediciones de conductividad del agua desionizada en la planta de Empresas Demaria S.A.

La primera etapa consiste en la aplicación del análisis R&R en la conductividad del agua desionizada, en esta fase se ejecuta el estudio de repetitividad y reproducibilidad largo, y se recopila la data de las mediciones de conductividad de la matriz de agua para su posterior análisis. Respecto de la generación de agua desionizada en la planta, se cuantifican 10 muestras, correspondientes a una sola partida de agua producida por esta, cada una de estas se etiqueta y entrega de manera aleatorizada a los analistas. Cada muestra se analiza en triplicado por cada participante, con mediciones sucesivas bajo idénticas condiciones, cabe destacar que los operadores no conocen los resultados previos ni cuál pieza está midiendo. En este caso el estudio se desarrolla con un total de tres analistas, por ende, se genera una matriz de 90 datos para la identificación de errores de medición inherente al sistema.

En una segunda fase del estudio se analizan los resultados y se evalúa el sistema de medición en función de los datos obtenidos de la aplicación del estudio R&R. Mediante un trabajo de análisis estadístico se obtienen las variaciones propias del sistema de medición expresadas como: repetibilidad, reproducibilidad y variación combinada. De estos indicadores se puede desprender la estimación del índice de precisión/tolerancia (P/T) y la índice precisión /variación total (EM/VarTot). En función de este análisis estadístico se determina la variación propia del sistema de medición, proporcionando una base sólida para identificar mejoras necesarias al sistema de control de calidad de las mediciones de conductividad.

En la fase final se generan propuestas de mejora en el método de medición. Aquí se busca optimizar los métodos de medición en función de los resultados del análisis R&R. Dichas propuestas se presentan mediante un Diagrama de Ishikawa, el cual se confecciona usando el método de las 6M, junto con este se genera un cuestionamiento de los cinco porqués. En función de la evidencia presentada por estas tres herramientas se consignan los principales motivos que generan las desviaciones y se levanta un plan de acción acorde al análisis causal planteado.

En el presente capítulo se presentan las condiciones en las que se desarrolla el estudio de variabilidad, las mediciones obtenidas en base a la matriz de agua, los

resultados obtenidos de dicho estudio y el respectivo análisis crítico desprendido de estos indicadores.

2.1. APLICACIÓN DEL ESTUDIO R&R

La aplicación de un estudio de repetitividad y reproducibilidad (R&R) largo se realiza mediante una estructura que asegura la obtención de datos representativos y confiables para el análisis de la calidad del sistema de medición. A continuación, se establecen los pasos a seguir y las consideraciones que se deben tener durante el desarrollo de un estudio R&R:

- Se debe seleccionar un conjunto de 10 partes representativas del proceso de producción, en este caso 10 muestras de agua desionizada de la misma partida (lote de producción).
- Se debe garantizar que las piezas seleccionadas sean homogéneas y estén en condiciones adecuadas para ser medidas sin interferencias externas.
- Se establece el número de ensayos por operador, es decir, cuántas veces cada operador medirá la misma muestra. Aunque el mínimo recomendado es de 2 ensayos por muestra, se sugiere realizar 3 para aumentar la robustez estadística del análisis. Debido a esto se consideran 3 analistas (operadores) para el desarrollo de este estudio.
- Se calibra el equipo previo a su funcionamiento. Dicha calibración se realiza en función del rango de trabajo y en tres puntos: 1.3, 5 y 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Se etiqueta cada muestra y distribuyen a cada operador en orden aleatorio, asegurando que no conozcan ni los resultados previos ni cuál de las piezas está midiendo. Así se garantiza un manejo ordenado y anónimo de las mediciones.
- Se realiza el análisis (en orden aleatorio y anónimo), de todas las muestras asignadas, siguiendo estrictamente las técnicas y los puntos de medición predefinidos.

- Se redistribuyen las muestras nuevamente en un orden diferente tras la finalización de la primera ronda de mediciones, y el siguiente operador procede con su ronda de mediciones.
- Se repite el ciclo de medición descrito anteriormente hasta completar el número de ensayos definidos para cada operador. Los resultados obtenidos se mantienen en reserva hasta el final de la aplicación, evitando que sean conocidos por los analistas.
- Se registran todos los resultados obtenidos en una matriz que permita identificar fácilmente la variabilidad entre operadores, dentro de cada operador y entre las muestras.
- Se realiza un análisis estadístico detallado, aplicando herramientas como el cálculo de rangos, promedios y desviaciones estándar, para descomponer las fuentes de variabilidad en componentes de repetitividad (equipo) y reproducibilidad (operadores).
- Se comparan los indicadores obtenidos (como porcentaje de variación respecto a la tolerancia, índice de precisión/variación total y número de categorías distinguibles) con criterios establecidos de aceptación.
- Se evalúa la capacidad del sistema de medición para cumplir con los requisitos del proceso en función del análisis realizado.
- Se definen acciones correctivas en caso de identificarse deficiencias significativas.

2.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS R&R.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del estudio largo de Repetitividad y Reproducibilidad (R&R), aplicado a las mediciones de conductividad del agua desionizada producidas en la planta desionizadora y evaluadas en el laboratorio de control de calidad de EDSA. Este análisis tiene como objetivo evaluar la

calidad de las mediciones, asegurando que los datos recopilados sean confiables para la toma de decisiones en el proceso productivo.

Para la aplicación de este estudio se consideran tres operadores (A, B y C) que realizan tres ensayos para cada una de las diez muestras, tal como se describe en el fundamento metodológico. Tras la aplicación de este estudio se genera un matriz de 90 datos que permite analizar la variabilidad tanto entre operadores como dentro de cada operador.

La matriz obtenida se presenta en la tabla 2-1, donde cada fila (horizontal) representa una muestra, mientras que las columnas (verticales) reflejan los resultados de cada ensayo obtenido por cada uno de los operadores. Esta disposición en los datos permite observar la variabilidad tanto entre ensayos individuales de un mismo operador como entre los distintos operadores.

Muestra	Operador A			Operador B			Operador C		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
1	4,832	4,952	4,982	5,038	5,043	5,127	5,232	4,999	5,310
2	4,785	4,815	4,997	4,544	4,554	4,770	4,945	5,002	5,020
3	4,430	4,445	4,773	6,041	5,815	5,831	5,664	5,697	5,713
4	6,592	6,734	6,759	5,162	5,591	5,351	5,713	6,710	6,708
5	4,463	4,503	4,504	4,413	4,397	4,343	4,411	4,421	4,423
6	4,573	4,546	4,511	4,322	4,358	4,354	4,423	4,497	4,501
7	4,478	4,472	4,469	4,351	4,358	4,352	4,501	4,433	4,439
8	4,507	4,512	4,504	4,357	4,363	4,411	4,436	4,436	4,444
9	4,357	4,378	4,379	5,381	5,342	5,305	5,084	5,089	5,096
10	4,521	4,492	4,543	4,998	5,031	4,986	4,974	4,976	4,982

Tabla 2- 1 Tabla resultados Aplicación R&R largo.

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una inspección visual de la tabla 2-1 se puede observar que en la matriz de datos existe variabilidad dentro de cada operador y entre ellos con datos que oscilan entre los 4,322 μ S/cm y los 6,759 μ S/cm. Respecto de los operadores, quien registra lecturas más altas e incluso aporta el valor máximo de medición en la matriz es el operador C. Para los resultados para una misma muestra, se observan diferencias significativas y aleatorias, lo que evidencia falta de uniformidad en las mediciones. patrones consistentes ni dentro de los operadores ni entre los operadores.

En función del análisis derivado de la tabla 2-1 se sugiere que las mediciones presentan una variabilidad aleatoria que podría deberse a inconsistencias en el sistema de

medición o en los métodos empleados. Por ende, se refuerza la necesidad de un análisis cuantitativo para evaluar la magnitud de las fuentes de variabilidad y con esta evidencia trabajar en mejorar el proceso de análisis de agua desionizada.

2.2.1. Rangos de mediciones por operador.

Se obtiene el rango de mediciones por pieza de cada operador. El rango se obtiene de la diferencia entre el valor mayor y el valor menor de los ensayos realizados a cada muestra por cada operador. El rango proporciona información directa sobre el error de las mediciones, es decir, sobre la repetibilidad debido a que son resultados sobre la misma pieza y realizados por el mismo operador. En la tabla 2-2 Rango de mediciones por operador se presentan los rangos obtenidos por cada una de las 10 muestras analizadas por operador de manera consecutiva.

El proceso de cálculo de cada uno de estos rangos se obtuvo mediante la confección de una planilla Excel en base a la matriz de datos obtenida de la aplicación del estudio R&R. En ella se observa en orden descendente los resultados obtenidos por cada muestra. Las columnas se señalan en color para facilitar su identificación y se disponen de izquierda a derecha según el orden previamente establecido: operador A (izquierda), operador B (centro) y operador C (derecha).

Operador A					Operador B				Operador C			
Muestra	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3	Rango	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3	Rango	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3	Rango
1	4,832	4,952	4,982	0,150	5,038	5,043	5,127	0,089	5,232	4,999	5,310	0,311
2	4,785	4,815	4,997	0,212	4,544	4,554	4,770	0,226	4,945	5,002	5,020	0,075
3	4,430	4,445	4,773	0,343	6,041	5,815	5,831	0,226	5,664	5,697	5,713	0,049
4	6,592	6,734	6,759	0,167	5,162	5,591	5,351	0,429	5,713	6,710	6,708	0,997
5	4,463	4,503	4,504	0,041	4,413	4,397	4,343	0,070	4,411	4,421	4,423	0,012
6	4,573	4,546	4,511	0,062	4,322	4,358	4,354	0,036	4,423	4,497	4,501	0,078
7	4,478	4,472	4,469	0,009	4,351	4,358	4,352	0,007	4,501	4,433	4,439	0,068
8	4,507	4,512	4,504	0,008	4,357	4,363	4,411	0,054	4,436	4,436	4,444	0,008
9	4,357	4,378	4,379	0,022	5,381	5,342	5,305	0,076	5,084	5,089	5,096	0,012
10	4,521	4,492	4,543	0,051	4,998	5,031	4,986	0,045	4,974	4,976	4,982	0,008

Tabla 2- 2 Rango de mediciones por operador.

Fuente: Elaboración propia.

Los rangos de mediciones por operador evidencian diferencias en la variabilidad de sus propias mediciones. El operador A tiene mediciones que oscilan entre 0,008 y 0,343, un espectro de mediciones bastante parecido al logrado por el operador B, que presenta valores de rango entre 0,007 y 0,429, demostrando consistencia en sus

mediciones. En cuanto al operador C, logra resultados que varían entre 0,008 y 0,997, lo que señala una elevada variabilidad y una consistencia reducida en sus mediciones.

2.2.2. Promedio de los rangos y media de las mediciones realizadas por operador.

Se obtiene el promedio de los rangos de cada operador para la totalidad de las piezas (muestras) evaluadas, para ello se realiza una sumatoria de los rangos obtenidos y se divide en la cantidad de muestras medidas obteniendo los siguientes resultados:

- Promedio de Rangos para Operador A (R^-A): 0,107 $\mu\text{S/cm}$
- Promedio de Rangos para Operador B (R^-B): 0,126 $\mu\text{S/cm}$
- Promedio de Rangos para Operador C (R^-C): 0,162 $\mu\text{S/cm}$

La obtención de dichos resultados se puede observar en detalle en la siguiente tabla:

Operador A					Operador B				Operador C			
Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango
1	4,832	4,952	4,982	0,150	5,038	5,043	5,127	0,089	5,232	4,999	5,310	0,311
2	4,785	4,815	4,997	0,212	4,544	4,554	4,770	0,226	4,945	5,002	5,020	0,075
3	4,430	4,445	4,773	0,343	6,041	5,815	5,831	0,226	5,664	5,697	5,713	0,049
4	6,592	6,734	6,759	0,167	5,162	5,591	5,351	0,429	5,713	6,710	6,708	0,997
5	4,463	4,503	4,504	0,041	4,413	4,397	4,343	0,070	4,411	4,421	4,423	0,012
6	4,573	4,546	4,511	0,062	4,322	4,358	4,354	0,036	4,423	4,497	4,501	0,078
7	4,478	4,472	4,469	0,009	4,351	4,358	4,352	0,007	4,501	4,433	4,439	0,068
8	4,507	4,512	4,504	0,008	4,357	4,363	4,411	0,054	4,436	4,436	4,444	0,008
9	4,357	4,378	4,379	0,022	5,381	5,342	5,305	0,076	5,084	5,089	5,096	0,012
10	4,521	4,492	4,543	0,051	4,998	5,031	4,986	0,045	4,974	4,976	4,982	0,008
Sumatoria	47,538	47,849	48,421	-	48,607	48,852	48,830	-	49,383	50,260	50,636	-
Promedio	($\bar{X}A$)	4,794	R-A	0,107	($\bar{X}B$)	4,876	R-B	0,126	($\bar{X}C$)	5,009	R-C	0,162

Tabla 2- 3 Promedio del rango de mediciones por operador.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los promedios de los rangos para los tres operadores revela diferencias claras en la consistencia de sus mediciones. El operador A presenta el promedio de rango más bajo, con 0,107 $\mu\text{S/cm}$, lo que indica que sus mediciones tienen una menor dispersión en comparación con los otros operadores, por ende, mediciones más precisas. El operador B, con un promedio de 0,126 $\mu\text{S/cm}$, muestra una dispersión ligeramente mayor que el operador A, pero sigue dentro de un rango aceptable, aunque

con mayor variabilidad. En cambio, el operador C, con un promedio de 0,162 $\mu\text{S/cm}$, presenta la mayor dispersión, lo que sugiere que sus mediciones son menos consistentes y tienen una mayor variabilidad en comparación con los otros dos operadores.

Se calcula la media de resultados por operador realizando en vertical la sumatoria de cada ensayo por operador, la sumatoria de los 3 ensayos de cada operador se divide en la cantidad total de repeticiones (30 mediciones por operador) y se obtiene la media total de las mediciones realizadas por cada operador. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la tabla 2-4 Media de las mediciones realizadas por operador.

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango
1	4,832	4,952	4,982	0,150	5,038	5,043	5,127	0,089	5,232	4,999	5,310	0,311
2	4,785	4,815	4,997	0,212	4,544	4,554	4,770	0,226	4,945	5,002	5,020	0,075
3	4,430	4,445	4,773	0,343	6,041	5,815	5,831	0,226	5,664	5,697	5,713	0,049
4	6,592	6,734	6,759	0,167	5,162	5,591	5,351	0,429	5,713	6,710	6,708	0,997
5	4,463	4,503	4,504	0,041	4,413	4,397	4,343	0,070	4,411	4,421	4,423	0,012
6	4,573	4,546	4,511	0,062	4,322	4,358	4,354	0,036	4,423	4,497	4,501	0,078
7	4,478	4,472	4,469	0,009	4,351	4,358	4,352	0,007	4,501	4,433	4,439	0,068
8	4,507	4,512	4,504	0,008	4,357	4,363	4,411	0,054	4,436	4,436	4,444	0,008
9	4,357	4,378	4,379	0,022	5,381	5,342	5,305	0,076	5,084	5,089	5,096	0,012
10	4,521	4,492	4,543	0,051	4,998	5,031	4,986	0,045	4,974	4,976	4,982	0,008
Sumatoria	47,538	47,849	48,421	-	48,607	48,852	48,830	-	49,383	50,260	50,636	-
Promedio	($\bar{X}_A$)	4,794	R-A	0,107	($\bar{X}_B$)	4,876	R-B	0,126	($\bar{X}_C$)	5,009	R-C	0,162

Tabla 2- 4 Media de las mediciones realizadas por operador.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se obtienen los siguientes resultados para la media de las mediciones realizadas por cada operador:

- Media de las mediciones para Operador A ($\bar{X}_A$): 4,794 $\mu\text{S/cm}$
- Media de las mediciones para Operador B ($\bar{X}_B$): 4,876 $\mu\text{S/cm}$
- Media de las mediciones para Operador C ($\bar{X}_C$): 5,009 $\mu\text{S/cm}$

El análisis de las medias de las mediciones realizadas por cada operador muestra diferencias en los valores obtenidos, lo que puede reflejar variaciones en la precisión de las mediciones o en los métodos de trabajo de cada uno. El operador A tiene la media más baja (4,794 $\mu\text{S/cm}$), indicando mediciones ligeramente inferiores. El Operador B, con 4,876 $\mu\text{S/cm}$, muestra valores moderadamente más altos y consistentes. El Operador C por su parte, presenta la media más alta (5,009 $\mu\text{S/cm}$), lo que sugiere un aumento considerable en la variabilidad de las mediciones.

2.2.3. Media de los rangos promedio y rango de las medias.

Los rangos promedio se obtienen mediante la aplicación de la fórmula señalada en la figura 2-1, donde en el numerador se realiza la sumatoria de los Rangos A, B y C obtenidos anteriormente y se divide en la cantidad de rangos considerados en el estudio, en este caso 3 rangos.

$$\overline{R} = \frac{\overline{R}_A + \overline{R}_B + \overline{R}_C}{3} =$$

Figura 2 - 1. Fórmula media de los rangos promedio.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Dicho procedimiento se encuentra contenida como una tabla en la planilla de cálculo señalada con el nombre de Media de los rangos y que en este estudio se registra como tabla 2-5 Media de los rangos por operador.

Media de los Rangos	
R-A	0,107
R-B	0,126
R-C	0,162
SUMA	0,394
$\overline{R}$	0,131

Tabla 2- 5 Media de los rangos por operador.
Fuente: Elaboración propia.

Para el resultado obtenido al desarrollar la figura 2-1 se obtiene un promedio de 0,131µS/cm, que corresponde a la media de los rangos obtenidos por los operadores. Esto evidencia la variabilidad conjunta de los tres operadores, denotando una variación moderada en las mediciones. Este valor indica que los operadores muestran algunas

variaciones en la uniformidad de sus mediciones, lo que podría representar un aspecto a mejorar en cuanto a normalización y exactitud en el procedimiento de medición

Para la obtención del rango de las medias se cuantifica la diferencia entre la mayor de las medias obtenidas por operador y la menor de estas según lo indicado en la figura 2-2 Fórmula del rango de las medias.

$$\bar{X}_{dif} = \bar{X}_A - \bar{X}_C =$$

Figura 2 - 2 Fórmula del rango de las medias.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018

En la confección de la planilla de cálculo se visualiza la resolución de la ecuación expresada en la figura 2-2, dicha resolución y resultado se adjuntan bajo el nombre de tabla 2-6 Rango de las medias.

Rango de las Medias	
MAX X-	5,009
MIN X-	4,794
X- DIF	0,216

Tabla 2- 6 Rango de las medias.
Fuente: Elaboración propia.

En este ejercicio la media de mayor magnitud es la obtenida por el Operador C, con un valor estimado de 5,009 µS/cm, mientras que el menor de las medias es obtenido por el operador A, con una magnitud promedio de 4,794 µS/cm. Al calcular el rango de las medias se obtiene una diferencia de 0,216 µS/cm en las medias, lo cual indica una variabilidad en los resultados obtenidos por los operadores, lo que podría sugerir distintos enfoques o variaciones en las técnicas de medición empleadas.

2.2.4. Límite superior de la carta de los rangos.

Se obtiene del producto que resulta al multiplicar D₄ y la media de los rangos (R̄). Respecto de la media de los rangos. Se calculó previamente que para este estudio corresponde a 0,131μS/cm. La obtención del factor D₄ en cambio, es un valor preestablecido y determinado en función de la cantidad de ensayos que se realizan en el estudio. En este caso al realizar 3 ensayos por operador corresponde la utilización de la constante 2,57. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 271)

Limite superior de la carta de rangos		
LCS =	(R̄) x (D4) =	0,338

Tabla 2- 7 Rango de las medias.
Fuente: Elaboración propia.

El resultado obtenido representa el valor máximo aceptable de variabilidad en los rangos de las mediciones de los operadores. Este valor es útil para determinar si los rangos obtenidos en los ensayos están dentro de los límites controlados o si indican que hay una variabilidad excesiva que requiere atención inmediata y una repetición de resultados. Para este caso todas las medias de los rangos se encuentran bajo este valor, por ende, los valores se encuentran dentro del rango de aceptación.

2.2.5. Repetibilidad (Variación expandida del equipo).

La variación expandida del equipo (VE) resulta del producto obtenido entre la media de los rangos (R̄) y la conste k₁, la cual se establece en un valor de 3,05 para estudios desarrollados con 3 ensayos. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 271). La figura 2-3 indica la fórmula requerida para el cálculo de la variabilidad expandida.

$$VE = 5.15\hat{\sigma}_{repeti} = k_1 \overline{R} =$$

Figura 2 - 3 Fórmula de la variación expandida.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

La variación expandida a su vez se obtiene de multiplicar la desviación estándar del equipo por 5,15(propiedad de la distribución normal que indica que al abarcar el 99% de la curva normal se obtiene un $\mu \pm 2,575$ de ambos lados de la curva) esta relación se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{\sigma}_{repeti} = \frac{\overline{R}}{d_2} = \frac{k_1 \overline{R}}{5.15} .$$

Figura 2 - 4 Ecuación de la desviación estándar del error del equipo.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

En función del desarrollo de las ecuaciones expresadas en la figura 2-3 y la figura 2-4 se obtienen los resultados de la repetibilidad de este estudio confeccionados en la planilla de cálculo e indicados a continuación bajo el título de figura 2-5 Resultados de la repetibilidad.

REPETIBILIDAD (Variación del Equipo)	
VE =	0,401
Desv. REPE =	0,078

Figura 2 - 5 Resultados de la repetibilidad.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo señalado en la figura 2-5 para los resultados calculados obtenidos previamente la magnitud de la variación del equipo es de 0,401 $\mu\text{S/cm}$, esto sugiere que el equipo tiene una fluctuación significativa en las mediciones, lo que podría implicar que el conductivímetro no se mantiene completamente estable a lo largo de las mediciones. Es crucial identificar si esta variación es inherente al dispositivo o si es consecuencia de factores como la calibración, el mantenimiento del equipo o las condiciones de las condiciones ambientales durante la medición.

La desviación estándar indica cuánto varían los errores de medición del equipo respecto a su valor medio. Un valor de 0,078 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sugiere que el equipo tiene un desempeño razonablemente estable, con errores que no se desvían en exceso de su media. Sin embargo, sigue existiendo una pequeña cantidad de error, propia de cualquier proceso de medición.

2.2.6. Reproducibilidad (variación expandida del operador).

La variación expandida del operador se puede determinar en función de la fórmula expresada en la figura 2-6, donde k_2 es una constante determinada por el número de operadores, para un estudio realizado con 3 operadores corresponde una constante de 2,70. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 271)

Los denominadores “n” constituyen el número de partes evaluadas (10 muestras) y “t” hace referencia al número de ensayos realizados (3 ensayos). Respecto de la VE y la X - dif, estas fueron calculadas anteriormente, siendo estas de 0,401 y 0,131 respectivamente.

$$VO = 5.15\hat{\sigma}_{reprod} = \sqrt{\left(k_2\bar{X}_{dif.}\right)^2 - \frac{(VE)^2}{nt}}$$

Figura 2 - 6 Fórmula de la variación expandida del operador.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Tras la resolución de la fórmula expresada anteriormente se obtiene un resultado de 0,578 correspondiente a la variación aportada por los operadores al sistema de mediciones de agua desionizada. En función de este resultado se determina la desviación estándar de la reproducibilidad, la cual se obtiene en función del desarrollo de la siguiente expresión:

$$\hat{\sigma}_{reprod} = \frac{VO}{5.15} =$$

Figura 2 - 7 Fórmula de la desviación estándar de la reproducibilidad.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Al reemplazar y resolver la ecuación planteada en la figura 2-7 se obtiene un valor de 0,112 correspondiente a la desviación estándar asociada a la reproducibilidad. El resultado obtenido de dicha resolución se observa en el extracto de la planilla de cálculo titulada figura 2-8 Resultados de la Reproducibilidad.

REPRODUCIBILIDAD (Variación del Operador)	
VO =	0,578
DESV. REPRO =	0,112

Figura 2 - 8 Resultados de la reproducibilidad.
Fuente: Elaboración propia.

La variación de 0,578 $\mu\text{S/cm}$ indica que los operadores ejercen un efecto significativo en la dispersión de las mediciones, lo que podría señalar variaciones en los métodos de medición, habilidades, o incluso en la manera en que interpretan los resultados. Esta variabilidad podría provocar inconsistencias en las mediciones y, en consecuencia, impactar la precisión total del sistema de medición.

La desviación estándar de la reproducibilidad es indicador de cuánto varían los resultados de las mediciones cuando los operadores repiten el mismo proceso bajo condiciones similares. Un valor de 0,112 $\mu\text{S/cm}$ indica que, aunque hay variabilidad entre los operadores, el grado de esa variabilidad no es excesivamente alto. Es decir, los operadores son capaces de reproducir sus mediciones con una desviación relativamente pequeña, aunque sigue existiendo una cierta variabilidad que debe ser abordada para mejorar la consistencia.

2.2.7. R&R (variación combinada).

El R&R total, representa la variabilidad combinada de repetitividad y reproducibilidad, también se le conoce como el error de medición expandida (EM) y se

obtiene mediante la raíz de la sumatoria entre el cuadrado de la variación del equipo y el cuadrado de la variación del operador, tal como se presenta en la figura 2-9.

$$EM = 5.15\hat{\sigma}_{R\&R} = \sqrt{VE^2 + VO^2} =$$

Figura 2 - 9 Fórmula de la variación combinada.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Al igual que en los casos anteriores se puede desprender de esta fórmula la desviación de estándar del R&R que se obtiene mediante:

$$\hat{\sigma}_{R\&R} = \frac{EM}{5.15} =$$

Figura 2 - 10 Fórmula de la desviación estándar de la repetividad y reproducibilidad.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

En función de las fórmulas expresadas en las figuras 2-9 y 2-10 se obtiene una variabilidad combinada de repetividad y reproducibilidad de 0,703 y una desviación estándar total de 0,137 para el R&R. Los siguientes resultados se generan en la planilla de cálculo y se representan en la figura 2-11.

R&R (Error de Medición expandido)	
EM = R&R =	0,703
DESV. R&R =	0,137

Figura 2 - 11 Resultados del error combinado expandido R&R.
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad de 0,703 μS/cm es un valor relativamente alto, lo que indica que tanto la repetitividad como la reproducibilidad contribuyen significativamente a la

dispersión de los resultados de las mediciones. Esta variabilidad podría afectar la precisión y confiabilidad de las mediciones en el proceso de control.

Una desviación estándar de 0,137 muestra la dispersión de las mediciones en relación con la media total del sistema de medición. Esto implica que, aunque la variabilidad combinada es considerable, el margen de error global del sistema es relativamente bajo, lo que indica que, aunque hay variabilidad, esta no es excesiva en relación con los valores de medición que se están utilizando.

2.2.8. Análisis en porcentaje de tolerancia.

Los siguientes resultados corresponden a las mediciones de agua desionizada expresadas en término de porcentajes de tolerancia. En este ámbito existen 4 indicadores a considerar:

- El porcentaje de variabilidad del equipo, que se expresa como 100 veces la variabilidad expandida sobre la tolerancia y su fórmula se representa en la imagen 2-12 y su resultado es de 10,02%. Resultado que se considera bueno o aceptable para el proceso de medición.

$$\%VE = \frac{100(VE)}{\text{tolerancia}} =$$

Figura 2 - 12 Fórmula del porcentaje de variabilidad.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

- El porcentaje de variabilidad del operador, que se expresa como 100 veces la variabilidad del operador sobre la tolerancia y su fórmula se representa según la imagen 2-12 y su resultado es de 14,44%. Resultado que se considera bueno o aceptable para el proceso de medición.

$$\%VO = \frac{100(VO)}{\text{tolerancia}} =$$

Figura 2 - 13 Fórmula del porcentaje de variabilidad.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

- El porcentaje de error de medición expandida o índice de precisión/tolerancia, se entiende como 100 veces el error de medición expandida sobre la tolerancia, su fórmula se representa en la figura 2-14 y su resultado es de 17,58%. Resultado que se considera bueno o aceptable para el proceso de medición.

$$P/T = \frac{EM}{ES - EI} \times 100 =$$

Figura 2 - 14 Fórmula índice de precisión/tolerancia.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

- El índice de precisión/variabilidad total, se puede obtener como 100 veces la desviación estándar del R&R sobre la desviación estándar total tal como lo indica la figura 2-14, sin embargo, previo al desarrollo de dicha fórmula se debe obtener la desviación parte para calcular la desviación total. La desviación parte se obtiene del rango del promedio de cada muestra sobre d₂ (valor tabla que para 10 datos se considera como 3,18). Al obtener la desviación de la parte se puede calcular la desviación total según la fórmula 2-15.

$$(\hat{\sigma}_{R\&R} / \hat{\sigma}_{total}) \times 100 =$$

Figura 2 - 15 Fórmula índice precisión/ variación total

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

$$\hat{\sigma}_{total} = \sqrt{\sigma_{parte}^2 + \sigma_{R\&R}^2}$$

Figura 2 - 16 Fórmula desviación total
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

En función de las fórmulas señaladas en las figuras 2-15 y 2-16 se obtienen respectivamente un índice de precisión/tolerancia del 24,49% (considerado marginalmente aceptable), obtenido en función de una desviación total de 0,557 y una desviación parte de 0,540.

Todos los indicadores anteriormente señalados se obtienen de la planilla de cálculo de la cual se extrae la tabla 2-8. Estos resultados son indicadores que deben ser contrastados con los criterios de aceptación de la figura 2-17 con el fin de evaluar la calidad de los sistemas de medición aplicados a la matriz de agua desionizada en estudio.

ANÁLISIS EN % DE TOLERANCIA	
%VE=	10,02%
%VO=	14,44%
P/T=%R&R=	17,58%
EM/VARTOT=	24,49%

Tabla 2- 8 Tabla de resultados en análisis de tolerancia.
Fuente: Elaboración propia.

- Criterio de aceptación:
- Abajo de 10% → Excelente proceso
 - De 10 a 20% → Bueno, aceptable
 - De 20 a 30% → Marginalmente aceptable
 - Arriba de 30% → Inaceptable y debe ser corregido

Figura 2 - 17 Tabla de criterios de aceptación para índices de tolerancia.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Una variabilidad del equipo (VE) del 10,02% indica que una proporción relativamente baja de la variabilidad total en las mediciones proviene del equipo. Esto

significa que, aunque el equipo tiene cierta influencia en la dispersión de los resultados, no es la fuente principal de la variabilidad. Además, con ciertas mejoras podría considerarse un excelente proceso, alcanzando porcentajes por debajo del 10%.

Respecto de la variabilidad de los operadores (VO), un valor de 14,44% es indicador de que los operadores tienen una influencia moderada en la variabilidad de las mediciones. Esto podría derivar de diferencias en las técnicas de medición, habilidades o condiciones operativas que podrían variar entre los operadores.

La variabilidad el sistema de medición tiene un nivel considerable de variabilidad atribuida a la repetitividad y reproducibilidad (R&R) es de un 17,58%, se observa que una parte significativa de la variabilidad es causada por las diferencias en cómo se repiten las mediciones dentro de un operador y entre ellos.

El error medio en relación con la variabilidad total es del 24,49%, lo que señala que una porción significativa de la variabilidad total se origina del error en el procedimiento de medición. Entre las posibles razones se incluyen las restricciones en el equipo, los métodos de medición, o las circunstancias en las que se llevan a cabo las mediciones. Este valor indica que la exactitud total del sistema de medición presenta oportunidades de perfeccionamiento.

2.2.9. Número de categorías distinguibles.

Este estadístico representa el número de grupos diferentes de piezas que el sistema de medición es capaz de distinguir, lo cual tiene relación directa con la resolución con la que este mide la característica de interés. (Gutierrez & Vara, 2018, pág. 274)

El número de categorías distinguible (n_c) se obtiene a partir del producto entre la raíz de 2 y el cociente entre la desviación estándar de la parte sobre la desviación estándar de R&R, tal como lo indica la fórmula expresada en la figura 2-18.

$$n_c = \sqrt{2} (\hat{\sigma}_{parte} / \hat{\sigma}_{R\&R})$$

Figura 2 - 18 Fórmula número de categorías distinguibles.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

Para este estadístico se obtuvo un resultado de 5,598, al contrastar este resultado con la tabla 2-9, se observa que para resultados mayores a 4 se considera que la resolución del sistema de medición es adecuada, por ende, la calidad del sistema de medición es adecuado. Si bien no se trata de una cifra extremadamente alta, puede estar proporcionando una representatividad suficiente para evaluar el comportamiento del proceso de medición.

INDICADOR	
NC>4	RESOLUCION ADECUADA
NC<2	RESOLUCION INADECUADA
2=< NC =<4	POCO ADECUADA

Tabla 2- 9 Fórmula número de categorías distinguibles.
Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

2.3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El análisis R&R aplicado en este estudio adjunto en la figura 2-19, ofrece evidencia objetiva sobre la capacidad del sistema de medición para garantizar mediciones confiables en el contexto de la producción del agua desionizada para la industria. En función de esto es importante destacar los índices que tienen mayor impacto en la variabilidad de las mediciones.

Operador A					Operador B				Operador C			
Muestra	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango
1	4,832	4,952	4,982	0,150	5,038	5,043	5,127	0,089	5,232	4,999	5,310	0,311
2	4,785	4,815	4,997	0,212	4,544	4,554	4,770	0,226	4,945	5,002	5,020	0,075
3	4,430	4,445	4,773	0,343	6,041	5,815	5,831	0,226	5,664	5,697	5,713	0,049
4	6,592	6,734	6,759	0,167	5,162	5,591	5,351	0,429	5,713	6,710	6,708	0,997
5	4,463	4,503	4,504	0,041	4,413	4,397	4,343	0,070	4,411	4,421	4,423	0,012
6	4,573	4,546	4,511	0,062	4,322	4,358	4,354	0,036	4,423	4,497	4,501	0,078
7	4,478	4,472	4,469	0,009	4,351	4,358	4,352	0,007	4,501	4,433	4,439	0,068
8	4,507	4,512	4,504	0,008	4,357	4,363	4,411	0,054	4,436	4,436	4,444	0,008
9	4,357	4,378	4,379	0,022	5,381	5,342	5,305	0,076	5,084	5,089	5,096	0,012
10	4,521	4,492	4,543	0,051	4,998	5,031	4,986	0,045	4,974	4,976	4,982	0,008
Sumatoria	47,538	47,849	48,421	-	48,607	48,852	48,830	-	49,383	50,260	50,636	-
Promedio	($\bar{X}_A$)	4,794	$\bar{R}-A$	0,107	($\bar{X}_B$)	4,876	$\bar{R}-B$	0,126	($\bar{X}_C$)	5,009	$\bar{R}-C$	0,162

Media de los Rangos	
R-A	0,107
R-B	0,126
R-C	0,162
SUMA	0,394
$\bar{R}$	0,131

Rango de las Medias	
MAX X-	5,009
MIN X-	4,794
X- DIF	0,216

Constante del n° de ensayos	
ENSAYOS	D4
2	3,27
3	2,57

Desv. Estandar a a partir del rango	
k1 ensayos	2
k2 operadore	3
k1	4,56
k2	3,65
n = n° de partes	
t = n° de ensayos	

Limite superior de la carta de rangos	
LCS =	($\bar{R}$) x (D4) = 0,338

ANÁLISIS DE VARIABILIDAD

REPETIBILIDAD (Variación del Equipo)

VE= 0,401

Desv. REPE= 0,078

REPRODUCIBILIDAD (Variación del Operador)

VO= 0,578

DES. REPRO= 0,112

R&R (Error de Medición expandido)

EM= R&R= 0,703

DES. R&R= 0,137

ES =	5
E =	1
TOLERANCIA=	4

ANÁLISIS EN % DE TOLERANCIA	
%VE=	10,02%
%VO=	14,44%
P/T= %R&R=	17,58%
EM/ VAR TOT=	24,49%

CRITERIO ACEPTACION	
<10%	Excelente proceso
10% a 20%	Bueno, aceptable
20% a 30%	Marginalmente aceptable
<30%	Inaceptable y debe ser corregido

NÚMERO DE PARTES

TABLA DE DATOS		
MUESTRA	SUMA	PROM
1	45,515	5,057
2	43,432	4,826
3	48,409	5,379
4	55,320	6,147
5	39,878	4,431
6	40,085	4,454
7	39,853	4,428
8	39,970	4,441
9	44,411	4,935
10	43,503	4,834

CÁLCULOS	
max	6,147
min	4,428
R Parte	
d2	3,180
Desv Parte	0,540
desvtot	
	0,557

RESULTADO	
nc	5,598

INDICADOR	
NC>4	RESOLUCION ADECUADA
NC<2	RESOLUCION INADECUADA
2<= NC <=4	POCO ADECUADA

Figura 2 - 19 Estudio R&R largo de las mediciones de agua desionizada.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Repetibilidad

La variación atribuida al equipo (VE) es de 0,401, es indicador de que el conductivímetro podría estar introduciendo un nivel significativo de variabilidad en las mediciones. Una desviación estándar de 0,078 μ S/cm indica que las mediciones del instrumento contienen un cierto margen de error, pero es relativamente pequeño. Sin embargo, es importante controlar estos errores y evitar que se acumulen en sus mediciones con el tiempo, ya que pequeños errores constantes pueden acumularse y afectar la precisión general.

Para mitigar la variabilidad aportada por el equipo a los sistemas de medición se recomienda estandarizar y documentar el procedimiento de calibración del equipo para

reducir esta variabilidad. Además, es posible que otros factores, como la falta de mantenimiento, estén influyendo en este nivel de variación, por lo que se debe considerar incluir este equipo en el plan de mantención preventiva para disminuir la variabilidad en este ámbito e impulsar este proceso hacia la excelencia (<10%)

2.3.2. Reproducibilidad

La variación asociada a los operadores (VO) es de 0,578 es significativa y refleja que los operadores introducen una variabilidad considerable en las mediciones. Esto podría estar relacionado con factores como diferencias en las técnicas de medición, la forma en que se manejan los equipos o la experiencia de cada operador.

La desviación estándar de 0,112 refleja un mayor aporte a la variabilidad combinada en comparación con el equipo. sigue siendo una fuente de error que puede afectar la precisión del proceso de medición. La reproducibilidad es aceptable, pero existe margen para mejorar la consistencia entre los operadores.

El porcentaje de variación respecto de la tolerancia es de 14,44%, lo que refuerza esta idea, posicionando la VO como uno de los principales factores de incidencia a mitigar mediante las propuestas de mejora.

2.3.3. Reproducibilidad & Repetividad

El valor de 0,703 $\mu\text{S/cm}$ para la variabilidad combinada es considerable, lo que evidencia que tanto las mediciones llevadas a cabo por los operadores como las mediciones repetidas están contribuyendo a la dispersión de los resultados. A pesar de que la desviación estándar general es bastante baja (0,137 $\mu\text{S/cm}$), la elevada variabilidad combinada indica que la precisión del sistema de medición podría incrementarse de manera significativa.

Aunque la desviación estándar general de 0,137 $\mu\text{S/cm}$ es relativamente baja, una dispersión que aún puede introducir incertidumbre en los resultados. Mejorar la repetibilidad y reproducibilidad mejora la consistencia y confiabilidad de sus mediciones.

El error total del sistema es del 17,58%, lo que clasifica al sistema como "bueno, aceptable" según los criterios establecidos. Sin embargo, hay que destacar la proximidad al límite superior (20%), lo que destaca la importancia de abordar la variabilidad

introducida tanto por el conductímetro como por el analista. Así pues, aunque es un sistema funcional, se requieren mejoras para volverlo perfecto para procedimientos de control estrictos. Enfocándose en la normalización de procesos, formación de operadores y mantención del equipo; estas diferencias se pueden disminuir considerablemente y aumentar la exactitud de las mediciones.

2.3.4. Índices de precisión

En función de la evidencia estadística se puede afirmar que los operadores son la principal fuente de variabilidad en el sistema de medición, representando el 14,44% de la variabilidad total, mientras que el equipo contribuye solo con un 10,02%. Sin embargo, la variabilidad atribuida a la R&R es del 17,58%, lo que sugiere que el sistema de medición en general aún tiene margen de mejora, especialmente en lo que respecta a la consistencia entre operadores y las mediciones repetidas.

Respecto del error medio total con un 24,49% es un valor relativamente alto, lo que indica que hay una cantidad considerable de variabilidad que no se explica por las diferencias entre operadores o el equipo. Este error puede estar relacionado con factores como la falta de estandarización en las técnicas de medición, las condiciones del entorno, o la precisión del equipo.

2.3.5. Número de partes y resolución

El cálculo del número de partes (n_c) es de 5,598, lo cual indica que el sistema posee una resolución adecuada para diferenciar las muestras, ya que supera el valor crítico de 4. Esto es indicador de que el sistema puede captar diferencias reales entre las muestras analizadas, lo que es un aspecto positivo para la confiabilidad de las mediciones.

Con un número moderado de piezas, los resultados obtenidos pueden ser indicativos de la tendencia general, pero podrían existir limitaciones en la precisión y confiabilidad de las conclusiones, especialmente si el número de muestras no es suficiente para reflejar todas las posibles fuentes de variabilidad en el proceso de medición.

3. **PROPUESTAS DE MEJORA EN LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN.**

3.1 **DIAGRAMA DE ISHIKAWA**

El diagrama de causa-efecto, también conocido como diagrama de Ishikawa o diagrama de espina de pescado, es una herramienta ampliamente utilizada en la gestión de calidad para identificar y organizar las posibles causas de un problema o efecto específico. En el contexto del análisis de la variabilidad en los procesos de medición, se emplea el método 6M para la clasificación de las potenciales causas de variabilidad en el proceso medición del agua desionizada. Bajo esta metodología se distinguen seis categorías, las cuales son: Método, Máquina, Mano de obra, Materiales, Medición y Medio ambiente. Esta estructura permite un análisis sistemático de las fuentes de variabilidad, facilitando la visualización e identificación de áreas críticas que pueden ser optimizadas para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de medición. Este se considera un diagrama de segundo orden, ya que la función de la problemática de la calidad de un producto, en este caso la calidad del agua desionizada, se realiza un análisis de la variabilidad aportada por el sistema de medición, es decir, las mediciones (una de las seis “emes”). Esta sucesión de análisis se representa en la figura 3-1 Las 6 M del proceso de medición.

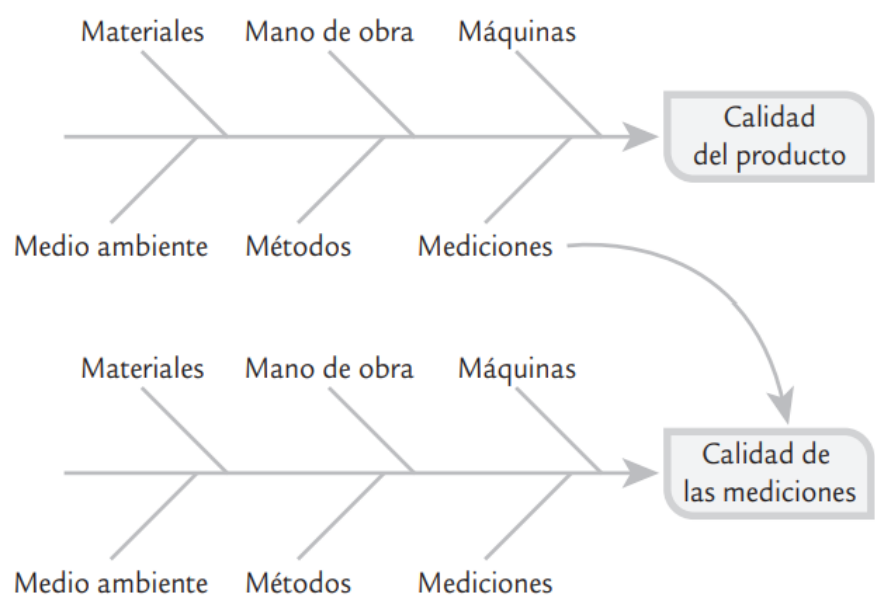


Figura 3- 1 Fórmula número de categorías distinguibles.

Fuente: Gutierrez & Vara, 2018.

3.1.1 Procedimiento

Para la construcción de un diagrama de Ishikawa se sigue un procedimiento previamente establecido, el cual se compone básicamente de las siguientes fases: la preparación del equipo, la definición del problema, la construcción del diagrama, identificación de las posibles causas, el análisis de las causas, revisión y validación y la elaboración de conclusiones y usos del diagrama para la construcción de propuestas. A continuación, se plantea el paso a paso realizado para la confección de este diagrama:

- Se convoca al equipo de trabajo, reuniendo al personal de control de calidad y aseguramiento de la calidad.
- Se define un moderador que guie la sesión y un encargado de documentar los hallazgos.
- Se presentan los resultados del estudio R&R al equipo y se explican brevemente las conclusiones más relevantes para contextualizar el problema.
- Se realiza la identificación del problema, para ello se escribe al centro de la pizarra la problemática utilizada “calidad de las mediciones del agua desionizada”
- Se construye el diagrama dibujando la línea central del problema y la problemática
- Se construyen las espinas, 6M’s, 3 en la parte superior y 3 en el lado inferior.
- Se realiza una lluvia de ideas donde se invita al equipo a proponer causas potenciales para cada categoría (6M)
- Se escribe cada causa en una nota adhesiva y colóquela en el diagrama.
- Se complementan las propuestas basándose en los resultados del análisis R&R.
- Se verifica que las causas propuestas tengan relación directa con el problema identificado.
- Se registran las causas principales y sus respectivas causas raíz.

- Se clasifican las causas principales y se analizan los 5 porqués para llegar a la causa raíz de cada una.
- Se revisa el diagrama completo con el equipo para confirmar que incluye todas las causas relevantes.
- Se Validan las causas principales con datos o evidencia adicional si es necesario.
- Se utilizan los resultados del análisis para desarrollar propuestas de mejora para el proceso de medición.

3.1.2 Diagrama Ishikawa de la calidad de las mediciones

En base estos antecedentes y a la necesidad de ser conscientes de la variabilidad aportada por los sistemas de calidad de mediciones en el laboratorio de control de calidad de Empresas Demaria se construye el diagrama de Ishikawa representado en la figura 3-2 Diagrama de Ishikawa de la calidad de las mediciones de agua desionizada en EDSA

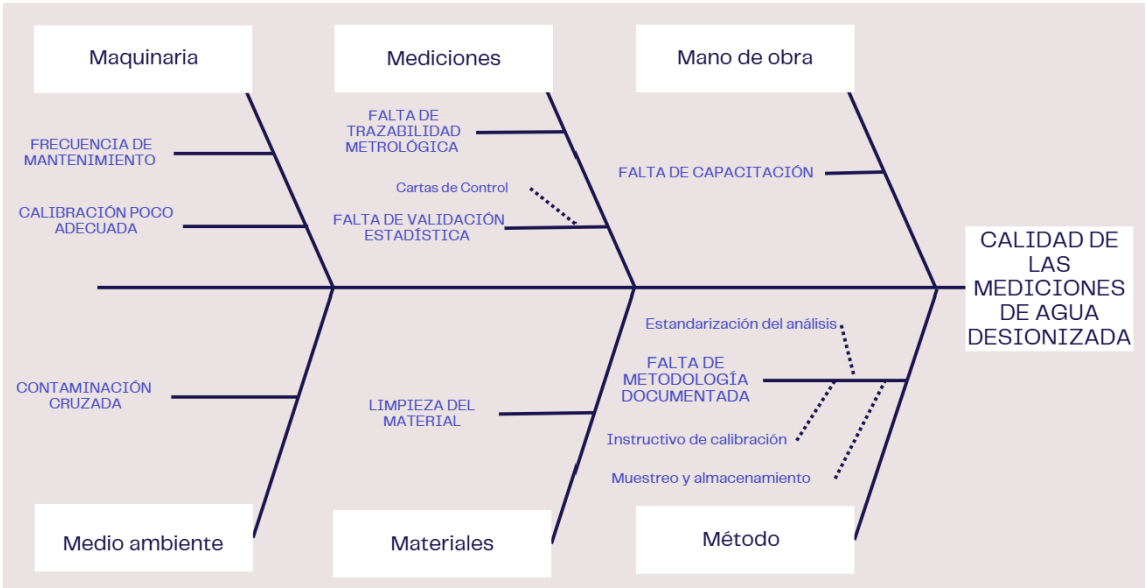


Figura 3- 2 Causa-efecto de las mediciones de agua desionizada en EDSA.

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama presentado en la figura 3-2 permite observar las principales causas de desviación en la entrega de resultados, esta corresponde principalmente a métodos y

mediciones a pesar de que en todos los factores de análisis se pueden observar factores que aportan variabilidad al proceso. A continuación, se analizan cada uno de ellos:

- **Método:** El problema principal radica en la falta de metodologías documentadas que permitan a cada analista realizar el trabajo de forma estandarizada y evite diferencias entre ellos. Se requiere en este proceso un instructivo de calibración, procedimientos estandarizados para la determinación de conductividad y un procedimiento de análisis de la calidad del agua desionizada.
- **Mediciones:** La falta de trazabilidad metrológica contribuyendo a la incertidumbre de la medida. A su vez, la falta de validación estadística no se puede asegurar que los resultados sean reproducibles ni precisos. Además, al ser este un proceso productivo es esencial contar con una carta de control que permita conocer su variabilidad, cambios y tendencias en el nivel del proceso.
- **Mano de obra:** Se puede justificar la variabilidad entre los operadores por variaciones en sus habilidades, técnicas y experiencia, lo que provoca un cierto nivel de inconsistencia en las mediciones. Esto evidencia una ausencia de estandarización en las prácticas individuales, reflejando la importancia de establecer programas de capacitación y normalización en los procedimientos para asegurar una mayor uniformidad y precisión en el procedimiento.
- **Maquinaria:** La precisión del conductivímetro desempeña un papel clave en la repetitividad del sistema de medición, siendo crucial para garantizar resultados consistentes. Sin embargo, la necesidad de calibración y mantenimiento regular es fundamental para mantener su rendimiento óptimo, ya que el desgaste puede afectar negativamente la calidad de las mediciones.
- **Materiales:** La limpieza y la correcta manipulación del material e insumos de trabajo juega un rol fundamental, ya que la contaminación de estos genera desviaciones en las mediciones derivando en resultados inexactos.

- Medio ambiente: El entorno, sumado a elementos como la contaminación cruzada originada por la utilización de recipientes plásticos en vez de vidrio y la manipulación excesiva de las muestras, puede tener un impacto considerable en las mediciones, impactando tanto el desempeño del equipo como la precisión de las medidas entregadas por el operador. Las fluctuaciones en la temperatura y las prácticas de gestión deben ser reguladas meticulosamente para reducir su efecto y asegurar la estabilidad y fiabilidad del sistema de medición.

La combinación de estos factores genera variabilidad en el sistema de medición, por ende, repercute en la calidad de las mediciones emitidas por el laboratorio de control de calidad.

3.2 CUESTIONAMIENTO DE LOS CINCO PORQUÉS

Para complementar este análisis de causa se aplica la metodología de los cinco porqués, con el objetivo de abordar el problema de manera efectiva, para ello es fundamental definirlo claramente y formular la primera pregunta “¿Por qué?” para identificar su causa inmediata. A partir de esa respuesta, se repite el proceso preguntando nuevamente “¿Por qué?” hasta llegar a la causa raíz del problema. Una vez alcanzada, es importante validar que se trate de la causa fundamental y no de un síntoma superficial. Finalmente, se propone soluciones correctivas que eliminen la causa raíz identificada, asegurando así una resolución efectiva y duradera del problema.

El problema planteado es que el sistema de medición tiene alta variabilidad, en función de esta problemática se plantean los cuestionamientos de la causa raíz.



Figura 3- 3 Cinco porqués del sistema de medición.

Fuente: Elaboración propia.

El estudio de los 5 porqués facilita la identificación de las causas fundamentales de la elevada variabilidad en el sistema de medición de agua desionizada. Mediante este ejercicio, se deduce que la variabilidad no solo se atribuye a la falta de un programa de formación para los operadores, sino también a una falta de estandarización en las técnicas de medición, la falta de procedimientos operativos definidos y la exigencia de una calibración y mantenimiento constante del equipo. La fluctuación de los operadores junto con las carencias del equipo en términos de calibración y mantenimiento son elementos cruciales que contribuyen a la inestabilidad de las mediciones. La falta de identificación previa de estas fuentes de variabilidad y la ausencia de un exhaustivo análisis estadístico, como el estudio R&R, retrasan la identificación y corrección de estos problemas.

La variabilidad detectada en los procedimientos de medición del agua desionizada se debe a diversos factores interconectados, tales como la falta de consistencia entre los operadores, la ausencia de normalización en los procedimientos, y fallos en el mantenimiento y calibración del equipo. Este análisis pone de manifiesto la importancia

de instaurar procedimientos operativos estandarizados (POE), capacitar de manera apropiada a los operadores y definir un plan de calibración estricto para disminuir las fuentes de variabilidad. Al tratar estos aspectos, el objetivo es lograr un incremento en la exactitud del sistema de medición, con el fin de robustecer los procedimientos de control de calidad y asegurar la fiabilidad de los resultados.

3.3 PROPUESTAS DE MEJORA BASADAS EN EL ANÁLISIS.

Con el objetivo de abordar las principales causas identificadas en esta investigación y mejorar la calidad de las valoraciones de agua desionizada se propone un concepto que consiste en la estandarización documentada de los procesos principales de EDSA. Este concepto permite reducir la variabilidad de los procedimientos, permite la trazabilidad de los resultados y mejor la calidad del control de calidad. A continuación, se hacen propuestas concretas:

- Para empezar, se debe estandarizar el procedimiento para determinar la calidad del agua desionizada. Para ello, hay que elaborar un procedimiento documentado que explique paso a paso cómo se tiene que realizar la determinación de la calidad del agua desionizada. Este documento debe incluir las condiciones de muestreo que se deben seguir, los equipos necesarios, los parámetros a medir y los criterios de aceptación.
- Estandarización del procedimiento para la determinación de la conductividad. Se debe desarrollar un protocolo claro y estructurado que permita medir la conductividad del agua de manera uniforme. El procedimiento debe especificar la preparación del equipo, las condiciones ambientales ideales, la técnica de medición y la frecuencia de las evaluaciones.
- Homologar y estandarizar los procedimientos de calibración de medidores de conductividad. Se deben elaborar procedimientos bien definidos e identificados para los medidores de conductividad a fin de garantizar la homogeneidad en la calibración del equipo en términos de documentos. La documentación de estos procedimientos debe incluir la periodicidad de la calibración, la toma de soluciones estándar, el registro de constantes de celda y las adecuaciones a las condiciones ambientales.

- Cree una hoja de cálculo de los resultados de la calidad del agua desionizada. Se debe preparar una hoja de cálculo estándar para registrar los resultados de las mediciones de la calidad del agua desionizada. La herramienta debe incluir campos para los valores obtenidos, condiciones del proceso, fecha y persona responsable de las mediciones para garantizar un control sistemático y trazable.
- Generar un registro para el seguimiento de la calibración del conductivímetro. Se debe realizar la implementación de una planilla independiente para la documentación de la calibración del conductivímetro y el seguimiento de las constantes de la celda y condiciones ambientales para la calibración y los cambios de equipo.

3.4 IMPACTO DE LAS MEJORAS DE PROPUESTAS.

La implementación de las mejoras propuestas tendrá un impacto transformador en la calidad y confiabilidad de las mediciones de agua desionizada de EDSA. Al estandarizar los procedimientos y maximice la repetibilidad y reproducibilidad para reducir la variabilidad y garantizar la precisión y trazabilidad de los resultados. Con ello se robustecen el control de calidad, validando mediciones fiables que son la base para tomar decisiones estratégicas, como la opción de poner en marcha otra planta de deionización, pero también respetando el enfoque de formación continua, la utilización de herramientas estadísticas, la mejora de la documentación, todo ello con el objetivo de poder optimizar recursos y reforzar a la vez sistemas de medición robustos y eficientes acordes a las mejores prácticas de la industria y así no tener dificultad para conseguir beneficios sostenibles a largo plazo.

CONCLUSIÓN

Este estudio, tal como se ha explicado anteriormente, permite evaluar la calidad de las mediciones del agua desionizada generada en la planta de Empresas Demaria S.A. mediante un estudio largo de repetitividad y reproducibilidad (R&R). Ello permite poder afirmar que los datos obtenidos son correctos, aspecto fundamental para poder garantizar la calidad de las mediciones en el control del agua desionizada generado en la empresa.

En relación con el primer objetivo específico, se aplica un análisis R&R a las mediciones de conductividad del agua desionizada. Esto incluye la recopilación de los datos a partir de las mediciones repetidas realizadas por tres operadores, los cuales permiten analizar la variabilidad entre operadores y la que existe en el interior de ellos. Los resultados de este análisis muestran una variabilidad combinada de repetitividad y reproducibilidad de 0,703 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual indica la necesidad de optimizar tanto el equipo como las técnicas utilizadas para la medición.

Con análisis de los resultados reveló que el sistema de medición actual, aunque funcional, es susceptible de mejora. El índice de error de medición expandida es de 17,58%, siendo clasificado como "bueno, aceptable", pero próximo al límite superior. Este hallazgo evidencia que, aunque el sistema de medición cumpla los requerimientos requeridos mínimos, existen factores, como la variabilidad del operador (14,44 %), que requieren atención para fortalecer la fiabilidad de los datos.

Finalmente, se sugieren mejoras para optimizar los métodos usados en la medición de la conductividad. Entre las propuestas destacan: la estandarización de los procedimientos de calibración, la inclusión del conductímetro en el plan de mantenimiento preventivo, la capacitación de los analistas y el uso de herramientas estadísticas. Estas propuestas están orientadas a reducir la variabilidad total a fin de garantizar que las mediciones cumplan con los estándares de calidad requeridos.

En definitiva, los resultados obtenidos y las propuestas formuladas fortalecen los sistemas de control de calidad de las Empresas Demaria S.A., porque los resultados permiten tener información fidedigna para la mejora de los procesos actuales y para los proyectos futuros, como es, arrancar la instalación de una segunda planta desionizadora. A su vez, este estudio refuerza la importancia de los sistemas de medición en la gestión de la calidad y posiciona a la empresa como un referente en de excelencia operativa y de compromiso con la mejora continua.

BIBLIOGRAFÍA

1. EMPRESAS DEMARIA S.A. 2024. Documentación interna: Procedimientos de calidad. Viña del Mar, Chile.

IT-CAL-051: Instructivo de calibración de conductivímetro.

DOI-CAL-109: Procedimiento estándar para análisis de cloro libre.

RE-CAL-113: Manual para análisis de pH.

2. EMPRESAS DEMARIA S.A. 2024. Quiénes somos. Recuperado de: <https://empresasdemaria.cl/quienes-somos/>

3. FISHER SCIENTIFIC. 2024. Conductímetro Orion A212 - Manual de Usuario. Recuperado de: <https://www.fishersci.com>

4. GUTIÉRREZ PULIDO, H., y DE LA VARA, R. 2018. Control estadístico de calidad y Seis Sigma. México: McGraw Hill.

5. INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN DE CHILE (INN). 1997. Norma Chilena NCh426/2. Of97: Agua desionizada para análisis fisicoquímicos - Requisitos. Santiago, Chile.

6. OELKER BEHN, A. sin año. Tratamiento de aguas para calderas. Thermal Engineering Ltda. Santiago, Chile.

7. PERRY, R. 2000. Manual del Ingeniero Químico. McGraw-Hill, tomo III

8. VIRGINIA. 2024. Sobre Virginia. Recuperado de: <https://virginia.cl/sobre-virginia/>