

**UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECANICA

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN
DE AGUA PARA HEMODIÁLISIS, PARA SUMINISTRAR AGUA
LIMPIA Y PURIFICADA PARA APLICACIÓN DE DIALISIS DE
LOS DIFERENTES PACIENTES DEL HOSPITAL DR. RAFAEL
ÁNGEL CALDERON GUARDIA UBICADO EN LA PROVINCIA
DE SAN JOSÉ.**

**MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERIA ELECTROMECANICA**

ESTUDIANTE: ISAAC JOEL VEGA VARGAS

TUTOR: ING. DIEGO ALONSO RAMIREZ ROJAS

**SEDE METROPOLITANA
OCTUBRE, 2024**

Contenido

Declaración Jurada	2
Cédula de Identificación	3
Solicitud de Defensa	4
Carta de Aprobación del Tutor.....	5
Carta de Autorización del Lector.....	6
Certificado del Filólogo	7
Carta de Entendimiento	8
Contenido	9
Tablas.....	12
Figuras.....	13
Dedicatoria	14
Agradecimientos.....	15
Resumen	16
CAPITULO I.....	18
1.1 Planteamiento del Problema	18
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo General	20
1.2.1 Objetivos Específicos	20
1.3 Justificación	20
1.4 Antecedentes.....	24
1.4.1 Antecedentes Internacionales	24
1.4.2 Antecedentes Nacionales	27
1.5 Proyecciones	30
1.5.1 Alcances	30
1.5.2 Limitaciones	31

	3
CAPITULO II.....	32
2.1 Marco Teórico.....	32
2.1.1 Control de Agua y Líquido de Diálisis.....	32
2.1.2 Tratamiento del Agua para la Diálisis.....	41
2.1.3 Agua Ultrapura para Hemodiálisis.....	53
2.1.4 Diseño de Acuerdo con las Normas de Calidad del Agua.....	59
2.1.5 Normativas y Estándares.....	71
CAPITULO III.....	75
3.1 Marco Metodológico.....	75
3.1.1 Enfoque de la Investigación.....	75
3.1.2 Método de la Investigación.....	75
3.1.3 Fuentes de Información.....	76
3.1.4 Variables de Análisis.....	77
3.1.5. Instrumentos y Técnicas.....	80
3.1.6. Proceso para la Recolección y Análisis de Datos.....	80
CAPITULO IV.....	83
4.1. Análisis de Resultados.....	83
4.1.1. Análisis del Diseño de Procesos de Producción.....	83
4.1.2. Análisis Costo-Beneficio para la Mejora del Sistema de la Planta de Tratamiento de Agua para Hemodiálisis.....	89
4.1.3. Tanques de Almacenamiento de Agua Tratada y Concentrados.....	94
CAPÍTULO V.....	96
5.1. Conclusiones.....	96
5.2. Recomendaciones.....	98
Referencias.....	100
Anexos.....	104

Tablas

Tabla 1. Variables de Análisis Consideradas para este Proyecto. _____	77
Tabla 2. Mejoras en el Sistema de Filtración de Agua para Hemodiálisis y Mantenimiento Preventivo Correspondiente _____	84
Tabla 3. Costos Totales de la Tubería CPVC _____	90
Tabla 4. Costos Totales de la Tubería de Polietileno. _____	91

Figuras

Figura 1. Planta de Tratamiento de Agua Hospital México, Inauguración Noviembre del 2022. Fuente: Rosales, 2022.	28
Figura 2. Esquema de hemodiálisis (Fuente: Cendial hemodiálisis, 2018).	35
Figura 3.Efectos de los contaminantes químicos presentes en el agua a los pacientes (Fuente: Tong, et al. (2001) citado por Mora, 2019, p.43).	37
Figura 4. Monitor de hemodiálisis (Fuente: Bosco, 2015, p.21).	41
Figura 5. Esquema general de una PTA para una clínica de diálisis (Fernández, 2023, p.20).	43
Figura 6. Esquema de subetapas del pretratamiento (Fernández, 2023, p.21).	44
Figura 7. Diagrama filtro multimedia (Fernández, 2023, p.21).	45
Figura 8. Esquema ablandador (Fernández, 2023, p.22).	46
Figura 9. Esquema filtro de carbón activado (Fernández, 2023, p.22).	47
Figura 10. Ósmosis - Ósmosis Inversa (Mora, 2019, p.53).	49
Figura 11. Lámparas UV (LightSources, 2022).	53
Figura 12. Parámetros de Calidad del Agua (Reglamento para la Calidad del Agua para Consumo Humano en Establecimientos de Salud, 2022).	60
Figura 13. Límites o parámetros establecidos por la norma ISO 13959 (Fuente: Latini, 2016, p.5).	62
Figura 14. Configuraciones que garantizan la circulación constante de agua (Pérez et al., 2016, p.10).	67
Figura 15. Diseño de la planta de tratamiento de agua para hemodiálisis (Fuente: Latini, 2016, p.9).	68

Dedicatoria

Inicialmente quiero agradecer a Dios por darme la vida, por otorgarme las actitudes que me hacen la persona que soy hoy día, inteligente, creativo y humilde, por darme la oportunidad y el valor de seguir y luchar por mis sueños y metas guiándome poco a poco por el camino del éxito lleno de perseverancia y sacrificio, como prueba de ello, es el permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida y mi formación como profesional. A mi madre Yorleny Vargas Gamboa que es una excelente mujer y me ha inculcado valores de superación y perseverancia. A mi padre Juan Manuel Vega Cordero que es un gran hombre valiente, esforzado y excelente padre que me ha enseñado el verdadero valor de lucha.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la bendición y protegerme en este camino brindándome la fuerza y voluntad para levantarme cada que caigo y superar las adversidades que se presentan en la vida junto con familia quien me dio el apoyo y el impulso para continuar con mi formación profesional apoyándome de muchas formas. Agradezco a cada profesor por las enseñanzas que nos brindaban de superación y metas a conseguir y el aporte de la teoría que de cada materia recibida.

Resumen

Durante los últimos años se ha incrementado notablemente el número de personas con enfermedades renales que son sometidas a hemodiálisis, ya que la insuficiencia renal les impide eliminar los contaminantes acumulados en el organismo, lo que les puede ocasionar una verdadera intoxicación e incluso la muerte.

La calidad del agua para la fabricación del líquido de diálisis es un requisito para tener en cuenta, ya que la sangre de los pacientes que se realizan diálisis se pone en contacto con 300 - 400 litros de agua semanalmente y lo hace a través de una membrana no selectiva.

La hemodiálisis es una modalidad terapéutica que sustituye la función renal y permite que aproximadamente un millón de personas nefróticas en todo el mundo, pueda vivir por mucho años, pero para ello es necesario garantizar la calidad del agua.¹⁻⁵ Los pacientes en diálisis presentan una susceptibilidad particular y enfrentan un grave problema de salud si se utiliza el fluido de diálisis contaminado microbiológicamente, lo que pone de manifiesto la necesidad de utilizar agua adecuada para esta modalidad terapéutica.

Esta investigación buscó mejorar la calidad de la planta de tratamiento de agua de hemodiálisis del el Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia (HDRACG), la cual tiene como función purificar el agua para que se pueda utilizar en la creación de líquido de diálisis y también eliminar todas las partículas en suspensión presentes en el agua que sumista la compañía encargada Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA).

Por esta razón, este estudio tuvo como objetivo general: Realizar el diseño de la implementación de mejora en el sistema de purificación de agua del departamento de hemodiálisis, de acuerdo con las normativas y aplicaciones técnicas vigentes, y poder garantizar la mejor calidad de agua para los pacientes en el Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia.

Asimismo, este estudio analizó la posibilidad de la mejora en la tubería de esta planta de tratamiento mediante un rediseño de esta, con el fin de lograr la disminución de proliferación de microorganismos, así como la recomendación de los materiales que se deben utilizar, los cuales no deben transmitir impurezas al agua tratada.

Por consiguiente, que se realizó una investigación basada en las principales necesidades generadas en el proceso del tratamiento de agua de hemodiálisis del Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia. Esta agua se utiliza para realizar el procedimiento sanguíneo y tiene que cumplir con especificaciones estrictas con el fin de llegar a obtener el agua ultra pura. Este proyecto abarcó las mejoras en el diseño de la planta de tratamiento de agua de hemodiálisis cumpliendo con las normas de calidad del agua. Recomendando mantener y fortalecer el programa de mantenimiento preventivo con monitoreo continuo de la calidad del agua, asegurando que se cumplan los parámetros de seguridad establecidos.

Palabras Clave: Diálisis, Hemodiálisis, Proliferación, Líquido de Diálisis, Purificación, Polietileno, CPVC, COT, Lámpara UV.

CAPITULO I

1.1 Planteamiento del Problema

Entre los distintos elementos de la hemodiálisis, uno de los más importantes es el referente a la calidad del agua que se utiliza para la producción del líquido de diálisis, ya que la sangre de los pacientes entra en relación con ésta, pese a estar separada por la membrana del dializador, en unas cantidades mínimas entre los 120 a 150 litros por sesión de diálisis, superándose en ocasiones dichas cifras con las técnicas actualmente utilizadas. (Terregosa, Pérez y Giménez, 2012).

La producción del líquido de diálisis se realiza habitualmente a partir del agua de la red pública, por lo que la mayoría de las complicaciones aparecidas a lo largo de los años, en relación con la calidad del agua utilizada, han sido consecuencia de los contaminantes contenidos en la misma y por lo tanto de los métodos utilizados para su depuración y potabilización. Además, dependiendo de las características del agua de la red pública de las distintas ciudades, para su aptitud se añaden sustancias tales como el cloro, dando lugar a la aparición de complicaciones como la metahemoglobinemia. (Terregosa, Pérez y Giménez, 2012).

De manera retrospectiva, algunas de las principales complicaciones dependientes del agua aparecidas durante las sesiones de hemodiálisis o tras las mismas, fueron las reacciones a pirógenos, el síndrome del agua dura y la intoxicación por aluminio. Todas estas complicaciones dieron lugar a un progresivo perfeccionamiento en la obtención y producción del agua a utilizar para el baño de diálisis con el fin de poder evitar esta yatrogenia. (Terregosa, Pérez y Giménez, 2012).

Con el tratamiento del agua mediante filtros de carbón activado y ósmosis inversa, la importancia de estos problemas se había minimizado. Sin embargo, una serie de factores, como la generalización del uso del bicarbonato, la incorporación a la hemodiálisis de las membranas de alta permeabilidad y la aparición de nuevas posibilidades terapéuticas de gran eficacia, como las distintas variedades de hemodiafiltración, han dado lugar a un renovado interés por la calidad del agua, persiguiéndose la obtención de un agua de gran pureza, con una mínima contaminación tanto química como microbiológica. Ante el incremento del interés por este tema, se realiza una revisión y actualización del tratamiento del agua para hemodiálisis.

El agua que se utiliza para la producción del líquido de hemodiálisis contiene cantidades variables de **contaminantes 1-6 partículas**, tanto minerales como coloides, sustancias en disolución y microorganismos con sus productos de degradación. Desde un punto de vista práctico se pueden dividir en contaminantes químicos y microorganismos. (Terregosa, Pérez y Giménez, 2012).

Referente en lo anterior, se plantea el siguiente problema: ¿En qué medida la propuesta de un diseño de la planta de producción de agua para hemodiálisis podría mejorar el suministro de agua limpia y purificada para la aplicación de diálisis para los diferentes pacientes que requieran dicho procedimiento?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Realizar el diseño de la implementación de mejora en el sistema de purificación de agua del departamento de hemodiálisis, de acuerdo con las normativas y aplicaciones técnicas vigentes, y poder garantizar la mejor calidad de agua para los pacientes en el Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Estudiar y analizar la importancia del tratamiento que requiere el agua para realizar el procedimiento de hemodiálisis, así como la normativa aplicable.
- Realizar cada una de las etapas de mejora en el diseño de la planta de tratamiento de hemodiálisis para conseguir el mejor rendimiento y calidad de agua para los pacientes.
- Realizar el estudio de mercadeo de los equipos o accesorios a instalar que cuenten con las características técnicas requeridas para mejorar el sistema.

1.3 Justificación

La hemodiálisis es un tratamiento diseñado para filtrar las toxinas y el agua de la sangre, imitando la función de los riñones en una persona sana. Se espera que, con el paso de los años, el número de personas que requieran este tratamiento continúe aumentando debido a factores como los hábitos de vida sedentarios y las costumbres alimenticias

inadecuadas. Para garantizar un procedimiento adecuado, es fundamental cumplir con todas las normas de calidad establecidas y asegurar que el agua utilizada sea de la más alta calidad. Por ello, la investigación de este proyecto busca utilizar los materiales correctos para cumplir con las normativas vigentes y suministrar agua ultrapura para el servicio de hemodiálisis del HDRACG.

Aunque el agua potable es apta para el consumo humano, no es adecuada para su uso en hemodiálisis debido a su contenido de impurezas, como pirógenos y otras sustancias contaminantes que pueden afectar el tratamiento. Esto subraya la urgencia de garantizar que los centros de salud cuenten con agua de alta calidad. Este objetivo se alcanza mediante un diseño y mantenimiento adecuados de los sistemas de distribución de agua, así como la implementación de materiales apropiados, como acero inoxidable y plásticos especiales en las redes de tuberías, que previenen la formación de biofilms que podrían comprometer la calidad del agua.

El presente proyecto se justifica por su enfoque en mejorar la calidad del agua utilizada en hemodiálisis, mediante la implementación de tecnologías y procedimientos rigurosos para garantizar la pureza del líquido de diálisis (LD). Desde un punto de vista práctico, la investigación busca mejorar el servicio ofrecido a los pacientes con insuficiencia renal crónica, especialmente aquellos de bajos recursos que dependen de este tratamiento como única opción de vida. Garantizar la pureza del líquido de diálisis (LD) a través de un adecuado diseño y mantenimiento del sistema de distribución de agua contribuye a evitar complicaciones graves de salud, como infecciones, reacciones tóxicas y daños sistémicos causados por la presencia de contaminantes. Además, resalta la importancia de utilizar materiales adecuados en las redes de tuberías, como acero inoxidable o

plásticos especiales como polietileno o propileno, para prevenir la formación de biofilms que afecten la calidad del tratamiento.

Desde un enfoque teórico, la investigación contribuye al conocimiento relacionado con el tratamiento de hemodiálisis, particularmente en lo que respecta a la calidad del agua utilizada en estos procesos. Asimismo, fortalece la comprensión sobre la relación entre los parámetros fisicoquímicos del líquido de diálisis y los efectos clínicos en los pacientes. Es importante mencionar que, al suministrar agua de alta pureza, se asegura que los pacientes reciban un tratamiento adecuado y que no estén expuestos a posibles contaminantes. Además, respalda estudios previos que indican que, aunque el agua potable es apta para el consumo humano, no es adecuada para la preparación del líquido de diálisis, lo que subraya la necesidad de una normativa técnica especializada en este campo. Según Pérez et al. (1995), citado por Mora (2019), "no sirve de nada utilizar un dializador con una membrana altamente compatible y de alta permeabilidad si el líquido de diálisis está contaminado con gran cantidad de pirógenos"; es decir, la calidad del agua es determinante para el buen funcionamiento de las máquinas. Cabe recalcar que, al suministrar agua ultrapura, se garantiza que el procedimiento se realice de manera adecuada y que los pacientes no estén expuestos a contaminantes. Además, es fundamental destacar que, en el proceso de hemodiálisis, el 96% del tratamiento depende directamente del agua utilizada.

Finalmente, desde el ámbito metodológico, esta investigación proporciona una guía clara sobre los procedimientos para evaluar y controlar la calidad del agua utilizada en hemodiálisis. Además, ofrece lineamientos para el diseño y mejora de los sistemas de tratamiento y distribución de agua en centros de salud, lo que puede adaptarse a otras

unidades médicas que brinden este servicio. Esto representa una aportación significativa para el desarrollo de protocolos estandarizados que garanticen la seguridad y eficiencia del tratamiento en diversas regiones.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes Internacionales

Se realizó una búsqueda de estudios previos relacionados con el tema de investigación, en este caso pertenecientes a nivel internacional en donde se encontraron cuatro investigaciones, en Colombia, Chile y España, las cuales se detallan seguidamente.

Echeverría y García (2015), en su proyecto de investigación realizado en Colombia, titulada “Propuesta de aplicación de herramientas de TPM a una planta de agua para máquina de hemodiálisis”, el cual tuvo como objetivo general: Proponer una estrategia de mejora continua con la aplicación de 6S e ILUO como herramientas de TPM, mejorando los estándares de calidad de la planta de agua de osmosis inversa del centro de servicio técnico en Bogotá. Lograron concluir que, la implementación de 6S le permitirá detectar las necesidades y los sobrantes del proceso que rodean la planta de agua de osmosis inversa y luego de esto estandarizar los procesos y herramientas mejorando la calidad del proceso para su uso. Por lo que recomiendan la implementación de este proyecto en la planta de agua de osmosis inversa del centro de servicio, en las plantas de agua de clínicas y centros de salud, así como para otras tecnologías.

Bocos (2015), en su proyecto de investigación realizado en España, titulado “Diseño de una planta de producción de agua para hemodiálisis”, el cual se desarrolló con los siguientes dos objetivos generales: 1) Diseñar una planta de producción de agua para hemodiálisis, de acuerdo al estado actual de la técnica, de la normativa vigente y, de forma que se garantice una máxima calidad del agua junto con la mayor continuidad

posible en el suministro y, 2) Dimensionar cada una de las etapas de las que consta la planta, para conseguir un rendimiento y una calidad del agua óptima. Logró concluir que, hay que seleccionar los tratamientos de agua más eficaces para el volumen y tipo de agua a tratar. Por lo que recomienda que, se debe estudiar detalladamente la técnica de destrucción de cloraminas mediante luz UV, y quizás intentar aplicarla justo antes de la entrada de agua al monitor de HD.

Rivas (2019), en su proyecto de investigación llamado “Diseño de una máquina de ósmosis inversa para producir agua ultrapura en el laboratorio de manufactura de la pucp” el cual tuvo como objetivo general: Diseñar una máquina de purificación de agua a partir de agua potable, con un alto ahorro energético y poco desperdicio de agua potable. El proyecto de Rivas (2019) suministra información importante, veraz y útil que refuerza la bibliografía consultada para el desarrollo de este proyecto, tal información puede ser usada para los cálculos dimensionamiento puesto que una diferencia entre los proyectos es la cantidad de líquido ultrapuro producido y la posibilidad variar el caudal producido según se requiera. Así mismo, el proyecto de Rivas (2019) carece de un sistema de control que suministre alarmas o información digital de lo que esté sucediendo en la planta en tiempo real, soporte de ello, su recomendación de hacer un monitoreo visual de los instrumentos de usados en la máquina, tarea que puede ser realizada mediante los sensores y la programación a usar en nuestro proyecto ya que se busca una automatización y control, partiendo desde el primer funcionamiento de la máquina.

Mora (2019), en su proyecto de investigación realizado en Colombia, titulada “Diseño de una planta de tratamiento de agua automatizada portable mediante el método de osmosis inversa para optimizar del funcionamiento de las máquinas de hemodiálisis”, el cual se llevó a cabo con el objetivo general de: Diseñar una planta portátil automatizada para el tratamiento y purificación del agua potable con el fin de optimizar el funcionamiento de las máquinas de hemodiálisis. Logró concluir que, teniendo en cuenta que la investigación realizada se basa en la creación de una planta de tratamiento de agua para el funcionamiento ideal de máquinas de hemodiálisis, se debió realizar diferentes diagramas, los cuales otorgaron una idea general de cuáles serían los diferentes componentes a utilizar en la misma, de igual forma, su ubicación y organización para su ideal funcionamiento. Estos diagramas se logran teniendo en cuenta la función de cada uno de los componentes requeridos para tratar el agua y así mismo captar algunas de sus características, tales como, la presión, el caudal, la temperatura o la conductividad; pues estas son de gran utilidad para cuando se desea llevar a cabo un prototipo específico, el hecho de conocer dimensiones de los componentes permitirá realizar un diseño en 3D otorgando de esta manera mayor información acerca del tamaño final que podrá presentar la máquina.

Por lo que recomienda que, cuando se quiera diseñar el sistema de control para producir una cantidad de permeado deseado y estable, se debe tener en cuenta que no existe un modelo paramétrico que represente una membrana osmosis inversa debido a su complejidad ya que el frecuente cambio en las características del agua hace que este tipo de sistemas presenten variables variantes en el tiempo debido a grado de ensuciamiento o incrustación presente en las perforaciones de las membranas, también

es importante mencionar que la osmosis inversa es un proceso multivariable donde se deben controlar paralelamente dos variables de entrada (flujo y conductividad) y dos variables de salida (presión y caudal de salmuera). Al momento de diseñar el tipo de controlador, se debe considerar la cantidad de procesamiento acorde al microcontrolador usado ya que al ser sistemas multivariables requerirán de gran poder de procesamiento.

1.4.2 Antecedentes Nacionales

Se realizó una búsqueda a nivel nacional de los principales estudios elaborados, sobre las consignas de la investigación. De la misma se encontraron dos investigaciones, éstas se detallan seguidamente.

Espinach y Avellán (2013), en su artículo de investigación realizado en Costa Rica, titulada "Indicadores de calidad en la unidad de hemodiálisis del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia", Lograron concluir que, los malos resultados demostrados en este estudio son interpretados como un avance en el conocimiento de la hemodiálisis, pero que evidencian el largo trabajo pendiente para mejorar los índices de calidad y permite desarrollar estrategias para mejorar cada indicador, según los recursos que se tienen en nuestro medio. Por lo que recomiendan que, al detectar la mala calidad del agua utilizada en la unidad de diálisis, que fue demostrado por las altas cantidades de endotoxinas encontradas tanto antes como después del proceso de purificación que hace la máquina. Considerando que estas endotoxinas son parte de la justificación del estado de inflamación permanente y este a su vez perpetua la anemia, resulta prioritario que

cualquier unidad de hemodiálisis de Costa Rica cuenta con una planta de purificación de agua para diálisis.

Rosales (2022) destaca un informe titulado “Avanzado sistema purificador de agua es aliado de terapias de hemodiálisis en Costa Rica” en donde explica que, cada planta de tratamiento de agua para hemodiálisis instalada en el país se ha diseñado tomando en cuenta la infraestructura de cada hospital y las características del agua disponible . Un sistema avanzado que centraliza el suministro de agua purificada para las máquinas de hemodiálisis ya está presente en tres centros hospitalarios del territorio nacional. Esta tecnología, cuyo fabricante de origen alemán es líder mundial en soluciones renales, fue recientemente adquirida por el Hospital México (Figura 1). Su sistema se suma a los instalados en el Hospital Enrique Baltodano Briceño en 2021 y en el Hospital Nacional de Niños en 2019.



Figura 1. Planta de Tratamiento de Agua Hospital México, Inauguración Noviembre del 2022. Fuente: Rosales, 2022.

Rosales (2022) concluye que, cada sistema o planta de tratamiento central de agua para hemodiálisis del fabricante Fresenius Medical Care, ha llegado al país a través de Nutricare S.A., empresa costarricense dedicada a la comercialización y la distribución de productos y equipos de última generación para diversas especialidades médicas. Cerca de 290 personas reciben actualmente terapias de hemodiálisis en el país. Y alrededor de un 45% de esta población se beneficia con la operación de esas tres plantas de tratamiento de agua. Estos sistemas brindan soluciones a la medida, pues se han adaptado a las condiciones de cada centro médico; además ofrecen diversas ventajas, entre ellas, procesos automatizados y monitoreo continuos sobre el desempeño de los procesos de purificación que permiten ahorrar tiempo y recursos. La hemodiálisis es un tratamiento que filtra las toxinas y el agua de la sangre, emulando la función que cumplen los riñones sanos, por lo que ayuda a que las personas con enfermedad renal crónica se sientan mejor y tengan una esperanza de vida más larga.

Por lo que se recomienda que, para aplicar esta terapia, se requiere purificar el agua, a fin de eliminar partículas como minerales, metales y sedimentos que serían potencialmente tóxicos si entraran en contacto con la sangre, así como microorganismos. El agua pura se mezcla con ácido y bicarbonato para formar el líquido de diálisis y se transporta al dializador (membrana de la máquina de diálisis, donde se realiza el proceso de depuración o limpieza de la sangre).

1.5 Proyecciones

La propuesta pretende:

1. Conocer la importancia del tratamiento que requiere el agua para realizar el procedimiento de hemodiálisis, así como la normativa aplicable.
2. Crear cada una de las etapas de mejora en el diseño de la planta de tratamiento de hemodiálisis para conseguir el mejor rendimiento y calidad de agua para los pacientes
3. Dar una propuesta de un sistema de producción de agua para hemodiálisis, de acuerdo con el estado actual de la técnica, de la normativa vigente y de forma que garantice una máxima calidad de agua junto con la mayor continuidad posible en el suministro.
4. Realizar el estudio de mercadeo de los equipos o accesorios a instalar que cuenten con las características técnicas requeridas para mejorar el sistema.

1.5.1 Alcances

1.5.1.1 La investigación permitió la elaboración de la propuesta de diseño una planta de producción de hemodiálisis avanzada que incorpore las tecnologías vigentes y las normas actuales correspondientes. Esta propuesta incluye procedimientos detallados, medidas de avance tecnológico, para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad de la persona el cual requiera el proceso de diálisis.

1.5.1.2 Se pretende mejorar significativamente la pureza del agua mediante la implementación de procedimientos que optimicen y minimicen la creación de bacterias en el trayecto de la tubería del agua ya purificada.

1.5.1.3 Se realizó un análisis detallado de estudio de mercado del proyecto, evaluando el costo beneficio de la implementación de los procedimientos propuestos.

1.5.2 Limitaciones

1.5.2.1 Una de las limitaciones es el mantenimiento que debe requerir el sistema de producción de hemodiálisis puede ser elevado, lo que puede ser una limitante en algunos centros.

1.5.2.2 La capacidad de producción de la planta de tratamiento debe tener la capacidad suficiente para satisfacer la demanda de diálisis, lo cual puede ser un desafío en situaciones de alta demanda.

CAPITULO II

2.1 Marco Teórico

En este apartado, se desarrolla la parte teórica-conceptual de los objetivos planteados en esta investigación, los cuales dan lugar a una revisión bibliográfica amplia sobre los sistemas de purificación de agua de hemodiálisis.

2.1.1 Control de Agua y Líquido de Diálisis.

Se deben realizar controles de calidad, comprobando diariamente la dureza del agua, los contenidos de cloro libre y total, así como la resistividad o su equivalencia en conductividad. Mensualmente, se debe comprobar la cuantificación bacteriana y de endotoxinas (LAL), semestralmente, el contenido en Aluminio y anualmente, los elementos de todos los componentes del sistema de tratamiento. Es necesaria la existencia de una persona responsable del sistema de tratamiento del agua que registre todos los resultados obtenidos. Éstos se anotan en un libro de seguimiento, en el que también se registra la periodicidad con que se realicen estas comprobaciones. El montaje de una planta nueva de tratamiento de agua implica, además, la determinación de toda la batería de posibles contaminantes (Pérez y Rodríguez, 2023).

2.1.1.1 La Hemodiálisis y la Preparación del Líquido de Diálisis

Los riñones son los órganos que filtran la sangre, eliminando mediante la orina los residuos metabólicos del organismo produce el cuerpo humano. Además, los riñones producen hormonas que mantienen los huesos y la sangre sanos. Cuando los riñones fallan, los desechos químicos que las células excretan no se eliminan, se acumulan en el

cuerpo y la presión aumenta y el cuerpo puede retener exceso de líquido y no produce glóbulos rojos (Bocos, 2015).

La diálisis se utiliza para tratar la insuficiencia renal avanzada y permanente, se lleva aplicando desde la década de los setenta, cuando se convirtió en un tratamiento práctico para la insuficiencia renal (Bocos, 2015). Los equipos más modernos para aplicar el procedimiento de diálisis siguen dependiendo de forma crucial de la calidad del agua para funcionar.

Según Bocos (2015) los aparatos para diálisis más modernos y fiables han hecho que la diálisis se haya convertido en una técnica muy segura. Pero incluso con los mejores procedimientos y equipos, la diálisis sigue dependiendo de forma crucial de la calidad del agua que necesitan para funcionar.

La hemodiálisis es una forma efectiva de mantener la salud y la calidad de vida en personas con enfermedad renal avanzada. Acerca del concepto de hemodiálisis, Tapia (2011) mencionado por Mora (2019) declara lo siguiente:

...Es un procedimiento mediante el cual la sangre se conduce entubada desde el organismo hasta una maquina "riñón artificial", en la que después de atravesar un filtro de limpieza (membrana artificial o dializador), que permite recoger las sustancias tóxicas de la sangre y aportar otras beneficiosas, es reenviada de nuevo al cuerpo (p.38).

Con base en lo anterior, la hemodiálisis es un tratamiento que tiene como objetivo sustituir el trabajo de los riñones cuando no están funcionando correctamente, filtrando la sangre del organismo y se hace circular por un dializador, o filtro donde se eliminan el exceso de

toxinas y líquidos del cuerpo humano. Luego de la filtración se devuelve la sangre limpia al organismo.

Como preparación previa para el tratamiento, el paciente es sometido a una intervención quirúrgica en la que se prepara un acceso vascular que permita la extracción y devolución de la sangre al cuerpo. En casos agudos, donde se necesita dializar al paciente inmediatamente, se utiliza un catéter venoso central. Por el contrario, en pacientes crónicos se utiliza en la mayoría de los casos una fístula arteriovenosa que consiste en la unión de una vena con una arteria (generalmente el acceso se realiza con la arteria radial, a la altura del antebrazo). Luego de anastomosar quirúrgicamente los vasos, el acceso tiene un período de maduración de aproximadamente cuatro semanas, durante el cual el flujo sanguíneo que lo atraviesa se incrementa hasta llegar a los valores necesarios para permitir el tratamiento (Pérez et al., 2016).

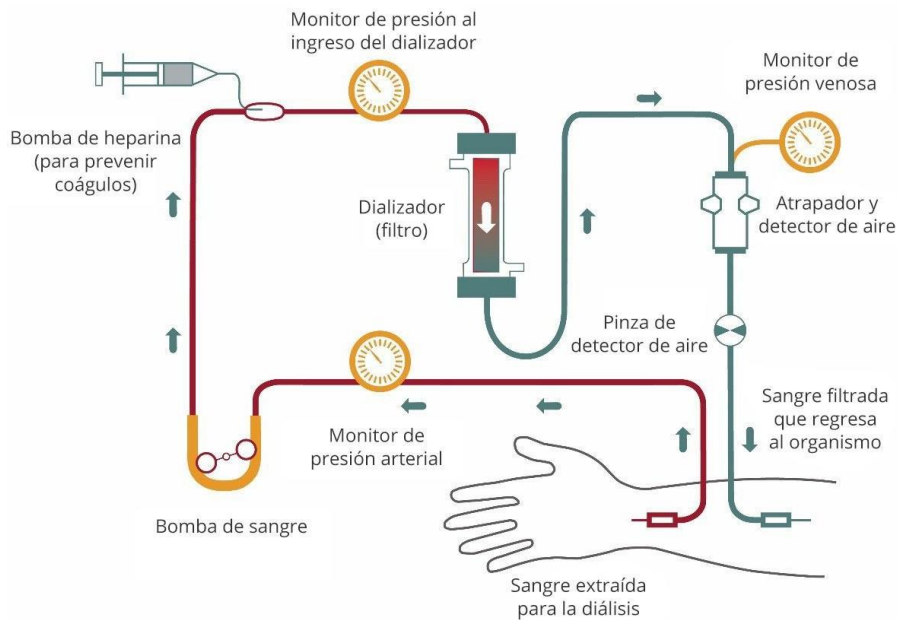


Figura 2. Esquema de hemodiálisis (Fuente: Instituto Nacional de la Diabetes y las Enfermedades Digestivas y Renales, 2018).

En la figura 2 se esquematizan los componentes necesarios para la realización de hemodiálisis, durante la hemodiálisis, la sangre extraída a través del acceso vascular se hace circular por un circuito extracorpóreo mediante una bomba peristáltica que fuerza a la sangre a pasar a través del dializador (Fernández, 2023). El proceso de hemodiálisis no solo permite la eliminación de desechos tóxicos del cuerpo, sino que también ayuda en la eliminación de líquidos innecesarios, favoreciendo la presión arterial y equilibrando algunas sustancias químicas presentes en el cuerpo como el potasio y el sodio.

2.1.1.2 Fuente del Agua Filtración y Tratamiento

El agua de diálisis es el término que se utiliza para referirse al agua purificada utilizada en los procesos de diálisis renal. Durante la diálisis, el riñón artificial, también conocido como máquina de diálisis, utiliza agua purificada para limpiar la sangre de impurezas y eliminar los desechos del cuerpo de una persona cuyos riñones no están funcionando correctamente.

Según Bocos (2015) el agua de diálisis se utiliza para preparar el líquido de diálisis, siendo más de un 96% de su contenido. El líquido de diálisis finalmente se pone en contacto con el paciente a través del dializador (es donde entran en contacto la sangre del paciente con el líquido de diálisis, siendo el elemento fundamental para la hemodiálisis), en una cantidad de entre 90 y 240 litros por sesión aproximadamente.

El líquido de diálisis que es empleado en los tratamientos de diálisis está conformado en su gran mayoría de agua, al ser esta su ingrediente principal se debe tener una delicada atención a la calidad de esta. La importancia que toma esta calidad es que, a través de los años, se ha visto como las características físico - químicas y microbiológicas del agua que no es debidamente tratada para preparar líquido de diálisis afectan de forma nociva el organismo de las personas que son sometidas a hemodiálisis. Es por ello por lo que la calidad del agua usada para el líquido de diálisis debe estar sometida a normas o estándares de calidad que buscan garantizar la salud del paciente.

Según Fernández (2023) durante un tratamiento de hemodiálisis, el paciente está en contacto con más de ciento veinte litros de fluido de diálisis compuesto en gran medida

por agua de diálisis. Para garantizar la seguridad del tratamiento, es fundamental asegurar la calidad del agua utilizada para generar este fluido

Para llegar a obtener un agua de alta pureza se deben someter a tratamientos que eliminen de ella cualquier tipo de contaminación. Por ello, Fernández (2023) dice que, el agua de red no tiene las características necesarias para permitir un tratamiento de hemodiálisis, ya que los niveles de contaminantes que son aceptables para el agua potable difieren de aquellos que se aplican al agua de diálisis; es por eso por lo que debe ser tratada para garantizar la seguridad del tratamiento.

Signos y síntomas	Posible contaminante del agua
Anemia	Aluminio, cloraminas, cobre, zinc, formaldehído, nitratos
Enfermedad ósea	Aluminio, Fluoruro
Hipertensión	Calcio, Sodio
Hipotensión	Bacterias, endotoxinas, nitratos
Acidosis metabólica	pH bajo, sulfatos
Debilidad muscular	Calcio, magnesio
Náuseas y vómitos	Bacterias, Calcio, Cobre, Endotoxinas, Bajo pH, Magnesio, Nitratos, Sulfatos, Zinc
Deterioro neurológico y encefalopatía.	Aluminio
Hemólisis	Cloraminas, Cobre, Nitratos, Formaldehído

Figura 3. Efectos de los contaminantes químicos presentes en el agua a los pacientes

(Fuente: Tong, et al. (2001) citado por Mora, 2019, p.43).

El agua usada para producir el líquido de diálisis, no proviene del agua potable, pues se piensa que al poder ser consumible, está libre de cualquier contaminante; sin embargo, esto es un error, debido a que el uso del agua potable para preparar líquido de diálisis a largo plazo causa problemas de salud a los pacientes y se deben a muchos factores como los materiales usados para la construcción de la planta potabilizadora, los materiales usados en sus sistema de distribución municipal o los componentes agregados en su proceso de potabilización, tal a como se muestra en la figura 3.

2.1.1.3 Agua Purificada: Composición y Dilución

La contaminación del agua tiene un gran impacto tanto en la salud como en el medio ambiente. Según Morell y Hernández (2000) citado por Pérez et al. (2016), la apreciable concentración de componentes indeseables (por ej., cloruros, nitratos y metales pesados) limita la viabilidad del líquido y aumenta su toxicidad. Es imprescindible monitorear aspectos como la potabilidad, la presencia de coliformes fecales, el cloro libre, la alcalinidad, la cantidad de sólidos suspendidos, la conductividad y la dureza, ya que los contaminantes provienen de diferentes prácticas humanas que afectan su calidad y, por ende, todas las actividades y organismos que dependen de ella.

Históricamente, al comienzo de la hemodiálisis, el tratamiento del agua simplemente intentaba prevenir el síndrome de agua dura y las contaminaciones bacterianas. Posteriormente hubo que enfrentarse a contaminantes difíciles de eliminar como es el caso de algunos metales, como el aluminio, cuya intoxicación produce encefalopatía y osteomalacia, o el caso de las cloraminas, que pueden provocar anemización por hemólisis en las unidades de hemodiálisis (Bocos, 2015).

Actualmente se intenta conseguir un líquido de hemodiálisis ultrapuro, que sólo contenga agua y los componentes necesarios con un grado de pureza como el que se exige para las soluciones para infusión intravenosa. Por ello, Bocos (2015) explica que, una parte importante de la biocompatibilidad de la técnica de hemodiálisis la constituye el líquido de diálisis y de ahí la importancia de su nivel de calidad.

Según Pérez et al. (2016) el agua purificada deberá tener una conductividad máxima de $5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. En situaciones de excepción se podrá aceptar menos de $20 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ mientras se identifica la causa del aumento de la conductividad. Si a pesar de contar con un tratamiento del agua con doble ósmosis en serie o una ósmosis más un electrodesionizador en serie no se alcanza $5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de conductividad y todos los contaminantes químicos medidos, están en niveles correctos, se fijará el nivel de conductividad existente como de referencia, siempre inferior a $20 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$. En esos casos se identificará la causa del aumento de la conductividad, como puede ser dióxido de carbono, pH, Na (Sodio), etc.

Una vez fijado el nivel de referencia, tanto si permanece en valores inferiores a $5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ como en la excepción mencionada, aumentos significativos de la conductividad, en más de un 30% de la de referencia, implicarán la determinación de todos los contaminantes químicos, el control de la calidad del agua de aporte y se identificará la causa del aumento de la conductividad. La conductividad del agua tratada se vigilará diariamente, anotándose su valor y las causas de sus cambios significativos. Se debe calibrar el conductímetro una vez al año como mínimo, y se recuerda la utilidad de compararlo con los TDS. Se recomienda que la concentración máxima de aluminio en el agua tratada sea de 0,005 ppm (5g/l) (evidencia nivel C, 2) (Pérez et al., 2016).

Referente en lo anterior, el tratamiento del agua purificada es un proceso riguroso que debe garantizar la eliminación de contaminantes para su uso en procedimientos médicos como la hemodiálisis. La conductividad del agua es un indicador clave de su pureza, y cualquier desviación en sus valores debe investigarse para evitar riesgos en la salud de los pacientes.

2.1.1.4 Monitoreo y Control: Parámetros a Controlar

El proceso de hemodiálisis es realizado gracias a una máquina especial conocida como monitor de hemodiálisis

Un monitor de hemodiálisis es un equipo médico utilizado en la terapia de hemodiálisis para controlar y monitorear el proceso de purificación de la sangre de un paciente (Figura 4). Según Mora (2019), el monitor de hemodiálisis está conformado por dos circuitos sanguíneos, uno extracorpóreo y un circuito hidráulico que se interconectan a través de la membrana del dializador, lugar donde la sangre del paciente y el líquido dializador entran en contacto. El monitor de hemodiálisis realiza las siguientes funciones que se consideran principales:

- Bombear la sangre del paciente al dializador y viceversa, controlando el flujo para seguridad.
- Construir el líquido de diálisis.
- Filtrar los desechos existentes en la sangre.
- Medir y controlar los flujos, presiones de la sangre y del líquido de diálisis.



Figura 4. Monitor de hemodiálisis (Fuente: Bocos, 2015, p.21).

El monitor de hemodiálisis tiene un sistema de control que gracias a los medidores y actuadores que integra, permite realizar un excelente proceso de hemodiálisis otorgando seguridad y fiabilidad.

2.1.2 Tratamiento del Agua para la Diálisis

El tratamiento del agua para la diálisis es de vital importancia, ya que el agua utilizada en el proceso de diálisis debe cumplir con altos estándares de calidad para garantizar la seguridad del paciente y para cumplir con este propósito, el agua debe someterse a varios procedimientos depurativos que serán clasificados según la función de la forma a purificar en el proceso.

2.1.2.1 Tratamiento Físico: Preparación, Pretratamiento, Tratamiento y Distribución

Las clínicas de diálisis cuentan con dos circuitos de agua completamente separados. Uno de ellos es el circuito de agua de red, que se utiliza para lavado de manos, sanitarios, limpieza, etc. El segundo es un circuito de agua tratada, que es utilizado principalmente para la realización del tratamiento, pero que puede tener otras aplicaciones como el reúso de dializadores.

Fernández (2023) explica que, el agua de diálisis es obtenida al someter al agua de red al tratamiento a través de la denominada cascada de purificación. Puede explicarse este concepto como una serie de pasos o etapas que atraviesa el agua, forma tal que a la salida de cada paso se obtiene agua con una calidad tal que puede ser tratada por la próxima etapa, sin causar ningún desperfecto en el equipamiento utilizado. La cascada de purificación consta de un pretratamiento (filtro multimedia, ablandador, filtro de carbón activado, etc.) del cual se obtiene agua con una calidad tal que puede ser procesada por el tratamiento principal, que en este caso es la ósmosis inversa. Al final de la cascada de purificación se encuentra el anillo de distribución, que hace llegar el agua de diálisis a todos los puntos de consumo.

El circuito de agua tratada debe contar además con bombas que permitan hacer llegar el agua de red a la planta de tratamiento de agua con la presión necesaria, y puntos de muestreo que permitan la extracción de muestras para el monitoreo de la calidad de agua de red. Si las características fisicoquímicas del agua así lo requieren, este circuito debe contar con los elementos de acondicionamiento adicionales requeridos para garantizar una cierta calidad de agua a la entrada de la planta de tratamiento. En la figura 5 se puede observar un esquema general de una PTA típica empleada en una clínica de diálisis.

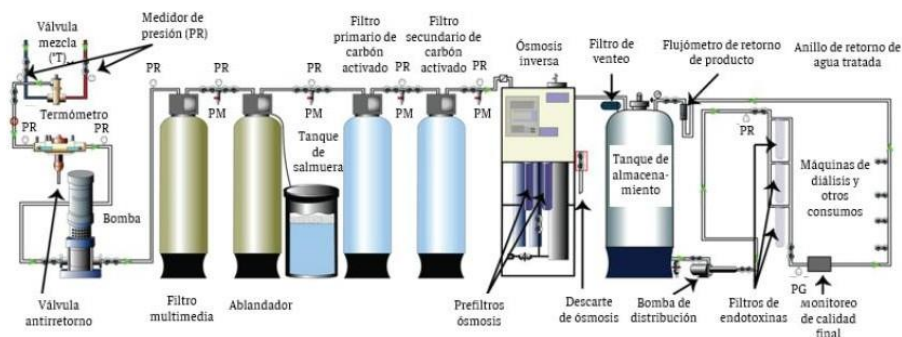


Figura 5. Esquema general de una PTA para una clínica de diálisis (Fernández, 2023, p.20).

Pérez y Rodríguez (2022) expresa que, durante la etapa de preparación del agua, la cual consiste en eliminar la mayoría de las partículas en suspensión. Este paso se logra habitualmente mediante filtros de 500 a 5 μm de poro. Previamente a estos filtros, el depósito de grandes cantidades de agua puede actuar eliminando partículas por sedimentación. Sin embargo, si no se cuenta con este sistema de sedimentación, el filtro inicial deberá ser de los de arena y antracita, que precisa ser lavado contracorriente

periódicamente. A continuación, para lograr un mayor rendimiento, se colocarán filtros en serie de mayor a menor porosidad. Estos filtros se deben cambiar periódicamente en función de su aspecto y/o cuando la caída de presión que condicionen en el circuito sea mayor de 0,5-1 Kg/cm². Su duración está condicionada por la cantidad de partículas del agua suministrada.

Por otra parte, Fernández (2023) describe que, el pretratamiento tiene como objetivo eliminar los sólidos suspendidos y los contaminantes químicos que no son compatibles con las membranas de la máquina de ósmosis inversa y que pueden obstruirlas o dañarlas. Como puede verse en la figura 6, el pretratamiento está constituido por tres subetapas que se suceden con un orden basado las características del agua al inicio y final de cada una.

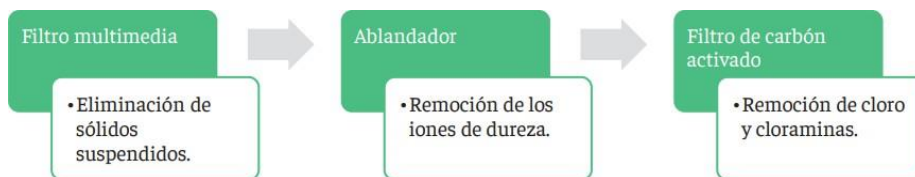


Figura 6. Esquema de subetapas del pretratamiento (Fernández, 2023, p.21).

La primera subetapa es un filtro multimedia cuya función principal es la eliminación de los sólidos suspendidos y micropartículas (diámetro comprendido en el intervalo 10-15 μ m).

Los componentes del lecho son seleccionados en función de los contaminantes del agua

de red a ser tratada; pero generalmente incluyen grava, arena y antracita, como puede verse en la figura 7.



Figura 7. Diagrama filtro multimedia (Fernández, 2023, p.21).

Fernández (2023) explica que los componentes son dispuestos en capas cuyo tamaño de partícula va disminuyendo a medida que el agua va atravesando el filtro, de manera que las partículas más grandes son retenidas en las primeras capas y se evita la saturación de las capas sucesivas.

Este tipo de filtro permite ser lavado, es decir que una vez que las distintas capas que componen el lecho se comienzan a saturar con las partículas retenidas, es posible devolver al filtro su capacidad de filtrado, al menos parcialmente.

Para esto, se procede a realizar un retrolavado que consiste en hacer circular agua por el filtro en sentido contrario al que se utiliza cuando se está preparando el agua para la próxima subetapa del pretratamiento. Cuando el agua circula desde los lechos con menor tamaño de partícula hacia aquellos de mayor tamaño, desobstruye los huecos y arrastra

las partículas retenidas por el filtro, eliminándolas del mismo. Por supuesto, cuando se realiza esta operación, el filtro es desconectado de la siguiente subetapa del pretratamiento y toda el agua utilizada en el retrolavado es descartada.

Una vez eliminadas las partículas del agua, es necesario remover los contaminantes químicos disueltos. Puntualmente, la segunda subetapa del pretratamiento es un ablandador, como el que puede observarse en el esquema de la figura 8.

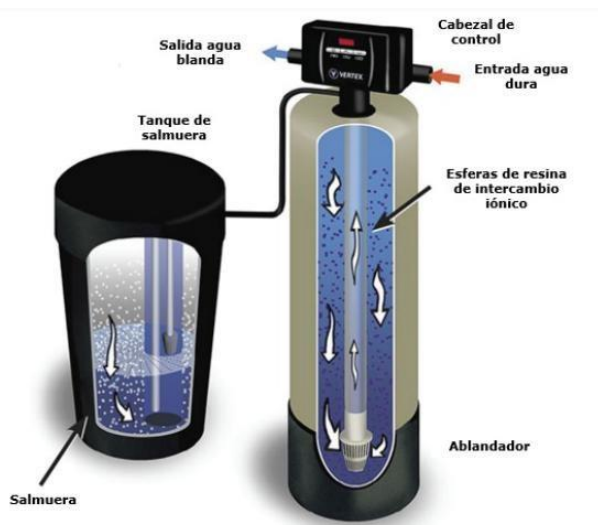


Figura 8. Esquema ablandador (Fernández, 2023, p.22).

El ablandador es un intercambiador iónico cuyo elemento activo es una resina con cationes fuertemente acídicos (CFA) que intercambia iones Na^+ por los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} presentes en el agua. El funcionamiento del intercambiador iónico se basa en la presencia de moléculas con carga en su interior. Dado que las fuerzas iónicas que unen

a dichas moléculas a la resina son más débiles que las que unirían a los iones a remover (que tienen dos cargas positivas en lugar de sólo una), ante la presencia de estos, la resina cede al agua un ion Na^+ y retiene a un ion Mg^{2+} o Ca^{2+} . Cuando la resina se satura con iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , la misma puede ser regenerada al “inundarla” con una solución rica en iones Na^+ que desplacen a los iones removidos del agua tratada (Fernández, 2023). La última subetapa del pretratamiento consiste en un filtro de carbón activado, como el que puede verse en la figura 9. La función primaria del filtro de carbón activado es la remoción del cloro y las cloraminas.

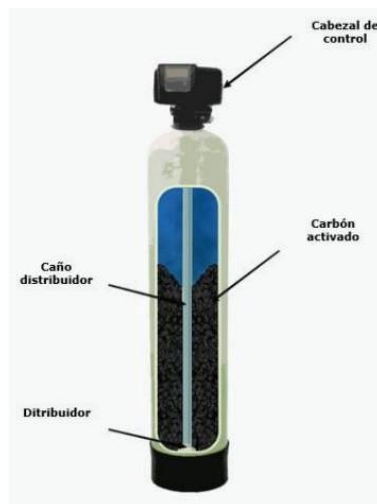


Figura 9. Esquema filtro de carbón activado (Fernández, 2023, p.22).

Estos contaminantes orgánicos producen hemólisis en los pacientes que son expuestos a ellos, causándoles anemia. Además, Fernández (2023) dice que, la presencia de cloro o cloraminas en el agua que ingresa a la máquina de ósmosis inversa produce daños en

las membranas. El carbón activado es derivado del carbón vegetal sometido a un tratamiento que permite aumentar su porosidad y en consecuencia su superficie. Los contaminantes orgánicos presentes en el agua son adsorbidos por el lecho de carbón activado. Dado que los contaminantes adsorbidos no pueden ser removidos del carbón activado, este tipo de filtros no puede ser regenerado, y resulta necesario reemplazar su carga periódicamente. Se realiza sin embargo un retrolavado periódico del filtro para remover cualquier partícula que haya ingresado en el mismo. Este proceso permite también que las partículas de carbón se reordenen dentro del filtro exponiendo nuevas caras de estas al agua, lo que incrementa la capacidad de adsorción del filtro.

2.1.2.2 Osmosis Inversa para la Aplicación de Hemodiálisis

El elemento fundamental de los tratamientos de agua es la ósmosis inversa. Es el transporte espontáneo de un disolvente desde una disolución diluida a una disolución concentrada a través de una membrana semipermeable, que impide el paso del soluto, pero deja pasar el disolvente, para intentar igualar las concentraciones a ambos lados de la membrana (Fernández, 2023).

Para el caso del agua, el proceso de ósmosis inversa sirve para la separación de materia orgánica o inorgánica presentes en el líquido, se logra gracias a una membrana semipermeable con un coeficiente mayor de presión para atravesarla que la presión osmótica del agua. La solución final, es un agua pura libre de materiales como coloides, minerales, bacterias, sales, etc. En la ósmosis se ven implícitas las fuerzas naturales, por lo que después de un tiempo se podrá apreciar un aumento de volumen en el lado de la

solución con mayores solutos y una disminución en la solución de menor concentración de solutos, esta diferencia entre ambos es conocida como presión osmótica (Figura 10).

La máquina de ósmosis inversa permite eliminar los minerales disueltos en el agua valiéndose de una (o varias) membranas semipermeables. Estas membranas permiten el paso del agua y algunos iones, pero no pueden ser atravesadas por la mayoría de los sólidos disueltos (principalmente iones).

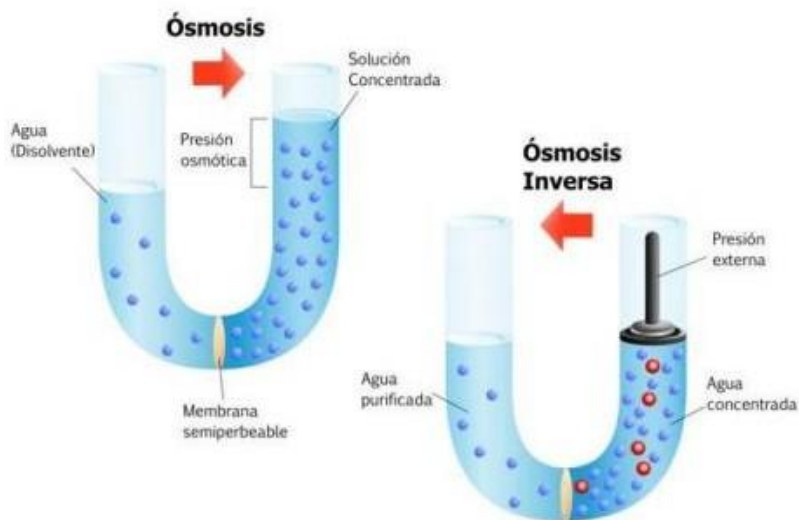


Figura 10. Ósmosis - Ósmosis Inversa (Mora, 2019, p.53).

Es así como Fernández (2023) expresa que, el proceso de ósmosis inversa consiste entonces en la aplicación de una presión hidrostática mayor a la presión osmótica en el compartimiento donde se encuentra la mayor concentración de sólidos disueltos (ver

figura 10). La presión aplicada hace que el agua atraviese la membrana en el sentido opuesto al que lo haría naturalmente por ósmosis, generando una solución muy concentrada en uno de los compartimientos y una con una muy baja concentración en el otro. Por lo tanto, el agua de uno de los compartimientos es purificada (“permeado”) mientras que en el otro compartimiento se encuentra un “concentrado” de la mayor parte de los minerales presentes en el agua que alimenta a la máquina de ósmosis inversa, y que será descartado (“descarte” o “rechazo”).

Finalmente, en la etapa de distribución Pérez y Rodríguez (2022) identifica las características del sistema de distribución del agua en una Unidad de hemodiálisis, las cuales son las siguientes:

El agua tratada es propulsada por una bomba de presión a través del circuito de distribución hasta las máquinas de hemodiálisis. El circuito debe ser cerrado y disponer de dos bombas de presión en paralelo por si surgiera la avería de una de ellas. El agua tratada debe circular en el circuito de distribución a una velocidad mayor de 1 m/seg, que minimice los riesgos de contaminación y formación de biofilm bacteriano, por lo que se debe calcular especialmente la sección de este. El agua no consumida retorna al tratamiento de agua y pasa de nuevo por él.

Los materiales más adecuados para el circuito de distribución del agua son: acero inoxidable de grado farmacéutico; polietileno expandido/reticulado (PEXA); acrilonitrilo butadieno estireno; polipropileno; polifloruro de vinilo y policloruro de vinilo. En todo caso, deberán estar etiquetados para uso sanitario y con marcado CE. Actualmente, se recomiendan los dos primeros por ser aptos para esterilización por calor. En el diseño del circuito de distribución, se deben evitar los espacios muertos, donde fácilmente puede

producirse crecimiento bacteriano y formarse un biofilm, difícilmente eliminable. Las tomas de distribución a las máquinas deben arrancar directamente del circuito y ser de la menor longitud posible. Los sistemas en U y los anillos secundarios son los circuitos más usados y recomendables.

2.1.2.3 La utilización de las Lámparas UV Como Método de Purificación

Dentro de los tratamientos biológicos para la purificación del agua, se desarrolla el siguiente de acuerdo con Mora (2019):

- **Lámpara UV:** la luz ultravioleta, es un tipo de radiación electromagnética la cual es invisible al ojo humano y posee una gran cantidad de utilidades en distintas áreas y oficios; dentro de estos encontramos su utilización en tratamientos de agua, gracias a que esta luz cuenta con la capacidad de eliminar microorganismos, bacterias y demás virus que se encuentran en la misma, purificando de esta manera el agua sin necesidad de agentes químicos, convirtiéndose en uno de los germicidas más poderosos en el uso de filtros y tratamientos de este líquido.

Es importante destacar que el tratamiento del agua para la diálisis debe ser realizado por personal especializado y en conformidad con las regulaciones y normativas locales y nacionales. En el Hospital Doctor Rafael Ángel Calderón Guardia (HDRACG), se realizan los servicios de mantenimiento preventivo y correctivo para la unidad centralizada de ósmosis inversa para tratamiento de agua; sin embargo, los repuestos y accesorios necesarios para mantener en óptimas condiciones de funcionamiento los equipos no son los mejores actualmente (Anexo 1).

En ello, Mora (2019) explica que, esta luz utilizada con cierta intensidad y tiempo estipulado tiene la capacidad de esterilizar o incluso rostizar dichos microorganismos, esto va dependiendo el equipo que se maneje para dicha actividad, cabe resaltar que esta luz suele funcionar donde agentes químicos como el cloro no logran llegar. Los tratamientos de agua con luz ultravioleta tienen una desinfección del agua garantizada de hasta un 99,99% de los agentes patógenos; aunque para lograr que este porcentaje sea efectivo, se debe tener en cuenta que el agua a tratar no está turbia, pues en este caso la luz no podrá penetrar perfectamente en el flujo del líquido.

Estas purificaciones de agua se llevan a cabo mediante radiación o iluminación con longitudes de onda desde 200 a 300 nanómetros; debido a esto las células de los microorganismos que son expuestos a este proceso, absorben los fotones UV causando una reacción fotoquímica irreversible, la cual inactiva y destruye las células de estos. Por tal razón, es que este proceso es uno de los más confiables y utilizados a lo largo de la historia, pues aparte de purificar el agua, da una desinfección instantánea de la misma lo cual ahorra tiempo y relativamente costos, es segura y ambientalmente es adecuada (Mora, 2019).

Según la empresa Light Sources (2022) la luz ultravioleta (UV) es un método eficaz de reducción del Carbono Orgánico Total (COT), ya que se utiliza para destruir o eliminar compuestos orgánicos a través de diferentes tipos de reacciones. Además de proporcionar un método confiable y eficaz para purificar el agua, el uso de lámparas UV para la reducción del carbono orgánico total ofrece muchos beneficios.



Figura 11. Lámparas UV (LightSources, 2022).

Los sistemas de desinfección de agua con lámparas germicidas UV brindan una amplia gama de beneficios que incluyen un alto nivel de reducción y desinfección microbiana con emisiones de 254 nm y 185 nm, así lo menciona LightSources (2022), por lo que algunos de los beneficios más importantes de la reducción del TOC por UV incluyen: eficacia germicida, bajos gastos operativos, bajos costos de mantenimiento, sin subproductos nocivos como ocurre con el uso de productos químicos y puede funcionar en interiores, exteriores y en el aire.

Las lámparas germicidas UV brindan estos beneficios y muchos otros, como soluciones de diseño personalizadas disponibles para satisfacer los requisitos de su aplicación específica, así como tecnología patentada.

2.1.3 Agua Ultrapura para Hemodiálisis

El agua utilizada para hemodiálisis tiene fijados unos criterios de calidad microbiológica y endotoxinas muy estrictos (normativa ISO 1163, 2009) para garantizar la seguridad del paciente, que se diferencian en función de si cumple los requisitos de agua pura o ultrapura (Pérez y Rodríguez, 2022).

Al agua de hemodiálisis se le añade la base (habitualmente bicarbonato) y un concentrado ácido, que contiene los principales solutos para generar el líquido de diálisis. El líquido de diálisis ultrapuro se consigue mediante el uso de agua ultrapura, filtros de endotoxinas interpuestos en el circuito del líquido de diálisis y estricto cumplimiento de los procedimientos de desinfección y monitorización microbiológica. La utilización de líquido de diálisis ultrapuro se acompaña de una mejoría del estado inflamatorio y lipídico del paciente, reducción de necesidad de factores eritropoyéticos, y niveles séricos de β_2m y mejoría del estado nutricional (Pérez y Rodríguez, 2022).

2.1.3.1 Nivel Máximo Admisible de Pureza Microbiológica

Las bacterias y otros microorganismos se encuentran y reproducen en todo tipo de medios acuáticos, por lo tanto, es posible encontrar este tipo de contaminación en el agua destinada a diálisis, con el consiguiente riesgo de infección del paciente. De esta forma, Pérez y Rodríguez (2022) menciona que, los límites bacterianos en el agua purificada que se emplea para diluir el concentrado de diálisis, deben contener menos de 100 UFC/ml.

2.1.3.2 Nivel Máximo Admisible de Endotoxinas

Las bacterias dan lugar a endotoxinas y otras sustancias pirogénicas, que desde el líquido de diálisis son capaces de pasar a la sangre a través del dializador, activar a los monocitos, producir citoquinas inflamatorias y dar lugar a una situación inflamatoria crónica en el paciente (Pérez y Rodríguez, 2022).

Las endotoxinas son sustancias con gran capacidad pirogénica, forman parte de la membrana externa de los gérmenes Gram negativos y pueden ser liberados a la

circulación por lisis bacteriana. En ello, Pérez y Rodríguez (2022) menciona que el nivel admisible de endotoxinas en el agua purificada para hemodiálisis no debe exceder las 0,25 UE/ml. En general, no hay una buena correlación entre la contaminación bacteriana objetivada mediante los cultivos y los niveles de endotoxinas, por lo que es necesario el control de sus niveles.

2.1.3.3 Reservorios y Filtros del Sistema de Filtrado

La filtración consiste en la separación de las partículas sólidas en suspensión presentes en una corriente de agua, al atravesar un medio poroso. Según Bocos (2015) la filtración es una operación compleja debido a la gran cantidad de parámetros implicados y la variedad de las condiciones de funcionamiento. A pesar de los grandes esfuerzos realizados no se ha podido encontrar una teoría general válida que explique correctamente el fenómeno de la filtración, por lo que la técnica actual sigue siendo muy dependiente de los estudios experimentales para cada medio filtrante, variables físicas y tipo de suspensión.

En ese sentido, Bocos (2015) menciona los mecanismos de filtración de agua, entre ellos están: Transporte hasta la superficie del medio filtrante y Adherencia a la superficie del medio filtrante. El transporte de partículas es un fenómeno físico. La adherencia entre partículas y medio filtrante es básicamente un fenómeno de acción superficial, influenciado por parámetros físicos y químicos.

Las partículas que se van a extraer de la suspensión, previamente, tienen que ser transportadas desde el seno de la disolución hasta la superficie del medio filtrante, donde las partículas permanecerán adheridas, siempre que resistan la acción de las fuerzas de

cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas de la corriente al atravesar el medio filtrante (Bocos, 2015).

Para Bocos (2015) los mecanismos que pueden realizar transporte son los siguientes:

- Cribado.
- Sedimentación.
- Impacto inercial.
- Difusión.
- Acción hidrodinámica.
- Mecanismos de transporte combinados.

Por otra parte, Bocos (2015) también expresa que existen los mecanismos de adherencia, entre ellos:

- Fuerzas de Van der Waals.
- Fuerzas electroquímicas.
- Enlace químico.

Durante la filtración, para un sistema en concreto, puede actuar en mayor grado uno de estos mecanismos, controlando el proceso, pero también puede ocurrir que se dé una combinación de varios, e incluso que varíe a lo largo del proceso. Dada la complejidad del fenómeno, es de esperar que más de un mecanismo estará actuando para transportar los diferentes tamaños de partículas hasta la superficie del medio filtrante y dejarlas adheridas. Si la filtración se produce en las capas superficiales, parece que el mecanismo dominante será el cribado, por el contrario, si la filtración ocurre en todo el lecho filtrante el cribado podría ser despreciable (Bocos, 2015).

Este hecho posibilita que se pueda distinguir dos tipos de filtración: La filtración en superficie que sólo suele ser eficiente para un determinado tamaño de partícula dejando pasar la mayoría de las partículas más pequeñas, es muy sensible a posibles caminos preferentes, pudiendo provocar un escape de sólidos en caso de rotura de medio filtrante.

En la filtración en profundidad, el medio filtrante presenta mayor espesor y sus poros son de tamaño desigual, incluso pueden ser mayores que el de las partículas a retener. Este tipo de filtración es mucho más eficiente, ya que consigue retener la mayoría de las partículas cualquiera que sea su tamaño, si bien existe un rango variable, según las características del sistema y condiciones físicas, alrededor del tamaño de 1 μm , en el que la eficiencia es menor. En este caso, además, el tiempo que se mantiene operativo el filtro es sensiblemente superior al de filtración en superficie (Bocos, 2015).

2.1.3.4 Desionizadores de Intercambio Iónico

Existen diferentes procesos y herramientas que se encargan de garantizar un excelente resultado al momento de tratar el agua, dentro de los cuales se puede encontrar el intercambio iónico, el cual ha sido uno de los procesos que más se ha estado implementando en los últimos años, debido a sus excelentes resultados para tratar la dureza del agua.

El intercambio iónico es una operación de separación basada en un intercambio reversible de iones entre una fase sólida iónica y una fase líquida externa, sin un cambio sustancial de la estructura del sólido. Así lo expresa Bocos (2015), en la fase sólida consiste usualmente en una matriz polimérica sintética funcionalizada o una red cristalina, insoluble pero permeable, sobre la cual se ubican los grupos funcionales fijos y los

contraiones móviles de carga opuesta que pueden ser intercambiados por los iones de la fase líquida.

Se produce la transferencia de uno o más tipos de iones desde la fase fluida hasta la fase sólida, donde quedarán retenidos por adsorción a los grupos funcionales. En sentido contrario el contraión del grupo funcional pasará a la disolución, de forma que en el proceso se intercambie un número de cargas eléctricas iguales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia (Bocos, 2015).

Según Mora (2019) en este intercambio iónico, se pueden encontrar las llamadas resinas iónicas, la cual se lleva a cabo en un intercambio iónico con cadenas hidrocarbonadas las cuales ayudan a lograr un mejor proceso en la filtración y purificación del agua, para lo cual se debe realizar una aplicación adecuada de la misma, pues existen diferentes tipos de aplicación para este tipo de materiales trabajados, dentro de los cuales el aislamiento y purificación, siendo este el más importante para el tratamiento y obtención de agua farmacéutica gracias a su gran suavidad y debida desmineralización o desionización.

Según QuimiNet (2012) citado por Mora (2019), las resinas iónicas poseen una clasificación que va a encaminada a los diferentes beneficios que se pueden obtener a través de estas; dentro de las cuales encontramos:

- Resinas catiónicas de ácido fuerte: en las cuales su funcionamiento se basa en dividir todas las sales que contienen estos líquidos y lo cual ayuda a tener una mejor suavidad en el mismo.

- Resinas catiónicas de ácido débil: estas son utilizadas en un nivel más bajo de velocidad de flujo y son manejadas a temperaturas bajas y funciona como una forma de hidrogeno al momento de utilizarse con una resina de ácido fuerte. Resinas anicónicas de ácido fuerte; su funcionalidad se lleva a cabo en el intercambio de amonio cuaternario.
- Resinas anicónicas de ácido débil; estas resinas absorben el ácido de los líquidos tratados, eliminando de esta manera ácidos fuertes de corriente, estas deben ser utilizadas en aguas con niveles de sulfato o cloruro donde no requiera la eliminación de alcalinos y de silicio.

Así mismo establece que las resinas ionizadas se utilizan en estas plantas para lograr una mayor calidad en el agua tratada, logrando obtener en este mayor porcentaje de suavidad, desalcalinización, desmineralización, mayor eliminación de nitratos y un aumento en el control de contaminación.

2.1.4 Diseño de Acuerdo con las Normas de Calidad del Agua

No existe un tratamiento de agua igual para todas las unidades de diálisis, en ello Pérez et al. (2016) expresa que, depende de la calidad química y bacteriológica del agua de aporte a tratar, su procedencia y posibles variaciones de los elementos disueltos en ella a lo largo del tiempo, limitaciones arquitectónicas, necesidades cuantitativas, necesidades cualitativas, presupuesto económico, perspectivas de evolución tanto de los propios tratamientos de agua como de las nuevas técnicas de diálisis

2.1.4.1 Parámetros de Calidad del Agua

En Costa Rica, las normas de calidad del agua potable, se rige bajo Decreto N° 38924-S, “Reglamento para la Calidad del Agua Potable” y en los establecimientos de salud bajo el Decreto N° 37083-S, “Reglamento para la Calidad del Agua para Consumo Humano en Establecimientos de Salud”, en el cual en su Artículo 1 dice que *“tiene por objetivo velar por la protección de la salud de los trabajadores y los pacientes de los establecimientos de salud, así como el correcto funcionamiento de los sistemas internos de abastecimiento de agua”*.

De esta forma, dentro de los límites máximos permisibles para los parámetros fisicoquímicos de análisis obligatorio en los sistemas de abastecimiento de agua para consumo (niveles I y II), la figura 11 muestra los siguientes:

Parámetro	Unidad	Valor Máximo Admisible
pH	--	Rango de 6,0-9,0
Cloro residual libre	mg/L	1,0
Conductividad	µs/cm	400
Olor	--	Debe ser aceptable
Sabor	--	Debe ser aceptable
Temperatura	°C	≤30

Figura 12. Parámetros de Calidad del Agua (Reglamento para la Calidad del Agua para Consumo Humano en Establecimientos de Salud, 2022).

Lo anterior, son los valores admisibles de los parámetros del nivel I y II de la calidad del agua, para lo cual deben realizar mediciones periódicamente de los parámetros la conductividad, pH, olor, temperatura, cloro residual libre y sabor.

Con el fin de minimizar los riesgos de infecciones y estandarizar los procedimientos técnicos relacionados con los servicios de diálisis, existen normas por la Asociación para el Avance de la Instrumentación Médica (AAMI) y por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), en donde identifica los requisitos de calidad del agua y líquidos de diálisis, los cuales están definidos con la norma ISO 23500 (2011, Guía para preparar y gestión de calidad de fluidos para hemodiálisis y terapias relacionadas), la norma ISO 11663 (2009, Calidad del líquido de diálisis para hemodiálisis y terapias relacionadas) y la norma ISO 13959 (2009, Agua para hemodiálisis y terapias relacionado.), las cuales son referencias para la estandarización de fluidos utilizados en hemodiálisis (Barrios, 2019).

Cuando se instala un sistema de tratamiento y distribución de agua para diálisis, el fabricante o proveedor debe proyectarlo de tal forma que alcance los requisitos de calidad de agua establecidos por las normas (ISO 23500, ISO 11663 y ISO 13959). Además, debe estar basado en el análisis de agua de entrada y contemplar las variaciones estacionales. Al finalizar la instalación, se puede demostrar que se cumplen estas especificaciones, las cuales se expresan en la figura 12.

Contaminante	Concentración máxima permitida mg/l
Contaminantes con toxicidad documentada en hemodiálisis	
Aluminio	0,01
Cloro total	0,1
Cobre	0,1
Fluoruro	0,2
Plomo	0,005
Nitratos [como N]	2
Sulfatos	100
Zinc	0,1
Electrolitos normalmente incluidos en el líquido de diálisis	
Calcio	2 [0,05 mmol/l]
Magnesio	4 [0,15 mmol/l]
Potasio	8 [0,2 mmol/l]
Sodio	70 [3.0 mmol/l]
Otros contaminantes	
Antimonio	0,006
Arsénico	0,005

Figura 13. Límites o parámetros establecidos por la norma ISO 13959 (Fuente: Latini, 2016, p.5).

Lo anterior muestra, los niveles máximos permitidos de contaminantes químicos según la norma ISO 13959, el propósito es que no se altere su composición final y este pueda utilizarse sin alteraciones en su composición final.

2.1.4.2 Reglamento para la Calidad del Agua para el Consumo Humano en Establecimientos de la Salud

El Ministerio de Salud en cumplimiento lo establecido en la Ley General de Salud (1973), según el Capítulo I del agua para el uso y consumo humano y de los deberes y restricciones a que quedan sujetas las personas en la materia y los artículos que lo conforman tiene la potestad de vigilar la calidad del agua que consume la población.

El artículo 268 de esta Ley le confiere esa labor de vigilar la calidad del agua potable en todos los sistemas de abastecimiento del país como función sustantiva de rectoría en salud.

El agua es un determinante social de la salud y como tal debe ser sujeto a la vigilancia y el control con el propósito de garantizar la salud pública de la población.

Conjuntamente, con otros actores clave, establece la regulación de parámetros de valores máximos admisibles en aspectos microbiológicos, físicos y químicos del agua para consumo humano; así como, la identificación de factores de riesgo en los componentes de los sistemas de abastecimiento de agua.

En Costa Rica, existen dos Decretos Ejecutivos que actualmente rigen en esta materia: Decreto N° 38924-S, “Reglamento para la Calidad del Agua Potable”. Decreto N° 37083-S, “Reglamento para la Calidad del Agua para Consumo Humano en Establecimientos de Salud”.

2.1.4.3 Red de Distribución del Agua Tratada

La red de distribución del tratamiento de agua para diálisis es una infraestructura vital y crítica en los centros de diálisis. Pérez et al. (2016) explica que, el agua tratada se muestra ávida de adquirir sustancias de los elementos que estén en contacto con ella, por lo que la red de distribución debe estar realizada con materiales que no aporten nada al agua o se sospeche puedan hacerlo; no se puede utilizar cañerías de cobre, hierro o aluminio; sin fondos de saco, en tubo continuo que evite empalmes e intersecciones, con la menor longitud posible. Si se utiliza acero inoxidable, debe ser de calidad farmacéutica.

El tubo que alimenta al monitor desde la red de distribución deberá considerarse como un elemento más de la propia red de distribución. Tiene que circular a velocidad que minimice los riesgos de contaminación y formación de biofilm (tapiz bacteriano) > 1 m/s, por lo que se debe calcular especialmente su sección. Por ello, el sistema de distribución garantiza la alimentación de agua a los monitores de diálisis y a los sistemas de producción local de concentrados ácidos, debe diseñarse para mantener la calidad química y microbiológica del agua, por lo que debe seguir los siguientes criterios:

- Anillo continuo con el mínimo recorrido posible.
- Mínimo número de conexiones.
- Mínima caída de presión.
- Materiales compatibles con las condiciones de uso (por ejemplo: suministro, desinfección, limpieza).
- No liberar sustancias químicas o nutrientes para microorganismos (cobre, aluminio, plomo, zinc, etc.).

- Material con baja rugosidad superficial.
- Opaco.
- Disponer al menos de un punto de toma de muestras al final del anillo de distribución.
- Su diseño debe evitar zonas muertas y minimizar la distancia entre el anillo y la toma de conexión al monitor (Pérez et al., 2016).

Siguiendo estos criterios, se puede garantizar la integridad del agua utilizada en los procedimientos de diálisis, protegiendo así la salud y seguridad de los pacientes. El sistema de almacenamiento y distribución es donde el agua purificada se almacena en tanques de almacenamiento especialmente diseñados para mantener su calidad y desde estos tanques, el agua se distribuye a través de tuberías hacia las máquinas de diálisis en las estaciones de tratamiento.

El agua tratada se muestra ávida de adquirir sustancias de los elementos que estén en contacto con ella, por lo que la red de distribución debe estar realizada con materiales que no aporten nada al agua o se sospeche puedan hacerlo; no se puede utilizar cañerías de cobre, hierro o aluminio; sin fondos de saco, en tubo continuo que evite empalmes e intersecciones, con la menor longitud posible. Si se utiliza acero inoxidable, debe ser de calidad farmacéutica. El tubo que alimenta al monitor desde la red de distribución deberá considerarse como un elemento más de la propia red de distribución. Tiene que circular a velocidad que minimice los riesgos de contaminación y formación de biofilm, > 1 m/s, por lo que se debe calcular especialmente su sección. El agua no consumida debe retornar al tratamiento de agua y pasar de nuevo por él (Pérez et al., 2016).

Las uniones en los materiales plásticos implican recovecos y alteraciones bruscas en la linealidad del tubo que implican reservorios y ruptura del flujo laminar; ya existen en el mercado materiales plásticos que no presentan estos inconvenientes. Estas uniones se encuentran tanto en los codos cuando estos se colocan para cambiar la dirección del tubo, como en las derivaciones a los monitores y llaves. Cuando se opte por algún tipo de material, hay que tener presente cómo realiza las uniones, pegamentos o termosoldados, por la posibilidad de que los pegamentos sean capaces de aportar, con el paso del tiempo y por su degradación, elementos indeseables al agua. Actualmente existen tuberías de polímeros que obvian estos inconvenientes y resisten el calor sin deformarse (Pérez et al., 2016).

Si la opción es acero inoxidable, presenta la ventaja de que se pueden utilizar sistemas de desinfección térmica o química, y su resistencia a los golpes o tracciones que se puedan hacer sobre él accidentalmente. Es fundamental la forma de realizar las soldaduras en este tipo de tubo, para que no sufran oxidación posterior. Es necesario garantizar la total ausencia de fondos de saco; las tomas de los monitores deben ser consideradas como tales y, por tanto, también deben ser eliminadas, enfatizando en aquellas donde los tubos son traslúcidos. Para ello la red de distribución debe llegar hasta el monitor; la forma de realizarlo puede ser mediante instalación denominada en U, donde la red de distribución va hacia el monitor y retorna, yendo posteriormente al siguiente monitor; presenta la desventaja de que el tubo que va hasta el monitor es de la misma sección que el resto de la red (Pérez et al, 2016).

Según Pérez et al. (2016) la otra forma de realizarlo es mediante anillos secundarios: un anillo primario es el encargado de distribuir el agua por toda la unidad; un segundo anillo

secundario lleva el agua hasta el monitor. Lógicamente, la dimensión de este anillo secundario es más pequeña que la del primario; en caso de rotura o estrangulamiento, solo afectaría al monitor conectado a él.

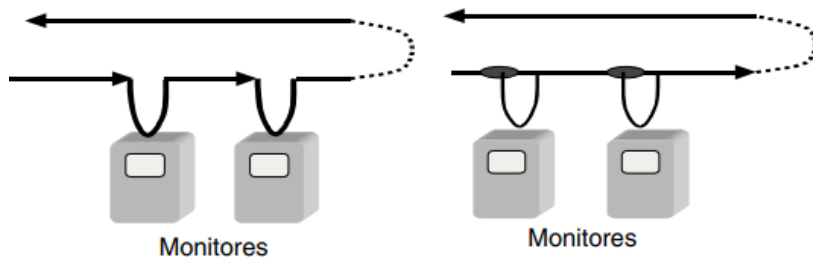


Figura 14. Configuraciones que garantizan la circulación constante de agua (Pérez et al., 2016, p.10).

La figura 13 muestra las diferentes configuraciones para garantizar la circulación constante del agua, hasta el monitor. A la izquierda, instalación en U, y a la derecha, con anillos secundarios.

2.1.4.4 Tubería para el Tratamiento de Diálisis

Una planta de producción de agua para hemodiálisis se instala en centros sanitarios, los cuales están abastecidos normalmente por suministros de agua potable, por lo que la calidad del agua tanto en el aspecto microbiológico debe estar en constante mantenimiento y análisis, pues la contaminación de esta puede causar otras enfermedades en los pacientes que reciben la diálisis.

El propósito de esta investigación es diseñar y mejorar la planta de tratamiento de agua para hemodiálisis, debido a que, actualmente, la planta de tratamiento que tienen el

HDRACG no cumple con los estándares de calidad correspondientes en la tubería que utiliza, por lo que se tiene en cuenta la viabilidad económica de una mejora en el diseño actual, considerando que se cumpla con los elementos necesarios en la misma.

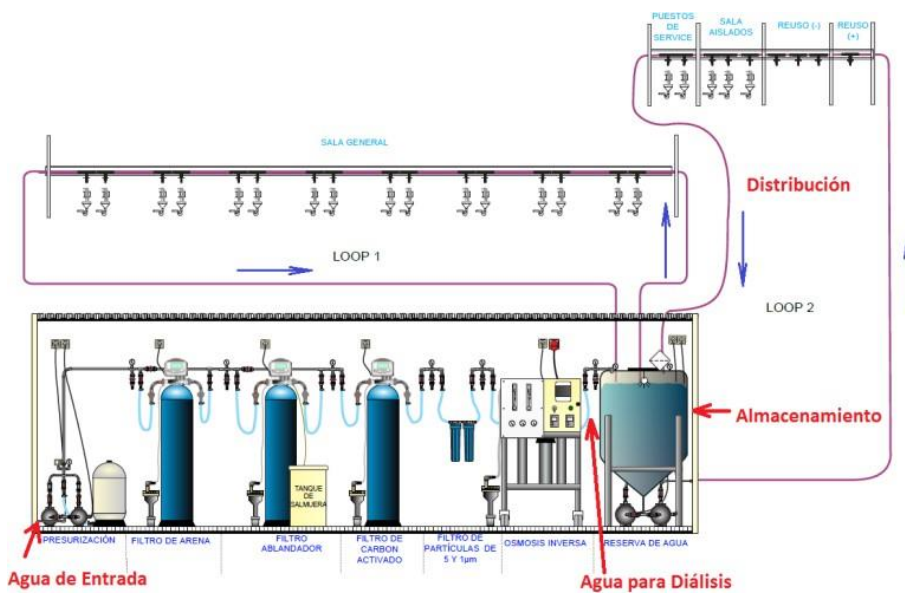


Figura 15. Diseño de la planta de tratamiento de agua para hemodiálisis (Fuente: Latini, 2016, p.9).

La figura 14 muestra, el diseño de la planta de tratamiento de agua, se logra observar que el agua para diálisis se obtiene a partir de agua de entrada (de red pública o perforación subterránea). El agua de entrada, aunque sea potable, tiene niveles de contaminantes superiores a los permitidos para el agua de diálisis y, por lo tanto, estos deben ser removidos mediante filtros de retención de bacterias y endotoxinas. Los filtros

tienen como función principal la extracción de partículas, además de brindar protección a los demás componentes del sistema de tratamiento de agua, como las membranas semipermeables de ósmosis inversa. el filtro de arena puede eliminar partículas suspendidas de 25 y 100 μm de tamaño (Barrios, 2019).

La calidad del agua es de vital importancia para la seguridad y bienestar de los pacientes sometidos a diálisis. El uso de tuberías inadecuadas podría comprometer la pureza del agua y aumentar el riesgo de contaminación, lo que puede tener graves consecuencias para la salud de los pacientes.

Actualmente, la tubería que se utiliza en el HDRCG es la CPVC (policloruro de vinilo), la cual es uno de los materiales más utilizados en las tuberías de agua, ya que es económico, fácil de instalar y no es propenso a la corrosión. Sin embargo, puede emitir productos químicos que contaminan el agua, especialmente en climas con altas temperaturas.

Es por ello por lo que la tubería que se tiene que utilizar es de polietileno de alta densidad HDPE, debido a que presenta otras propiedades que superan al acero, el CPVC y el concreto.

Según Bingo (2021) dentro de las ventajas se destacan las siguientes:

- Buena estabilidad química: el HDPE tiene una buena estabilidad química, no genera algas ni bacterias, no se incrusta y es un producto ecológico (protege el medio ambiente).

- Buena fuerza de conexión, por lo que adopta accesorios de electrofusión (sistema de unión de tubos) de enchufe, accesorios de fusión a tope o conexión de brida, con pocas juntas y sin fugas.
- Buena resistencia a la fragilidad a baja temperatura: la temperatura de fragilidad es -40 , y no se requieren medidas de protección especiales durante la construcción en condiciones generales de baja temperatura (0°C).
- Antienvejecimiento y larga vida útil: la tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) se puede almacenar o usar al aire libre durante 50 años sin ser dañada por la radiación ultravioleta.

Es por esta razón, que el propósito es que la tubería CPVC que se utiliza en la planta de hemodiálisis del HDRCG sea cambiada por la de polietileno, tomando en cuenta las ventajas y calidad de alta resistencia a ataques químicos y medio ambientales, lo cual es una mejor opción para este proceso tan delicado.

2.1.4.5 Cumplimiento de los Estándares

El control diario de elementos o parámetros fundamentales, de fácil y rápida supervisión, permite garantizar el correcto funcionamiento de los diferentes componentes del sistema de tratamiento del agua; además, puede evitar que incipientes problemas en algunos de ellos puedan convertirse en repercusiones graves para algún otro componente del sistema y afectar con ello la calidad del agua tratada. Por ello se debe controlar a diario en el agua de aporte y en la tratada: niveles de cloro libre y total (cloram inas), dureza y conductividad. Al tiempo se deben controlar las presiones y flujos de los diferentes componentes del equipo de tratamiento de agua y distribución (Pérez et al., 2016).

2.1.5 Normativas y Estándares

La familia de Normas ISO 23500, denominada preparación y gestión de la calidad de los fluidos para hemodiálisis y terapias relacionadas, tiene por objetivo establecer los requisitos mínimos a respetar a la hora de diseñar y operar una planta de tratamiento para su uso en tratamientos de diálisis, garantizando en todo momento la seguridad del tratamiento, la norma se compone de cinco partes, así lo menciona Perez y Rodriguez (2023).

- Parte 1: Requisitos generales. Esta primera parte de la norma establece los lineamientos generales de lo que se considera una buena práctica para la preparación de fluidos de diálisis y fluidos de sustitución (terapias on-line, como hemodiafiltración).
- Parte 2: Equipo de tratamiento de agua para aplicaciones en hemodiálisis y terapias relacionadas. La segunda parte de la norma se enfoca en recomendaciones para los fabricantes de equipamientos y/o proveedores de sistemas de tratamientos de agua que serán utilizados en el marco de una clínica de diálisis para la obtención de los fluidos de diálisis y/o fluidos de sustitución.
- Parte 3: Agua para hemodiálisis y terapias relacionadas. El objetivo de esta parte es establecer los requisitos mínimos de calidad para el agua que será utilizada para la realización de tratamientos de hemodiálisis, terapias relacionadas y reúso de dializadores.
- Parte 4: Concentrados para hemodiálisis y terapias relacionadas. Esta parte de la norma establece los requisitos mínimos de calidad para los concentrados que se utilizan en las terapias de diálisis, en sus distintas modalidades. Dado que en la

clínica bajo estudio no se realiza la preparación centralizada de concentrados, sino que este paso se realiza en cada máquina de diálisis y/o se utilizan concentrados que llegan envasados y se conectan directamente a cada máquina de diálisis, esta parte de la norma no es aplicable para el presente trabajo. La calidad de los concentrados es monitoreada durante su fabricación y por lo tanto no resulta necesario incorporar las recomendaciones de esta norma en el diseño de la PTA de la clínica bajo estudio.

- Parte 5: Calidad del fluido de diálisis para hemodiálisis y terapias relacionadas. Finalmente, esta última parte de la norma establece los requisitos mínimos de calidad que deben cumplir los fluidos de diálisis, excluyendo los concentrados (cubiertos por la parte 4 de la norma).

La norma ISO 23500 establece un marco riguroso para garantizar la calidad del agua y los fluidos utilizados en hemodiálisis, minimizando los riesgos para los pacientes. Cada parte aborda un aspecto clave del proceso, desde el equipo hasta la calidad del agua y los líquidos de diálisis.

2.1.5.1 Normas Locales e Internacionales

En general, las normas de calidad del agua para la hemodiálisis (normas asociadas, ISO 13959 e ISO 11663) se enfocan en garantizar la pureza y seguridad del agua utilizada durante el procedimiento de diálisis y de la salud del paciente, por lo que es importante que esta se encuentre entre los límites de los parámetros de la concentración de sustancias químicas que puedan estar presentes en el agua y que podrían ser perjudiciales para el paciente en la diálisis, las endotoxinas bacterianas, que son

subproductos liberados por ciertas bacterias que pueden estar presentes en el agua pueden causar reacciones inflamatorias en los pacientes sometidos a hemodiálisis. Así como la contaminación microbiológica, ya que la exposición a estos organismos puede provocar infecciones en los pacientes y en la conductividad y pureza, son para garantizar que el agua utilizada esté libre de contaminantes y minerales en concentraciones perjudiciales.

Como se ha venido mencionando anteriormente, en Costa Rica, existe un Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto N° 32327-S) (Poder Ejecutivo, 2005) el cual fue publicado en el diario oficial La Gaceta N° 84, del 3 de mayo de 2005. Su objetivo es establecer los niveles máximos que deben tener aquellos componentes o características del agua que pueden representar un riesgo para la salud de la comunidad o ser inconvenientes para la preservación de los sistemas de abastecimiento en beneficio de la salud pública. Además, el artículo 15 indica que todo ente operador de sistemas de abastecimiento de agua está obligado a entregar copia de los informes de su programa de control de calidad al Ministerio de Salud (Pérez et al., 2016).

2.1.5.2 Directrices de la Asociación Americana de Nefrología

La Sociedad Americana de Nefrología (ASN), conocida en español como Sociedad Americana de Nefrología, es una organización líder en el campo de la salud renal, desempeña un papel fundamental en la promoción de la investigación, la educación y el desarrollo de políticas relacionadas con las enfermedades renales. Tal es el caso de elaboración de guías como la del 2004 de Pérez et al. (2016) una Guía de Gestión de Calidad del Líquido de Diálisis, allí se hacen algunas recomendaciones sobre normas para preparar el líquido de diálisis: agua, concentrados y sistemas de dosificación de la

hemodiálisis. Basándose en las normativas internacionales correspondientes a la hemodiálisis.

CAPITULO III

3.1 Marco Metodológico

3.1.1 Enfoque de la Investigación

El enfoque de esta investigación es de naturaleza mixta. Dado que el objetivo es la propuesta de un diseño de una planta de producción de hemodiálisis, se empleó tanto el enfoque cuantitativo como el cualitativo. El enfoque cuantitativo permitió la recopilación de datos sobre la calidad del agua, tasas de éxito del tratamiento y tasas de complicaciones por un mal sistema del manejo del agua tratada. Asimismo, el enfoque cualitativo se enfocó en la recolección de datos como encuestas y entrevistas con profesionales y técnicos especializados en el sistema de tratamiento de agua para hemodiálisis. La combinación de ambos métodos permitió la obtención de información importante para la sobre el impacto que puede ocasionar un mal diseño de una planta de producción de líquido para hemodiálisis.

3.1.2 Método de la Investigación

El método que guio esta investigación fue el modelo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Este enfoque es comúnmente utilizado en proyectos de mejora continua y es adecuado para optimizar procesos técnicos, como los relacionados con un sistema de planta de tratamiento de hemodiálisis. En la fase Definir, establecer el propósito de mejorar continua, como mejorar la calidad del agua a utilizar, En Medir, establecer métricas relevantes para el rendimiento del sistema como: La calidad del agua (conductividad, contaminantes) y las tasas de complicaciones y satisfacción del paciente. En la fase de Analizar, Utilizar técnicas como el diagrama de Ishikawa o el análisis de

Pareto para identificar las causas de los problemas detectados y así determinar cuáles problemas son más críticos y deben abordarse primero, basándose en su impacto en la calidad del tratamiento y la satisfacción del paciente. En la fase de Mejorar es generar ideas y propuestas para mejorar los procesos, que pueden incluir: la implementación de nuevas tecnologías y prácticas desinfección. La fase de Controlar, Definir nuevos procedimientos operativos y estándares de calidad basados en las mejoras implementadas, como el monitoreo continuo del agua tratada.

3.1.3 Fuentes de Información

Las fuentes de información son los recursos, materiales o medios de los cuales se obtiene información útil para cualquier tipo de búsqueda de conocimiento. Tal como lo expresan Hernández et al. (2017), “consiste en detectar, consultar y obtener la bibliografía y otros materiales que sean útiles para los propósitos del estudio, de los cuales se extrae y recopila información relevante y necesaria para el problema de investigación” (p.61). Es importante evaluar la credibilidad y la autoridad de las fuentes, para asegurar que la información recopilada sea apropiada para el propósito de la investigación o el trabajo que se está realizando.

3.1.3.1 Fuentes primarias

Estas fuentes primarias son fundamentales en la investigación y proporcionan información directa, así lo mencionan Hernández et al. (2015), las fuentes primarias son:

Aquellas que proporcionan datos de primera mano, pues se trata de documentos que contienen los resultados de estudios como libros, antologías, artículos, monografías, tesis y disertaciones, documentos oficiales, reportes de

asociaciones, trabajos presentados en conferencias o seminarios, artículos periodísticos, testimonios de expertos, documentales, videocintas en diferentes formatos, foros y páginas en Internet, entre otros (p. 61).

Aquí pertenecen las fuentes de información principales, en este caso, se utiliza información de tesis, artículos universitarios, libros e información proporcionada por el HDRACG.

3.1.3.2 Fuentes secundarias

Estas fuentes secundarias, son valiosas porque pueden ayudar a entender, la información proveniente de fuentes primarias. En ello, Hernández et al. (2015), afirma que “Son listas con recopilaciones y resúmenes de referencias y fuentes primarias publicadas en un área de conocimiento particular, las cuales comentan, artículos, libros, tesis, disertaciones y otros documentos especializados” (p. 66). Contienen información primaria, sintetizada y reorganizada, en este caso, se utilizó tesis, artículos universitarios y revistas, páginas web oficiales.

3.1.4 Variables de Análisis

Tabla 1. Variables de Análisis Consideradas para este Proyecto.

OBJETIVOS ESPECIFICOS	DESARROLLO DEL PROYECTO (ETAPAS Y ACTIVIDADES)	TECNICAS A UTILIZAR	SUJETOS Y FUENTES DE INFORMACION
Objetivo 1	Etapa1	• Conversatorio con profesionales y	<i>Fuente:</i> personal de empresas

Estudiar y analizar la importancia del tratamiento que requiere el agua para realizar el procedimiento de hemodiálisis, así como la normativa aplicable.	Recopilación de información relacionada con la importancia del tratamiento del agua para realizar el procedimiento diálisis.	técnicos especializados en los sistemas de planta de producción de hemodiálisis <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de documentación: revisión de normativas y guías técnicas 	especializados en sistema de producción de agua para hemodiálisis. <i>Fuente:</i> requisitos de calidad y técnicas de tratamiento.
Objetivo 2	Etapa 2	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de documentación: revisión de normativas y guías técnicas. • Análisis comparativo de técnicas y propuesta y la elección del diseño adecuado. • Selección de equipos: investigar y 	<i>Fuentes:</i> oficialización y declaratoria de interés público y nacional de la "Norma para la habilitación de servicios de hemodiálisis".
Realizar cada una de las etapas de mejora en el diseño de la planta de tratamiento de hemodiálisis para conseguir el mejor rendimiento y	Realizar un diseño adecuado que cumpla con las normas de calidad establecidas. <i>Diseño de la Planta:</i> crear planos y especificaciones técnicas para la		

calidad de agua para los pacientes.	planta, incluyendo distribución de áreas.	seleccionar máquinas de hemodiálisis, dializadores, sistemas de purificación de agua.	
Objetivo 3	Etapa 3	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar los precios de los equipos y accesorios en el mercado. • Costos de instalación y mantenimiento: incluir costos adicionales que puedan influir en la decisión de compra. • Evaluar las tendencias del mercado, como la digitalización y el uso de tecnologías sostenibles. 	<p><i>Fuentes:</i></p> <p>indicadores de calidad de agua para hemodiálisis UCR.</p> <p>Artículos de la revista summa, normativa de calidad del servicio.</p>
Realizar el estudio de mercadeo de los equipos o accesorios a instalar que cuenten con las características técnicas requeridas para mejorar el sistema.	Realizar el estudio de mercado de la tubería y equipos a instalar que cumpla con las características requeridas y garantizar un tratamiento adecuado a los pacientes.		

-
- Proyecciones sobre la demanda futura de equipos y tecnologías de tratamiento.
-

3.1.5. Instrumentos y Técnicas

Para esta investigación se utilizaron técnicas e instrumentos para recaudar información para desarrollar la investigación, esto permitió recopilar información correcta y poder desarrollar el proyecto de la manera correcta y que cumpla con las normas establecidas.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron consultas a profesionales y técnicos especializados en los sistemas de planta de producción de hemodiálisis, esto ayudó a para conocer los diferentes puntos de vista de cada persona y poder aplicar de la manera correcta el desarrollo del proyecto, también se realizaron consultas a diferentes empresas que se dedican a los sistemas de hemodiálisis.

Con la recopilación de la información que suministraron los técnicos o profesionales especializados en el ámbito de la producción de hemodiálisis, podemos visualizar los problemas o defectos de un mal diseño de una planta de producción líquido de diálisis.

3.1.6. Proceso para la Recolección y Análisis de Datos

Es el proceso que se da mediante, el cual se obtiene información relevante sobre el tema de investigación, para ello se debe de aplicar diversas técnicas que permitan recopilar la información, por lo que para efecto de esta investigación se seleccionaron la

observación no participante y la entrevista, los cuales permitirán obtener datos sobre el tema.

Al respecto Chacón y Ramírez (2022), indica que:

La recolección de los datos se refiere al uso de una gran diversidad de técnicas y herramientas que pueden ser utilizadas por el analista para desarrollar los sistemas de información, los cuales pueden ser la entrevista, la encuesta, el cuestionario, la observación, el diagrama de flujo y el diccionario de datos entre otros (p.199).

La recolección de datos es fundamental para obtener la información necesaria que permita construir la información efectiva, por eso la elección de la técnica adecuada es crucial para garantizar la relevancia de la información recopilada en el proceso de desarrollo informativo.

El análisis de datos en una investigación es un proceso esencial que permite transformar los datos recopilados en información significativa, así como lo menciona Chacón y Ramírez (2022), indicando que: “Una vez recolectado los datos estos serán organizados y estudiados de tal manera que facilite su análisis e interpretación y así lograr enriquecer el proceso de investigación” (p.202). El análisis de datos permite comprender los datos recopilados durante el estudio con el fin de obtener información relevante y responder a las preguntas de investigación planteadas.

De esta manera, como parte del proceso de análisis e interpretación de los resultados de esta investigación, se utilizará la triangulación de datos, la cual es una técnica estrategia metodológica utilizada para combinar y contrastar información de

distintas fuentes y así obtener resultados completos del fenómeno de estudio. Así como lo mencionan Okuda y Gómez (2005) expresado en Jiménez (2022) la triangulación “se refiere al uso de varios métodos (tanto cuantitativos como cualitativos), de fuentes de datos, de teorías, de investigadores o de ambientes en el estudio de un fenómeno” (p.87).

Referente en lo anterior, al aplicar la triangulación, se busca complementar diferentes perspectivas o fuentes de información con la finalidad de validar los hallazgos, reducir sesgos y enriquecer la comprensión del tema en estudio. Por ello, al combinar datos cuantitativos y cualitativos, asimismo, utilizar diversas fuentes de información, en este caso, las entrevistas y cuestionarios, así como involucrar la teoría relacionada con las mismas, permite fortalecer la validez y fiabilidad de los resultados de la investigación.

CAPITULO IV

4.1. Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del estudio y desarrollo del diseño de la planta de producción de agua para hemodiálisis en el Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia. La información recabada se compara con los fundamentos teóricos explorados previamente, con el propósito de sustentar científicamente la propuesta y validar su viabilidad técnica y regulatoria.

Se examinan los parámetros de calidad del agua, los requerimientos específicos para el procedimiento de hemodiálisis y las mejoras propuestas en el sistema de purificación, asegurando el cumplimiento de la normatividad vigente. Además, se analizan los aspectos técnicos y de mercado relacionados con la selección de equipos y accesorios, asegurando que el diseño propuesto optimice el desempeño y la seguridad del agua utilizada en los tratamientos.

Es por ello, que este análisis justifica la importancia de implementar mejoras en el sistema de purificación, con el objetivo de garantizar un suministro de agua de alta calidad que proteja la salud y el bienestar de los pacientes sometidos a hemodiálisis.

4.1.1. Análisis del Diseño de Procesos de Producción

El diseño de la planta de producción de agua para hemodiálisis, para suministrar agua limpia y purificada para aplicación de diálisis de los diferentes pacientes del HRACG es el tema principal de esta investigación, por lo que, es importante tomar en cuenta los

costos correspondientes, tomando en cuenta las ventajas de obtener una planta de hemodiálisis, con mayor durabilidad y que cumpla con los requisitos de calidad de agua establecidos por la norma de calidad.

Dentro de los costos que se van a utilizar, se muestra la tabla 1 que corresponde a los mismos.

Tabla 2. Mejoras en el Sistema de Filtración de Agua para Hemodiálisis y Mantenimiento Preventivo Correspondiente.

Detalle	Unidad	Cantidad	Sistema de		Elvatron	
			filtración (costo)		(costo)	
			Unitario	Total	Unitario	Total
Cambiar tubería de recirculación con respectivos accesorios y acoples	m	70 m	\$900	\$63 000	\$950	\$68 500
Reacondicionar la ubicación del cuarto de maquinas	c/u	1	\$60 000	\$60 000	\$62 000	\$62 000
Sistema de ultravioleta para la eliminación de TOC	c/u	1	\$26 000	\$26 000	\$23 000	\$23 000

Mantenimiento preventivo a la planta de tratamiento	c/u	12	\$900	\$10 800	\$840	\$10 080
Total				\$159 800		\$161 580

Fuente: Elaboración propia, 2025, información proporcionada por el HDSRCG.

Como parte de los equipos del sistema actual de la planta de tratamiento se encuentran los siguientes:

- 01 Bomba de alimentación de agua marca Foras, modelo P5-180/4.
- 01 Filtro primario marca ENPRESS LLC, modelo CT 840.
- 02 Suavizador de agua doble columna marca CLACK, modelo V125EEDMI, series VLV02711088 y VLV02711089.
- 02 Filtro de carbón activado marca CLACK, modelo V125CTK, series VLV025567882 y VLV025567883.
- 01 Sistema de doble ósmosis inversa marca GE, modelo E4EZ4ECM.
- 02 Bombas de ósmosis marca MARATHON, modelo XVX056T34F5347B.
- 02 Lámpara UV marca VIQUA, modelo E4+, series 151217138 y 151217139.
- 01 Bomba de agua del lazo marca GRUNDFOS, modelo MQ45.
- 01 Tanque de almacenamiento de agua ultra-pura de 2000 litros, marca ACE ROTOR-MOLD, modelo CB00500SWSM.

- 01 Controlador lógico programable (PLC) marca UNITRONICS, modelo V570, serie QCE48B10592.
- 19 Caja de válvulas.

A continuación, se muestra la rutina propuesta para brindarle mantenimiento preventivo al sistema, cada una de las actividades mínimas, con su respectiva frecuencia, a ser contempladas en el mantenimiento del sistema serán las siguientes:

- i. Desinfección del sistema (del loop). Frecuencia quincenal.
- ii. Análisis químico y bacteriológico del agua del lazo. Frecuencia mensual.
- iii. Reemplazo del filtro (GE RO Safe) y el de 0.2 micras. Frecuencia bimensual
- iv. Reemplazo filtro (SCT 400). Frecuencia semestral.
- v. Reemplazo lámpara UV y manga cuarzo. Frecuencia anual.
- vi. Cambio resina catiónica, cambio de carbón activo y cambio de membranas de osmosis. Frecuencia bianual.
- vii. Cambio filtros osmosis inversa. Frecuencia bianual.

Para el desarrollo de esta propuesta, se contó con el asesoramiento de la empresa Sistemas de Filtración, cuyo representante legal es Angelo Flores Meléndez, el brindó apoyo técnico en el análisis y mejora del sistema de tratamiento. Esta empresa es responsable del mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de purificación de agua en el hospital, además del suministro de repuestos esenciales, Para lograr un análisis preciso del agua cruda y purificada, se utilizaron equipos calibrados y certificados, garantizando mediciones confiables. El proceso se realizó bajo condiciones controladas de temperatura (20-25°C) para evitar alteraciones en los resultados, y se

siguieron protocolos estrictos de muestreo para asegurar que las muestras fueran representativas. Además, el personal que tomo las muestras es persona acreditado del laboratorio Aquolab S.A. Gracias a esta colaboración, fue posible obtener un análisis físico-químico detallado del agua cruda en su punto de ingreso, así como un estudio de los posibles contaminantes presentes en el tanque de almacenamiento de agua purificada el cual se destaca a continuación:

A continuación, se describe el funcionamiento del sistema de ósmosis inversa como periféricos para el funcionamiento del sistema, así como las mejoras propuestas para una óptima operación de este.

Línea de producción:

1. Entrada agua municipal.
2. Bomba booster.
3. Filtros de Zeolita.
4. Suavizadores.
5. Filtros de carbón activado.
6. Monitor de conductividad entrada.
7. Prefiltración cartucho 1 micra nominal.
8. Ósmosis Inversa.
9. Monitor de conductividad salida.
10. Tanque Captación.
11. Bomba de recirculación.
12. Sistema ultravioleta salida del Loop.
13. Filtros cartucho 0.22 micras absoluto.

14. Sistema ultravioleta retorno del Loop.

El técnico describió que, este sistema trabaja hoy en día 24/7, donde sólo se detiene para los mantenimientos respectivos; teniendo la mayoría del tiempo calidad de agua de óptimas condiciones para el abastecimiento en el área de Hemodiálisis, se trabaja con un plan de mantenimiento quincenal, donde se monitorea condiciones de agua básicas y mantenimientos programados de cambio de filtros, membranas y medios filtrantes; cada visita se realiza una desinfección con cloro.

Sin embargo, a pesar de que se logra mantener la operación en las mejores condiciones, hay mejoras que se requieren para una mayor seguridad en el agua algunas de estas mejoras son las siguientes:

- Cambiar tubería de recirculación por la recomendada preferiblemente inoxidable sanitario, en este momento se cuenta con CPVC.
- Mantener los equipos en un área más adecuada o bien acondicionar el sitio donde se encuentran actualmente (más inocuo)
- Los sistemas de bombeo sólo se mantienen uno de cada uno y si llegan a fallar el sistema se detiene por completo, lo ideal es mantener sistemas dobles y alternantes para evitar problemas a futuro.
- Un sistema de ultravioleta para eliminar TOC es primordial en este tipo de equipos y no se cuenta con ello.
- Colocar puntos de muestreo certificados y que puedan “flamearse” ya que por experiencia en sitio ha tocado tomar de nuevo muestras por resultados falso positivos. (esto en conjunto con el tema del acondicionar el área).

Es observable que la colaboración con la empresa Sistemas de Filtración ha sido fundamental para el análisis y optimización del sistema de purificación de agua del hospital, asegurando un suministro confiable y de alta calidad para el área de hemodiálisis. Aunque el sistema opera de manera continua con un riguroso mantenimiento, se han identificado oportunidades de mejora que fortalecerán aún más la seguridad del proceso.

La implementación de tuberías de acero inoxidable sanitario, la reubicación o acondicionamiento del área de equipos, la redundancia en los sistemas de bombeo, la incorporación de un sistema de radiación ultravioleta para la eliminación de TOC y la instalación de puntos de muestreo certificados, son medidas clave para optimizar la eficiencia y confiabilidad del sistema. Estas mejoras no solo reducirán los riesgos asociados a la calidad del agua, sino que también garantizarán una mayor estabilidad operacional, minimizando las interrupciones en un servicio crítico para los pacientes.

4.1.2. Análisis Costo-Beneficio para la Mejora del Sistema de la Planta de Tratamiento de Agua para Hemodiálisis

La inversión destinada a la mejora del sistema de la planta de tratamiento de agua para hemodiálisis es una estrategia fundamental para garantizar la calidad, eficiencia operativa y el cumplimiento de las normativas sanitarias del sector. Aunque la inversión inicial se estima en \$160,690.00 para la contratación de una empresa especializada en la adquisición de sistemas y servicios necesarios, los beneficios derivados de esta inversión son significativos y se justifican a largo plazo.

El sistema de tratamiento de agua para hemodiálisis es esencial para asegurar que el agua utilizada en los procedimientos cumpla con los más altos estándares de calidad, ya que cualquier deficiencia en el agua podría comprometer la salud de los pacientes. Una de las áreas críticas que requiere mejora es la tubería de recirculación del sistema.

Actualmente, la tubería utilizada es de CPVC, un material que no es adecuado para el uso específico de la planta de tratamiento, ya que no cumple con los requisitos técnicos necesarios para asegurar la pureza y el flujo adecuado del agua. Por lo tanto, la adquisición de tuberías de alta calidad y resistencia, compatibles con los estándares de tratamiento de agua para hemodiálisis, es indispensable para el buen funcionamiento del sistema.

Dentro de los costos que conlleva el cambio de la tubería, se muestra una comparación de la tubería CPVC y la tubería de Polietileno, identificando la cantidad de artículos de tubería necesarios para el sistema, su costo unitario y los costos totales de cada uno de ellos, lo cual se logra observar en la tabla 2 y 3.

Tabla 3. Costos Totales de la Tubería CPVC.

Costos	Cantida d	Precio unitario	Totales
Tubos CPVC (3/4") X 6M	43 mts	€12550,3	€100 402,88
SDR13.5SC Marca Durman		6	
Adaptador Hembra CPVC	12	€1334,68	€16 016,16

Adaptador Macho	6	¢516,30	¢3097,8
Uniones CPVC 3/4"	9	¢738,53	¢6 646,77
Codo 90 CPVC FGG 18MM(3/4" x 45) BE, Marca Durman	8	¢538,27	¢4 306,16
Figura T	8	¢1085,09	¢8 680,72
Pegamento	2	¢5350	¢10 700
Mano de Obra (Operario fontanería)	16 horas	¢2300 la hora	¢36 800
Mano de Obra (Ayudante fontanería)	16 horas	¢1800 la hora	¢28 800
Costo Total de la colocación de la tubería CPVC			¢215 450,49

Fuente: Elaboración propia, 2025, información proporcionada por el HDSRCG.

Tabla 4. Costos Totales de la Tubería de Polietileno.

Costos	Cantida d	Precio unitario	Totales
Tubería de polietileno	40 mts	¢1130	¢45 200

Adaptador Hembra Compresión PEAD 3/4"	4	€3295,15	€13 180
Adaptador Macho Compresión PEAD 3/4"	20	€3225,03	€64 500,6
Figura T de compresión PE	8	€6100	€48 800
Mano de Obra (Operario fontanería)	16 horas	€2300 la hora	€36 800
Mano de Obra (Ayudante fontanería)	16 horas	€1800 la hor a	€28 800
Costo Total de la colocación de la tubería Polietileno			€237 280,6

Fuente: Elaboración propia, 2025, información proporcionada por el HDSRCG.

La inversión en la sustitución de tuberías de CPVC por una opción más adecuada, como el polietileno, representa un gasto significativo pero esencial para garantizar la calidad y seguridad del agua utilizada en el proceso de hemodiálisis. Ambas tablas de costos reflejan el gasto total asociado a la instalación de tuberías de CPVC y Polietileno, es fundamental evaluar no solo el costo inicial, sino también los beneficios a largo plazo que ofrece un sistema de tuberías optimizado.

Una tubería con características técnicas superiores reducirá el riesgo de acumulación de biopelícula, minimizará los costos de mantenimiento correctivo y prolongará la vida útil del sistema de purificación de agua, asegurando un suministro confiable y libre de contaminantes para los pacientes.

Por ello, es importante tomar en cuenta que, el costo de la tubería de polietileno es un poco más elevada, en comparación con la tubería CPVC; sin embargo, se valora las ventajas de este material para la planta de hemodiálisis, se realizaría una sola inversión y su durabilidad es de 50 años, además, cuando se instala un sistema de tratamiento y distribución de agua para diálisis, se debe tomar en cuenta que se cumpla con los requisitos de calidad de agua establecidos por la norma de calidad.

Otro componente esencial en la mejora de la planta es la instalación de un sistema de lámparas ultravioleta (UV) para la eliminación de TOC (Total Organic Carbón). Este sistema de desinfección es crucial para garantizar que el agua esté libre de impurezas orgánicas que podrían afectar la calidad del tratamiento de hemodiálisis. Las lámparas UV ofrecen una solución eficiente y segura para reducir los niveles de TOC, un factor crítico para obtener agua ultrapura, cumpliendo con las normativas internacionales para su uso en procedimientos médicos.

Adicionalmente, es fundamental que el cuarto de máquinas, donde se encuentran los equipos clave para el tratamiento, cumpla con todos los requisitos normativos y de seguridad necesarios. Este espacio debe estar debidamente acondicionado, con condiciones óptimas de ventilación, acceso y protección para garantizar la operación eficiente y segura de los equipos, contribuyendo a la prolongación de su vida útil y al desempeño continuo del sistema.

Sumado a estas mejoras, se incluye la ejecución de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo, fundamental para maximizar la vida útil de los equipos y garantizar su funcionamiento continuo de acuerdo con los estándares establecidos. El mantenimiento regular permitirá identificar posibles fallos antes de que ocurran, optimizando así la eficiencia del sistema y evitando tiempos de inactividad inesperados que podrían comprometer la calidad del tratamiento de hemodiálisis.

El objetivo final de estas mejoras es obtener agua ultrapura, un recurso imprescindible para los procedimientos de hemodiálisis. Esto garantiza no solo la seguridad de los pacientes, sino también el cumplimiento de las normativas y los estándares de calidad establecidos por las autoridades sanitarias.

Es importante señalar que, si bien la inversión no se retribuirá económicamente de manera directa, los beneficios a largo plazo son evidentes, ya que se logra ofrecer un servicio de calidad que beneficia la salud de los pacientes y asegura el correcto funcionamiento del sistema de tratamiento.

4.1.3. Tanques de Almacenamiento de Agua Tratada y Concentrados

El principal resultado esperado de la **propuesta**, es la optimización de la calidad del agua utilizada en las máquinas de hemodiálisis, asegurando un suministro libre de contaminantes químicos y microbiológicos. La implementación de un sistema avanzado de purificación permitirá que el agua utilizada en el procedimiento de diálisis cumpla con los más altos estándares de pureza, reduciendo significativamente los riesgos de complicaciones durante y después de las sesiones de tratamiento. Estudios previos han demostrado que las deficiencias en la calidad del agua han impactado negativamente en

la eficacia y seguridad del proceso de hemodiálisis, destacando la necesidad de intervención en el sistema de purificación.

Los concentrados individuales deben cumplir las especificaciones del etiquetado. Según Pérez et al. (2016), si se demuestra que están contaminados se rechazarán, se notificará y se cambiarán por un lote correcto. En los sistemas centralizados se realizarán las desincrustaciones y desinfecciones y otras formas de prevención y tratamiento según especifique la empresa proveedora. Se recomienda la desinfección al menos cada 12 meses y realizar determinaciones analíticas bacteriológicas 3 días antes de su desinfección. Ante la presencia de contaminación bacteriana del LD, con niveles adecuados en el agua, se debe sospechar como fuente de contaminación el concentrado, realizando los cultivos pertinentes.

CAPÍTULO V.

5.1. Conclusiones

Dentro de las conclusiones que arroja esta investigación, se muestran las siguientes:

- La implementación de un sistema avanzado de purificación de agua en el Hospital Dr. Rafael Ángel Calderón Guardia representa un paso fundamental para mejorar la calidad del agua utilizada en las máquinas de hemodiálisis, lo cual es crucial para garantizar la seguridad y bienestar de los pacientes. A través de la aplicación de tecnologías de purificación de vanguardia, como la ósmosis inversa, los filtros de carbón activado y la radiación ultravioleta, se logrará una significativa mejora en la pureza del agua, reduciendo los riesgos de complicaciones durante y después de las sesiones de diálisis.
- La identificación de las deficiencias en el sistema actual, como las tuberías de CPVC que favorecen la acumulación de biofilm, ha permitido la propuesta de soluciones adecuadas, como el reemplazo de estas tuberías por materiales más eficientes como el polipropileno, polietileno y acero inoxidable. Estos materiales ofrecen superficies más lisas y resistentes, lo que facilitará un flujo de agua más limpio y seguro.
- Las tuberías de polietileno son ampliamente utilizadas en aplicaciones de suministro de agua y tienen algunas ventajas que podrían ser beneficiosas para el tratamiento de agua para diálisis, como la resistencia a la corrosión, lo que significa que es menos propenso a liberar sustancias químicas dañinas al agua, así como la baja rugosidad superficial, lo que ayuda a reducir la acumulación de sedimentos y microorganismos en las paredes de la tubería. Además, son flexibles y

duraderos, lo que puede ser beneficioso para una red de distribución de agua de diálisis que requiere una alta confiabilidad.

- Es fundamental asegurarse de que el polietileno cumpla con todas las normas y regulaciones aplicables para el tratamiento de agua para diálisis. Esto incluye estándares de calidad del agua y especificaciones técnicas.
- Es importante considerar el análisis de costos completo, que incluya el costo de los materiales, instalación y mantenimiento a lo largo del tiempo, aunque es un poco mayor a la tubería CPVC se debe tomar en cuenta las grandes ventajas de la tubería de polietileno mencionadas anteriormente.
- El personal encargado de la instalación y mantenimiento de la nueva red de distribución debe estar debidamente capacitado y tener el conocimiento técnico necesario.
- Como parte de la ventilación, la planta de hemodiálisis no debe estar con aire acondicionado, debido a que, el aire acondicionado puede generar partículas suspendidas en el aire y aerosoles, lo que puede aumentar el riesgo de contaminación microbiológica en el ambiente. Además, los sistemas de aire acondicionado suelen recircular el aire, lo que significa que el aire puede contener bacterias, virus y otros patógenos que se propagan por el ambiente. Estas partículas en el aire pueden ser inhaladas o entrar en contacto con los pacientes durante el tratamiento de diálisis, lo que puede aumentar el riesgo de infecciones respiratorias y otros problemas de salud.
- Adicionalmente, la incorporación de un sistema de radiación ultravioleta (UV) para la eliminación de los Compuestos Orgánicos Totales (TOC) permitirá una

desinfección más eficaz de los microorganismos, complementando las tecnologías de purificación existentes. Esto reducirá aún más el riesgo de contaminación microbiológica, asegurando que el agua utilizada en las sesiones de hemodiálisis esté completamente libre de contaminantes perjudiciales.

- Asimismo, la creación de un espacio adecuado y controlado ambientalmente para el mantenimiento de los equipos de purificación de agua garantizará que estos operen de manera eficiente y prolongue su vida útil, evitando fallos y garantizando la calidad constante del agua.

En conclusión, la optimización del sistema de producción de agua de hemodiálisis del HRACG es una estrategia clave para mejorar la seguridad y eficiencia del tratamiento, garantizando el bienestar del paciente y el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos en el sector salud.

5.2. Recomendaciones

Como parte de las recomendaciones que se pueden desarrollar con esta investigación, se destacan las siguientes:

- Se recomienda sustituir la tubería de recirculación actual por Polietileno para evitar riesgos de contaminación y asegurar una mayor durabilidad del sistema.
- Incorporar un sistema ultravioleta moderno para la eliminación del Carbono Orgánico Total con el fin de mejorar la calidad del agua y reducir la presencia de contaminantes.

- Acondicionar el área donde se ubican los equipos de purificación para cumplir con las normas de seguridad y sanidad, minimizando el riesgo de contaminación cruzada.
- Instalar sistemas de bombas redundantes y alternas para evitar interrupciones en el suministro de agua en caso de falla de los equipos.
- Colocar puntos de prueba certificados que permitan obtener un puntaje de prueba más preciso y confiable, evitando falsos positivos en los análisis bacteriológicos.
- Se recomienda mantener y fortalecer el programa de mantenimiento preventivo con monitoreo continuo de la calidad del agua, asegurando que se cumplan los parámetros de seguridad establecidos.
- Asegurar el estricto cumplimiento de la rutina de mantenimiento establecida, con énfasis en la desinfección periódica del sistema y el reemplazo de filtros y membranas en los tiempos recomendados.
- Capacitar al personal de mantenimiento en el uso adecuado de los equipos y en la identificación temprana de posibles fallas del sistema.
- Realizar revisiones periódicas para evaluar el impacto de las mejoras implementadas y detectar oportunidades de optimización adicionales. Justificar la inversión en mejoras técnicas y de infraestructura mediante un análisis detallado de costo-beneficio, enfatizando ampliamente los beneficios en términos de seguridad, reducción de costos operativos y cumplimiento de normativas.
- Mantener alianzas estratégicas con proveedores especializados para asegurar la disponibilidad de repuestos calificados y servicios de mantenimiento.

Referencias

- Barrios C. L. M. (2019). Contaminación microbiana en hemodiálisis y su asociación con el riesgo de Infecciones. <https://repositorio.fass.edu.br/jspui/bitstream/123456789/428/1/Laura%20Maria%20Barros%20Caparelli.pdf>
- Bingo. (2021). La vida útil y las ventajas económicas de la tubería de polietileno de alta densidad (HDPE). <https://es.bingopipes.com/noticia-de-tuberia-pead-economica.html>
- Bocos G. L. M. (2015). Diseño de una planta de producción de agua para hemodiálisis. Esquema principio de la hemodiálisis. <https://cendial.com.mx/hemodiálisis>
- Chacón C. M. y Ramírez N. F. M. (2022). Estrategias de gestión universitaria para mitigar la exclusión y garantizar la permanencia y graduación de la población estudiantil, que opta por la carrera de Bachillerato en Ciencias de la Educación Primaria con Concentración en Inglés del Recinto de Guápiles, Universidad de Costa Rica, durante el periodo 2017-2021. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86992>
- Echeverría P. J. D. y García A. M. R. (2015). Propuesta de aplicación de herramientas de TPM a una planta de agua para máquina de hemodiálisis. <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/156/PROPUESTA%20DE%20APLICACION%20DE%20HERRAMIENTAS%20DE%20TPM%20A%20UNA%20PLANTA%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Espinach y Avellán. (2013). Indicadores de Calidad en la Unidad de Hemodiálisis del Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia. Revista Clínica de la Escuela de Medicina UCR – HSJD, 3(8), 21-29. ISSN 2215-2741

- Fernández A. S. (2023). Diagnóstico, evaluación y rediseño de Planta de tratamiento de agua de clínica de diálisis en cumplimiento con los requisitos de la familia de las normas ISO 23500.
- Hernández S. R, Fernández C. Baptista L. P. (2015). Metodología de la Investigación (6ta Ed). México: Mc Graw Hill.
- Hernández S. R. y Mendoza T. C. P. (2017). Metodología de la investigación: las rutas: cuantitativa y cualitativa y mixta. México: Mc Graw Hill.
- Instituto Nacional de la Diabetes y las Enfermedades Digestivas y Renales. (2018). <https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/enfermedades-rinones/insuficiencia-renal/hemodialisis>
- Jiménez C. J.J. (2022). Procesos de reinserción social a través de las herramientas del sentido de vida en las personas con beneficio penitenciario adscritas al Centro de Atención Semiestructurada de Nicoya, durante el primer trimestre del 2022. Trabajo Final de Graduación. Universidad Central Sede Metropolitana.
- LightSources. (2022). Reducción del COT UV en el agua con lámparas de calidad. <https://www.light-sources.com/blog/uv-toc-reduction-in-water-with-quality-lamps/>
- Latini D. (2016). Agua para diálisis. https://cdn1.redemc.net/campus/wp-content/uploads/2016/11/HD_M6_Latini-Agua-para-Di%C3%A1lisis-ES-PUBL.pdf
- Ley General de Salud. (1973). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=6581
- Mora R. S. I. (2019). Diseño de una planta de tratamiento de agua automatizada portable mediante el método de osmosis inversa para optimizar del funcionamiento de las máquinas de hemodiálisis.

- Morell, I. & Hernández, F. (2000). El agua en Castellón: un reto para el siglo XXI. Castellón de la Plana: Editorial de la Universidad Jaume. España.
- Okuda B. M. y Gómez R. C. (2005). Métodos en investigación cualitativa: triangulación. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 34(1). 118-124.
<https://www.redalyc.org/pdf/806/80628403009.pdf>
- QuimiNet. (2012). Descubra para qué sirven las resinas de intercambio iónico. Obtenido de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/articulos/descubra-para-que-sirven-las-resinas-de-intercambio-ionico-2663450.htm>
- Pérez G. R., García M. R., Gonzales P. E., Solozábal C. C., Ramírez C. R., Rabadán P. M. (2016). Guía de gestión de calidad del líquido de diálisis (LD). *Revista de la Sociedad Española de Nefrología*, 36 (3), 1-52.
- Pérez-García, R., Anaya, F., Chisvert, J., y Valderrábano, F. (1995). Asociación de dializadores de alto flujo y contaminación bacteriana del dializado inducida por liberación crónica de citocinas en pacientes en hemodiálisis. *Nephrol Dial Transplant*.
- Pérez G. R. y Rodríguez B. P. (2023) Calidad del líquido de diálisis y sus componentes: Agua y Concentrados. *Nefrología al día*. ISSN: 2659-2606.
<https://www.nefrologiaaldia.org/322>
- Pérez G. R. y Rodríguez B. P. (2016). Calidad del líquido de diálisis y sus componentes: Agua y Concentrados.. *Nefrología al día*. ISSN: 2659-2606.
- Rivas N. P. D. (2019). Diseño De Una Máquina De Ósmosis Inversa Para Producir Agua UltraPura En El Laboratorio De Manufactura De La Pucp.
<https://tesis.pucp.edu.pe/items/b061d2ec-2a99-4515-896c-96e534fab490>
- Rosales D. (2022). Avanzado sistema purificador de agua es aliado de terapias de hemodiálisis en Costa Rica.

Tapia, F. L. (2011). Tcae en hemodiálisis. Málaga, España: Editorial Publicaciones Vértice

Terregosa I., Pérez A. y Giménez M. (2012). Tratamiento del agua para hemodiálisis. Nefrología, 18(1). <https://www.revistanefrologia.com/es-tratamiento-del-agua-hemodialisis-articulo-X0211699598010059>

Tong, M.-H., Wang, W., Kwan, T.-H., Chan, L. Y Au, T.-C. (2001). Tratamiento del agua para hemodiálisis. (N. L. Elsevier, Ed.) Hong Kong Journal Of Nephrology, 3, 7-14. Doi:10.1016/S1561-5413(09)60050-8

Anexos

Esta sección de anexos representa la planta de tratamiento de agua para la hemodiálisis que tiene actualmente el Hospital Dr. San Rafael Ángel Calderón Guardia, el cual utiliza tubería CPVC.



