



**EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN
TANQUE DE FUNDENTE EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN CALIENTE
EN LA COMPAÑÍA GALCO S.A.S.**

Santiago Carvajal Zapata

Ingeniería Química

Asesor

Farlán Taborda Agudelo, Ph.D

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia

2022

Cita	(Carvajal Zapata, 2022)
Referencia	Carvajal Zapata, S. (2022). <i>Evaluación de la implementación de un sistema de control en tanque de fundente en el proceso de galvanizado en caliente en la compañía Galco S.A.S.</i> [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



GALCO S.A.S - Área de galvanizado



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres por su apoyo incondicional; a mis compañeros por su amistad y momentos compartidos. A los ingenieros Miguel Tavera y Yuliana Gómez por su gran calidez humana y aportes de conocimiento. A todos los asesores y docentes del departamento de Ingeniería Química por su paciencia y orientación durante este ciclo. A Galco S.A.S por permitirme realizar las prácticas en sus instalaciones, principalmente al área de galvanizado y todos sus empleados. Y finalmente a la Universidad de Antioquia, por la formación profesional y humana durante todos estos años.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
1 Objetivos	10
1.1 Objetivo general	10
1.2 Objetivos específicos	10
2 Marco teórico	11
3 Metodología	14
4 Discusión de resultados	16
5 Conclusiones	20
Referencias	22

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados de las valoraciones volumétricas y de las mediciones de las propiedades físicas en tanque de fundente	16
Tabla 2 Comparación de los diferentes sistemas que se pueden implementar	19

Lista de figuras

Figura 1	Proceso de galvanización	11
Figura 2	Lazo de control para la variable pH en tanque fundente	18

Resumen

Con el objetivo de reducir los costos en el proceso de galvanizado en caliente de la empresa Galco S.A.S, se identifica en el tanque de fundente para preparación superficial del material, una potencial mejora. Para esto, se evaluó la implementación de un sistema de control en este tanque mediante la búsqueda de información referente a la solución fundente y la identificación de las variables más críticas del proceso. Para ello, se realizaron diferentes análisis volumétricos (medición de iones cloruro, medición de zinc, concentración de hierro) y diferentes medidas de variables como el pH, la temperatura, el nivel y la densidad. Como resultado se obtuvo un lazo de control para la variable más crítica que en este caso fue el pH, analizando los diferentes tipos de control que se podrían implementar e identificando además un rango óptimo de operación para el pH de 4 - 4,5 empleando amoníaco como agente regulador de esta variable; garantizando así una buena activación del material y una formación de subproductos mínima.

Palabras clave: Control, fundente, galvanizado, pH, variables de proceso, zinc.

Abstract

In order to reduce costs in the hot-dip galvanizing process of the company Galco S.A.S, a potential improvement is identified in the flux tank for surface preparation of the material. For this, the implementation of a control system in this tank was evaluated by searching for information regarding the flux solution and identifying the most critical variables of the process. In consequence, different volumetric analyzes were carried out (measurement of chloride ions, zinc measurement, iron concentration) and different measurements of variables such as pH, temperature, level, and density. As a result, a control loop was obtained for the most critical variable, which in this case was the pH, analyzing the different types of control that could be implemented and identifying an optimal operating range for the pH of 4 - 4.5 using ammonia as a regulatory agent of this variable; thus, ensuring a good activation of the material and a minimum formation of byproducts.

Keywords: Control, flux, galvanizing, pH, process variables, zinc.

Introducción

Galco S.A.S es una empresa colombiana especializada en la fabricación de sistemas de conducción eléctrica, postes y otros elementos metalmecánicos, en la prestación de servicio de galvanizado en caliente y comercialización de otros productos metalmecánicos relacionados para los diferentes sectores industriales, comerciales y residenciales. En el área de galvanizado en caliente se realiza la protección contra la corrosión de una gran variedad de productos de hierro y acero, esto se logra mediante la inmersión de los materiales en un baño de Zinc fundido a una temperatura de 450°C, a esta temperatura, se permite un recubrimiento que no solo se deposita sobre la superficie, sino que forma una aleación entre el zinc y el hierro de gran resistencia a los distintos agentes de corrosión como la atmósfera, el agua o el suelo. Este proceso se lleva a cabo teniendo en cuenta los procedimientos establecidos por las normas internacionales: ASTM A-123 y ASTM A-153/NTC 2076 (Galco S.A.S., 2014).

Una de las etapas más críticas del proceso es la preparación superficial del material, previo a la inmersión en el baño de zinc, específicamente el tanque de fundente, para ello diariamente deben tomarse muestras de la solución del tanque para evaluar sus propiedades fisicoquímicas tales como concentración de hierro y cloruro de zinc, nivel, densidad, pH, temperatura y relación de sales.

En este sentido se pretende evaluar la implementación de un sistema de control en el tanque de fundente de preparación superficial del material, mediante la identificación de las variables críticas del proceso y el análisis del desempeño técnico y económico de dicha implementación, con el fin de aumentar la productividad, reducir los costos relacionados con la cantidad de zinc utilizado y la formación de subproductos.

Para ello, a partir de la semana 8 se realizaron valoraciones volumétricas y mediciones físicas las cuales fueron evaluadas considerando aspectos relacionados con costos de operación y procurando el mejoramiento continuo del proceso.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la implementación de un sistema de control en tanque de fundente en el proceso de galvanizado en caliente en la compañía Galco S.A.S. basado en las necesidades actuales del proceso.

1.2 Objetivos específicos

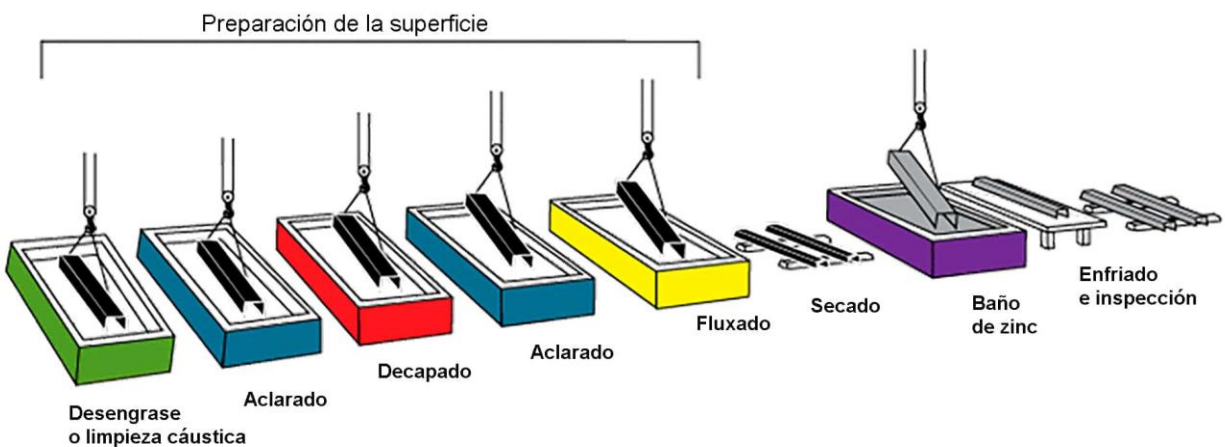
- Realizar el monitoreo de las variables de proceso que permiten el recubrimiento de acuerdo con los estándares de calidad requeridos por las normas internacionales ASTM A-123 y ASTM A-153/NTC 2076.
- Identificar las variables críticas del proceso y la manera como se están controlando actualmente.
- Identificar los diferentes tipos de control que se podrían adecuar al proceso de acuerdo con las variables seleccionadas.
- Analizar la factibilidad técnica y económica de la implementación del sistema de control.

2 Marco teórico

El proceso de galvanizado en caliente consta de 3 pasos principales: preparación de la superficie, galvanizado y acabado (**Figura 1**). Dentro de la preparación de la superficie se encuentran las etapas de desengrase, decapado, aclarado o enjuague y fluxado (fundente). Es sabido que el pretratamiento es clave para el éxito de prácticamente todas las operaciones de acabado de metales. En el galvanizado en caliente, la operación de fundente es un paso particularmente crítico que afecta directamente la calidad y uniformidad de la adhesión del zinc al acero, así como la cantidad de zinc utilizada (Cook, 2003).

Figura 1

Proceso de galvanización



Nota. Fuente (*Mecanizado Industrial de Tubo En Barcelona*, n.d.)

El principal objetivo de esta etapa es facilitar la adherencia del zinc a la superficie del material (hierro o acero) y así prevenir que se formen otros óxidos en la superficie del metal antes de ser galvanizado. Para esto es necesario aplicar un baño de sales (cloruro de zinc y cloruro de amonio) (ANDI, 2017).

Una solución de fundente efectiva debe probarse y ajustarse periódicamente para lograr los resultados de galvanizado requeridos. Entre las medidas de resultados más importantes se encuentra el porcentaje de uso bruto de zinc (%GZU) (Cook, 2003). Se calcula:

$$\%GZU = (\text{zinc usado} / \text{acero galvanizado}) \times 100\%$$

También se tiene la medida del Número de Cloruro de Amonio (ACN), la cual es una relación matemática que equivale a la concentración de cloruro de amonio dividida por la concentración de todos los demás componentes en la solución de fundente. Se calcula de la siguiente manera:

$$ACN = \%Cloruro\ de\ Amonio / \%Cloruro\ de\ Zinc$$

Los fundentes con ACN inferiores a 1 no se secan bien y acumulan humedad del aire. Estos fundentes provocan explosiones de humedad cuando el acero entra en el zinc fundido (los rastros de agua que permanecen en la superficie del acero provocan explosiones cuando, al calentarse, vaporizan muy rápidamente). Estas explosiones son la causa de varios inconvenientes: derrame de zinc fundido en todas las direcciones alrededor del tanque; derroche de material; pérdida de tiempo dedicado al mantenimiento constante de la limpieza; peligro para los operadores. Los fundentes con ACN superiores a aproximadamente 2 son térmicamente inestables y producen fuertes explosiones químicas debido a la alta concentración de NH_4Cl provocando además mayor generación de humos cuando se sumergen en el zinc fundido. En cualquier caso, cuando se presenta un ACN inferior a 1 o superior a 2, la entrada lenta requerida en el zinc fundido provoca un menor índice de producción y recubrimientos de zinc más gruesos en las partes inferiores del producto de acero (Cook, 2003).

De no lograrse las condiciones requeridas en el tanque de fundente pueden obtenerse cantidades indeseadas de subproductos como:

Dross: Resultante tras la contaminación de la solución fundente y del baño de zinc fundido con pequeños arrastres de hierro desde las etapas previas de la preparación de superficie (Galco S.A.S., 2018).

Cenizas: Subproducto resultante en el proceso de galvanizado tras el proceso de oxidación de la capa superficial del zinc contenido la cuba de galvanizado.

Humo de galvanizado: Durante el galvanizado el baño desprende emisiones que normalmente consisten en materiales sólidas y de gases. La cantidad de emisión depende principalmente de la concentración y tipo de sales en el baño de flux, es decir si hay altas concentraciones de Amonio en la tina de flux, la formación de humo de galvanizado se elevará (Saavedra, 2017).

El contenido del dross es aproximadamente de 96% de zinc y 4% de hierro. Los cristales de dross se hunden hasta el fondo de la cuba de zinc y deben ser removidos periódicamente. Debido al alto contenido de zinc en el dross, su desarrollo representa un gran costo para la empresa, y éste debería ser minimizado. El dross se produce de las siguientes fuentes:

- Sales de hierro, formadas en la solución de decapado y/o en el tanque del fundente, y luego son acarreadas por las piezas hacia el tanque de galvanizado, donde reaccionan con el zinc y con el fundente de superficie, formando el dross.
- Reacción fundente-acero. La reacción entre la capa de fundente y el acero, que está siendo galvanizado, produce sales de hierro, las cuales forman dross. La cantidad de dross de esta fuente se incrementa con: la temperatura del fundente; el tiempo de contacto entre el fundente y el acero, y la actividad en la capa del fundente (contenido de cloruro de amonio) (Gutiérrez, 2003).

Para esto es importante prever una correcta preparación del material antes de la inmersión en el horno de galvanizado, para una adecuada adherencia del zinc, una apropiada emanación de gases, correcta formación de dross y una conveniente formación de ceniza. Cabe mencionar que la formación es inevitable pero el buen control en el proceso permite disminuir en lo posible la formación de estos, por ende, la disminución del consumo de zinc en estos subproductos (Saavedra, 2017).

3 Metodología

1. *Búsqueda de información referente a la solución fundente en el proceso de galvanizado en caliente.*

Se investigó acerca de la solución que conforma el tanque de fundente, así como las variables que afectan el correcto desempeño de dicha solución; esto a través de páginas web y documentos proporcionados por la compañía.

2. *Identificación y seguimiento de las variables críticas del proceso que se van a controlar*

Se realizó seguimiento a los procesos en planta con el fin de identificar los rangos de operación de las variables para los cuales la calidad y seguridad en el proceso no se vean afectados, buscando además definir un estado óptimo para el cual se vean reducidos los costos de operación. Para ello se contó con insumos y equipos empleados en los diferentes análisis volumétricos (medición de iones cloruro, medición de zinc) y en las diferentes medidas de variables como el pH y la densidad.

3. *Análisis tecnoeconómico de la implementación del sistema de control*

Se analizó el desempeño técnico y económico, describiendo los requisitos de operación y funcionamiento de los dispositivos que conformarán el sistema de control. Se realizó utilizando un modelo tecnoeconómico, el cual es un modelo integrado de procesos y costes, donde se combinan elementos de diseño de procesos, caracterización del sistema, identificación de equipos, estimación de costos de capital y estimación de costos operativos.

Para determinar los elementos se utilizaron cuadros comparativos, permitiendo identificar las semejanzas, diferencias y beneficios.

4. *Reporte de actividades desarrolladas y de resultados de pruebas*

De acuerdo con la información recolectada, se realizaron diferentes cálculos, los cuales permitieron identificar el comportamiento de la solución en el tanque de fundente y a partir de estos

resultados se evaluaron las diferentes alternativas que condujeron a la evaluación de la rentabilidad del proceso.

4 Discusión de resultados

El primer objetivo que se pretendió alcanzar en el desarrollo de la práctica fue mostrar como las variables del proceso deberían monitorearse para alcanzar las especificaciones requeridas del proceso de galvanizado en caliente. Para ello, a partir de la semana 8 se realizaron valoraciones volumétricas y mediciones físicas las cuales en su conjunto permitieron identificar las variables más críticas del proceso, las cuales podrían ser seleccionadas para ser controladas posteriormente. En la **Tabla 1** se presentan los resultados.

Tabla 1

Resultados de las valoraciones volumétricas y de las mediciones de las propiedades físicas en tanque de fundente

Día	Vol K ₂ Cr ₂ O ₇	Conc. (g/l) FeCl ₂	Vol EDTA	Conc. (g/l) ZnCl ₂	Vol AgNO ₃	Conc. (g/l) Cl	Conc. (g/l) NH ₄ Cl	ACN	pH	°Be	T (°C)
1	2,25	9,51	8,1	110,42	4,9	173,95	167,43	1,40	3,9	15	56
2	2,35	9,93	8,1	110,42	4,8	170,40	161,72	1,34	4,3	15	55
3	2,35	9,93	8	109,06	4,8	170,40	162,79	1,37	4,2	15	55
4	2,2	9,30	8,25	112,46	4,6	163,30	149,95	1,23	4,6	15	57
5	2,3	9,72	8,3	113,15	4,8	170,40	159,76	1,30	4,3	15	58
6	2,3	9,72	8,1	110,42	4,8	170,40	161,90	1,35	4,4	15	57
7	2,2	9,30	8,2	111,78	4,7	166,85	155,84	1,29	4,3	15	56
8	2,35	9,93	8,7	118,60	4,5	159,75	139,25	1,08	4,9	15	55
9	2,4	10,14	9	122,69	4,6	163,30	141,22	1,06	4,6	16	55
10	2,8	11,83	10,5	143,14	4,5	159,75	118,39	0,76	4,1	16	55
11	2,3	9,72	10,1	137,68	4,6	163,30	129,80	0,88	4,1	15	58
12	2,1	8,87	10,1	137,68	4,5	159,75	125,17	0,85	4,3	15	59
13	2,2	9,30	9,3	126,78	4,5	159,75	133,37	0,98	3,8	15	60
14	2,3	9,72	8,3	113,15	4,8	170,40	159,76	1,30	4,2	15	59
15	2,4	10,14	8,4	114,51	4,7	166,85	152,98	1,23	4,4	17	59
16	2,2	9,30	9,6	130,87	4,75	168,63	143,53	1,02	4,8	16	56
17	2,4	10,14	8,8	119,96	4,5	159,75	138,01	1,06	4,3	16	58
18	2,6	10,99	8,9	121,32	4,8	170,40	152,27	1,15	4	17	59
19	2,2	9,30	8,9	121,32	4,8	170,40	153,70	1,18	3,9	16	57
20	2,2	9,30	8,5	115,87	4,6	163,30	147,28	1,18	4,1	16	56
21	2,1	8,87	8	109,06	4,7	166,85	158,33	1,34	4,1	16	55
22	2,15	9,08	8,25	112,46	4,6	163,30	150,13	1,24	4	16	58
23	2,2	9,30	8,25	112,46	4,6	163,30	149,95	1,23	3,9	16	60
24	2,15	9,08	8,2	111,78	4,6	163,30	150,67	1,25	3,7	16	61
25	2,1	8,87	8,1	110,42	4,5	159,75	146,57	1,23	4,1	16	60

Inicialmente se realiza la titulación para la determinación de hierro en solución para controlar la concentración de este metal en las soluciones de proceso empleando bicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) al 0.1 N como agente valorante. Con el desarrollo de esta tarea se tiene control de la cantidad de hierro en proceso y se pueden tomar acciones preventivas para evitar una gran acumulación en la cuba de galvanizado, para controlar así la generación de dross. Un nivel de hierro superior al 3% en la solución fundente, puede convertirse en la principal razón del aumento en la generación de dross y sería necesario realizar el tratamiento de oxidación química para la eliminación de este, el cual consiste en la precipitación del hierro en el flux adicionando lenta y homogéneamente peróxido de hidrógeno, seguido de la adición de amoníaco cuando el valor del pH no es el deseado (> 5). La determinación con exactitud de las cantidades de peróxido y amoníaco a adicionar para lograr un arrastre significativo de hierro ($> 70\%$) se realiza días previos al tratamiento en el laboratorio.

Posteriormente se llevó a cabo la medición de los iones de zinc presentes en la solución del fundente, empleando EDTA (Ácido Etilendiaminotetraacético) como valorante; mediante ésta se pretendió lograr una minimización del consumo de sales al tener conocimiento exacto de la concentración del cloruro de zinc.

Por último, se realiza la medición de los iones de Cl^- presentes en la solución del flux para conocer la concentración de los cloruros totales asociados a las sales de amonio, zinc y hierro; en este análisis se empleó nitrato de plata 0,1 N ($AgNO_3$) como agente valorante. Teniendo estos datos es posible determinar el Número de Cloruro de Amonio (ACN), relación que es primordial para la toma de decisiones en cuanto a la adición de las sales de cloruro de amonio y zinc evitando que el índice de producción se vea afectado.

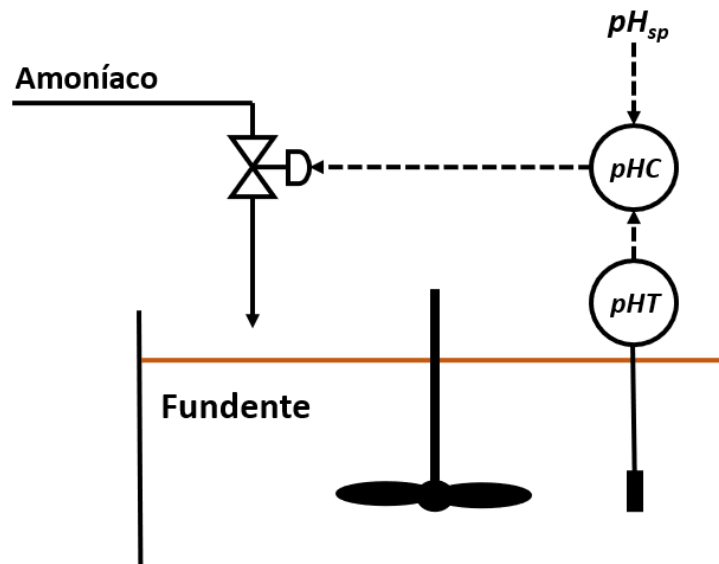
El pH fue la variable más crítica que se obtuvo en la recolección de la información, ya que los valores obtenidos utilizando métodos estándar son solo una aproximación y esto se debe a que la presencia de hierro u otras sales puede interferir en la medición con la sonda del pH-metro utilizado, generando resultados inexactos en los valores de pH. Conociendo el valor preciso del pH, se pueden tomar las acciones pertinentes en cuanto a la adición de amoníaco se refiere, teniendo en cuenta que los valores óptimos de pH están dentro del rango de 4 - 4,5. Dentro de la experimentación se observó que un pH demasiado alto ($> 4,7$) produce un fundente débil, ineficaz para limpiar la superficie del acero, mientras que un pH demasiado bajo hace que el producto se

disuelva en el fundente aumentando la concentración de hierro en la solución obtenida en la valoración de hierro por volumetría.

A partir de la información anteriormente recolectada, se procede a implementar un lazo de control referente a la variable pH, empleando amoníaco como agente controlador del pH como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2

Lazo de control para la variable pH en tanque fundente



Para definir los elementos que conformarán el sistema de control, primero es necesario definir el tipo de dispositivo que realizará la automatización. Para ello se presenta la **Tabla 2**, en la cual se comparan los diferentes sistemas que se pueden implementar.

Tabla 2*Comparación de los diferentes sistemas que se pueden implementar*

Características del sistema	Electromecánico	Microcontrolador	Controlador Lógico Programable (PLC)
Adaptación a diferentes procesos	Baja	Media	Alta
Posibilidad de ampliación	Poca	Media	Alta
Estructura en bloques independientes	Difícil	Media	Fácil
Herramientas para pruebas	Poca	Alto	Alto
Interconexiones, cableado externo, etc.	Mucho	Medio	Poco
Revisión de fallas	Tardado	Medio	Rápido
Mantenimiento	Difícil	Regular	Fácil
Costo para pequeños cambios	Alto	Medio	Bajo
Costo de fabricación	Bajo	Medio	Medio
Flexibilidad	Poca	Medio	Alto
Disponibilidad del equipo	Rápida	Media	Media
Rendimiento	Bajo	Medio	Alto
Personal de mant. especializado	Poco	Mucho	Medio

Fuente. (Espinoza Flores & Hidalgo Zapiain, n.d.)

Según la **Tabla 2**, se considera al controlador lógico programable PLC el indicado para la realización de las funciones de control debido a su alta flexibilidad.

Posteriormente para poder realizar la programación mediante el PLC, primero es necesario identificar cual de éstos cumple con las características requeridas para el proceso tales como entradas/salidas, tipo de comunicación, memoria, etc. Sin embargo, la configuración de estas características implica un modelamiento más preciso, involucrando variables como tiempo de respuesta del sistema, cinética de las reacciones y respuesta a la adición de amoníaco.

5 Conclusiones

Se realizó satisfactoriamente el seguimiento a las variables operacionales presentes en el tanque de fundente del proceso de galvanizado en caliente, específicamente variables como la temperatura, el pH, el número de cloruro de amonio (ACN), concentración de hierros y °Bé, las cuales son de vital importancia para el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos por las normativas internacionales vigentes.

Se determinó que la variable más crítica dentro del proceso fue el pH, ya que la constante presencia de impurezas provenientes del arrastre de las etapas anteriores de preparación superficial hace que la estabilidad de esta variable se vea afectada. Por lo tanto, se determina un rango de operación entre 4 y 4,5 para dicha variable; garantizando así que dentro de este rango la limpieza y activación superficial del material no se ve afectado para los casos en los cuales el pH es demasiado bajo ($< 3,8$) y se garantiza que la formación de subproductos indeseados no aumente, para los casos donde se presente un pH demasiado alto ($> 4,7$).

Se evaluaron diferentes tipos de control que se podrían implementar evaluando diferentes aspectos relacionados con flexibilidad, disponibilidad y costos; considerado al controlador lógico programable (PLC) apto para la realización de las funciones de control de pH en el tanque de fundente. Sin embargo, para un profundo análisis técnico de la configuración del sistema, es requerida la evaluación de características inherentes al proceso y a la solución presente en el tanque de preparación superficial.

6 Recomendaciones

Se recomienda realizar el diseño a detalle de la propuesta de automatización, el cual está relacionado con el diseño de los subsistemas y componentes que lo integran.

Posteriormente para determinar la correcta operación del proceso previo a la implementación en planta se deben realizar las respectivas simulaciones comprobando la factibilidad y el buen desempeño del PLC, para lo cual también debe ser definido el tipo de lenguaje a emplear.

Por último, se sugiere la ampliación del sistema de control a los demás tanques de preparación superficial, para lograr una mayor estabilidad en el proceso de galvanizado en caliente.

Referencias

- ANDI. (2017). *Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente*.
<https://polyuprotec.com/wp-content/uploads/2017/06/Guia-Galvanizado-por-inmersi%C3%B3n-en-caliente.pdf>
- Cook, T. H. (2003). Composition, Testing, and Control of Hot Dip Galvanizing Flux. *Metal Finishing*, 22–35.
- Espinoza Flores, M. Á., & Hidalgo Zapiain, E. E. (n.d.). *Automatización del proceso de galvanización en caliente*.
- Galco S.A.S. (2018). *Preparación superficial del material a galvanizar*.
- Gutiérrez, K. L. (2003). *Guía de operación del equipo de control de contaminación en una planta de galvanizado*. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0377_M.pdf
- Mecanizado industrial de tubo en Barcelona*. (n.d.). Retrieved September 24, 2022, from <https://ferrosplanes.com/>
- Saavedra, G. S. (2017). *Disminución del consumo de zinc mediante la reducción de la generación de sub-productos formados en el proceso de galvanizado*.
<https://es.scribd.com/document/366006667/Informe-Ceniza-Dross>