

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Dimensionamiento y montaje de la planta de tratamiento de agua para el proceso de niquelado químico en la empresa Field Service Solution.

Oscar Daniel Velásquez Muñoz

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico.

Modalidad: práctica empresarial.

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Ingeniero Químico.

Tutor

Gilberto Quintero Niño

Ingeniero Metalúrgico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Dedicatoria

A Dios, principio y fin de todo conocimiento, en ti encontré la fuente inagotable de inspiración y sabiduría que guio cada paso en este arduo camino académico. En tu presencia, encontré la fortaleza para superar cada desafío y alcanzar mis metas. A ti señor, elevo mi más sincero agradecimiento por darme la vida, por ser mi faro en la oscuridad, mi sostén en la debilidad y mi guía constante.

A mi amada madre Sonia Muñoz, cuyo amor ha sido mi roca inquebrantable a lo largo de este viaje, tú sacrificio silencioso, tu aliento constante y tu amor desinteresado han sido el motor que me impulsa a perseguir mis sueños con determinación y coraje. En este nuevo logro alcanzado veo reflejado tu esfuerzo y dedicación, tus enseñanzas las cuales me han permitido llegar a culminar este ciclo académico, y es a ti a quien dedico este logro con profunda gratitud y admiración por que estoy seguro que sin ti jamás lo hubiera logrado.

A mi familia cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor tesoro en esta travesía, gracias por su presencia constante, por la comprensión y por su aliento inquebrantable.

A mi novia Melissa Josa, por su amor incondicional, por su apoyo constante, por alentarme a superar los desafíos que parecían imposibles, por caminar junto a mí en este camino académico, gracias por cada logro que superamos juntos y por ser la persona que me sostuvo cuando dudé de mis capacidades, por ser la luz que iluminó mi camino, gracias por tanta paciencia, amor y por cada sacrificio y problema que enfrentaste por mí.

Tabla de contenido

Introducción	8
Descripción de Field Service Solution S.A.S.....	10
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
2. Marco conceptual.....	12
2.1. Proceso de niquelado químico.....	12
2.2. Precipitación por sulfato de níquel.....	13
2.3. Envenenamiento por orto-fosfito.	13
2.4. Agua desionizada.	14
2.5. Resina intercambio catiónico	15
2.6. Resina intercambio aniónico	15
2.7. Carbón activado.....	16
2.8. Filtros de sedimentos.....	17
3. Metodología	18
3.1. Etapa 1	19
3.1.1. <i>Pruebas de operación y diagnóstico del pH y la temperatura.....</i>	<i>19</i>
3.1.2. <i>Pruebas de operación y diagnóstico de la concentración de sulfato de níquel e hipofosfito de sodio</i>	<i>20</i>
3.1.3. <i>Pruebas de operación y diagnóstico del agua desionizada.</i>	<i>22</i>
3.2. Etapa 2.....	23
3.3. Etapa 3.....	23
4. Resultados	25
4.1. Análisis del pH y la temperatura.	25
4.2. Análisis de la concentración de sulfato de níquel e hipofosfito de sodio.	28
4.3. Análisis de la concentración de hipofosfito de sodio.....	29
4.4. Análisis y montaje de la planta de tratamiento para la obtención de agua desionizada.	31
5. Conclusiones	43
6. Recomendaciones	44
Referencias bibliográficas.....	45

Lista de figuras

Figura 1 <i>Etapas de la descripción metodológica.....</i>	18
Figura 2 <i>Manchas en la herramienta por falta de agua desionizada en el lavado.</i>	31
Figura 3 <i>Tanque de polipropileno con las paredes niqueladas.....</i>	32
Figura 4 <i>Filtro de sedimentos con capacidad de retención de 10 micras.</i>	35
Figura 5 <i>Filtro de sedimentos con capacidad de retención de 5 micras.</i>	36
Figura 6 <i>Diagrama PFD de la planta de tratamiento de agua.</i>	38
Figura 7 <i>Planta de tratamiento lista para su funcionamiento en la empresa Field Service Solution.</i>	39
Figura 8 <i>Tanques de almacenamiento de agua desionizada.</i>	39
Figura 9 <i>Estructura empleada para regenerar las resinas de intercambio iónico con las respectivas sondas para reducir el caudal del ácido clorhídrico y el hidróxido de sodio empleados para realizar el proceso de regeneración.....</i>	40
Figura 10 <i>Tanque de níquel después de terminar el proceso implementado agua desionizada. 41</i>	41
Figura 11 <i>Herramienta niquelada después de lavado con agua desionizada.</i>	41
Figura 12 <i>Bomba de recirculación con fallas a causa de la falta de agua desionizada presentado niquelado en sus componentes.</i>	42
Figura 13 <i>Bomba de recirculación al terminar el baño de niquelado químico, implementado agua desinoizada en el mismo.</i>	42

Lista de tablas

Tabla 1 Rangos de concentración de sulfato de níquel para los respectivos ensayos de operación.	21
Tabla 2 Ensayo de operación con ajustes en el tiempo del nuevo rango de temperatura y pH. .	27
Tabla 3 Ensayos de operación para obtener el rango de operación para la concentración de sulfato de níquel.	28
Tabla 4 Nuevas condiciones de operación para el tanque de niquelado químico.	30
Tabla 5 Condiciones de operación tanque de niquelado químico suministrada por FES.	30
Tabla 6 Resultados de conductividad, pH, TDS y cloro libre en el agua.	34
Tabla 7 Especificaciones técnicas suministrados por FES para el dimensionamiento y volumen de resinas de intercambio iónico.	37

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Resumen

Título: Dimensionamiento de la planta de tratamiento de agua para el proceso de niquelado químico en la empresa Field Service Solution. *

Autor: Oscar Daniel Velásquez Muñoz. **

Palabras claves: Niquelado químico, hipofosfito de sodio, sulfato de níquel, agua desionizada, concentración.

Descripción: Este trabajo se enfocó en una práctica empresarial en Field Service Solution, una compañía que emplea el método de niquelado químico enfocado en la industria petrolera, específicamente aplica un recubrimiento de níquel-fósforo. Field Service Solution enfrenta diversos problemas derivados de la falta de conocimiento en dicho proceso. Estos problemas incluyen el excesivo consumo de reactivos, el rápido desgaste de los tanques de reacción, la precipitación debido al mal uso de los reactivos principales y la escasez de agua desionizada, un reactivo clave que resulta en contaminación excesiva y diversas complicaciones, como niquelado no deseado en las paredes de los tanques, manchas en la herramienta niquelada y dificultades en la preparación de reactivos. Además, aumenta el consumo de ácido nítrico para la limpieza de los tanques de polipropileno.

Para mejorar el proceso, se realizó un diagnóstico de la planta de producción. Se evaluó la concentración de los reactivos principales durante el tiempo de niquelado para determinar los valores adecuados. También se implementó una planta de tratamiento para la obtención de agua desionizada, con el objetivo de garantizar la calidad del producto final y reducir el consumo de ácido nítrico. Estas acciones se llevaron a cabo con consideraciones hacia la seguridad de los trabajadores y la reducción de la huella de carbono.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Omar Andrés Benavides Prada, Ingeniero Químico.

Abstract

Title: Sizing of the water treatment plant for the chemical nickel-plating process at Field Service Solution.

Author: Oscar Daniel Velasquez Muñoz

Keywords: Chemical nickel plating, sodium hypophosphite, nickel sulfate, control loop, concentration.

Description: This work focused on a business practice at Field Service Solution, a company that employs the chemical nickel-plating method focused on the oil industry specifically they apply a nickel-phosphorous coating. Field Service Solution faces several problems resulting from a lack of knowledge of the process. These problems include excessive reagent consumption, rapid wear of the reaction tanks, precipitation due to misuse of the main reagents and shortage of de-ionized water, a key reagent that results in excessive contamination and various complications such as unwanted nickel plating on the tank walls, staining of the nickel-plating tool and difficulties in reagent preparation. In addition, it increases the consumption of nitric acid for cleaning the polypropylene tanks.

To improve the process, a diagnosis of the production plant was carried out. The concentration of the main reagents during the nickel-plating time was evaluated to determine the optimum values. A treatment plant was also implemented to obtain de-ionized water in order to guarantee the quality of the final product and reduce nitric acid consumption. These actions were carried out with considerations for worker safety and the reduction of the carbon footprint.

*Degree thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Omar Andrés Benavides Prada, Ingeniero Químico.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Introducción

En el marco de las operaciones de Field Service Solution (FES), se implementa la técnica de niquelado químico con el objetivo de depositar un recubrimiento de níquel-fósforo con más del 11 % m/m de fósforo. Este procedimiento cuenta con una investigación detallada, enfocada en mejorar las propiedades anticorrosivas de las herramientas utilizadas en la industria petrolera, prolongando su durabilidad. El niquelado químico es una técnica reconocida por la uniformidad del recubrimiento, destacando por su alta resistencia a la corrosión y dureza. No obstante, su efectividad está vinculada a variables como la composición del material, los procesos de pretratamiento, la limpieza y la calidad de los reactivos empleados.

En respuesta a desafíos específicos enfrentados en el proceso de niquelado, FES ha identificado la necesidad de mejorar los resultados obtenidos. Entre los problemas identificados se encuentran el elevado consumo de reactivos, el desgaste masivo de los tanques de niquelado químico antes de alcanzar su vida útil, procedimientos inapropiados llevados a cabo por los técnicos encargados del proceso y, principalmente, la escasez de agua desionizada. Con la finalidad de garantizar un recubrimiento de calidad uniforme en todas las herramientas, se ha propuesto una alternativa estratégica orientada a mejorar la eficiencia del proceso, reducir las pérdidas de reactivos durante la producción y ejercer un control preciso sobre las variables operativas para obtener resultados adecuados en el recubrimiento, buscando de estandarizar la calidad de este.

En este contexto, se ha formulado una propuesta integral que abarca el dimensionamiento y puesta en marcha de un sistema de tratamiento para la obtención de agua desionizada, a la par de un diagnóstico detallado de los procedimientos inadecuados identificados en la planta por parte

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

de los técnicos de producción. Este proceso es esencial para ejercer un control sobre los reactivos principales, tales como el agua desionizada, el sulfato de níquel y el hipofosfito de sodio. El control de las concentraciones de hipofosfito de sodio se rige como una necesidad ineludible para mantener un valor adecuado de este compuesto, asegurando así que el recubrimiento cuente con un contenido de fósforo superior al 11 % m/m, siendo esta una condición esencial para garantizar sus propiedades anticorrosivas. Por otro lado, es necesario estabilizar la concentración de sulfato de níquel para prevenir la formación de precipitados con el amoníaco, lo cual afecta propiedades críticas como la ductilidad, dureza y resistencia a altas temperaturas. Además, resulta ineludible asegurar que estos reactivos reaccionen junto con agua desionizada de alta calidad para disminuir problemas como el niquelado de las paredes del tanque de polipropileno, el alto consumo de sulfato de níquel, el gasto desmesurado de ácido nítrico, la formación de óxidos nitrosos en proceso de limpieza y la adecuada preparación de reactivos.

En busca de cumplir con estos objetivos, se llevó a cabo un estudio de los procedimientos efectuados en la planta de producción. Este análisis tuvo como propósito identificar los valores adecuados de las variables de control, en particular del hipofosfito de sodio y sulfato de níquel. Posteriormente, con base en la evaluación realizada se ha propuesto la implementación de una planta de tratamiento para la obtención de agua desionizada, adaptada a las necesidades específicas del proceso y de la empresa. La instalación de esta planta se establece como un elemento fundamental para la consecución de los objetivos planteados, al permitir una gestión eficiente de las variables críticas y, en consecuencia, un fortalecimiento de la posición competitiva de Field Service Solution dentro del sector.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Descripción de Field Service Solution S.A.S.

Field Service Solution S.A.S., fundada en el año 2015 se define como una entidad especializada en la rehabilitación de herramientas destinadas a la inyección de agua en pozos petroleros, facilitando así el proceso de extracción de crudo mediante el principio de diferencias de densidades. Como parte de su evolución continua, la empresa condujo una investigación focalizada en la optimización de la vida útil de estas herramientas, obteniendo como resultado la aplicación de un recubrimiento de níquel-fósforo.

La pionera adopción por parte de FES del recubrimiento de níquel en estas herramientas, se tradujo en una significativa mejora de propiedades como la dureza, ductilidad, resistencia a elevadas temperaturas y propiedades anticorrosivas superiores. Este enfoque innovador no solo permitió que las herramientas resistan más de 5 años bajo tierra sin comprometer el recubrimiento de níquel, sino que también extendió el intervalo para realizar reparaciones, superando con creces las expectativas iniciales en términos de vida útil.

El logro mencionado propulsó el crecimiento y el fortalecimiento de FES, emergiendo como una entidad con más de 40 empleados. Asimismo, la colaboración estratégica con Ecopetrol S.A., la principal entidad petrolera en Colombia y la compañía más grande del país, ha elevado la posición de FES en el mercado, consolidándose como un actor clave en la industria petrolera colombiana. Este testimonio de innovación técnica y colaboración estratégica resalta el papel destacado de la empresa en el desarrollo y avance de prácticas vanguardistas en el ámbito de la ingeniería y la industria petroquímica.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Dimensionar y poner en marcha la planta de tratamiento de agua para el proceso de niquelado químico en la empresa Field Service Solution S.A.S.

1.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar el proceso de niquelado químico en la planta durante el año 2023.
- Seleccionar y dimensionar los equipos requeridos para la obtención de agua desionizada.
- Puesta en marcha de la planta de tratamiento de agua para el proceso de niquelado químico.

2. Marco conceptual

2.1. Proceso de niquelado químico.

El proceso de niquelado químico se configura como una técnica avanzada de galvanoplastia empleada en la aplicación de recubrimientos de níquel-fósforo o níquel-boro sobre superficies de metal o plástico. El propósito fundamental de esta técnica es mejorar las propiedades anticorrosivas de la pieza mediante una reacción autocatalítica de óxido-reducción, que tiene lugar en presencia de un agente reductor, como el hipofosfito de sodio hidratado. La formación del recubrimiento resultante exhibe propiedades notables como dureza, ductilidad, resistencia térmica y una excepcional protección contra la corrosión. La variación de estas propiedades está intrínsecamente vinculada a la cantidad de fósforo depositado durante el proceso. Existen tres categorías principales de recubrimientos, determinadas por el porcentaje de fósforo: niquelado con baja concentración de fósforo (2-5 % m/m), que ofrece alta resistencia a la corrosión en ambientes alcalinos; niquelado con media concentración de fósforo (5-11 % m/m), el más común por su rápida velocidad de deposición y brillo; y niquelado con alta concentración de fósforo (superior al 11 % m/m), que proporciona la máxima resistencia a la corrosión y dureza. (Brenner, 1963; Gomes *et al.*, 2019)

La uniformidad en el espesor de la capa del recubrimiento es una característica distintiva del niquelado químico. Para lograr este resultado, es imperativo someter la pieza a diversos pretratamientos, cuya naturaleza dependerá del material y el acabado deseado. Comúnmente se inicia con un proceso de limpieza para eliminar impurezas y presencia de fosfatización, seguido de la eliminación de óxidos y, finalmente, un proceso de activación. En el caso de piezas metálicas, este último se realiza con ácidos débiles, mientras que para las piezas plásticas se emplea nitrato

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

de plata. Este proceso meticuloso garantiza la preparación adecuada de la superficie antes de la aplicación del recubrimiento, optimizando así las propiedades finales del mismo. La aplicación del niquelado químico no solo se distingue por sus propiedades mejoradas, sino también por la precisión y eficacia en la uniformidad del recubrimiento, lo cual lo convierte en una técnica esencial en la ingeniería de superficies avanzada. (Brenner, 1963; Gomes *et al.*, 2019)

2.2. Precipitación por sulfato de níquel.

En el contexto del proceso de niquelado químico, la precipitación mediante sulfato de níquel es un suceso común y crucial. Este fenómeno se origina debido a la necesidad de mantener el pH de la solución en un rango específico a lo largo del tiempo, dependiendo si el baño es ácido o alcalino. En el caso de baños ácidos, la adición controlada de Na(OH) hidratado o NH₃ es esencial para estabilizar los valores de pH durante la operación. Sin embargo, es indispensable tener en cuenta que ambos actúan como precipitantes para el sulfato de níquel, significando que la presencia de grandes cantidades de estos agentes, o de sulfato de níquel, puede desencadenar la precipitación no deseada en el baño de niquelado químico. Este fenómeno no solo detiene la velocidad de deposición, también puede ocasionar la formación de manchas indeseadas en las herramientas sometidas al proceso (Free, 2013)

2.3. Envenenamiento por orto-fosfito.

El envenenamiento por orto-fosfito en el proceso de niquelado químico surge como consecuencia de la subproducción de este compuesto en el baño. Esta subproducción se origina a partir del hipofosfito de sodio hidratado, y se manifiesta cuando la concentración del orto-fosfito excede los 100 [g/l]. Para gestionar esta situación, es imperativo mantener un control preciso sobre

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

la concentración de hipofosfito de sodio, manteniéndola en el rango de 36-40 [g/l]. La desviación de estos valores establecidos puede provocar la precipitación de contaminantes, generando daños irreversibles en la mayoría de los casos. Esta problemática se agrava por el elevado costo de los reactivos necesarios para regenerar el baño, haciendo más económico y viable el montaje de un nuevo baño con reactivos nuevos. Además, esta desviación impacta directamente en la calidad del recubrimiento en la herramienta, requiriendo, en muchos casos, un reproceso completo de la misma (Gomes *et al.*, 2019)

2.4. Agua desionizada.

El agua desionizada es aquella que no posee iones disueltos, como sodio, calcio, hierro y cobre. Esta se obtiene mediante un proceso de desionización que elimina tanto aniones como cationes, que se encuentran comúnmente en el agua corriente. Así mismo, este tipo de agua es escasa en iones de carga eléctrica, lo que la hace ideal para aplicaciones específicas como el uso en laboratorios, implementada, principalmente, en la preparación de reactivos y disoluciones de los mismos, con el fin de evitar que los iones puedan interferir en los análisis químicos. Otra forma de identificarla es por su baja conductividad; comparada con otros tipos de agua, su capacidad para conducir electricidad es muy baja (Pérez, 2018).

El agua desionizada desempeña un papel crucial como reactivo principal en el proceso de niquelado químico debido a la necesidad de eliminar iones como sodio, hierro, cobre y calcio. El agua se somete a un proceso de intercambio iónico para garantizar la homogeneidad del recubrimiento, su calidad y espesor. Asimismo, es fundamental eliminar estos iones para prevenir la niquelación de las paredes del tanque de polipropileno (tanque de proceso) utilizado en el proceso principal, lo cual podría afectar equipos como resistencias térmicas, bomba de

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

recirculación y el sensor de temperatura. Además, el lavado adecuado de las piezas antes y después del proceso de niquelado es crucial para evitar manchas y eliminar completamente las impurezas. El agua desionizada también se utiliza en el laboratorio para preparar disoluciones y reactivos necesarios para titulaciones, con el objetivo de evitar interferencias en las reacciones químicas.

2.5. Resina intercambio catiónico

Es un tipo de resina de intercambio iónico empleada para el tratamiento de agua desionizada; esta se encuentra como cuentas esféricas con un tamaño entre 0.5-10 [mm] de diámetro. A nivel molecular su estructura es bastante abierta, lo cual permite que la solución, en este caso el agua, fluya a través del polímero entrecruzado y se ponga en contacto con los sitios de intercambio. Existen dos tipos de resinas catiónicas: de ácido fuerte y de ácido débil. Así mismo, la resina catiónica tiene la capacidad de retirar minerales y iones del agua como el calcio, magnesio, hierro y manganeso, y otros cationes metálicos como el cobre, níquel, zinc, entre otros (Sharma *et al.*, 2021).

2.6. Resina intercambio aniónico

Es un tipo de resina de intercambio iónico que cuenta con las mismas características estructurales que las resinas catiónicas. La resina de intercambio iónico aniónica tiene la capacidad de intercambiar iones aniónicos en solución por iones de carga opuesta presentes en su estructura. Está compuesta por una matriz polimérica porosa que contiene grupos funcionales catiónicos unidos a ella de manera covalente. La función de estos grupos catiónicos es atraer y retener iones aniónicos de la solución circundante. Cuando la resina entra en contacto con una solución acuosa que contiene iones aniónicos disueltos, los grupos catiónicos en la matriz polimérica se cargan

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

positivamente y tienen afinidad por los iones aniónicos presentes en la solución. Como resultado, los iones aniónicos en la solución son adsorbidos y retenidos por la resina, mientras que los iones de carga positiva asociados a los grupos catiónicos son liberados en la solución. Este proceso de intercambio iónico permite la purificación y el tratamiento de aguas contaminadas al remover selectivamente iones aniónicos no deseados, como nitratos, sulfatos, fosfatos, entre otros. La resina de intercambio iónico aniónica es particularmente efectiva en entornos donde se requiere una alta selectividad y capacidad de adsorción para eliminar contaminantes específicos. Además, es importante destacar que las resinas de intercambio iónico aniónicas pueden regenerarse después de su uso. Esto se logra mediante la elución de los iones adsorbidos de la resina y su reemplazo con iones de carga positiva a través de un proceso de lavado con una solución regeneradora adecuada. (Sharma *et al.*, 2021).

2.7. Carbón activado

El carbón activado es un polvo fino con propiedades que le permiten retener diversas sustancias químicas y partículas en su superficie. Una de sus aplicaciones más recurrentes es en filtros de agua debido a su gran capacidad de adsorción, lo que permite retirar cloro y compuestos orgánicos como el benceno o el tolueno, entre muchos otros. Otra de sus particularidades es la capacidad de retirar sabores y olores desagradables del agua y, por último, aunque no es una de sus funciones principales, también posee la capacidad de atrapar partículas y sedimentos (Sharma *et al.*, 2021).

2.8. Filtros de sedimentos

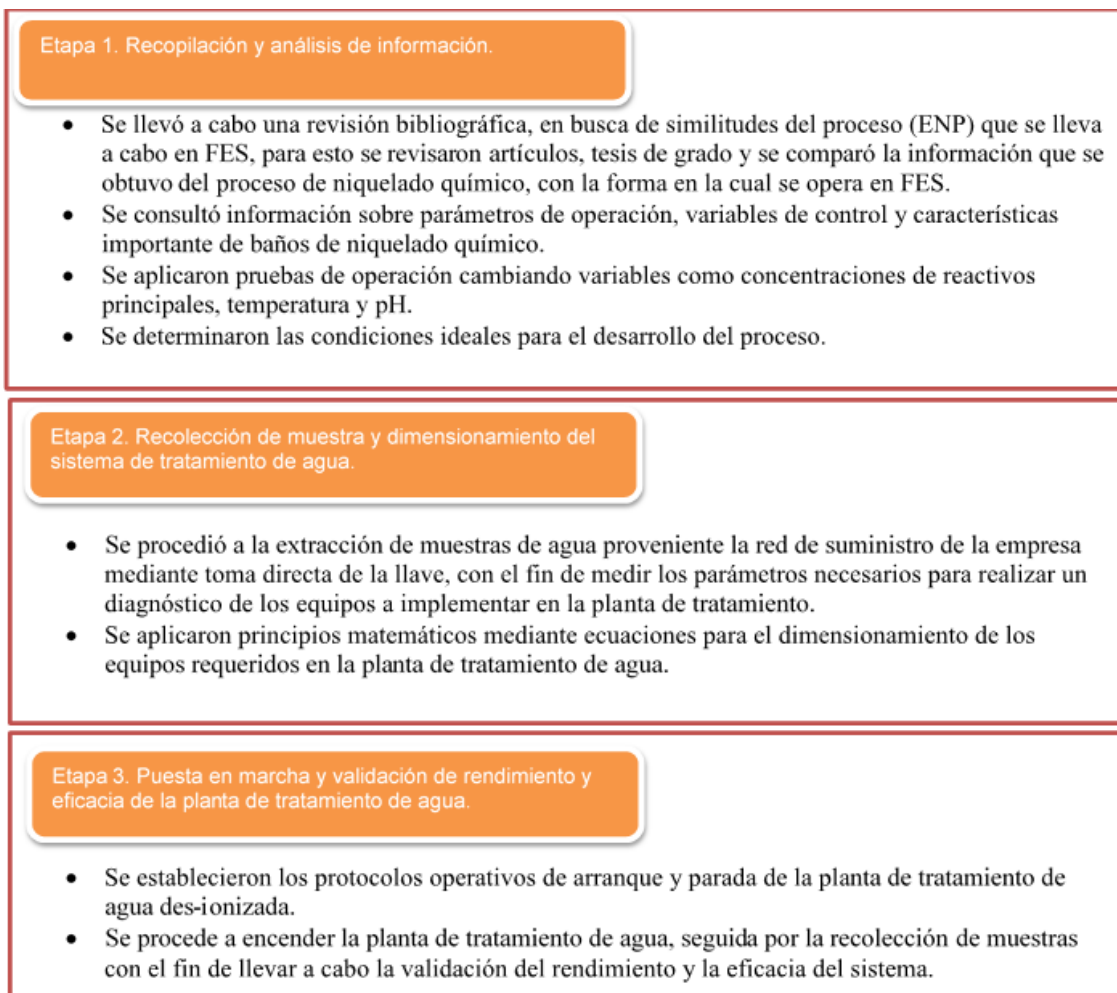
Los filtros de sedimentos son equipos diseñados para eliminar partículas sólidas en suspensión que se encuentran presentes en el agua; entre estas partículas se tiene arena, barro elementos metálicos y orgánicos. Estos filtros son esenciales para cuidar y proteger equipos y tuberías con diámetros pequeños, funcionando como una pantalla que atrapa partículas de un tamaño superior al diámetro de sus poros internos; además, pueden encontrarse en diferentes materiales como poliéster, polipropileno, fibra de cristal y cerámica (Sharma et al., 2021).

3. Metodología

A continuación, se dará a conocer la metodología empleada con sus respectivas etapas y actividades, planteadas para alcanzar los objetivos propuestos. En la Figura 1 se presentan las actividades realizadas para diagnóstico y montaje de la planta de tratamiento de agua.

Figura 1

Etapas de la descripción metodológica.



3.1. Etapa 1

Se llevó a cabo la recopilación y análisis de información proveniente de fuentes como tesis de grado, artículos científicos y datos proporcionados por FES. El objetivo principal fue obtener un entendimiento detallado del proceso de niquelado químico, buscando similitudes que facilitaran un diagnóstico preciso de la operación actual en la planta de procesamiento. Con los datos recolectados, se procedió a realizar pruebas operativas, focalizadas en las variables principales del proceso, evaluando su funcionamiento para llevar a cabo eficientemente la operación. Gracias a este diagnóstico, se lograron identificar las condiciones más propicias con relación a las concentraciones clave de sulfato de níquel, hipofosfito de sodio, temperatura y pH. Este análisis sistemático sienta las bases para la mejora continua del proceso.

3.1.1. Pruebas de operación y diagnóstico del pH y la temperatura.

En el proceso de niquelado químico, el pH constituye una variable esencial que guarda una relación significativa con la velocidad de deposición del recubrimiento. En FES la regulación del pH a lo largo del tiempo se realiza mediante una bomba dosificadora que ajusta el caudal de amoníaco según se determine por los técnicos de producción. FES ha establecido los valores óptimos de pH en un rango [5.2- 5.5] para mantener la velocidad de deposición. La medición de estos valores se lleva a cabo mediante tirillas de pH con una escala de [3.8-5.5], realizando mediciones cada hora o según el criterio del técnico de producción.

En el contexto del proceso de niquelado químico, es fundamental destacar que la temperatura en el tanque desempeña un papel determinante que incide directamente en la velocidad de deposición del recubrimiento. En la empresa FES la monitorización y regulación de la

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

temperatura se lleva a cabo a través de un sensor conectado a un controlador, el cual modula el suministro de energía al tanque mediante el control de dos resistencias. Inicialmente, se definió un rango operativo de temperatura entre 80-85 °C. Sin embargo, al ajustar los niveles de pH para evitar la precipitación de sulfato de níquel, se detectó un efecto notable en la velocidad de deposición, con un incremento sustancial en el tiempo de proceso que oscilaba entre 1 y 5 horas para alcanzar las micras de espesor requerido por cada tanda de herramienta niquelada.

En respuesta a esta situación, se plantearon dos estrategias alternativas para encontrar una solución. En primer lugar, se procedió a determinar el valor máximo de temperatura que el tanque empleado en el proceso de niquelado químico podía soportar de manera segura, con el propósito de ampliar el rango de temperatura operativa y evaluar el aumento en la velocidad de deposición. Esta evaluación implicó consulta con los proveedores para obtener información sobre las especificaciones del material del tanque. Como segunda alternativa, se llevó a cabo un análisis de la relación entre la disminución de la velocidad de deposición y la variación en los niveles de pH. Para ello se emplearon láminas de zinc con un espesor determinado que fueron sometidas a un pretratamiento antes de su inmersión en el tanque de niquelado. Posteriormente, se midió el espesor del recubrimiento en intervalos regulares para determinar el tiempo requerido para alcanzar el espesor deseado. Los resultados de esta medición revelaron una disminución en la velocidad de deposición conforme los niveles de pH descendían.

3.1.2. Pruebas de operación y diagnóstico de la concentración de sulfato de níquel e hipofosfito de sodio.

El sulfato de níquel se destaca como uno de los reactivos principales en el niquelado químico. Sin embargo, su comportamiento se ve afectado al estar en la presencia de compuestos

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

como el amoníaco, también utilizado en dicho proceso. Al realizar un análisis de la interacción entre el sulfato de níquel y el amoníaco, se observó que se lleva a cabo una titulación cada hora para controlar la concentración del sulfato de níquel, manteniéndola en un rango de 4.9-5.5 [g/l]. Inicialmente.

Con el propósito de determinar el rango adecuado de concentración de sulfato de níquel, se diseñaron varios ensayos operativos para identificar cuál de ellos generaba una producción superior que satisficiera los requisitos de FES. En esta fase inicial, se persigue aumentar la producción reduciendo el consumo de reactivos principales, sin comprometer la calidad del recubrimiento y atenuando problemas clave como la precipitación de sulfato de níquel y el envenenamiento por orto-fosfito. Para este propósito, se estableció un rango de concentración de sulfato de níquel entre 4.1 y 5.5 g/l. Con el objetivo de mejorar los resultados, se propuso mantener constante la concentración de sulfato de níquel a lo largo del tiempo, realizando titulaciones cada media hora y añadiendo la cantidad necesaria de la solución de sulfato de níquel al tanque de proceso para mantener los valores establecidos. De esta manera, se llevaron a cabo cinco ensayos con diferentes rangos de operación para la concentración de sulfato de níquel (ver Tabla 1).

Tabla 1

Rangos de concentración de sulfato de níquel para los respectivos ensayos de operación.

# Ensayo	Rango de concentración sulfato de níquel [g/L]
1	5,2 - 5,5
2	4,9 - 5,5
3	4,9 - 5,2
4	4,6 - 5,2
5	4,1 - 4,9

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Por otra parte, el hipofosfito de sodio se rige como uno de los reactivos fundamentales dentro del proceso de niquelado químico, desempeñando el papel de agente reductor y siendo el principal responsable de transferir propiedades anticorrosivas al recubrimiento. En FES se implementa un recubrimiento con un contenido de fósforo superior al 11% [m/m], debido a que las piezas recubiertas son destinadas a la industria petrolera y requieren una elevada resistencia a la corrosión.

Para encontrar los valores adecuados para la concentración de hipofosfito de sodio se realizó una búsqueda bibliográfica (Paunovic & Schlesinger, 2006; Landolt, 2007; Sun et al., 2015) y se consultó con los ingenieros responsables del proceso de niquelado en FES. Es importante mencionar que se llevó a cabo un análisis previo de la concentración de hipofosfito de sodio en los baños de níquel químico precipitados por orto-fosfito. Considerando esto, se propuso un ensayo con un rango de concentración de hipofosfito de sodio de 36 a 40 g/l. En este ensayo se evaluó el comportamiento del baño, la calidad de las herramientas procesadas y la vida útil del baño, además de analizar la posibilidad de envenenamiento por orto-fosfito.

3.1.3. Pruebas de operación y diagnóstico del agua desionizada.

Para llevar a cabo un diagnóstico de los problemas derivados de la escasez de agua desionizada en FES, se identificaron todos los procedimientos que se ven afectados por la falta de este recurso. Además, se realizaron pruebas de operación en el sistema utilizado para la obtención de agua desionizada, con el objetivo de evaluar su funcionalidad y capacidad.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

3.2. Etapa 2

En la segunda etapa se procedió a tomar muestras de agua provenientes de la red de suministro de la empresa. Se llevaron a cabo mediciones de pH, conductividad, sólidos disueltos y cloro libre en el agua, con el fin de identificar cualquier valor que pudiera afectar las resinas de intercambio iónico. Luego, se realizó un análisis detallado de estos parámetros para seleccionar los equipos necesarios para la planta de tratamiento. Además, se llevaron a cabo pruebas utilizando dos tipos de resinas: de lecho mixto y de intercambio catiónico y aniónico.

Posteriormente, dado que las resinas catiónicas y aniónicas suministradas por el proveedor no estaban activadas ni listas para su funcionamiento, se desarrolló un procedimiento de activación y regeneración para las mismas. Se aplicaron principios matemáticos utilizando ecuaciones e información proporcionada por los proveedores para dimensionar los cartuchos de intercambio iónico, además de elaborar el diagrama de flujo del proceso (PFD). Finalmente, se procedió al montaje de la planta de tratamiento de agua.

3.3. Etapa 3

En la etapa final, se establecieron los protocolos operativos para el arranque y la parada de la planta de tratamiento de agua desionizada. Para ello, se formularon una serie de pasos que deben llevar a cabo los técnicos de producción con el objetivo de asegurar que el sistema funcione correctamente, logrando los valores de conductividad requeridos y evitando daños en las resinas de intercambio iónico antes de que completen su ciclo de trabajo. Seguidamente, se elaboró un procedimiento para medir variables como la conductividad, el pH y la cantidad de cloro residual, con el fin de identificar el momento preciso para regenerar las resinas de intercambio iónico o

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

cambiar algún prefiltro en la planta de tratamiento. Finalmente, se encendió la planta de tratamiento y se realizó un muestreo para validar el funcionamiento del sistema.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del diagnóstico de la planta para cada una de las variables principales de proceso.

4.1. Análisis del pH y la temperatura.

Al realizar el diagnóstico se identificó dificultad de mantener la concentración de sulfato de níquel en el rango de operación fijado por FES, generando un gasto excesivo de la solución de sulfato de níquel y aumentando el riesgo de precipitación con amoníaco. Este problema se originó gracias a dos errores fundamentales: en primer lugar, la escasez de agua desionizada en el proceso implica el niquelado de las paredes del tanque de polipropileno y de la bomba de recirculación, debido a la presencia de agentes externos; y segundo, la falta de conocimiento por parte de los técnicos al realizar la titulación propiciaba errores críticos en la toma de muestras, afectando directamente los cálculos de la cantidad de solución que se debía agregar al tanque de niquelado y generando valores falsos de concentración, por debajo a la concentración real a la que se encontraba en el tanque, saturando el tanque de sulfato de níquel al subir los valores de la concentración muy por encima a los permitidos.

Para determinar valores más adecuados de pH, se llevaron a cabo dos ensayos operativos. En el primer ensayo se inició el tanque con un pH de 5.5 y se permitió que el valor disminuyera a 5.2 durante las primeras 5 horas de operación, manteniéndolo constante durante el resto del proceso. En el segundo ensayo se inició el tanque de níquel con un pH de 5.5 y se permitió que el valor disminuyera gradualmente a lo largo de la operación, hasta alcanzar 4.6.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Del primer ensayo se concluye que, al reducir el pH en el tanque, se prolongó la vida útil del mismo durante 10 horas. Sin embargo, después de este período se observó la formación de un precipitado de sulfato de níquel, lo que llevó a detener el proceso de inmediato. Esto afectó negativamente a las piezas que estaban en proceso y no cumplían con los estándares de calidad requeridos. Durante el segundo ensayo, se observó la precipitación del sulfato de níquel en el tanque al finalizar la operación, sin que esto afectara la calidad del recubrimiento de las piezas en proceso. Sin embargo, se registró una disminución en la velocidad de deposición, lo que se tradujo en una reducción de espesor en el recubrimiento de entre 5-10 micras según las muestras tomadas. Este fenómeno resultó en un incremento del tiempo de operación en el baño de niquelado químico. Además, se determinó que mantener niveles de pH elevados era la causa principal de la precipitación de sulfato de níquel, un inconveniente recurrente en la planta de producción.

Simultáneamente se estableció que la temperatura máxima de operación para el tanque de níquel es de 90°C. En el ensayo de operación para la temperatura se obtuvieron los resultados de medición del espesor del recubrimiento (Tabla 2). Estos datos fueron empleados para redefinir el rango de operación, asegurando que la velocidad de deposición sea de 45 micras en un tiempo de 5 horas. Este ajuste en la temperatura se presentó como una medida efectiva para contrarrestar los efectos adversos derivados de las modificaciones en los valores de pH, contribuyendo así a la mejora del proceso de niquelado químico en FES. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de operación número 2, donde se evidencia el ajuste en los valores de pH y temperatura que cumplen con el tiempo de operación por cada tanda de herramienta niquelada.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Tabla 2

Ensayo de operación con ajustes en el tiempo del nuevo rango de temperatura y pH.

# de operación	Tiempo [h]	pH	Temperatura [°C]	Testigo [μ]	# de operación	Tiempo [h]	pH	Temperatura [°C]	Testigo [μ]
1	1	5,5	80	10	8	1	4,9	84	10
	2	5,5	80	20		2	4,9	84	20
	3	5,5	80	30		3	4,9	84	30
	4	5,5	80	40		4	4,9	84	40
	5	5,5	80	50		5	4,6	84	50
2	1	5,2	82	10	9	1	4,6	84	10
	2	5,2	82	20		2	4,6	87	20
	3	5,2	82	30		3	4,6	87	30
	4	5,2	82	40		4	4,6	87	40
	5	5,2	82	50		5	4,6	87	50
3	1	5,2	82	8	10	1	4,6	87	10
	2	5,2	84	17		2	4,6	87	20
	3	5,2	84	30		3	4,6	87	30
	4	5,2	84	40		4	4,6	87	40
	5	5,2	84	50		5	4,6	87	50
4	1	5,2	84	10	11	1	4,6	87	10
	2	5,2	84	20		2	4,6	87	20
	3	4,9	84	30		3	4,6	87	30
	4	4,9	84	40		4	4,6	87	40
	5	4,9	84	50		5	4,6	87	50
5	1	4,9	84	10	12	1	4,6	87	9
	2	4,9	84	20		2	4,6	87	18
	3	4,9	84	30		3	4,6	87	27
	4	4,9	84	40		4	4,6	89	38
	5	4,9	84	50		5	4,6	89	50
6	1	4,9	84	10	13	1	4,6	89	5
	2	4,9	84	20		2	4,6	89	15
	3	4,9	84	30		3	4,6	89	25
	4	4,9	84	40		4	4,6	89	35
	5	4,9	84	50		5	4,6	89	45
7	1	4,9	84	10	14	1	4,6	90	5
	2	4,9	84	20		2	4,6	90	15
	3	4,9	84	30		3	4,6	90	25
	4	4,9	84	40		4	4,6	90	35
	5	4,9	84	50		5	4,6	90	45

4.2. Análisis de la concentración de sulfato de níquel e hipofosfito de sodio.

Al evaluar cada uno de los ensayos, se determinó que la concentración podría manejarse de manera eficiente en un rango entre 4.6 y 5.2 g/l. Este nuevo rango de operación redujo el consumo de sulfato de níquel en un 29 % por cada tanque de niquelado químico. Además, disminuyó las posibilidades de obtener precipitación por sulfato de níquel, lo que resultó en una mejora de la eficiencia global del proceso de niquelado químico en un 95 %. Este valor se deriva de la evaluación de los objetivos establecidos por FES para el niquelado de un área específica de herramientas, considerando los costos y el consumo de la solución. Los resultados se comparan con los obtenidos al implementar los nuevos rangos de operación alcanzados después del diagnóstico. En la Tabla 3 se presentan los datos de cada uno de los ensayos realizados respecto al número de tandas procesadas, el tiempo de operación, el área de las piezas niqueladas, el consumo de sulfato de níquel y el gasto de sulfato de níquel con relación al área niquelada. A partir de los resultados de cada variable medida se determinó el nuevo rango de operación que favorece las necesidades de FES.

Tabla 3

Ensayos de operación para obtener el rango de operación para la concentración de sulfato de níquel.

# Ensayo	Rango de concentración sulfato de níquel [g/L]	# De tandas procesadas	Tiempo de operación [h]	Área niquelada [dm ²]	Consumo de sulfato de níquel [L]	Gasto de sulfato de níquel [L] por dm ² de área niquelada
1	5,2 - 5,5	8	56	7004,5	299	0,0427
2	4,9 - 5,5	9	62	10329,1	339	0,0328
3	4,9 - 5,2	12	78	12432,25	358	0,0288
4	4,6 - 5,2	14	84	12872,14	496	0,0385
5	4,1 - 4,9	14	96	12923,14	532	0,0412

4.3. Análisis de la concentración de hipofosfito de sodio.

Se determinó que concentraciones de hipofosfito de sodio menores a 30 g/L favorecían la producción de orto-fosfito, lo cual fue evidenciado después de realizar titulaciones a cada uno de los compuestos durante las primeras 5 horas de la operación. Por lo tanto, se estableció un rango de operación considerando que, a partir de una concentración de 36-40 g/l de hipofosfito de sodio, la producción de orto-fosfito se mantiene en un rango de 0-5 g/l por hora. Además, se observó que, al ampliar el rango de operación para la concentración de hipofosfito de sodio, se reducen las probabilidades de precipitación de orto-fosfito. Estos valores también resultaron en una reducción del gasto de solución en un 26 % y aseguraron que los valores de fósforo en el recubrimiento superaran el 11 % m/m, obteniendo así las propiedades anticorrosivas deseadas. En la Tabla 4 se presentan los nuevos rangos de operación para las concentraciones de sulfato de níquel, hipofosfito de sodio, temperatura y pH. Estos nuevos rangos de operación han resultado en una disminución del consumo de reactivos principales, un aumento en el área de las herramientas niqueladas, una reducción de las posibilidades de precipitación por sulfato de níquel y orto-fosfito durante el tiempo de operación del tanque de niquelado, y finalmente, han asegurado una velocidad de deposición de 45 μ /h.

Por otra parte, se evidenció una fuerte correlación entre el hipofosfito de sodio y el envenenamiento por orto-fosfito, el cual causa la precipitación de contaminantes. Esta relación se basa en que el orto-fosfito es un subproducto del hipofosfito de sodio. Se llegó a la conclusión de que los valores previamente establecidos por FES no eran los más adecuados, ya que contribuían significativamente a la producción de orto-fosfito. Se observó que concentraciones de hipofosfito

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

de sodio inferiores a 30 g/l iniciaban el envenenamiento por orto-fosfito, y cuando alcanzaban los 20 g/l, ya era demasiado tarde para recuperar el baño de níquel.

Tabla 4

Nuevas condiciones de operación para el tanque de niquelado químico.

Variables de operación	Ud de medida	LCI	LCS
pH	No aplica	4,1	5,5
Temperatura	°C	80	90
Concentración de Sulfato de níquel	g/L	4,9	5,2
Concentración de hipofosfito de sodio	g/L	36	40

A continuación, se muestra la tabla con las condiciones de operación del proceso de niquelado químico, presentados por FES. En la Tabla 5 se presentan los límites de carga superior (LCS) e inferior (LCI) para las variables de operación que deben ser controladas durante el funcionamiento del tanque de niquelado químico.

Tabla 5

Condiciones de operación tanque de niquelado químico suministrada por FES.

Variable de operación	Unidad de medida	(LCI)	(LCS)
pH	No aplica	5,2	5,5
Temperatura	°C	80	85
Concentración de Sulfato de níquel	g/L	4,9	5,5
Concentración de hipofosfito de sodio	g/L	32	40

4.4. Análisis y montaje de la planta de tratamiento para la obtención de agua desionizada.

Se encontró en el diagnóstico de la planta que las nuevas condiciones de operación lograban su cometido únicamente cuando el tanque de niquelado químico trabajaba con agua desionizada. Por lo tanto, se tomó la decisión de realizar mediciones de variables como la conductividad del agua, el pH, la concentración total de sólidos disueltos en el agua y los valores de cloro residual. El objetivo era verificar que la planta de tratamiento de agua utilizada en FES cumpliera con la demanda de agua desionizada necesaria para el proceso de niquelado químico.

Figura 2

Manchas en la herramienta por falta de agua desionizada en el lavado.



Al realizar las mediciones de conductividad, se observó que estos valores oscilaban en un rango de 600-900 $\mu\text{s}/\text{cm}$, lo que reveló que el agua utilizada en el proceso no cumplía con los

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

estándares requeridos. Así mismo, al verificar la información proporcionada por FES, se encontró que la falta de agua desionizada causó problemas en el recubrimiento de níquel, manifestándose en manchas en la herramienta al salir del proceso y ser llevadas al lavado (Figura 2).

Figura 3

Tanque de polipropileno con las paredes niqueladas.



Por otro lado, el baño de niquelado químico se vio afectado por las impurezas, lo que redujo drásticamente su vida útil y afectó el proceso de limpieza posterior al niquelado, ya que la falta de agua desionizada permitió que las paredes del tanque de polipropileno se cubrieran con una capa de níquel (Figura 3). Para eliminar esta capa de níquel se requiere ácido nítrico, lo que genera una reacción exotérmica y libera vapores de óxidos de nitrógeno, contaminando el medio ambiente y creando una condición insegura para los operarios. Adicionalmente, se encontraron problemas en el laboratorio del proceso, ya que la preparación de los reactivos empleados en las titulaciones se

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

realizaba con agua del grifo, lo que afecta directamente los valores de concentración obtenidos por las posibles impurezas presentes en el agua.

Al determinar que las resinas de intercambio iónico no estaban proporcionando los valores de conductividad requeridos, se optó por llevar a cabo dos ensayos de funcionamiento utilizando dos tipos diferentes de resina: una de lecho mixto y otra de intercambio iónico catiónica y aniónica. El objetivo era evaluar la opción que mejor se ajustara a las necesidades del proceso de niquelado. Estas pruebas consistieron en implementar las resinas de intercambio iónico y valorar los resultados de cada una por separado, fijando una capacidad de 1000 a 1500 litros de agua desionizada por semana.

Como resultado de las pruebas, se determinó que el cartucho de resina de lecho mixto no fue favorable, ya que sólo proporcionó 200 litros de agua por semana antes de requerir un cambio de resinas. Esta cantidad resultó insuficiente para cumplir con la producción semanal de agua necesaria (1000 L) para el funcionamiento de la planta. Además, el alto consumo de resina mixta, que no puede ser reutilizada, generó un costo significativo. Por consiguiente, se tomó la decisión de cambiar los cartuchos por resinas catiónicas y aniónicas, las cuales pueden ser regeneradas, mejorando así el proceso y reduciendo los costos asociados. De igual forma, se optó por instalar un sistema de tratamiento de agua que incluye 4 filtros: dos filtros de carbón activado para eliminar compuestos orgánicos y reducir la concentración de cloro residual a menos de 1 mg/L, un filtro de sedimentos de polipropileno de 10 micras, otro filtro de carbón activado de 5 micras, y finalmente, cartuchos de resina catiónica y aniónica.

Teniendo en cuenta el sistema de filtros que cumple con las exigencias de FES, se decidió establecer tres baterías de cartuchos para resina aniónica y catiónica con capacidad para procesar

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

entre 7 y 13 litros de agua por hora. Dos de estas baterías están diseñadas para operar de manera simultánea y suministrar agua a dos tanques de proceso. La tercera batería es necesaria para disponer del tiempo suficiente al momento de reactivar las resinas sin afectar la producción. Para garantizar que el caudal de agua se mantenga en el rango establecido, se incorporaron válvulas de aguja antes del sistema de resinas. Además, se instalaron válvulas de PVC para realizar el muestreo de agua y medir valores de conductividad, sólidos disueltos, cloro residual y pH en el sistema. Estas válvulas también se emplean para purgar el sistema de aire y así evitar mediciones incorrectas de conductividad.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de conductividad, pH, TDS (sólidos totales disueltos) y cloro libre en muestras de agua recolectadas del sistema de suministro de la empresa durante el primer día de muestreo. Esto se realizó con el fin de evaluar las condiciones del agua suministrada a FES y determinar las tecnologías necesarias en la planta de tratamiento.

Tabla 6

Resultados de conductividad, pH, TDS y cloro libre en el agua.

# Muestra	Tiempo [h]	Conductividad [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	TDS [ppm]	pH	Cloro libre [mg/L]
1	1	800	400	7	5
2	2	900	450	7	4
3	3	1000	500	7	6
4	4	900	450	7	6
5	5	900	450	7	7
6	6	800	400	7	5
7	7	800	400	7	5

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Por un lado, los valores de cloro superiores a 1 mg/L afectan el rendimiento de la resina de intercambio aniónico, disminuyendo drásticamente su tiempo de operación. De igual manera, las mediciones de TDS y conductividad indican la presencia de iones como magnesio, hierro, calcio, entre otros, lo que incrementa la carga de trabajo de la resina y, a su vez, reduce su rendimiento y vida útil. Debido a esta situación, se decidió instalar dos cartuchos con carbón activado. Para asegurar que la concentración de cloro fuera menor a 1 mg/L, se tomaron muestras a medida que se añadía carbón activado a los cartuchos, comparando los valores obtenidos del suministro de agua en la empresa. Posteriormente, se tomó muestra a la salida de los filtros con el fin de asegurar que los niveles de cloro residual se encontraran en un rango de 0-1 mg/L. La decisión de implementar dos cartuchos se tomó para garantizar el reemplazo de alguno de ellos (en caso de falla) sin necesidad de detener la operación.

Figura 4

Filtro de sedimentos con capacidad de retención de 10 micras.



Por otra parte, se instalaron dos cartuchos de sedimentos en el sistema de tratamiento de agua, uno con capacidad de retención de 10 micras (Figura 4) seguido de otro con capacidad de

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

retención de 5 micras. El objetivo del cartucho de 10 micras era realizar una filtración parcial de las impurezas presentes en el agua, garantizando la reducción de sedimentos y así mejorar la efectividad del cartucho de 5 micras (Figura 5), prolongando su vida útil y asegurando una salida de agua con la menor cantidad de sedimentos posible. Estos cartuchos fueron proporcionados por el proveedor.

Figura 5

Filtro de sedimentos con capacidad de retención de 5 micras.



Finalmente, se ajustaron los parámetros según la Tabla 7 proporcionada por FES para determinar las dimensiones de las baterías y el volumen de resina catiónica y aniónica. Como resultado, las dimensiones de las baterías fueron de 2 pies de altura y 4 pulgadas de diámetro, cumpliendo con las especificaciones del modelo D-05 mostradas en la Tabla 7, el cual tiene volúmenes de 5 y 4 litros de resina aniónica y catiónica, respectivamente. Los cartuchos se ensamblaron en PVC para asegurar el caudal requerido para su operación, suministrado por el proveedor. Además, se implementaron válvulas de bola del mismo material en el resto del sistema para eliminar el aire de la planta de tratamiento y evitar mediciones incorrectas de conductividad.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Tabla 7

Especificaciones técnicas suministrados por FES para el dimensionamiento y volumen de resinas de intercambio iónico.

Modelo	Flujo de operación [L/h]	Dimensiones del sistema de resinas [cm]	Volumen de resina Aniónica [L]	Volumen de resina Catiónica [L]
D-0,5	7 - 13	82 x 22 x 10	5	4
D-1	20 - 35	82 x 30 x 13	6	5

Por otro lado, se implementaron tres sistemas para la recolección de agua desionizada en el mismo sistema, con la capacidad de operar de manera independiente. Estas decisiones se tomaron siguiendo los requerimientos y directrices establecidos por FES, basados en la experiencia acumulada durante años de operación de la planta de niquelado, así como en las directrices orientadas al uso de tecnologías por parte del tutor designado por la empresa.

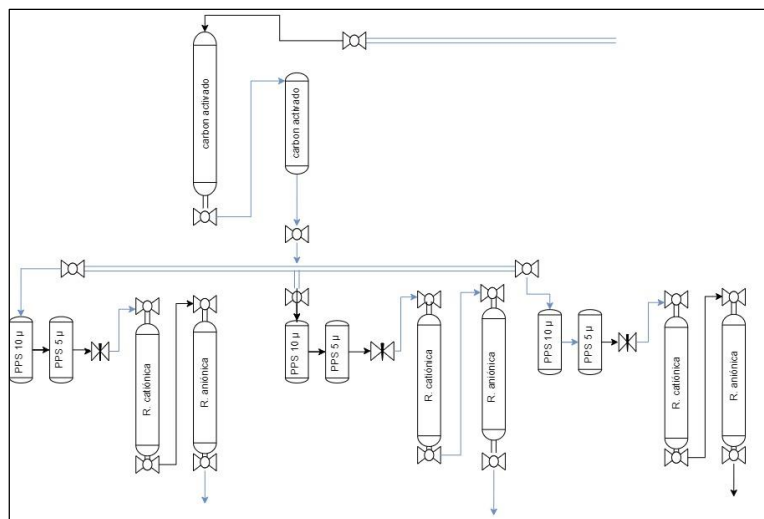
La Figura 6 muestra el diagrama PFD de la planta de tratamiento de agua, que incluye dos filtros de carbón activado conectados al suministro de agua de FES. Estos filtros reducen la concentración de cloro libre en un rango de 0-1 mg/L, como se mencionó anteriormente. La salida de los filtros está conectada a un tubo que distribuye el agua en tres sistemas diferentes mediante válvulas de bola. En primer lugar, el agua pasa por un prefiltro de sedimentos de 10 micras, que realiza una remoción parcial de impurezas, antes de pasar al filtro de sedimentos de 5 micras, que completa el proceso de limpieza del agua. Luego, el agua atraviesa una válvula de aguja para ajustar el caudal según el modelo D-05 de la Tabla 7 y finalmente llega a las baterías de resina de intercambio iónico. Es importante destacar que las baterías de resina de intercambio iónico cuentan

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

con válvulas de bola tanto en la entrada como en la salida del sistema para realizar una purga y evitar la presencia de aire en el sistema.

Figura 6

Diagrama PFD de la planta de tratamiento de agua.



A continuación, se presenta el proceso para obtener agua desionizada en FES, así como la estructura para la activación y regeneración de las resinas. En la Figura 7 se muestra el montaje de la planta de tratamiento en las instalaciones de la empresa; además, en la Figura 8 se observa el IBC implementado para almacenar el agua que se procesa semanalmente. Asimismo, en la Figura 9 se evidencia la estructura diseñada para regenerar las resinas de intercambio iónico con mayor facilidad, sin necesidad de extraerlas de su respectivo cartucho. Estas estructuras también permiten recolectar el efluente de reactivos como ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, que se utilizan para activar la resina catiónica y aniónica, respectivamente. Estos efluentes se neutralizan y se desechan de manera adecuada. Por último, esta estructura tiene como objetivo conectar sondas que permitan reducir el caudal de los reactivos, cumpliendo con las condiciones de flujo necesarias para llevar a cabo este procedimiento.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Figura 7

Planta de tratamiento lista para su funcionamiento en la empresa Field Service Solution.



Figura 8

Tanques de almacenamiento de agua desionizada.



Figura 9

Estructura empleada para regenerar las resinas de intercambio iónico.



Finalmente, al poner en marcha el sistema de tratamiento de agua en la planta de niquelado químico, se observó una reducción del 75% en el uso de ácido nítrico. Esto se debe a que las paredes del tanque de proceso dejaron de presentar recubrimiento de níquel en su mayor parte, como se puede apreciar en la Figura 10. De igual forma, al implementar agua desionizada para el lavado de la herramienta al final, se observó la eliminación de las manchas en la herramienta niquelada como se evidencia en la Figura 11.

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Figura 10

Tanque de níquel después de implementar la planta de agua desionizada.



Figura 11

Herramienta niquelada después de lavado con agua desionizada.



DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Por último, se lograron superar los problemas con la bomba de recirculación al emplear agua desionizada. La bomba dejó de presentar problemas de niquelado, como se muestra en la Figura 12, y funcionó de manera correcta hasta terminar el proceso (Figura 13).

Figura 12

Bomba de recirculación con fallas a causa de la falta de agua desionizada, presentado niquelado en sus componentes.



Figura 13

Bomba de recirculación al terminar el baño de niquelado químico luego de la implementación de la planta de agua desionizada.



5. Conclusiones

Basándose en los ensayos de operación, se determinó que lo más efectivo para evitar la precipitación de sulfato de níquel era operar en un rango de pH entre 4.6 y 5.5, realizando mediciones cada hora y ajustando con mayor precisión el caudal de la bomba dosificadora. Por otra parte, los nuevos rangos de operación para las variables principales funcionan correctamente siempre que el proceso se realice con agua desionizada. Con la ejecución del diagnóstico de la planta de producción de niquelado químico se logró definir un rango de operación para las concentraciones de los reactivos principales, la temperatura y el pH, prolongando la vida útil del baño hasta en un día de operación y obteniendo una mayor cantidad de piezas niqueladas. Además, se evitaron problemas como precipitación por sulfato de níquel o envenenamiento por orto-fosfito.

La estrategia implementada para medir parámetros y variables necesarias para el diseño de la planta de tratamiento de agua permitió realizar el montaje del sistema desionizador, logrando obtener la cantidad de agua necesaria para operar sin tener que parar la producción. Por otra parte, con el proceso implementado se logró suficiente tiempo para regenerar (reactivar) las resinas de intercambio iónico. El montaje final del sistema de tratamiento de agua consiste en dos filtros de carbón activado, seguidos por dos filtros de retención de sedimentos de 10 y 5 micras, antes de llegar a las resinas de intercambio iónico catiónica y aniónica.

Con la puesta en marcha de la planta de tratamiento de agua, FES obtuvo menor consumo de reactivos principales, reducción de ácido nítrico para limpiar el tanque de níquel químico y cero daños en la bomba de recirculación por niquelado. Además, la implementación de agua desionizada en el laboratorio de proceso permitió un mejor análisis de las concentraciones de los reactivos principales, además de no observar manchas en las piezas niqueladas.

6. Recomendaciones

Se sugiere al personal FES, encargado de realizar el proceso de niquelado químico, seguir los parámetros de operación designados para seguir obteniendo los resultados deseados, y tener un control absoluto de la planta de tratamiento de agua para evitar problemas por la escasez de agua desionizada. Así mismo, se sugiere tomar muestras de agua para asegurar que el funcionamiento de la planta se lleve a cabo de forma idónea, tal como se dejó plasmado en el documento de arranque y parada entregado a la empresa.

Referencias bibliográficas

- Brenner, A. (1963). *Electrodeposition of Alloys Principles and Practice* (1a ed., Vol. 1).
- Free, Michael. (2013). *Hydrometallurgy : fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Gomes, N., González-Estrada, O. A., & Pertuz, A. (2019). Electroless Nickel Phosphorous: una visión global. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 173–192.
<https://doi.org/10.18273/REVUIN.V18N4-2019016>
- Landolt, D. (2007). *Corrosion and Surface Chemistry of Metals* (1a ed., Vol. 1). EPFL Press.
- Lowenheim, F. A. (1974). *Modern electroplating*. John Wiley and Sons.
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=264425>
- Paunovic, M., & Schlesinger, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition, 2nd Edition* / Wiley. <https://www.wiley.com/en-br/Fundamentals+of+Electrochemical+Deposition%2C+2nd+Edition-p-9780471712213>
- Pérez, M. (2018). *Desarrollo de un sistema de purificación de agua mediante resinas de intercambio iónico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Porcayo Calderón, J., & Sarmiento Bustos, E. (1995). *Caracterización de recubrimientos Ni-P depositados por reducción química autocatalítica en superficies internas*.
<http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>

DIMENSIONAMIENTO Y MONTAJE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Sharma, S., Singh, S., Sarma, S. J., Misra, K., & Brar, S. K. (2021). Arsenic removal technologies: Field applications and sustainability. *Handbook of Water Purity and Quality*, 271–292. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821057-4.00002-1>

Sun, R., Yu, G., Xie, Z., Hu, B., Zhang, J., He, X., & Zhang, X. (2015). Influence of Hypophosphite on Efficiency and Coating Qualities of Electroless Ni-P Deposits on Magnesium Alloy AZ91D. En *Int. J. Electrochem. Sci* (Vol. 10). www.electrochemsci.org