



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA  
PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO  
DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN  
EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**

**Jorge Estuardo Ixcot Ajpop**

Asesorado por M.A. Ing. Carlos Snell Chicol Morales

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA  
PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO  
DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN  
EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JORGE ESTUARDO IXCOT AJPOP**

ASESORADO POR EL M.A. ING. CARLOS SNELL CHICOL MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De Leon Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Victor Hugo Dardón Castillo
EXAMINADOR	Ing. José Milton De León Bran
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 17 de noviembre de 2022.

**Jorge Estuardo Ixcot Ajpop**



**EEPFI-PP-1924-2022**

Guatemala, 11 de noviembre de 2022

**Director**  
**Gilberto Morales Baiza**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Morales**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Área de Operaciones - Optimización de operaciones y procesos**, presentado por el estudiante **Jorge Estuardo Ixcot Ajpop** carné número **201314583**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion Industrial.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

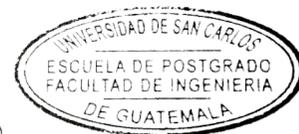
Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Carlos Snell Chicol Morales  
INGENIERO MECÁNICO Col. 14029  
Ma. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Mtro. Carlos Snell Chicol Morales  
Asesor(a)

Mtro. Hugo Humberto Rivera Perez  
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIM-1569-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Estuardo Ixcot Ajpop**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Gilberto Morales Baiza  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica

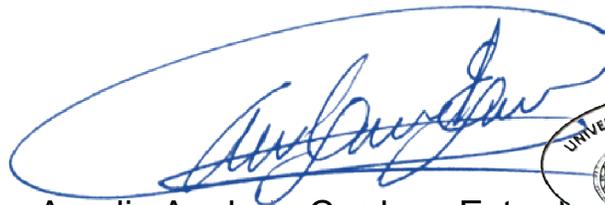
Guatemala, noviembre de 2022

Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.175.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCORIA SUPERFICIAL EN UNA PAILA DE ZINC PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE METAL FUNDIDO EN EL PROCESO DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE EN UNA SIDERÚRGICA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE VILLA NUEVA**, presentado por: **Jorge Estuardo Ixcot Ajpop**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Por su esfuerzo y apoyo incondicional. Por creer y confiar en mí. Por su comprensión en los días difíciles y las palabras de aliento que nunca faltaron.
<b>Mis abuelos</b>	Por su consentimiento y cuidados. Por los consejos y lecciones aprendidas. Un abrazo eterno a mi abuela que hoy hace falta.
<b>Mi hermano</b>	Por su compañía y apoyo a lo largo del tiempo.
<b>Luisa</b>	Por ser la compañera de mi vida, por todo el apoyo y carisma.
<b>Mis tíos</b>	Por cuidarme, apoyarme y aconsejarme desde pequeño.
<b>Mis amigos</b>	Por todas las experiencias y recuerdos vividos. Por el tiempo compartido.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mis padres</b>	Por sostener mis estudios y mi carrera. Por darme la oportunidad de ser profesional.
<b>Familia y amigos</b>	Por la motivación y ánimos durante la carrera.
<b>Mi asesor</b>	Por compartir sus conocimientos para hacer un buen trabajo, y por su apoyo y seguimiento para avanzar en cada fase del proceso.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi <i>alma mater</i> .
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por todo lo aprendido y vivido en este proceso de aprendizaje y experiencia de convertirme en profesional de la ingeniería como desde niño quise.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
3.1. Contexto general .....	9
3.2. Descripción del problema .....	9
3.3. Formulación del problema .....	10
3.3.1. Pregunta central .....	10
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	10
3.3.3. Delimitación del problema .....	10
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos .....	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15

7.	MARCO TEÓRICO .....	19
7.1.	Galvanización por inmersión en caliente.....	21
7.1.1.	Precalentamiento .....	23
7.1.2.	Recocido .....	24
7.1.3.	Enfriamiento controlado .....	25
7.1.4.	Enfriamiento forzado .....	25
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO .....	33
9.	METODOLOGÍA .....	35
9.1.	Características del estudio .....	35
9.1.1.	Enfoque.....	35
9.1.2.	Alcance.....	35
9.1.3.	Diseño .....	36
9.2.	Unidad de análisis .....	36
9.3.	Variables .....	37
9.4.	Fases del estudio .....	38
9.4.1.	Fase 1: revisión de la teoría y documentación .....	38
9.4.2.	Fase 2: toma de datos de muestreo.....	39
9.4.3.	Fase 3: análisis de datos y comportamiento .....	39
9.4.4.	Fase 4: análisis de posibles causas .....	39
9.4.5.	Fase 5: control de temperatura de lámina .....	40
9.4.6.	Fase 6: cambio en la instrumentación utilizada.....	40
9.4.7.	Fase 7: mayor pureza en las barras de adición.....	41
9.4.8.	Fase 8: análisis de nuevos datos sobre el comportamiento químico del metal fundido.....	41
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	43

11.	CRONOGRAMA.....	45
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	47
13.	REFERENCIAS.....	49
14.	APÉNDICES.....	51



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema de solución .....	18
----	---------------------------	----

### TABLAS

I.	Unidad de análisis .....	37
II.	Cronograma de investigación.....	45
III.	Presupuesto .....	47



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
\$	Dólar estadounidense
\$	Dólar estadounidense
°C	Grados Centígrados
%	Porcentaje
“	Pulgadas
/	Relación



## GLOSARIO

<b>Acero Inoxidable</b>	Es una aleación de acero con un contenido de cromo entre el 10 % al 12 %. Posee una elevada resistencia a la corrosión.
<b>Acero</b>	Aleación de hierro (Fe) y carbono (C), el contenido de carbono en las que el contenido de carbono en disolución sólida en el hierro se encuentra por debajo de 2.1 %.
<b>Al</b>	Aluminio.
<b>Aleación</b>	Material que contiene una mezcla de dos o más metales o elementos no metálicos, con propiedades diferentes a las de su metal base.
<b>Ánodo</b>	Electrodo en el que se produce una reacción de oxidación. El material pierde electrones e incrementa su estado de oxidación.
<b>C</b>	Carbono.
<b>Cátodo</b>	Electrodo en el que se produce una reacción de reducción. El material recibe electrones y reduce su estado de oxidación.

<b>Comburente</b>	Sustancia que provoca o favorece la combustión de otras sustancias.
<b>Corrosión</b>	Deterioro del material por un ataque electroquímico causado por su entorno. El proceso de corrosión deteriora el hierro dentro del acero provocando la pérdida de sus características principales como la dureza y resistencia.
<b>Escoria</b>	Es un subproducto procedente del proceso de fundición. Aleación de Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Aluminio (Al). Tiene una composición de 40 % de hierro, 20 % Zinc y 40 % de aluminio.
<b>Fe</b>	Hierro.
<b>Galvanizado</b>	Aplicar un baño de zinc fundido a un metal como capa protectora a la corrosión.
<b>Gas licuado de petróleo</b>	Mezcla de gases licuados presentes en el gas natural, siendo estos propano y butano.
<b>GLP</b>	Gas licuado de petróleo.
<b>H</b>	Hidrógeno.
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrógeno diatómico.

<b>Hidrógeno</b>	Es el primer elemento de la tabla periódica. Es el elemento más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón. Estable en su forma diatómica. (H <sub>2</sub> ).
<b>Inmersión</b>	Introducción completa de un cuerpo en un líquido.
<b>Jumbo 90 / 10</b>	Aleación de metales de adición para la paila de galvanizado que contiene 90 % de zinc y 10 % de aluminio.
<b>Jumbo de metales</b>	Presentación de aleaciones y metales de adición para la fundición en la paila de galvanizado.
<b>Merma</b>	Pérdida de algunas características físicas de los productos obtenidos, o de los utilizados para su obtención.
<b>N</b>	Nitrógeno.
<b>Nitrógeno</b>	Elemento perteneciente al grupo de los no metales, cada átomo cuenta con siete protones en su núcleo. Es un gas inodoro, incoloro e insípido, compone el 78 % del aire que se respira.
<b>Oxidación</b>	Fenómeno químico en el cual se transforma un cuerpo o compuesto por la acción de un oxidante, que hace que aumente la cantidad de oxígeno y disminuya el número de electrones de algunos de los átomos.

<b>Paila de galvanizado</b>	Depósito metálico de acero inoxidable, contiene la fundición de metales en donde se sumerge el acero para el proceso de galvanización. Tiene una capacidad de 140 Tm de metal fundido y un espesor de pared de 1 ½ pulgadas.
<b>Siderúrgica</b>	La industria siderúrgica se deriva de la metalurgia y se encarga de la extracción y transformación del hierro en sus aleaciones, como el acero.
<b>Zinc</b>	Elemento químico de número atómico 30 y símbolo Zn. Es un metal del grupo de los elementos de transición, de color blanco azulado, de brillo intenso y estructura laminosa. No existe libre en la naturaleza, se encuentra como óxido de zinc. Se utiliza como capa protectora o galvanizador para el hierro y el acero y como componente de distintas aleaciones.
<b>Zn</b>	Zinc.

## RESUMEN

El proceso de galvanizado se realiza sobre el acero para mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión generando un producto con alta durabilidad y tiempo de vida, ampliamente utilizado en el sector industrial y de la construcción. La galvanización puede ser continua o intermitente. En este trabajo se enfocará en el método continuo, este consta de hacer pasar la tira de lámina de acero por todo un sistema de rodillos bajo fuerzas de tensión; en el intermedio de este sistema se encuentra una paila con metal fundido, en donde el mayor porcentaje de contenido es zinc, el cual es útil para formar la capa de galvanizado sobre el acero.

Como parte natural del proceso productivo se tienen pérdidas o mermas que se necesitan controlar. La merma en el proceso de galvanizado surge del choque térmico entre la temperatura de la tira de acero y la temperatura del metal fundido al cual ingresa el acero para adquirir la capa de zinc. Este choque térmico genera un subproducto conocido como escoria de superficie. La escoria superficial contiene cierta cantidad de zinc que aún puede ser útil para la galvanización como tal, generando la necesidad de optimizar el uso y consumo de materias primas utilizadas para el proceso, con el beneficio de la reducción de costos operativos y un mayor aprovechamiento de los metales aportados al proceso.



# 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto se realizará en una siderúrgica cuyas actividades productivas se enfocan en la galvanización de acero en rollo y producción de perfiles de construcción en acero galvanizado, para ser comercializados dentro y fuera del país.

El trabajo de investigación busca la optimización en el consumo de materias primas, las materias primas utilizadas son los metales de fundición que alteran la composición química del baño de inmersión en la paila, compuestos por aluminio, antimonio y hierro y zinc. Este último metal es el principal a desear controlar dentro del proceso de galvanización por inmersión en caliente.

Durante el proceso de galvanizado existen algunos factores que se estudiarán y analizarán en este trabajo que afectan directamente en el rendimiento del zinc durante el proceso productivo. Los tres factores principales por tomar en cuenta son la temperatura de lámina de ingreso al baño de metal fundido en la paila, las herramientas e instrumentación utilizada para el escurrimiento del zinc para ser retirado de la escoria, y la pureza o mejoría en composición química de las barras de metal de adición utilizadas para controlar los parámetros de operación de los metales, haciendo referencia a los porcentajes de participación de cada uno dentro del baño de inmersión en caliente.

Como parte del proceso natural de galvanización se forma escoria en la superficie del metal fundido, la escoria no puede ser eliminada en su totalidad, pero sí puede ser controlada; y su control implica que se tendrá un mejor

aprovechamiento de la materia prima principal utilizada, el zinc. Para mejorar el rendimiento de este metal, es necesario reducir la cantidad de escoria superficial que se forma en la paila de baño de metal fundido, la optimización y control de este metal favorece los costos de operación del proceso.

Para dar inicio al proyecto se obtendrán los valores históricos recientes para reconocer el consumo actual del metal, y se estudiará la teoría aplicable al proceso de galvanización del acero por inmersión en caliente, tomando en cuenta los tres factores determinantes en la operación. Estos factores serán analizados con el objetivo de implementar gradualmente mejoras en métodos de control operacional para evaluar el comportamiento resultante en la generación de escoria superficial, y la participación de cada uno de ellos dentro de la optimización del metal utilizado como materia prima principal.

En el capítulo 2 se establecen los antecedentes que son la base de la investigación del proyecto a la implementación de controles adecuados en los métodos operativos.

En el capítulo 3 se define el planteamiento del problema, se formulan las preguntas específicas y la pregunta general que sirven como guía de la investigación a desarrollar. Se detalla la situación actual para poder plantear una propuesta de solución.

En el capítulo 4 se presenta la justificación de la investigación, se explica la importancia y el impacto que tiene la solución del problema.

En el capítulo 5 se presentan los objetivos de la investigación a realizar y el alcance. Se presenta el objetivo general, del cual surgen los objetivos específicos que se buscan alcanzar.

En el capítulo 6 se presentan las necesidades a cubrir y el esquema de solución del problema que se plantea. Se define la necesidad principal que es la optimización en el uso de las materias primas dentro del proceso de producción. Se definen las fases de la investigación y cómo cada una de estas se desarrolla, así como los factores a considerar dentro de los análisis. Se tiene un total de 8 fases a desarrollarse durante 205 días hábiles.

En el capítulo 7 se desarrolla el marco teórico con la información aplicable para todo el proceso de galvanización de acero por inmersión en caliente, factores operacionales que afectan el comportamiento y composición química de los metales en el baño de inmersión y del acero galvanizado como producto final, y técnicas operativas ajustables para ir estableciendo parámetros de control.

En el capítulo 9 se establece la metodología de la investigación para poder obtener los valores se obtendrán muestras cada día para analizar la composición química de los metales de fundición y el indicador de generación de escoria superficial. Se muestran las fases del desarrollo de las varias etapas, acciones y controles a implementar.

En el capítulo 10 se establecen las técnicas de análisis de la información, se desarrolla el método para la obtención de información útil para los análisis que se plantean. Se utiliza la teoría existente relacionada con el tema de la investigación como apoyo y referencia.

En el capítulo 11 se presenta el cronograma para definir la distribución del tiempo para cada una de las fases del trabajo de graduación y proyecto de investigación.

En el capítulo 12 se define la factibilidad del estudio y el costo total a cubrir por el investigador para realizar el proyecto de investigación. Se define el presupuesto total.

## 2. ANTECEDENTES

El acero es un metal de consumo masivo en varias actividades y procesos comerciales e industriales, presenta un bajo costo y muy buenas propiedades mecánicas y químicas que lo hacen una opción viable para todos sus usos; es imperativo conocer los aspectos que lo afectan negativamente, ya que es un material propenso a la acción corrosiva al ser expuesto al entorno bajo condiciones como la exposición a la atmósfera; se hace necesario investigar sobre los métodos de protección que pueden aplicarse. La corrosión debido a la atmósfera es un fenómeno electroquímico que deteriora el acero al ser expuesto, esto obliga a implementar métodos de control, siendo uno de estos el recubrimiento de capa con zinc.

Los métodos de protección para el acero más importantes en la industria son los de recubrimiento metálico, el galvanizado por inmersión en caliente tiene un amplio campo de aplicación, siendo de los más destacados. Año tras año, millones de toneladas de zinc son utilizadas para procesos de recubrimiento de acero. El proceso de galvanizado por inmersión en caliente es adaptable y eficiente ya que tiene una gran serie de productos a los que puede concentrarse.

Los factores de mayor afectación en el acero galvanizado y el proceso de galvanización son las propiedades físicas y químicas del acero, contenido de elementos en el acero, como silicio que tiene incidencia en la capa de recubrimiento (Sánchez, 2007).

El zinc es uno de los metales más utilizados en todo el mundo. La mitad del zinc extraído como recurso natural se utiliza en el proceso de galvanizado como

recubrimiento anticorrosivo del acero. El galvanizado por inmersión en caliente es un proceso implementado y utilizado a lo largo de la historia y del desarrollo del comercio e industria, posee varias ventajas en comparación a las otras formas de protección, tiene bajo costo económico si se le compara con la extensa vida de utilidad que el material otorga y su gran resistencia a daños mecánicos (Carrillo, 2014).

El gran consumo del zinc a nivel mundial genera la necesidad de mejorar su uso, optimizar su provecho y disminuir las pérdidas durante los procesos. Tecnológicamente los parámetros operativos para el recubrimiento utilizando zinc no han variado a través del tiempo; sin embargo, se cuenta con nuevas aplicaciones, por ejemplo, en la industria automotriz y en el área de la construcción inmobiliaria que abre el campo a varias investigaciones sobre los factores del proceso y sus mejoras; así como también los nuevos tipos de recubrimiento de zinc, aumentando los estudios para adherir elementos de aleación al baño de zinc, y obtener una mejora en la microestructura y en las propiedades que otorga al producto final el recubrimiento de capa (Hernández y Suárez, 2020).

Con el aumento del consumo del zinc, se ha generado bastante interés en el estudio de los métodos de recubrimiento metálico como el galvanizado, para mejorar el desempeño del proceso, estas modificaciones persiguen mejoras significativas en los baños de recubrimiento, como mejorar el desempeño del consumo del metal en el proceso, al ser este un elemento clave en la industria del acero (Rico y Carrasquero, 2017).

Formación del recubrimiento de aleación Fe-Zn, creado por la difusión entre átomos de hierro y zinc, esto produce enlaces inter metálicos promoviendo la formación de diferentes fases y subproductos como la escoria superficial. En

parámetros de operación de temperatura entre 430 °C y 660 °C el proceso genera una menor contaminación y consumo de energía. A una mayor temperatura, por encima de los 490 °C el recubrimiento se adhiere al hierro y forma distintas fases en la última fase los cristales se disuelven y flotan permanentemente (Chico, 2018).



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Contexto general**

En el proceso de galvanizado por inmersión se utiliza una paila que contiene zinc fundido, la generación de escoria superficial es producto de relaciones inter metálicas. La capa superficial de escoria contiene un 50 % de zinc todavía aprovechable y 50 % de merma. La escoria se forma por la reacción química del zinc y el hierro, es una precipitación causada por la saturación de estos metales en la paila. El zinc es el metal principal utilizado en el proceso de galvanizado por lo que es importante controlar y optimizar su aprovechamiento durante el proceso.

La escoria superficial fuera de control incrementa el consumo de metales y los costos como consecuencia; genera indicadores de gestión fuera del objetivo planteado, y también implica un aumento en la interacción del personal operativo con la paila de metal fundido al tener que retirar más veces durante la jornada la escoria formada en la superficie, incrementando la probabilidad de eventos de seguridad no deseados.

#### **3.2. Descripción del problema**

La empresa es una siderúrgica multinacional ubicada en el municipio de Villa Nueva, dedicada a la transformación y comercialización del acero en rollo y en distintos perfiles de construcción. Se tienen distintos tipos de materiales como acero negro, acero galvanizado, acero pintado y recubierto. La investigación se

desarrolla en el departamento de producción, área industrial, en la línea de galvanizado por inmersión en caliente.

### **3.3. Formulación del problema**

Se plantea la pregunta central de la investigación, esta pregunta da lugar a las preguntas auxiliares.

#### **3.3.1. Pregunta central**

- ¿Cómo reducir la cantidad de escoria superficial generada en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente en la paila de zinc?

#### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Cuáles condiciones generan un aumento en la formación de escoria superficial?
- ¿Cómo controlar las condiciones analizadas que aumentan la formación de escoria en la superficie del metal fundido?
- ¿Cómo impacta en los costos la reducción de la generación de escoria superficial?

#### **3.3.3. Delimitación del problema**

La investigación se desarrolla en la línea de galvanizado, que forma parte del departamento de producción en el área industrial de la organización.

## 4. JUSTIFICACIÓN

El proyecto de optimización en el aprovechamiento del zinc surge de la necesidad de reducir costos y hacer más eficiente la operación de galvanizar el acero por inmersión en caliente.

El zinc es la materia prima principal para la galvanización del acero, formando una capa protectora anticorrosiva que alarga la durabilidad del material en el tiempo de manera considerable. La galvanización genera escoria de metal fundido en la sección de paila, esta escoria superficial contiene zinc que todavía puede ser aprovechado en el proceso y no ser arrojado como merma a las ollas utilizadas para retirar la escoria de la paila. Es importante estudiar y analizar el comportamiento de los diferentes elementos que conforman la línea de galvanizado y que afectan en la generación de mayor o menor cantidad de escoria; entre estos factores se encuentra la temperatura de salida de lámina de la sección del horno, conformado por zonas de fuego directo y zonas de calor por resistencias eléctricas, el uso de metales de adición para variar concentración de los distintos metales utilizados en el proceso, siendo aluminio y antimonio, accesorios adecuados para retirar escoria y que permitan un adecuado escurrimiento del zinc. Analizando los factores anteriores y otros que puedan surgir en el desarrollo de la investigación se puede controlar el aprovechamiento del zinc durante el proceso y mejorar los costos de consumo de este metal.

El sector de la construcción requiere en volúmenes importantes este material para los distintos proyectos, por la calidad de sus propiedades químicas y mecánicas; se justifica mantener un control preciso sobre la utilización de metal

de manera que se pueda garantizar maximizar su uso y mantener el nivel de ofrecimiento a la demanda sin castigar los costos operativos.

En el área industrial se define un estándar mensual como máximo permitido para la generación de escoria, en los últimos meses de operación el indicador ha estado por encima del estándar aceptado, lo cual impacta directamente en los costos del departamento, haciendo la operación más cara. Con la finalización del proyecto se espera disminuir y mantener en control la generación de la escoria superficial en la paila de metal fundido, para mantener el indicador dentro de los parámetros establecidos y no incrementar costos innecesariamente. Esto es importante para la empresa ya que abastece a toda Centro América, Estados Unidos y Colombia de acero galvanizado en rollo, siendo de los pocos en la región con la capacidad de producción actual. La estrategia organizacional busca seguir expandiéndose en el mercado nacional e internacional del acero galvanizado, por lo que esta optimización también beneficia y se alinea a los objetivos definidos por la dirección.

Adicional a los costos, que son un factor importante en la operación, también se esperan otros beneficios en el área de paila, pues al lograr reducir la cantidad de escoria superficial formada la interacción hombre – máquina también disminuye, pues el operador de paila tendrá que exponerse menos veces al metal fundido y al calor de la zona para retirar esta escoria superficial, y la mejora en los accesorios, herramientas y tecnología utilizada para el escurrimiento del zinc en la escoria permitirá que su aprovechamiento incremente, optimizando la tarea operativa en general y beneficiando los costos de producción y minimizando posibles eventos de seguridad industrial.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Optimizar el consumo de zinc, reduciendo la formación de escoria superficial en una paila de metal fundido en el proceso de galvanizado de acero por inmersión en caliente.

### **5.2. Específicos**

- Conocer las condiciones de operación que generan un aumento en la formación de escoria en la superficie del metal fundido
- Controlar las condiciones analizadas para reducir la escoria, y mejorar el aprovechamiento del zinc durante el proceso de galvanizado para cumplir con el objetivo definido por el área de producción.
- Optimizar costos en el consumo de metales al disminuir el desperdicio de zinc en la paila de galvanizado.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

La necesidad principal del proyecto es la optimización en el uso continuo de metales dentro de la paila de metal fundido en una línea de galvanizado de acero por inmersión en caliente. Esto afecta directamente los costos de operatividad específicamente en el consumo de materias primas. Una oportunidad colateral de la reducción de la escoria generada es la disminución de la interacción del personal con el metal fundido, que es considerada una zona de riesgo por el manejo de metales fundidos a alta temperatura.

Existen diversos factores que contribuyen a la optimización del uso de metales, los cuales deberán ser analizados e investigados a mayor profundidad para conocer cómo afectan el comportamiento del metal fundido en la generación de escoria formada en la superficie de este. Esta escoria que se forma aún tiene cierta cantidad de zinc que podría ser aprovechado dentro del proceso de galvanización y no desperdiciarse como merma.

Tres factores para considerar que afectan dentro de la cantidad de escoria que se genera en la superficie de paila son la temperatura de lámina cuando ésta finaliza la etapa dentro del horno e ingresa al metal fundida, que debe controlarse lo más cercano a la temperatura del metal mismo para contrarrestar el choque térmico. Los instrumentos utilizados para retirar la escoria, se busca que permitan una buena fluidez del zinc aún aprovechable para el proceso de producción. Y el grado de pureza en las barras de metales de adición que se agregan a la paila para controlar los porcentajes de metales requeridos durante el proceso de galvanización por inmersión en caliente.

Las fases del proyecto se definen de la siguiente forma:

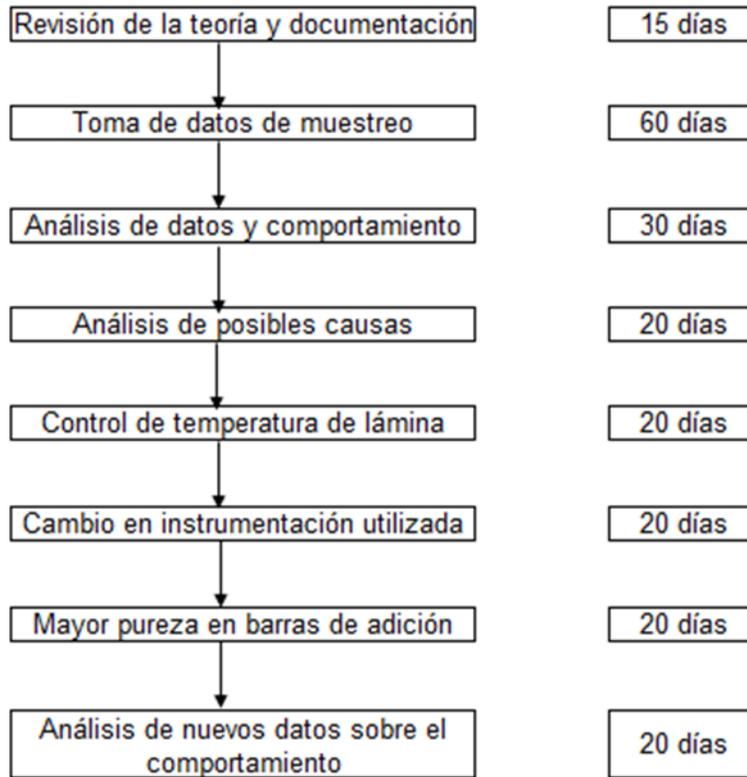
- Fase 1: revisión de la teoría y documentación: se revisa la teoría aplicable dentro de factores y parámetros de control operativo que pueden controlar las condiciones de generación de escoria en la superficie del metal fundido en la paila de galvanizado. Se estima un tiempo de 15 días.
- Fase 2: toma de datos, muestreo: dentro de la operación continúa se toman dos muestras del metal fundido dentro de la paila para el análisis de la composición de cada uno de los metales que interactúan y afectan la generación de escoria: aluminio, antimonio y hierro. Se toman datos cada doce horas para conocer el comportamiento y la fluctuación que estos han tenido durante el desarrollo de las actividades de producción. Se estima un tiempo de 60 días para la toma de muestras.
- Fase 3: análisis de datos obtenidos en muestreo y comportamiento. Se analizan los datos obtenidos por las muestras estudiadas en el laboratorio, para conocer el comportamiento y fluctuación que tienen los metales ante diversas condiciones operativas. Se estima un tiempo de 30 días.
- Fase 4: análisis de posibles causas: se evalúan las condiciones operativas que se tienen en los momentos de mayor y menor generación de escoria en la superficie del metal. Cuáles son fácilmente controlables y cuáles otras requieren de algún ajuste o mejora compleja para poder controlar. Se estima un tiempo de 20 días.
- Fase 5: análisis de posibles acciones: control en la temperatura de lámina, la primera acción a implementar busca controlar la temperatura de lámina previo al ingreso a la paila de zinc; en el horno y en las distintas zonas que

lo conforman se eleva y luego se enfría de manera forzada la tira de lámina para controlar paulatinamente la temperatura de proceso. Tiempo estimado 20 días.

- Fase 6: análisis de posibles acciones: cambio en la instrumentación a utilizar para el vaciado de la escoria en la paila de galvanizado. Mejorar el escurrido. Tiempo estimado 20 días.
- Fase 7: análisis de posibles acciones: adición de barras de metal de mayor pureza, a la paila de metal fundido. Tiempo estimado 20 días.
- Fase 8: análisis de los datos obtenidos sobre el comportamiento de metales y composición de estos ante el desarrollo de la fase 5, 6 y 7. Tiempo estimado 20 días.

El desarrollo de todas las fases tiene un tiempo estimado de 205 días hábiles.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

## 7. MARCO TEÓRICO

La galvanización por inmersión en caliente se ha empleado como protección ante los efectos negativos que la corrosión genera sobre los metales a lo largo de la historia humana e industrial. Elementos naturales siendo el aire y la humedad tienden a volver los metales a su forma natural siendo este el estado en forma de minerales.

La mayor parte del zinc se extrae de las minas de sulfuro de zinc y se transforman en zinc metálico mediante uno de estos procesos: reducción térmica, retortas horizontales, electrotermia y electrólisis. Actualmente el método más usado es el electrolítico con un 85 % de la producción mundial de zinc (Carrillo, 2014).

La galvanización puede realizarse utilizando la inmersión en caliente; se tienen dos tipos de recubrimiento de capa encontrados dentro de las normas, el primero consiste en un recubrimiento de capa bajo, este tipo de recubrimiento bajo se encuentra reglamentado dentro de la normativa UNE en ISO 10346. El otro tipo de recubrimiento que se puede realizar es el recubrimiento de capa alta, este se presenta de larga duración o rendimiento, este recubrimiento está reglamentado en la normativa UNE en ISO 1461.

El zinc genera una aleación con el acero formando sobre este una capa adherente, que presenta resistencia a la tracción mecánica.

El acero galvanizado tiene una capa de recubrimiento formada con zinc, para proteger al acero de los efectos provocados por la corrosión, convirtiéndolo

en un material de larga duración y resistente. Uno de los usos más comunes del acero con recubrimiento se encuentra en el área de la construcción y en la conformación de componentes industriales; entre otras aplicaciones.

El zinc es un material muy usado en la protección de aceros ya que le concede una doble protección, establece una barrera física entre el medio y la superficie del acero, conocida como de barrera, y también proporciona una protección catódica, ya que el zinc es un metal menos noble que el acero (Carrillo 2014).

Los metales se encuentran en la naturaleza como minerales u óxidos de estado impuro, así que las propiedades de tipo mecánico y estructural que lo convierten de utilidad en las diversas aplicaciones para que sean aprovechadas en su máximo punto, el material debe recibir tratamientos protectores prolongar el tiempo en el que regresen a su estado original encontrado en la naturaleza.

Los materiales metálicos en ambientes húmedos sufren un proceso de corrosión irreversible, por lo que requieren una adecuada protección superficial mediante diferentes métodos, entre los cuales destacan los recubrimientos metálicos (Chico, 2018).

La corrosión de los metales se da por reacciones químicas y un flujo de electrones. Este proceso natural ocurre en la superficie del metal. Se aplican los métodos que retardan este proceso natural para poder mitigar los efectos de la corrosión. El control de estos efectos negativos se da por pasivación, inhibición o protección.

La corrosión es un proceso indeseado y espontáneo, causado por acciones químicas o físico químicas del ambiente, transforma irreversiblemente los metales hasta que vuelven a su estado mineral (Chico, 2018).

La investigación se basa en mitigar la corrosión a través de la protección por el recubrimiento de capa sobre la superficie del material. Para esto se puede agregar una capa de recubrimiento metálico, por ejemplo, pintura. También puede ser a través de la protección por celda galvánica o catódica, proporcionando una celda galvánica al aplicar un metal anódico con el acero, siendo este el metal de sacrificio aportado. El metal de sacrificio en este caso es el zinc.

El zinc se proporciona en el recubrimiento de capa del galvanizado para que cumpla su función como metal de sacrificio frente a la corrosión. Los metales anódicos se encuentran sobre el potencial normal del hierro, este es el caso que se presenta en la utilización del zinc. Al encontrarse con el hierro estos forman el ánodo de corrosión que tiene lugar ante la humedad y el oxígeno en el ambiente. El hierro es la parte catódica, no sufre alteraciones. El zinc crea una protección catódica, al adquirir el papel de ánodo de sacrificio, le confiere inmunidad al hierro. Además, al ser depositado sobre el metal crea una barrera de alta resistencia y adherencia que desacelera el proceso corrosivo (Chico, 2018).

### **7.1. Galvanización por inmersión en caliente**

Se aplica un recubrimiento como capa protectora de zinc fundido a la tira de acero de proceso, el zinc presenta un punto de fusión superior a los 400 °C (Sánchez, 2007).

Entonces el acero de proceso pasa por unos segundos en una paila que contiene en su interior metal fundido, a temperatura del metal fundido dentro de la paila debería estar entre el rango de los 450 °C a 480 °C según indica Sánchez (2007) en operación continúa. La inmersión en caliente permite la aplicación de la capa protectora de galvanizado ante los efectos de la corrosión, siendo esencial para culminar con este proceso. los aceros nunca tienen grados de pureza del 100 %, ya sea porque el proceso de refinación no puede realizarlo o porque la existencia de otro metal otorga propiedades físicas o químicas necesarias para realizar un mejor desempeño (Delgado y Bravo, 2016).

Las líneas de galvanizado se encuentran conformadas por secciones: entrada, proceso y salida. Cada sección se encuentra conformada por procesos más específicos de cada etapa respecto al tratamiento químico y mecánico que se desee otorgar al acero.

El acero pasa dentro En la sección de entrada se ingresan las bobinas de acero en rollo hacia los desenrolladores, los rollos se posicionan sobre un carro que los transportará y colocará sobre el desenrollador, para este momento existe otro rollo que está siendo parte ya del proceso, es decir corriendo en la línea. El traslape de los rollos de acero se hace por soldadura de discos de cobre que generan un arco eléctrico. En la sección de entrada también se tiene el subproceso de limpieza superficial del acero llevada a cabo en los contenedores de pretratamiento.

Tanques con solución de desengrasante mezclada con agua caliente para realizar el decapado del acero y eliminar impurezas no deseadas, que se forman por la laminación. Se quiere eliminar los finos de hierro y las emulsiones remanentes (Chamorro, 2018).

La fase de limpieza se conforma de una estación de desengrase previo, posterior a un tanque de inmersión de desengrase, y otra sección que tiene cepillos con detergente por aspersión y finalmente un tanque de enjuague con agua caliente. El desengrase es para asegurarse que el acero no presente algún resto de grasa o aceite impregnado en su manufactura, las piezas son sometidas a desengrase mediante una solución alcalina o ácida (Delgado y Bravo, 2016).

Más adelante en la fase de proceso la tira de acero sufre cambios en sus propiedades tanto químicas como mecánicas; corre en el interior de un horno y al salir entra a la paila que contiene metal fundido. Se profundizará en las secciones horno y paila porque es en donde el acero sufre los cambios importantes en sus propiedades.

El horno en su interior tiene una atmósfera de gases: hidrógeno y nitrógeno, circulando en sentido contrario al de la lámina, el horno tiene las siguientes etapas:

#### **7.1.1. Precalentamiento**

Se incrementa la temperatura del metal utilizando llama de fuego directo. En el túnel de precalentamiento se pretende minimizar el consumo de combustible, el producto de la combustión fluye en contra de la lámina de acero, transfiere el calor de los gases a la lámina.

En la zona de fuego directo se utilizan los gases de combustión para elevar la temperatura sobre los 200 °C. En esta zona la temperatura superficial de la lámina sube entre 480 °C y 820 °C según refiere Sánchez (2007) para eliminar los aceites de laminación, reducidos por evaporación. El calor es transferido por convección y conducción. La superficie de la tira de lámina se va limpiando con

el fluir de los gases reductores. Se quema combustible y aire por debajo del rango de combustión completa, esto permite que se forme hidrógeno y monóxido de carbono dentro de la recámara. Esta atmósfera reductora que se forma mantiene el material enriquecido con hidrógeno y nitrógeno provocando que la superficie del acero no tenga oxidaciones, y elimina otros aceites (Chamorro, 2018).

A través del área transversal dentro del horno y la posición de los quemadores se forma un flujo de gases con turbulencia a alta temperatura provocando la transferencia de calor, la flama no pega directo a la tira de acero, esto asegura una temperatura de lámina pareja y evitar zonas de sobrecalentamiento que puedan dañar la estructura interna del acero.

### **7.1.2. Recocido**

Según indica Sánchez (2007), se utilizan resistencias eléctricas y tubos radiantes para aumentar la temperatura. Es una zona hermética, en donde se forma una atmósfera controlada 75 % nitrógeno y 25 % hidrógeno, a una presión mayor a la atmosférica, esto evita que entre aire al horno. En esta fase a través de la temperatura que se configure en el horno el material puede convertirse en acero suave o duro.

El hidrógeno minimiza el óxido que se forma en el precalentamiento; recristalizando la estructura del grano. El hidrógeno es un gas reductor y elimina la oxidación en la superficie de la lámina. La atmósfera de gases dentro del horno ayuda a mantener una limpieza del acero para asegurar la calidad del recubrimiento de capa que recibirá en la paila de zinc. La combinación de la oxidación y reducción, con la alta temperatura reorientan la estructura molecular del acero, bajando el grado de dureza y adquiriendo ductilidad (Sánchez, 2007).

El nitrógeno forma presión un poco mayor a la atmosférica para que no ingrese aire, se mantiene un valor bajo en el punto de condensación en la atmósfera interior del horno, se debe asegurar aislamiento térmico a la alta temperatura, porque alto contenido de vapor de agua dentro del horno provoca óxidos que tienen imperfecciones en la capa.

### **7.1.3. Enfriamiento controlado**

Utilizando tubos de aire se reduce la temperatura de la lámina. Se evita el envejecimiento del grano. En este punto el tratamiento térmico terminó definiendo si es acero duro o suave. La temperatura del acero en esta zona oscila entre 580 °C a 600 °C (Sánchez, 2007).

### **7.1.4. Enfriamiento forzado**

Se utilizan ventiladores para reducir la temperatura de la lámina por debajo de los 500 °C. Esto acerca la temperatura de lámina próxima a la del metal fundido en la paila, como preparación al baño de galvanizado. El enfriamiento se da usando intercambiadores de calor para minimizar la temperatura del hidrógeno y nitrógeno.

En el interior del horno se produce una reacción química de oxidación por combustión produciendo energía en forma de calor y luz. La combustión genera dióxido de carbono y agua. La combustión se da en presencia de un elemento comburente que reacciona con el oxígeno; y un elemento combustible.

Según la clasificación de los combustibles se encuentran en estado sólido, líquido y gaseoso. Los combustibles en estado sólido son naturales y artificiales, siendo algunos ejemplos la madera, carbón, residuos de biomasa. Los

combustibles en estado líquido son alcoholes y derivados del petróleo, pueden ser también residuales, algunos ejemplos son los gasóleos y fuelóleos. En estado gaseoso se encuentran los combustibles residuales, de gas natural, gases líquidos de petróleo y biogás; son aquellos gases como el propano, butano y gases de horno alto.

Las formas de combustión dependerán del estado en que se encuentre el combustible; puede darse por combustión homogénea en estado gaseoso.

La reacción química se da cuando la mezcla aire – combustible tiene lugar. La mezcla es producida por la turbulencia en la corriente de aire y combustible a la salida de los quemadores. La combustión heterogénea se da con combustibles sólidos y líquidos, se necesita un mayor tiempo de ignición y el combustible debe ser atomizado previo a la combustión (Rico y Carrasquero, 2017).

Según Sánchez (2007), en el horno se agrega el oxígeno por una corriente de aire, se necesita una combustión completa, debe existir suficiente oxígeno. La composición del aire es de 21 % oxígeno y 79 % nitrógeno, dada esta relación se debe calcular el volumen de aire de aproximadamente cinco veces el volumen de oxígeno necesario. Una combustión perfecta significa que el carbono se ha transformado en dióxido de carbono y el hidrógeno se ha convertido en agua en su totalidad.

No siempre se da combustión perfecta y completa, existe un límite de inflamabilidad del combustible.

Puede existir una combustión completa pero no perfecta, esto se presenta cuando hay más oxígeno del necesario. Si la relación aire – combustible es muy pequeña el combustible será muy pobre para quemarse; si la relación aire –

combustible es muy grande la mezcla será excesivamente rica para arder (Hernández y Suárez, 2020).

Otro tema importante es la transferencia de calor. Se entiende por transferencia de calor a la energía en tránsito dada una diferencia de temperaturas (Hernández y Suárez, 2020).

Los tipos de transferencia de calor pueden ser por conducción, convección y radiación.

Transferir calor por conducción es tener una diferencia de temperatura en un medio estacionario, puede ser sólido o un fluido. La transferencia por convección se da entre con un fluido en movimiento circulando o pasando por una superficie, a distintas temperaturas. Transferir calor por radiación es entre dos superficies con temperatura que emiten la energía en forma de ondas electromagnéticas.

Al terminar la etapa de calentamiento y enfriamiento en el horno, la tira de acero pasa a la galvanización, sumergiéndose en una paila que contiene metal fundido con zinc, aluminio y antimonio para recibir el baño de galvanizado.

El proceso de galvanización por inmersión en caliente se realiza cuando la pieza de acero está limpia de oxidantes y se sumerge en el zinc fundido a una temperatura de 450 °C. Una serie de capas inter metálicas se forma debido a la reacción metalúrgica entre el hierro y el zinc, la velocidad de reacción es muy rápida y se puede observar una agitación considerable en el baño de zinc (Delgado y Bravo, 2016).

El baño de galvanizado se realiza en la paila, la temperatura de la lámina y del zinc fundido deben ser similares para evitar el choque térmico que aumenta la generación de escoria. El acero entra a la paila para ser flexionado por un rodillo sumergido que da salida al material del baño de zinc, pasa por un barrido de aire a presión para lograr la capa de recubrimiento.

En la extracción de la pieza del baño de galvanización se forma una capa compuesta de zinc puro debido a la fricción del baño, después del enfriamiento se puede observar el aspecto brillante asociado a los productos galvanizados (Delgado y Bravo, 2016).

El barrido de aire a presión se realiza con las cuchillas de aire, estas pueden acercarse o alejarse entre sí, también se puede variar el ángulo de posicionamiento de estas para controlar la capa de adherencia; permanecen equidistantes una de la otra para asegurar que la capa esté pareja en ambos lados, inferior y superior de la tira de acero. La capa de zinc se agrega en gramos de zinc por área superficial sobre el acero. La limpieza de las cuchillas de aire durante el proceso es importante, en las boquillas se quedan tapones y se debe utilizar un rayado, compuesto de acero templado, con filo en uno de sus extremos. Este rayador se pasa a lo largo de las cuchillas hasta eliminar las acumulaciones de zinc.

En esta sección es importante tomar en cuenta las variables de control: composición química del baño de metal fundido, velocidad de enfriamiento, temperatura del baño de metal fundido y temperatura de la lámina. Acá es donde se adquieren las propiedades químicas anticorrosivas del material.

La composición química del baño de galvanizado es compuesta por zinc con agregados de aluminio y antimonio como microaleantes.

El aluminio mejora la adhesión del recubrimiento de zinc, y controla la reactividad del hierro con el zinc, el aluminio disuelto y el hierro de la lámina forman una capa inter metálica que inhibe la reacción del hierro con el zinc. El antimonio es agregado para controlar el tamaño de la flor y mejorar la fluidez del baño, favorece el proceso de escurrido en las cuchillas de aire (Sánchez, 2007).

La flor da la apariencia superficial de la lámina galvanizada, es el patrón de copo de nieve que se observa, este patrón se forma durante la adherencia del zinc fundido a la lámina de acero, enfriándose a su punto de solidificación. No hay especificaciones para definir el tamaño de la flor, el control se define cualitativamente, fundamentado en la especificación ASTM A 653/A 653 M.

Cuando se retira el acero del baño de galvanización, el zinc presenta una superficie brillante y pulida. Con el tiempo esta se vuelve gris porque la superficie reacciona al oxígeno, el agua y el dióxido de carbono de la atmósfera, que permite la formación de una película protectora compleja, pero fuerte y estable, que se pega con firmeza al zinc (Delgado y Bravo, 2016).

El tamaño de la flor puede ser regular, mínimo o libre de floreado. El floreado regular tiene cristales de zinc visibles, cuando no existe velocidad de enfriamiento controlada produce un tamaño de flor variable. El floreado mínimo es visible a los ojos, más pequeño que el regular; el crecimiento de la flor es controlado y reducido por otros métodos de producción. El libre de floreado, no se tiene una estructura de flor visible con facilidad, el acabado se logra por una combinación química del baño de recubrimiento y el enfriamiento.

El aluminio debe controlarse en el proceso, se quiere que la generación de escoria generada por el aluminio sea casi nula. Si la concentración de aluminio se encuentra muy baja se pueden tener problemas de capa muy gruesa, y

desprendimiento de zinc que afecta la adherencia de la capa, formando escoria en el fondo de la paila. Si la concentración de aluminio es muy alta se forman acumulaciones de zinc, y se aumenta el costo por agregar más metal del necesario y puede generar problemas en aplicaciones de construcción.

La escoria, compuesto inter metálico, generada en reacción con el aluminio agregado al baño de zinc y con el hierro disuelto de la lámina que corre. Se forma dentro del baño de zinc y luego flota hacia la superficie (Carrillo, 2014).

La formación de escoria tiene causas: los cambios de temperatura en la paila, cambios drásticos en la temperatura de los ventiladores de enfriamiento forzado, alta diferencia de temperatura entre zona de enfriamiento forzado y metal fundido en paila, y cambios bruscos en la composición química. Es importante tener claro que la escoria no puede evitarse, sólo controlarse y minimizar su formación.

Las pailas pueden ser de tipo cerámico o metálico, estas últimas son las utilizadas en este proceso, el calor se forma usando resistencias eléctricas. Existen pailas de pre – fusión, en este proceso los lingotes no son introducidos en la paila principal y se tienen variaciones mínimas de temperatura y menor acumulación de escoria en la paila principal.

Sigue una segunda fase de enfriamiento que reduce la temperatura de la tira de lámina por convección forzada de aire a temperatura ambiente y enfriamiento con agua por aspersion, con esto la temperatura de la tira se acerca a los 50 °C según indica Sánchez (2007).

Posteriormente, está el tratamiento de tenso nivelado para mejorar la planeza del material e igualar las fibras longitudinales del material, para evitar defectos en el material.

Al finalizar, se agrega tratamiento químico superficial, con una base de cromo para producir un recubrimiento orgánico mejorando la adhesión y aumentando la protección a la corrosión en la tira de acero ya galvanizado.

Finalmente se tiene la sección de salida, la función principal es enrollar nuevamente la tira de lámina para convertirla en rollo y cortar de acuerdo con el peso requerido. Teniendo al final de esta sección rollos de acero galvanizado disponibles para posterior transformación en roladoras en frío para producir perfiles de construcción.



## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso de galvanizado, inmersión en caliente

2.1.1. Etapa de precalentamiento

2.1.2. Etapa de recocido

2.1.3. Etapa de enfriamiento controlado

2.1.4. Etapa de enfriamiento forzado

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Análisis del proceso de galvanizado por inmersión en caliente

3.1.1. Toma de datos de muestreo

3.1.2. Análisis de datos y comportamiento actual

3.1.3. Análisis de posibles causas

3.1.4. Implementación de controles

- 3.1.4.1. Control de temperatura del acero durante el proceso
- 3.1.4.2. Propuesta de cambios en instrumentación utilizada en el proceso
- 3.1.4.3. Propuesta de cambios en materia prima de adición para composición química del baño de galvanizado.
- 3.1.5. Análisis de nuevos datos y cambios en el comportamiento

#### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Análisis de cambios en variables
- 4.2. Análisis de costos
- 4.3. Optimización del consumo de materias primas durante el proceso de galvanizado por inmersión en caliente

#### 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

Se presenta la metodología de investigación aplicable al proyecto, desde la fase investigativa y de recopilación de datos y muestras hasta la fase de desarrollo de las distintas etapas y posibles acciones a implementar como métodos de control.

### **9.1. Características del estudio**

El proyecto de investigación tendrá las siguientes características.

#### **9.1.1. Enfoque**

El presente proyecto presenta un enfoque cualitativo, a pesar de basarse en el análisis y recopilación de datos numéricos, no busca validar una hipótesis sino apegarse a la teoría ya existente y documentada sobre las propiedades y cualidades de la generación de escoria durante el proceso de galvanización por inmersión en caliente. Este enfoque favorece la interpretación y comparación de los datos obtenidos en el muestreo. Se basa en el razonamiento inductivo ya que busca comprobar teoría generalizada sobre el control de los parámetros para ajustar la generación de escoria y reducirla al mínimo posible.

#### **9.1.2. Alcance**

El alcance de investigación para el proyecto de análisis de comportamiento en la búsqueda de la optimización del consumo de materias primas es de tipo descriptivo. En principio está basado en la recopilación de datos de muestreo. El

análisis de la información obtenida permite realizar ajustes en control operacional apegados a tres grandes rubros para observar el cambio en el comportamiento dado en la composición química de los metales como materia prima. Esto permite evaluar y definir si la combinación de estos tres factores a considerar, de dos o la implementación de uno solo favorece para disminución de escoria superficial sobre el metal fundido. El objetivo es la reducción de los costos operativos sobre el uso de materias primas, y reducir la cantidad de pérdida que se tiene, orientando los resultados al aprovechamiento de los metales en el proceso de galvanización como tal y no en el desperdicio que se genera.

### **9.1.3. Diseño**

El diseño de la investigación está enfocado en el diagnóstico de cómo afectan los tres factores a controlar dentro de la generación de la escoria; cuantificando cuál de ellos favorece en mayor medida y en menor medida la disminución de este desperdicio, con el objetivo de reunir los esfuerzos en los que impliquen una menor generación, para maximizar la optimización en el uso de los metales. Se parte de un problema, que en este proyecto es la generación de escoria encontrándose fuera de objetivo, para controlar y minimizar este indicador fuera de objetivo se pretende basarse en la teoría ya existente de la metalurgia para poner en práctica conceptos que ayuden a reducir la generación de escoria durante el proceso de galvanización.

## **9.2. Unidad de análisis**

La unidad de análisis son los factores que incrementan o decrementan la generación de escoria superficial sobre el metal fundido utilizado para el proceso de galvanización, para reducir los desperdicios que se general y poder maximizar

el aprovechamiento en el recurso de materias primas para abaratar costos de producción.

### 9.3. Variables

A continuación, se presentan las variables utilizadas en la investigación.

Tabla I. **Unidad de análisis**

<b>Nombre de la variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>	<b>Indicador</b>
Establecer etapas del proceso	Proceso de producción: pasos secuenciales planificados y realizados secuencialmente para la fabricación de un producto.	Definir las etapas del proceso de producción para el acero galvanizado. Con el uso actual de materias primas, siendo estas los metales utilizados para el recubrimiento de fundición.	Gramos de zinc por área, en metros cuadrados sobre la tira de acero galvanizado.
Condiciones operativas en los parámetros de control	Conjunto de actividades orientadas a la transformación de recursos o factores en la generación de un producto.	Etapas importantes durante la galvanización de acero para mantener y garantizar sus propiedades mecánicas y químicas.	Temperatura de lámina. Temperatura de metal fundido.

Continuación tabla I.

---

Optimización en consumo de materias primas.	El uso adecuado y óptimo de los recursos utilizados dentro del proceso de producción para un producto.	La reducción en el desperdicio generado por el mal aprovechamiento de los metales en el proceso de fundición	Consumo de metales. Costos.
---	--	--	-----------------------------

---

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### **9.4. Fases del estudio**

Se describen las fases implementadas para el desarrollo de la investigación:

##### **9.4.1. Fase 1: revisión de la teoría y documentación**

En esta fase se busca conocer la teoría aplicable a la generación de escoria para analizar los tres factores detectados que influyen en la generación de la merma que aún contiene metal fundido aprovechable dentro del proceso de fundición. Estos tres factores para considerar son: la temperatura de lámina al salir del horno conformado por zonas de fuego directo y calor por resistencias, previo a ingresar a la paila de metal fundido para el baño de recubrimiento de zinc. La instrumentación utilizada para el escurrimiento de la escoria al ser retirada de la superficie del metal fundido para garantizar un adecuado escurrimiento del zinc restante en la escoria que se retira y la adición de barras de metal de mayor pureza con bajos contenidos de hierro.

#### **9.4.2. Fase 2: toma de datos de muestreo**

Durante sesenta días en cada turno de producción conformado por doce horas se toman muestras de análisis de paila que permiten conocer la cantidad de hierro que se tiene dentro del metal fundido; el hierro propicia la generación de esta escoria por lo que mantenerlo bajo control es imperativo para el proceso productivo. Se realiza un análisis de una muestra relativamente pura del metal fundido utilizado como recubrimiento en la tira de lámina, y se analiza una muestra de la escoria para conocer la cantidad de zinc y otros metales contenidas en ella.

#### **9.4.3. Fase 3: análisis de datos y comportamiento**

En esta fase se busca analizar en masa el comportamiento de la escoria generada durante el proceso productivo. Se genera una base de datos con la información obtenida y se realizan gráficas que permitan facilitar el análisis del comportamiento en la composición de los metales utilizados. Con base en estas gráficas se deducen y confirman los factores anteriores a considerar para la disminución de la escoria. Acá se analiza la fluctuación que tienen los metales antes las diversas condiciones de operación.

#### **9.4.4. Fase 4: análisis de posibles causas**

Se busca conocer cuáles condiciones de operación propician o minimizan la generación de escoria en la superficie del metal fundido, con el objetivo de implementar controles más estrictos en las que se detecte que generan valores fuera de los parámetros trazados como objetivo.

#### **9.4.5. Fase 5: control de temperatura de lámina**

Se analizan las condiciones operativas que aumentan o disminuyen la temperatura de la lámina de acero de proceso. Se busca reducir la temperatura para acercarla a un valor muy similar o igual a la temperatura del metal fundido. El objetivo de esto es verificar que se disminuya el choque térmico generado por la gradiente de temperatura entre la lámina de proceso y el metal fundido; el choque térmico por concepto aumenta la generación de escoria, por lo que evitarlo es esencial.

#### **9.4.6. Fase 6: cambio en la instrumentación utilizada**

En esta fase se detecta un área de oportunidad que no tiene injerencia directa dentro de las condiciones operativas, más bien es un procedimiento aparte pero que debe realizarse para mantener la pureza del metal en fundición como recubrimiento de capa. Cuando se genera la escoria superficial esta debe ser retirada haciendo uso de instrumentación creada específicamente para este proceso, se ha detectado que la práctica operativa sugiere que no se tiene un adecuado escurrimiento del metal fundido, por lo que al ser retirada la escoria también se retira cierta parte de metal aún aprovechable dentro del proceso productivo.

Se tiene interés en mejorar la instrumentación para garantizar el adecuado escurrimiento del metal útil de la escoria que se genera. Cabe resaltar que no es posible reducir la escoria a cero, ya que es parte normal y natural del proceso de galvanización, pero sí se busca que esté dentro de un rango definido en el cual los costos operativos son sostenibles.

#### **9.4.7. Fase 7: mayor pureza en las barras de adición**

Otra área de oportunidad implica mejorar las barras de adición que se agregan para mantener la composición química del baño de recubrimiento. El baño de recubrimiento para el proceso de galvanización está conformado por zinc, aluminio, antimonio y hierro. Si se agregan barras que contengan un bajo contenido en hierro, estas mejorarán el rendimiento del metal fundido en general, si se logra reducir el hierro se logra reducir la generación de escoria y por ende significa un mayor aprovechamiento del metal.

#### **9.4.8. Fase 8: análisis de nuevos datos sobre el comportamiento químico del metal fundido**

Con los ajustes de operatividad y las nuevas condiciones operativas se busca analizar los nuevos datos obtenidos para conocer cuáles han sido de mayor beneficio para la reducción de la escoria generada y cuáles han tenido un menor impacto. El objetivo es que una combinación de los tres factores tomados en cuenta para este proyecto maximice la optimización del uso de las materias primas, siendo estos los metales en general; aunque es de considerar que también es importante la reducción de costos operativos en cierta medida, por lo que se prioriza la condición que resulte mejor y de mayor retorno.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se recopilará información sobre el comportamiento de la escoria superficial generada como información histórica obtenida previo a realizar alguna mejora implementada, esto forma parte de la información documentada que se reporta en los resultados de gestión mensualmente. A partir de esta información se obtendrá el dato conocido como actual en el que se encuentra la generación de escoria, este dato es medido en gramos por área.

Se determinarán los factores que aumentan o disminuyen la generación de escoria sobre el metal fundido, con base en la teoría de la metalurgia aplicable al proceso de galvanizado por inmersión en caliente. El objetivo de este análisis es definir los parámetros de control. Se analizará continuamente la composición química del baño de metal fundido de recubrimiento en la paila, para conocer los porcentajes de aluminio, antimonio y hierro que se tienen.

Se definen y analizan el comportamiento de tres parámetros de control los cuales son: la temperatura de lámina previo al ingreso del metal fundido se busca controlar y aproximar la temperatura del acero a la temperatura del metal fundido dentro de la paila, con el fin de evitar el choque térmico. La diferencia de temperatura contribuye en el aumento de la generación de escoria.

Se analizarán las herramientas y accesorios utilizados para el proceso de retiro de escoria, se busca implementar mejoras que permitan obtener un mejor escurrimiento del zinc de proceso de la escoria que se retira. Actualmente al retirar la escoria de la superficie con las herramientas disponibles no se tiene un

escurrimiento óptimo lo que significa que se desperdicia zinc que aún es aprovechable dentro del proceso de galvanización del acero.

Se buscará mejorar la composición química de las barras de metal de adherencia, se busca una mejor pureza con bajos porcentajes de hierro en las barras de metal que se agregan en el proceso del control de parámetros operativos en metales de fundición. Esto implica utilizar barras con mejores características de otros proveedores o del mismo proveedor solicitadas bajo este nuevo criterio. Los metales que se analizan continuamente son los porcentajes de aluminio, antimonio y hierro. Estos tres metales juegan un papel importante para la reducción o aumento de la escoria generada sobre la superficie del metal fundido. Se pretende realizar pruebas con barras de adición de mayor pureza para observar el comportamiento en la generación de escoria.

Se analizarán los tres métodos implementados durante determinados períodos de tiempo definidos en la metodología de investigación, para conocer cuál arroja mejores resultados para la reducción de la generación de escoria superficial sobre el metal fundido, el objetivo de estos resultados es la disminución de costos de materia prima, que es el zinc, optimizar su consumo y mantener el control sobre este, definido dentro del indicador aceptado por el departamento de producción.

## 11. CRONOGRAMA

Tabla II. Cronograma de investigación

Nombre de la tarea	Duración	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
Aprobación del protocolo	50 días																		
Ejecución de la investigación	205 días																		
Revisión de la teoría y documentación	15 días																		
Toma de datos de muestreo	60 días																		
Análisis de datos y comportamiento	30 días																		
Análisis de posibles causas	20 días																		
Control de temperatura de lámina	20 días																		
Cambio en instrumentación utilizada	20 días																		
Mejor pureza en barras de adición	20 días																		
Análisis de nuevos datos y comportamiento	20 días																		
Elaboración del informe final	60 días																		
Redacción de resultados	20 días																		

Continuación tabla II.

Redacción de discusión de resultados	20 días	
Redacción de conclusiones	20 días	
Aprobación del informe final	60 días	
Aprobación del asesor	15 días	
Aprobación del coordinador	15 días	
Aprobación del revisor	15 días	
Aprobación de la Escuela de Postgrado de Ingeniería	15 días	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Se presenta el presupuesto estimado para la realización del proyecto de investigación:

Tabla III. **Presupuesto**

	Ítem	Cantidad	Costos (Q)	Fuente de financiamiento
Recurso humano	Asesor	1	Q. 0.00	No aplica
	Investigador	1	Q. 0.00	No aplica
	Personal operativo de la empresa	5	Q. 0.00	No aplica
Recursos materiales	Útiles y papelería	1	Q. 550.00	Propia
Recursos físicos	Gasolina		Q. 1,500.00	Propia
	Depreciación de vehículo	1	Q. 750.00	Propia
Recursos tecnológicos	Computadora portátil	1	Q. 6,500.00	Propia
	Internet		Q. 700.00	Propia
	Red móvil de datos		Q. 897.00	Propia
Equipo	No aplica		Q. 0.00	No aplica

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El presupuesto será cubierto por el investigador en su totalidad, la suma total es de Q. 10,897.00



### 13. REFERENCIAS

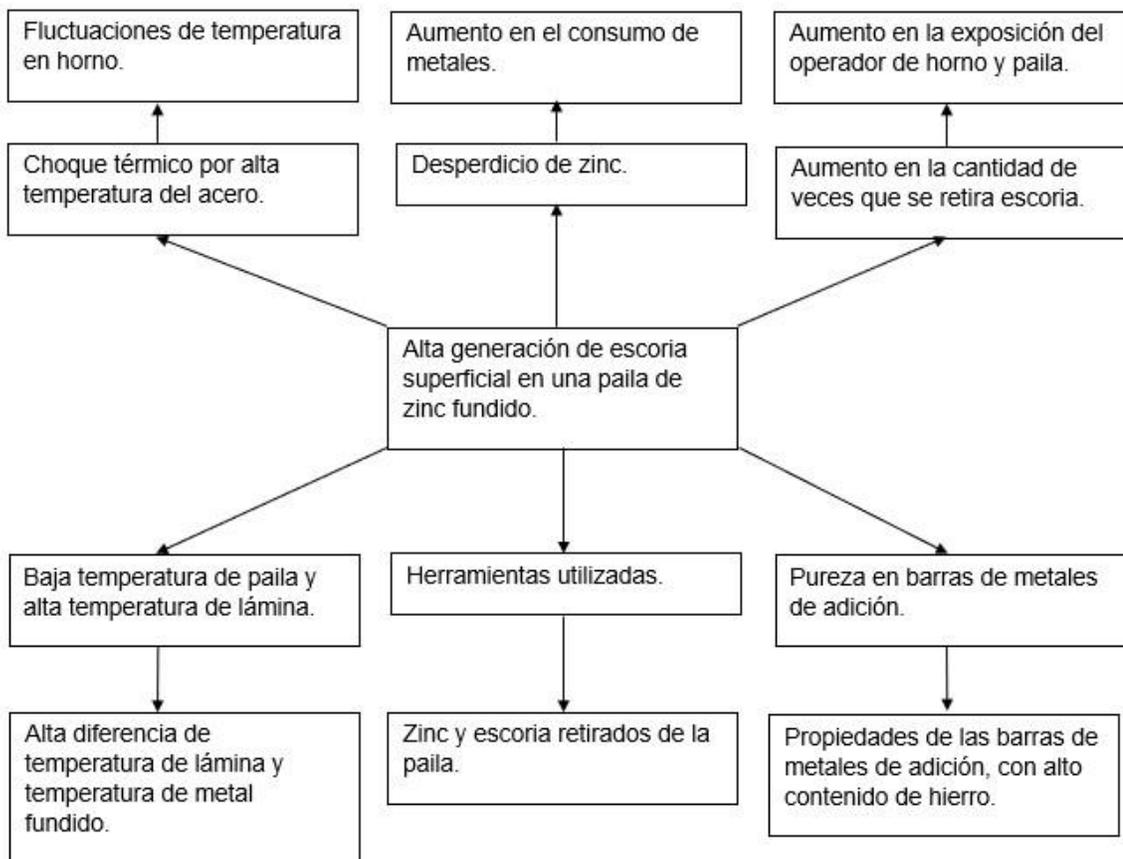
1. Carrillo, J. (2014). *Estudio de la recuperación de zinc presente en los baños agotados de decapado procedentes de las industrias de galvanizado procedentes de las industrias de galvanizado de zinc en caliente mediante técnicas electroquímicas* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/39370>.
2. Chico, J. J. (2018). *Caracterización del grado de adherencia y difusión de la capa de aleación hierro – zinc para perfiles galvanizados de acero estructural de bajo contenido de carbono* (Tesis de licenciatura). Escuela politécnica nacional, Ecuador. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19358>.
3. Delgado, C. y Bravo, M. (2016). *Estudio de prefactibilidad de una planta de galvanizado en caliente para el sector industrial metal mecánica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú. Recuperado de: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/621668/Estudio+de+Prefactibilidad+de+una+Planta+de+Galvanizado+en+Caliente+para+el+sector+Industrial+Metal+Mecánica.pdf?sequence=1>.
4. Hernández, J. y Suárez, M. (enero, 2020). Efecto de la composición química del baño en la microestructura y resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente. *Revista de*

*Ciencia y Tecnología*, (23), 40-52 Recuperado de:  
[http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-860X2020000100040yscript=sci\\_arttext](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-860X2020000100040yscript=sci_arttext).

5. Rico, O., y Carrasquero, A. (julio, 2017). Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente. *Revista de Ciencia y tecnología*, (18), 30-39. Recuperado de:  
<https://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius/article/view/18.2017.04>.
6. Sánchez, M. (2007). Factores operacionales que afectan el comportamiento del acero galvanizado por inmersión en caliente. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, (30), 188-197. Recuperado de:  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0254-07702007000400022&lng=pt&nrm=iso](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0254-07702007000400022&lng=pt&nrm=iso).

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

Problema: ¿cómo disminuir la formación de escoria superficial generada en el proceso de galvanizado de acero por inmersión en caliente, para optimizar el consumo del metal fundido y reducir costos?

Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Metodología	Técnicas	Indicadores
¿Cómo reducir la cantidad de escoria superficial generada en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente en una paila de zinc?	Optimizar el consumo de zinc, reduciendo la formación de escoria superficial en una paila de metal fundido en el proceso de galvanizado de acero por inmersión en caliente.	Gramos de zinc por área en metros cuadrados	Mediciones de composición química del baño de metal fundido.	Recopilación de información histórica sobre el comportamiento de la escoria superficial.	Cantidad de gramos de zinc en capa de recubrimiento por metro cuadrado.
¿Cuáles condiciones generan un aumento en la formación de escoria en la superficie del metal fundido?	Conocer las condiciones de operación que generan un aumento en la formación de escoria en la superficie del metal fundido.	Parámetros de control, operativos.	Estudio sobre los tres factores a controlar para mejorar el rendimiento de la materia prima,	Implementación de nuevas técnicas y parámetros de operación en planta.	Temperatura de lámina. Temperatura de metal fundido.

Continuación apéndice 2.

¿Cómo controlar las condiciones que aumentan la formación de escoria en la superficie del metal fundido?	Controlar las condiciones analizadas para reducir la escoria, y mejorar el aprovechamiento del zinc durante el proceso de galvanizado para cumplir con el objetivo definido por el área a cargo.	Implementación de mejoras y ajustes técnicos operativos a los equipos y sistemas existentes.	Selección y descarte de las técnicas operativas que menor impacto generen sobre la reducción de la escoria superficial	Análisis de resultados de los nuevos valores, tras la implementación de controles operativos.	Nuevos parámetros de operación  Nuevos valores estándar.
¿Cómo impacta en los costos la reducción de la generación de escoria superficial?	Optimizar costos en el consumo de metales al disminuir el desperdicio de zinc en la paila de galvanizado.	Gestión de costos, reducción de costos en la mejora del aprovechamiento de las materias primas.	Generación de datos obtenidos mediante análisis de costos y consumo de metales.	Análisis de optimización de consumos de materia prima y costos.	Consumo de metales, materias primas.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.