

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE GALVANIZADO POR  
ELECTRODEPOSICIÓN EN SUSTRATOS METALICOS EN LA EMPRESA HRS  
S.A.S.**

**Trabajo presentado para optar por el título de Ingeniero Químico por:**

**Vivian Mariana Latorre Hernandez**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2020**



**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO DE GALVANIZADO POR  
ELECTRODEPOSICIÓN EN SUSTRATOS METALICOS EN LA EMPRESA HRS  
S.A.S.**

**Vivian Mariana Latorre Hernandez  
Código: 1090501865**

**Director: Jacqueline Corredor Acuña, Msc.  
Codirector: Héctor Restrepo Soto, Msc.**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER  
2020**

## Nota de Aceptación

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad de Pamplona para optar al título de Ingeniero(a) Químico(a)

---

Jacqueline Corredor Acuña  
Director(a) del Programa de Ing.  
química  
Presidente del Jurado

---

Erick German Yanza Hurtado  
Jurado 1

---

Sonia Esperanza Reyes Gómez  
Jurado 2

Pamplona junio de 2020

A mis padres.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los docentes quienes me instruyeron en este aprendizaje quienes con dedicación me instruyeron a lo largo de mi carrera, a mi directora la profe Jacqueline, al profesor Julián Méndez porque dedicó parte de su tiempo en aconsejarme, a la profesora Carla con quien conté para resolver dudas y estuvo dispuesta a colaborar en todo momento, a mi compañero Jeison Galván quien me facilitó amablemente su trabajo.

Igualmente, a quienes de una u otra manera conté con su apoyo, a las miopes Karen y Derly, Aleja y Paz les doy muchas gracias por su grata compañía. A mis amigos Alex, Briant, Doritos por confiar y apoyarme incondicionalmente. A ti Miguel por tomarte parte de tu tiempo en ayudarme. Lili por preocuparte por mí mil abrazos mujer. A mi hermana Cindy con quien pasamos noches trabajando, acompañándonos y apoyando en estos tiempos difíciles y siempre me dio energías.

Finalmente doy gracias a Dios y mi familia por el gran esfuerzo que hicieron para que pudiera estudiar, en especial a mis papas y mi tía Challa.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
<b>3</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>18</b>
	DEFINICION DEL PROBLEMA.....	18
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Aspectos generales de la galvanía</b> .....	<b>19</b>
4.1.1	Galvanotecnia.....	19
4.1.2	Otros métodos de protección de metales .....	19
4.1.3	Invencción de la Galvánica .....	20
4.1.4	La Galvánica en el sector Industrial .....	20
<b>4.2</b>	<b>Normas para el recubrimiento de Electro-depósitos</b> .....	<b>21</b>
4.2.1	ASTM 456.....	21
4.2.2	ASTM B 633 .....	22
4.2.3	ASTM B 604 .....	22
<b>4.3</b>	<b>fundamentos de la electrodeposición</b> .....	<b>22</b>
4.3.1	Electrolisis .....	22
4.3.2	Ley de Faraday.....	23
<b>4.4</b>	<b>La Celda electrolítica (Celda Hull)</b> .....	<b>25</b>
4.4.1	Descripción.....	25
4.4.2	Función.....	25
<b>4.5</b>	<b>Componentes principales de una celda Hull</b> .....	<b>26</b>
4.5.1	Celda .....	26
4.5.2	Rectificador.....	27
4.5.3	Cátodo .....	27
4.5.4	Ánodo .....	27
<b>4.6</b>	<b>Parámetros a obtener en cuenta en el proceso de Galvanizado en una planta</b> <b>28</b>	
<b>4.7</b>	<b>Etapas del recubrimiento</b> .....	<b>29</b>
4.7.1	Pretratamiento .....	29
4.7.2	Preparación de la pieza a recubrir. ....	30
4.7.3	Pos-tratamiento. ....	33
4.7.4	Electro deposición de multilayers.....	33
4.7.5	Recuperación y secado.....	33
<b>4.8</b>	<b>mecanismos de electrodeposicion de los recubrimientos</b> .....	<b>33</b>
4.8.1	Cinética de la deposición de níquel .....	33

4.8.2	Cinética de la deposición de cobre .....	34
<b>4.9</b>	<b>Baño de níquel.....</b>	<b>35</b>
4.9.1	Níquel Watts .....	36
4.9.2	Níquel brillante.....	36
4.9.3	Níquel semibrillante .....	36
<b>4.10</b>	<b>baño cobre.....</b>	<b>37</b>
4.10.1	Cobre flash.....	37
4.10.2	Cobre Alcalino .....	37
4.10.3	Cobre acido brillante .....	38
<b>4.11</b>	<b>Equipos principales en una planta de galvanizado .....</b>	<b>38</b>
4.11.1	Contenedor electrolítico .....	38
4.11.2	Calefactores .....	39
4.11.3	Fuente de corriente .....	39
4.11.4	Sujetadores .....	39
4.11.5	Agitadores .....	41
<b>5</b>	<b><i>METODOLOGÍA.....</i></b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>preparación y optimización de los baños de recubrimiento .....</b>	<b>42</b>
5.1.1	Preparación de la pieza a recubrir .....	42
5.1.2	Preparación de los baños.....	43
<b>5.2</b>	<b>parámetros de operación en el proceso de electrodeposición.....</b>	<b>47</b>
5.2.1	Temperatura .....	47
5.2.2	Masa del metal depositada .....	47
5.2.3	Densidad de corriente .....	48
5.2.4	Poder de penetración .....	49
<b>6</b>	<b><i>RESULTADOS Y ANALISIS.....</i></b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Níquel .....</b>	<b>50</b>
<b>6.2</b>	<b>Cobre flash .....</b>	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b>Cobre alcalino .....</b>	<b>54</b>
<b>6.4</b>	<b>Cobre acido brillante.....</b>	<b>56</b>
<b>6.5</b>	<b>Masas depositadas .....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b><i>DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA.....</i></b>	<b>60</b>
<b>7.1</b>	<b>Etapas previas e intermedias al revestimiento .....</b>	<b>60</b>
<b>7.2</b>	<b>Equipos y requerimientos .....</b>	<b>61</b>
7.2.1	Contenedores .....	61
7.2.2	equipo de corriente.....	62
7.2.3	equipo de agitación .....	62
7.2.4	equipo de calentamiento .....	62
7.2.5	dimensionamiento del reactor electrolítico .....	63
7.2.6	Ánodos .....	67
7.2.7	Sujetadores .....	67



<b>7.3</b>	<b>DESCRIPCION DEL PROCESO DE LA PLANTA.....</b>	<b>68</b>
7.3.1	DIAGRAMA PFD .....	68
7.3.2	Distribución de la planta .....	72
<b>8</b>	<b>ANALISIS ECONOMICO.....</b>	<b>74</b>
<b>8.1</b>	<b>costos directos.....</b>	<b>74</b>
8.1.1	Costo de equipos ( $C_p$ ) .....	74
8.1.2	Costo de materia prima ( $C_{RM}$ ) .....	77
8.1.3	Costo mano de obra operativa ( $CoL$ ) .....	78
<b>8.2</b>	<b>COSTOS INDIRECTOS .....</b>	<b>78</b>
8.2.1	Costo de consumo energético.....	78
8.2.2	Costo de servicio de acueducto .....	80
<b>8.3</b>	<b>ANALISIS DE COSTOS TOTALES .....</b>	<b>80</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>83</b>
	<b>Anexo A.....</b>	<b>90</b>
	<b>Anexo B.....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación del sector metal mecánico. ....	21
Figura 2. Esquematación de la electrodeposición de Plata sobre una cuchara. .	23
Figura 3. Montaje del sistema de una celda Hull. ....	26
Figura 4. Dimensiones de una Celda Hull.....	28
Figura 5. Esquematación de un proceso de desengrase en una línea galvánica. .....	31
Figura 6. Formas de las gancheras. ....	40
Figura 7. Formas básicas de los bastidores. ....	40
Figura 8. Prueba número 1 del baño de níquel.....	50
Figura 9. Prueba No. 2 del recubrimiento de níquel.....	51
Figura 10. Muestra No. 3 del recubrimiento de níquel. ....	52
Figura 11. Prueba número 1 del recubrimiento de baño de cobre flash. ....	53
Figura 12. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre flash. ....	54
Figura 13. Prueba número 1 del recubrimiento de cobre alcalino.....	55
Figura 14. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre alcalino.....	55
Figura 15. Prueba número 1 de la deposición de cobre ácido brillante. ....	56
Figura 16. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre ácido brillante.....	57
Figura 17. Prueba número 3 del recubrimiento de cobre ácido brillante.....	58
Figura 18. Medidas para el cálculo de la distancia media.....	64
Figura 19. Descripción de la línea de galvanizado de la planta piloto.....	71
Figura 20. Dimensionamiento y distribución de la planta. ....	72
Figura 21. Análisis de los costos directos. ....	80
Figura 22. Análisis de costos indirectos.....	81

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equivalentes electroquímicos de los metales. ....	24
Tabla 2. Niveles de concentración de los ácidos de acuerdo al metal base (superficie de la pieza de trabajo). ....	32
Tabla 3. Datos operativos trabajados en el desengrase electrolítico. ....	43
Tabla 4. Formulación base del baño de níquel. ....	44
Tabla 5. Condiciones de operación para la deposición de níquel. ....	44
Tabla 6. Formulación base para el baño de cobre flash. ....	45
Tabla 7. Condiciones de operación para la deposición de cobre flash. ....	45
Tabla 8. Condiciones de operación utilizadas en el recubrimiento de cobre alcalino. ....	45
Tabla 9. Formulación base para el baño cobre alcalino. ....	46
Tabla 10. Datos de operación del cobre ácido brillante. ....	46
Tabla 11. Formulación base para el baño de cobre ácido brillante. ....	47
Tabla 12. Adiciones realizadas a la muestra de baño de níquel para la muestra número 2. ....	51
Tabla 13. Adiciones realizadas al baño de níquel para la muestra número 3. ....	52
Tabla 14. Formulación del baño de Cobre flash optimizado. ....	53
Tabla 15. Formulación optimizada para el baño de cobre alcalino. ....	56
Tabla 16. Adiciones de abrillantadores al baño de cobre ácido brillante. ....	57
Tabla 17. Segundo sistema de concentración adicionado al cobre ácido brillante. ....	57
Tabla 18. Masas teóricas depositadas según la reacción química. ....	58
Tabla 19. Masas depositadas. ....	59
Tabla 20. Porcentajes de error de los valores de masas depositadas. ....	59
Tabla 21. Descripción de las etapas previas a cada baño. ....	60
Tabla 22. Dimensiones de los tanques de desengrase, activación y enjuague. ....	61
Tabla 23. Calores y potencias requeridas para el calentamiento. ....	63
Tabla 24. Distancias para el dimensionamiento del equipo. ....	64
Tabla 25. Medidas a tomar en cuenta para el largo del tanque. ....	65
Tabla 26. Dimensiones del reactor electrolítico. ....	65
Tabla 27. requerimientos mínimos para la construcción del tanque. ....	66
Tabla 28. Características de los posibles materiales de construcción de los tanques electrolíticos. ....	66
Tabla 29. Necesidades de los equipos de acuerdo a la operación. ....	68
Tabla 30. Descripción de la simbología. ....	73
Tabla 31. Costos a tomar en cuenta para el análisis económico. ....	74
Tabla 32. Precios de los ánodos. ....	76
Tabla 33. Costo de equipos. ....	76

Tabla 34. Costo de materias primas .....	77
Tabla 35. Costo de mano de obra.....	78
Tabla 36. costo energético de las operaciones.....	79
Tabla 37. Costo energético de los rectificadores .....	79
Tabla 38. Costos indirectos .....	80

## NOMENCLATURA

ASTM American Society for Testing and Materials.

e	electrón
aq	acuoso
s	solido
W	masa
Z	equivalente electroquímico
I	corriente
t	tiempo
F	constante de Faraday (96500 C)
C	Culombio
Cu	Cobre
g	gramo
A	Amperio
L	litro
V	Voltio
J	Joule
m	metro
W	Watts
DC	Densidad de corriente
N	moles
<i>a</i>	Área
Min	minuto
Q	calor (J o KJ)
Cv	Calor especifico
$\Delta T$	Diferencia de Temperatura
PP	Polipropileno
PVC	Cloruro de Polivinilo
FRP	Plásticos reforzados



## RESUMEN

HRS S.A.S es una empresa situada en la ciudad de Bogotá, dedicada a la fabricación de químicos especializados en el área del galvanizado tanto en frío como en caliente, donde se producen insumos necesarios para mantener los diferentes baños metálicos óptimos así como baños desengrasantes, los cuales son necesarios para preparar la pieza antes de los recubrimientos, sin embargo no se cuenta con una planta que realice las operaciones de recubrimientos con los baños que brinda la empresa, a manera de probar y mantener la calidad de los mismos, brindando la seguridad y respaldo de la calidad de los productos a sus clientes.

Por consiguiente, en este trabajo se expone un modelo de diseño de planta piloto para el proceso de galvanizado en materias primas metálicas de tipo decorativo, contando con las operaciones básicas de un galvanizado como lo son el flash de cobre, cobre alcalino níquel cobre ácido brillante.

En el proceso de dimensionamiento y caracterización se estableció que los tanques de los baños deben contar con medidas de 30 cm de largo, 24 cm de ancho y 35cm de alto, fabricados en polipropileno para mantener seguro los baños en el rango de temperatura de trabajo, se realizaron los cálculos necesarios para determinar las potencias y calores de cada operación, y se realizó una distribución de la planta para optimizar el espacio y reducir riesgos y derrames.

Teniendo en cuenta el número de equipos, las especificaciones de los mismos y el número de etapas por las que debe pasar la pieza en el galvanizado se realizó finalmente el análisis económico con el fin de evaluar los costos necesarios para la instalación de la misma, obteniéndose así que el costo para instalar la planta es de \$68.350.254 y un análisis de los costos de servicios que llevaría a operarla en un año para lo cual se estimó en \$3.339.169, dando finalmente un costo total de la inversión y operatividad de \$ 72.000.000.

**PALABRAS CLAVES:** Electrodeposición, celda Hull, plateados, recubrimiento, acabado.

## ABSTRACT

HRS SAS is a company located in Bogotá, dedicated to manufacture of specialized chemicals in the area of both hot and cold galvanizing, where the necessary supplies are produced to maintain the different optimal metal baths as well as degreasing baths, which They are necessary to prepare the piece before the coatings, however, there is no plant that performs the coating operations with the baths provided by the company, in order to test and maintain their quality, providing security and support. of the quality of the products to its clients.

Therefore, in this work, a pilot plant design model is exposed for the galvanizing process in metallic raw materials of a decorative type, counting on the basic operations of a galvanizing such as copper flash, alkaline copper, nickel and bright acid copper.

In the dimensioning and characterization process, it was established that the bath tanks must have measures of 30 cm long, 24 cm wide and 35 cm high, made of polypropylene to keep baths safe in the working temperature range. They made the necessary calculations to determine the powers and heats of each operation, and a distribution of the plant was made to optimize space and reduce risks and spills.

Taking into account the number of equipment, their specifications and the number of stages that the part must go through in the galvanizing, the economic analysis was finally carried out in order to evaluate the necessary costs for its installation, obtaining so the cost to install the plant is \$68.350.254 and an analysis of the costs of services that would take to operate it in a year for which it was estimated at \$3,339,169, finally giving a total cost of investment and operation of \$ 72,000,000.

Key words: Electrodeposition, Hull cell, silver, coating, finish.



## 1 INTRODUCCIÓN

En el campo de la industria el avance en los recubrimientos metálicos se ha convertido en una efectiva alternativa para la protección y decoración de piezas u objetos en muchos procesos de fabricación de productos, lo que ha llevado a este sector a desarrollar innovaciones enfocadas al aumento de su alcance y su durabilidad, reduciendo posibles problemas como el desgaste y la corrosión de las mismas (Nava, 2013). De esta forma el recubrimiento de metales hace referencia a la deposición de los mismos, lo cual se produce gracias a los iones presentes en una solución electrolítica mediante la aplicación de la corriente directa, de acuerdo con las leyes de Faraday la cantidad de sustancia depositada en el electrodo es proporcional a la intensidad de corriente y al tiempo de ejecución de la electrolisis donde la reacción se da en la superficie de separación entre el electrodo y la solución (B. B. Damaskin, 1980).

Es así como la actividad galvánica abarca a la acción que consiste en la deposición de un metal sobre una superficie ya sea metálica o no metálica (“Tratamiento de aguas residuales industriales - Aguas residuales urbanas,” n.d.) a través de la aplicación de una corriente, utilizando como medio un baño constituido de una solución de sales metálicas, realizándose por medio de la inmersión de la pieza en el baño, donde los iones presentes en la solución se reducen en la pieza a recubrir (Chávez Porras, Cristancho Montenegro, & Ospina Granados, 2009); por otra parte, es importante resaltar que los recubrimientos que presentan mejor adhesión y calidad son aquellos en los cuales las piezas previamente han pasado por un proceso extra como el pulido de la superficie y el desengrase (“Design, specification, inspection of galvanized products,” n.d.).

En este orden de ideas existen dos técnicas para la deposición del metal en la industria galvánica estas se dividen de acuerdo al metal a depositar; la primera de ellas es la electroformación de láminas en la cual se emplea estaño y cromo; la segunda es el revestimiento de protección o decoración en el cual se utilizan metales como níquel, cobre, plata o aleaciones como bronce (Galvanoplastia, 2013), Así, por ejemplo, entre los baños bases del proceso por el cual debe pasar una pieza son el flash de Cobre, cobre alcalino, Níquel y Cobre ácido brillante (CNPMLTA, n.d.). En cuanto los baños de tipo decorativo las piezas son sometidas a una serie de capas, además de pasar por el desengrase, el lavado, la activación ácida que ayudan a una mejor adhesión y preparación de la misma a fin de lograr la protección necesaria junto con el acabado indicado, en general el recubrimiento de una pieza involucra tres etapas: preparación de la superficie, tratamiento y acabado (Voytko, 2008).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar conceptualmente una planta a escala piloto para el proceso de galvanizado por electrodeposición de materiales ferrosos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar, formular y operar los baños electrolíticos de níquel flash de cobre, cobre alcalino y cobre ácido brillante.
- Diseñar la planta piloto de galvanizado útil para obtener chapados de diferentes metales como: Cobre, Cobre alcalino, Níquel, Cobre ácido.
- Realizar el análisis económico para la instalación de la planta piloto.

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### DEFINICION DEL PROBLEMA

Los acabados en piezas metálicas como herrajes y artículos de bisutería han brindado una agradable presentación a los productos, además de protegerlas contra factores como la corrosión que influyen en la durabilidad, sin embargo, para lograr una vida útil más extensa es necesario someterlos a una serie de operaciones en la industria que deben realizarse con sumo cuidado, puesto que de ello dependerá la calidad y atractivo de la pieza.

La empresa HRS especializada en el campo de la industria galvánica, brinda a sus clientes productos químicos y aditivos para baños de recubrimientos en su mayoría por electrodeposición, razón por la que se plantea como necesidad realizar la instalación de una planta piloto de las operaciones básica por las que son sometidas las piezas a fin de certificar la calidad de los componentes de cada baño y realizar pruebas para sus clientes, garantizando la confiabilidad de sus productos. Para llevar a cabo este proyecto se plantea la elaboración de un diseño conceptual, abarcando el estudio y análisis de los equipos y operaciones que conforman el proceso, el diseño de los tanques y finalmente un análisis económico sobre la inversión necesaria para su instalación.

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 ASPECTOS GENERALES DE LA GALVÁNICA

#### 4.1.1 Galvanotecnia

La galvanotecnia agrupa todos aquellos procesos en los que se deposita una capa metálica mediante la aplicación de una corriente sobre una pieza ya sea conductora (metálica) o no conductora (plástico, madera, cuero, etc), donde el metal se encuentra en forma de cationes en una solución electrolítica. El proceso general del galvanizado utiliza una celda electrolítica, que consiste en poner una carga negativa sobre el metal y sumergirlo en una solución contenida en sales metálicas (electrolitos) presentando los iones metálicos cargados positivamente, luego debido a las cargas negativas y positivas, los dos metales se atraen entre sí.

Esta técnica permite que la mayoría del producto sea elaborado con metales más económicos para luego revestirlo con metales de alta calidad y darle una buena apariencia con la protección necesaria. También hay tipos específicos de galvanizado, como el cobreado, el revestimiento de plata y el cromado (“Electroplating - Chemistry LibreTexts,” 2019; Encyclopedia Britannica, 2020; Zaputt, n.d.) .

#### 4.1.2 Otros métodos de protección de metales

La utilización de metales altamente puros genera una disminución en la corrosión puesto que la superficie presenta menos desigualdades y vacíos en donde se pueda presentar; el empleo de aleaciones también puede reducir la corrosión, como es el caso de los aceros, que de acuerdo al contenido de carbono se puede predecir el comportamiento de la velocidad de corrosión, de igual manera la adición de titanio a los mismos deja como resultado los aceros inoxidables (García, 2009).

Otro método muy conocido es la polarización catódica que consiste en poner en contacto eléctrico el metal con otro más electronegativo disminuyendo la velocidad de disolución anódica produciendo que la velocidad de desprendimiento de Hidrogeno aumente y consecuentemente la velocidad de corrosión disminuya.

Por otra parte, los inhibidores son sustancias que producen la disminución de la velocidad de disolución anódica, la velocidad de desprendimiento de Hidrogeno o ambas; existen inhibidores catódicos, anódicos y mixtos, los inhibidores catódicos

desplazan el potencial estacionario hacia el lado anódico, los anódicos lo hacen al contrario y los mixtos pueden desplazarlo hacia cualquier lado, estos últimos son los más empleados puesto que brindan un amplio grado de trabajo, en su mayoría están constituidos por grupos orgánicos como aminas y tioles (B. B. Damaskin, 1980).

#### 4.1.3 Invención de la Galvánica

El revestimiento de un metal sobre una superficie se remonta a hace más de 300 años cuando un alquimista logro cubrir el hierro por el zinc fundido generando una película plateada sobre la superficie, se dice que el zinc es el precursor en el galvanizado (“History of Galvanizing,” n.d.).

La palabra “Galvánica” fue descrita por la década de 1790, gracias al médico y físico Luigi Galvani quien estudio con ranas como con el paso de una corriente los músculos de estas se contraían, sin embargo, fue Von Humboldt quien llamo “Galvanismo” al paso de una corriente directa continua. La primera patente registrada donde se cita la palabra galvanizado se da en 1836 por el Francés llamado Sorel en donde se describe el recubrimiento de acero por el zinc fundido (Dummer, 1983).

El proceso que ocurre en un electro recubrimiento fue descrito en 1824 por Sir Humphrey cuando puso en contacto dos metales sumergidos en agua que se conectaban eléctricamente y observo como un metal se corroía mientras que el otro se revestía como una especie de protección, a partir de esta teoría sugirió como el fondo de los barcos podría protegerse de la corrosión causada por el agua del mar (“History of Galvanizing,” n.d.).

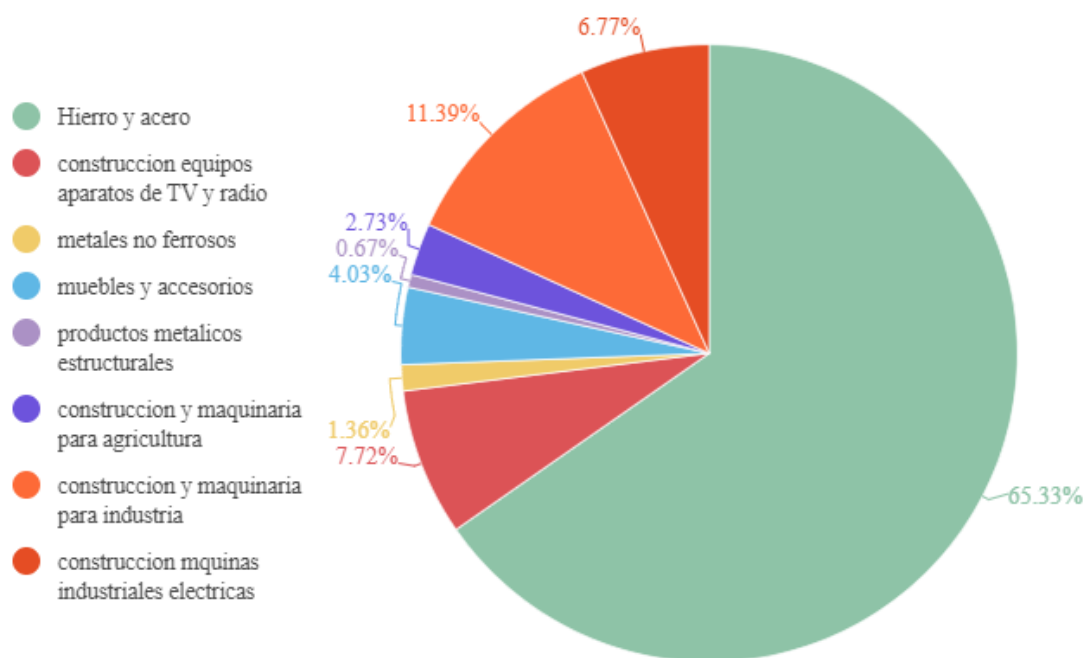
#### 4.1.4 La Galvánica en el sector Industrial

La galvánica forma parte de la industria metal mecánica donde los productos que pasan por este proceso suelen ser usados directamente por los clientes y en otras ocasiones son incluidos como piezas para procesos posteriores, la figura 1 describe en qué áreas específicamente se ve involucrada la actividad del sector y en qué proporción; el sector galvánico en Colombia está constituido principalmente por empresas medianas y pequeñas que en su mayoría funcionan informalmente es decir de una manera muy artesanal, y existe poca competitividad entre ellas puesto que varía hacia qué tipo de pieza se trabaja y como se observa en la figura 1 existe una gran variedad de aplicaciones, respecto a qué tipo de recubrimiento son más

comunes y de mayor consumo son el cobreado ácido, níquelado, cromado, cincado, plateado y el anodizado (FUNDES. Red de soluciones empresariales, 2010).

Actualmente la galvanización sigue en desarrollo en diferentes campos, se estudia la influencia de los diferentes elementos y aleaciones en el cambio de las propiedades de los recubrimientos, como es el comportamiento y mecanismo de corrosión ante los diferentes ambientes que puede estar expuesto y la calidad del mismo en los puntos de unión (soldadura) (Gallego, Gil, Castro, & Piotrkowski, 2007) (Iii & Jr, 1994).

Figura 1. Aplicación del sector metal mecánico.



fuentes: Guía de buenas prácticas FUNDES.

## 4.2 NORMAS PARA EL RECUBRIMIENTO DE ELECTRO-DEPÓSITOS

### 4.2.1 ASTM 456

Brinda información acerca de los requisitos para recubrimientos con efecto protector y decorativo, donde se utilizan los sistemas Cobre/Níquel/Cromo y Níquel/Cromo,

el estándar define las clases de recubrimiento de acuerdo al tipo y grosor que se pueden realizar sobre sustratos metálicos como acero, cobre y aleaciones (CNPMLTA, n.d.; Dorfman, 2005).

#### 4.2.2 ASTM B 633

Describe los estándares para recubrimiento de efecto protector donde lo primordial es generar una capa que aumente la resistencia a la corrosión sin tener en cuenta la apariencia, el depósito se realiza con zinc cromatizado o estaño, genera costos más bajos con un resultado voluminoso en la capa protectora (CNPMLTA, n.d.; Dorfman, 2005).

#### 4.2.3 ASTM B 604

Brinda información acerca de los recubrimientos decorativos sobre materiales no metálicos (plásticos) donde se utilizan sistemas Cobre/Níquel/Cromo (CNPMLTA, n.d.).

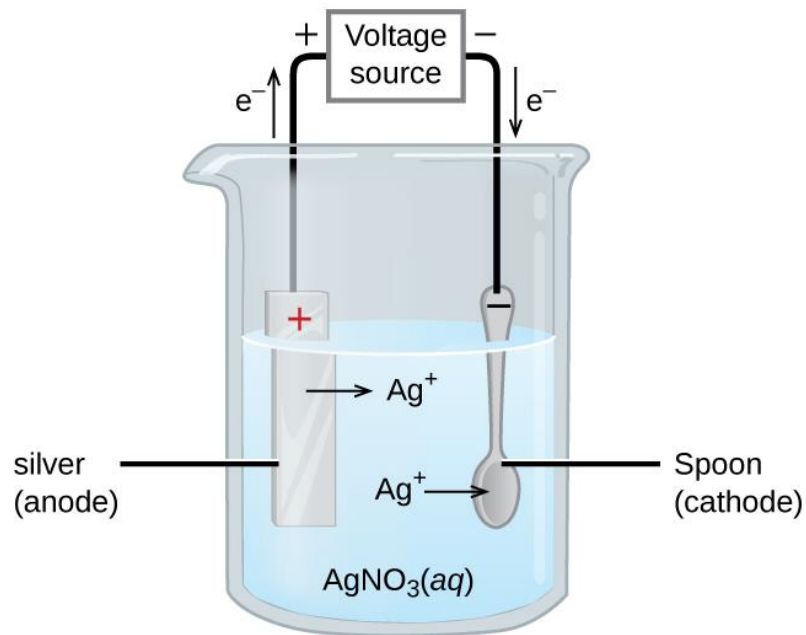
### 4.3 FUNDAMENTOS DE LA ELECTRODEPOSICIÓN

#### 4.3.1 Electrólisis

La electrolisis consiste en la deposición de una o más capas de un metal sobre una superficie ya sea metálica o plástica, en donde la energía eléctrica que se hace pasar por un circuito produce reacciones no espontáneas, removiendo así del ánodo los iones metálicos cargados positivamente, estos atraviesan una solución hasta depositarse sobre la superficie del cátodo (objeto a galvanizar) el cual se encuentra cargado negativamente, el movimiento de los iones se debe al campo eléctrico resultante de la acción de poner en contacto los electrodos en el medio (solución electrolítica) , (“17.7 Electrolysis – Chemistry,” n.d.).

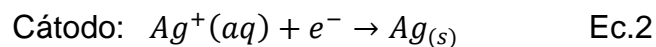
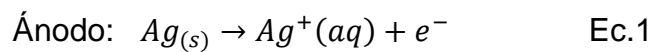
En un proceso de electrolisis intervienen varios factores por lo que se hace una técnica compleja de manejar, una buena electrodeposición metálica dependerá del buen control de las variables involucradas y del conocimiento sobre el proceso que se esté efectuando. Un ejemplo común en la electrodeposición se muestra en la figura 2, donde se realiza una deposición de Plata sobre un cubierto (Díaz del Castillo, 2008) .

Figura 2. Esquematación de la electrodeposición de Plata sobre una cuchara.



Fuente: <https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/17-7-electrolysis/>

A medida que transcurre la deposición la masa del cátodo aumenta debido a que se van depositando los iones de plata ( $\text{Ag}^+$ ) desprendidos del ánodo, como se muestra en la figura 2 y se describe ocurren dos reacciones para el ion en el sistema, una para el ánodo y otra para el cátodo. En este caso se exponen las reacciones dadas en el proceso de electrodeposición de la Plata ("17.7 Electrolysis – Chemistry," n.d.).



#### 4.3.2 Ley de Faraday

Rige los principios de la electrólisis y se define como:



“La cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) que es liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución”.

Es decir, La masa  $W$  de un elemento liberado en la electrolisis es proporcional a la corriente  $I$  y al tiempo  $t$  al que es sometido el proceso, la ecuación 3 describe esta relación.

$$W = Z * I * t = \frac{Eq * I * t}{F} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde,  $Z$  se define como la constante de proporcionalidad que viene siendo el equivalente electroquímico de cada metal y su valor varia para cada uno, este valor puede presentarse en función de la constante de Faraday o no, como se muestra en la tabla 1 donde la segunda columna representa los valores independientes es decir los valores equivalentes mientras que la tercera y cuarta columna son los valores dependientes de la constante de Faraday es decir los valores electroquímicos y  $F$  corresponde a la constante de Faraday con un valor de 96500 C (Gabe, 1978; Nelson, 2008).

Tabla 1. Equivalentes electroquímicos de los metales.

Metal	Chemical equivalent	Electrochemical equivalent	
		mg/C	g/Ah
<b>Ag</b>	108	1.118	4.024
<b>Au</b>	65.6	0.676	2.436
<b>Au</b>	197	2.03	7.308
<b>Cd</b>	56	0.58	2.088
<b>Co</b>	29.5	0.305	1.098
<b>Cr</b>	8.75	0.091	0.3276
<b>Cu (<math>SO_4^{2-}</math>)</b>	31.8	0.329	1.182
<b>Cu (<math>CN^-</math>)</b>	63.6	0.658	2.364
<b>Fe</b>	28	0.29	1.044
<b>Ni</b>	29.3	0.303	1.091
<b>Pb</b>	103.5	1.071	3.86
<b>Sn</b>	59.5	0.615	2.21
<b>Zn</b>	32.5	0.338	1.22

Fuente: Principles of metal surface treatment and protection.

Esta definición conlleva directamente al consumo de energía demandado para un proceso de electrodeposición y ha permitido determinar como un metal con menor número de valencia requiere menor consumo energético para su deposición, aunque en la práctica esto no se pueda realizar en alguno procesos industriales (Díaz del Castillo, 2008; Nelson, 2008).

#### 4.4 LA CELDA ELECTROLÍTICA (CELDA HULL)

##### 4.4.1 Descripción

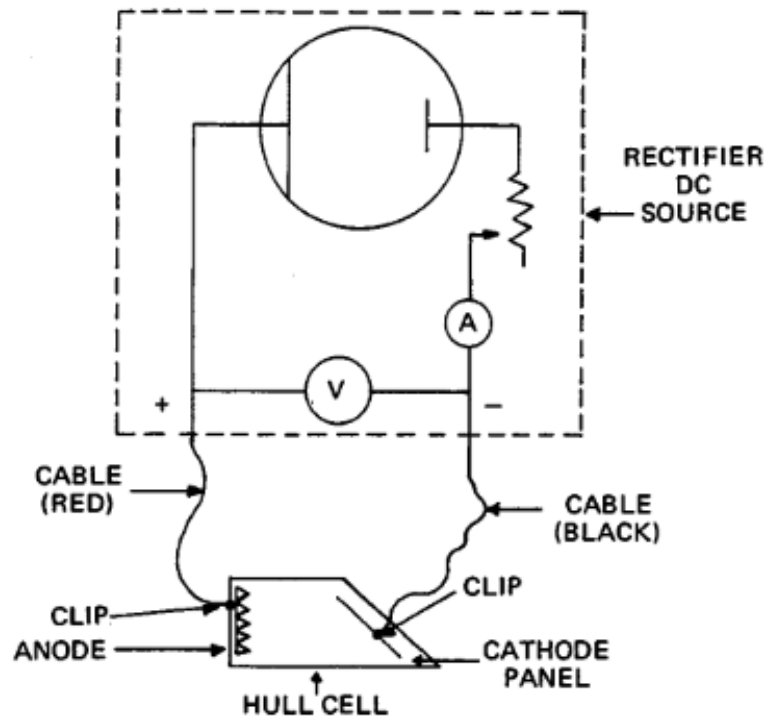
La celda electroquímica es usada para estudiar cómo se realiza la electrodeposición de un metal a escala laboratorio, y está constituida por dos electrodos metálicos (ánodo y cátodo) separados por una solución electrolítica como muestra la figura 4, adicionalmente se trabaja con una fuente de alimentación (amperímetro); al entrar en contacto los electrodos con el medio acuoso se presenta una diferencia de potencial, así no se presente corriente en el medio (Alonso & Scharifker, 2002). La diferencia de potencial presente en la interfaz es la que permite que los electrones presentes en el medio se desplacen, mientras que la corriente aplicada permite controlar la dirección de desplazamiento de los mismos, en definición la interfaz metal-solución es el componente importante para que se dé un buen resultado en la deposición (Raheja & Allocco, 2005).

##### 4.4.2 Función

Una celda Hull permite obtener sobre una pequeña placa el recubrimiento con el que industrialmente se esté trabajando o se quiera operar, brindando información como: las zonas de depósito irregular, el poder de penetración, las impurezas presentes en el baño de recubrimiento y la química del mismo, llevando a cabo un mejor control de calidad, mantenimiento y cuidado de las soluciones (Julve, 2009).

Es el dispositivo más utilizado para el control y estudio de las propiedades de los baños de electrodeposición puesto que abarca un amplio intervalo de densidad de corriente de los que comúnmente son usados en las operaciones industriales, permite analizar un baño utilizando una porción mínima del volumen total y realizar hasta tres pruebas con la misma muestra de la solución (Glayman & Faros, 1969).

Figura 3. Montaje del sistema de una celda Hull.



Fuente: Test methods manual.

## 4.5 COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA CELDA HULL

### 4.5.1 Celda

Recipiente en donde se vierte la solución salina y se introducen los electrodos, allí ocurre el proceso de la deposición, existen celdas que vienen acompañadas a un control de temperatura con su respectiva resistencia a fin de facilitar el calentamiento de la solución que en muchas ocasiones es necesario. La figura 3 muestra las dimensiones de una celda Hull. Viene regularmente para 267ml pero también de 524ml y 1000ml, sin embargo la más usada es la de 267ml y son fabricadas en polipropileno y porcelana, uno de sus lados presenta un particular ángulo del lado de la posición del cátodo, esto con el fin de representar las diferentes distancias que se puede dar entre el ánodo y la superficie de una pieza con forma irregular (Lima, Mescheder, & Reinecke, 2012).

#### 4.5.2 Rectificador

Existen variaciones en el rango de amperaje de trabajo de un rectificador, aunque la mayoría cuentan con una fuente de corriente alterna de 110 Voltios, la rectificación a corriente continua directa varía de 0-5, 0-10 0-30 Amperios, algunos cuentan con temporizador que permite llevar un tiempo de hasta 30 minutos (“The Hull Cell: Key to Better Electroplating - Part I | Products Finishing,” n.d.).

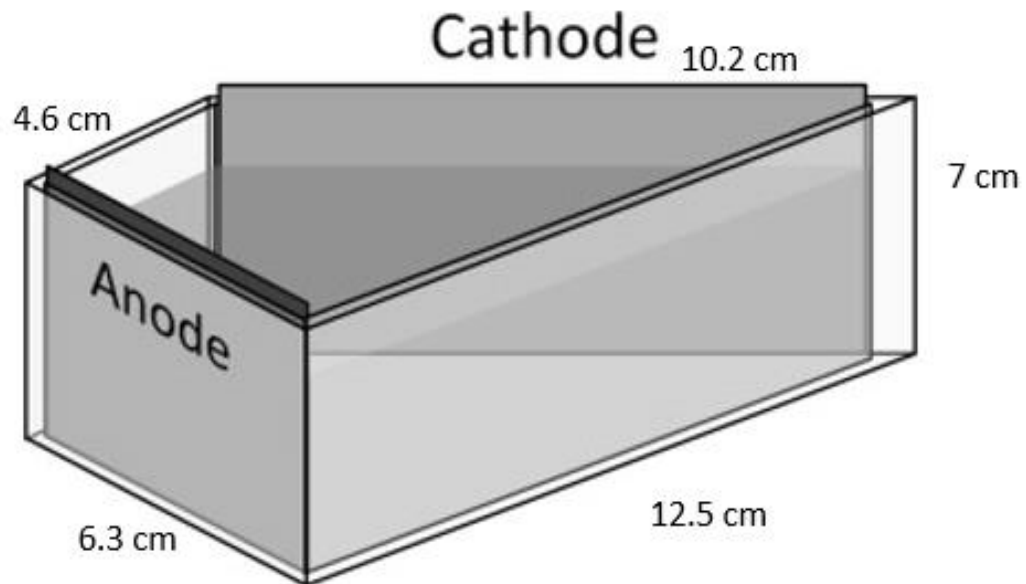
#### 4.5.3 Cátodo

Las placas utilizadas como cátodos, son la pieza a recubrir y son fabricadas en bronce-latón, en el cincado estas placas son de hierro para asemejar más el proceso. Se encuentran con unas dimensiones estándar para una celda de 267 ml de 7cm de alto por 10 cm de largo y un espesor entre 0.1-0.2 cm (“The Hull Cell: Key to Better Electroplating - Part I | Products Finishing,” n.d.).

#### 4.5.4 Ánodo

La pieza a recubrir es conocida como cátodo, por lo tanto, para que el circuito se complete se necesita de los ánodos, los cuales ayudan a que los electrones presentes en la solución se depositen sobre la superficie, (Miyake, Kubo, & Hirato, 2014). Existen dos tipos de ánodos : de sacrificio o de permanencia; los ánodos de sacrificio están hechos del mismo metal a depositar donde no solo los iones presentes en la solución se depositan pues también se depositan los del ánodo, mientras que los ánodos de permanencia están hechos de otros materiales como el carbono, acero y platino pero contribuyen a que los iones presentes en el electrolito se desplacen (Hayyat & Ali, 2019).

Figura 4. Dimensiones de una Celda Hull.



Fuente: Hull cell tests for evaluating the effects of polyethylene amines as brighteners in the electrodeposition of aluminum from dimethylsulfone- $AlCl_3$  baths.

#### 4.6 PARÁMETROS A OBTENER EN CUENTA EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN UNA PLANTA

Los principales problemas a abordar en el diseño de galvanizado para minimizar defectos y posibles problemas tanto en la pieza como en las soluciones de los baños son los siguientes:

- El artículo debe suspenderse durante la galvanización. La provisión de gancheras o canastas para eliminar las marcas es un ejemplo de diseño que mejora la calidad.
- El artículo debe tener provisiones adecuadas de ventilación y drenaje para asegurar el flujo suave a lo largo de la superficie.
- Las dimensiones del artículo deben ajustarse cómodamente dentro de las dimensiones del baño para permitir ángulos de extracción adecuados. ("INGAL Specifiers Manual," 2005).

- Evitar el escurrimiento de los baños en los procesos posteriores, pueden causar contaminación y consecuentemente problemas en la calidad del resultado.
- En dado caso de presentarse contaminación se debe realizar la eliminación de los contaminantes más críticos tomando en cuenta el mejor tratamiento (Kreysa & Schutze, 2011).

## 4.7 ETAPAS DEL RECUBRIMIENTO

### 4.7.1 Pretratamiento

#### 4.7.1.1 Preparación de la solución electrolítica.

Las preparaciones de los baños hoy día parten de estudios ya realizados, las relaciones de los compuestos respecto a otros y la experiencia propia del personal a cargo, sin embargo, la mayoría de las soluciones utilizadas en la electrodeposición de metales y aleaciones contienen uno o más aditivos inorgánicos u orgánicos que tienen funciones específicas en el proceso de deposición que permiten resaltar las características finales del producto como brillo, buena nivelación y superficie altamente lisa (Yamada, Data, Examiner, & Ryan, 2010).

#### 4.7.1.2 Abrillantadores

Los abrillantadores son refinadores de granos que suprimen las diferencias cristalográficas, y producen que se absorban en sitios activos particulares, la mayoría de estos están constituidos por compuestos aromáticos sulfonados, con enlaces múltiples de nitrógeno, oxígeno o azufre (Nelson, 2008).

#### 4.7.1.3 Niveladores

se encargan de controlar el efecto de difusión de las especies en la superficie, son inhibidores y están presentes a bajas concentraciones, sin embargo permiten que los iones se depositen en donde es más difícil penetrar (valles), rellenando las grietas o rasguños que presente, uno de los compuestos más conocidos de este

tipo es la cumarina el cual produce depósitos de níquel semibrillantes con buena ductilidad y nivelación (Milad, 2005).

#### 4.7.1.4 Portadores

Los portadores modifican la estructura incrementando la resistencia a la polarización y producen una red de gránulos más compacta y mejor organizada, generándose así depósito con mayor espesor son abrillantadores de primera clase, normalmente son compuestos aromáticos como el ácido fenilsulfínico, sacarina y la sal de sodio; no suelen consumirse en el proceso de la electrolisis si no por el arrastre y pérdidas en el tratamiento del baño con carbón activado (Nelson, 2008).

#### 4.7.1.5 Humectantes

Son agentes anti-picaduras evitan la formación de burbujas de hidrogeno sobre la superficie que pueden desencadenar en picaduras del depósito, actúan reduciendo la tensión superficial liberando estas burbujas (Schällibaum, Burbach, Münch, Weiler, & Wahlen, 2015).

### 4.7.2 Preparación de la pieza a recubrir.

Se debe tener en cuenta que ni el mejor recubrimiento ni la mejor tecnología para la deposición podrán funcionar correctamente si no se le realiza un pretratamiento adecuado a la pieza; la contaminación e imperfecciones que se presenten puede ocasionar una pérdida total del recubrimiento generando como consecuencia el desprendimiento de la capa o zonas sin adherencia, por ello es importante limpiar la pieza de grasas, contaminantes y recubrimientos viejos.

Por otra parte las salpicaduras de soldadura o puntos de unión con soldadura son casi imposibles de recubrir de manera uniforme, además de que a menudo son poco adherentes por lo que son una causa común de falla prematura del recubrimiento ("INGAL Specifiers Manual," 2005).

#### 4.7.2.1 Desengrase.

El desengrase en una pieza dependerá del material de la misma y de los procesos por los que ha pasado, por ejemplo, en el caso de latón recubierto por plástico se

debe retirar la película plástica, en materiales galvanizado se recomienda igualmente remover viejas capas. Los desengrasantes normalmente son solventes orgánicos o soluciones alcalinas (R. . H. and C. Co, 2001) y generalmente se pasa la pieza por dos sistemas de desengrase, los cuales son:

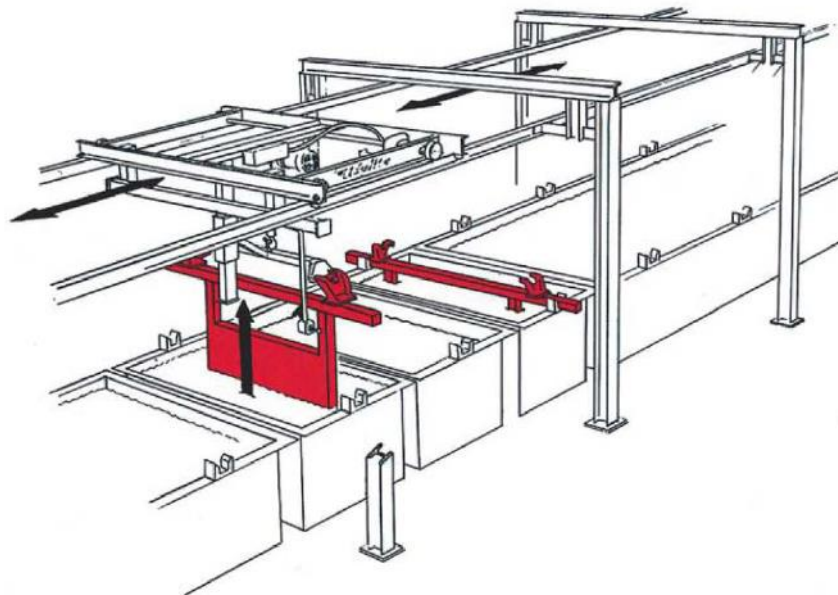
#### 4.7.2.2 Desengrase por inmersión.

Es un desengrase que funciona a una macro escala y remueve grasas pesadas, se considera llevar la solución de desengrasante hasta una temperatura de 60°C puesto que aumenta la eficiencia y normalmente se compone de soda caustica (NaOH) entre 50 a 100g/l disuelta en agua desionizada (García, 2009).

#### 4.7.2.3 Desengrase electrolítico.

Este tipo de desengrase opera a un nivel más profundo en la pieza y se realiza por medio del paso de una corriente entre el medio y el sustrato, donde se saponifica la grasa hasta convertirla en jabón.(CNPMLTA, n.d.).

*Figura 5. Esquematización de un proceso de desengrase en una línea galvanítica.*



*Fuente: Metal Finishing, guidebook and directory, p. 474.*



#### 4.7.2.4 Decapado

Este proceso se realiza en piezas que llevarán recubrimientos de efecto protector, y es por ello que es importante realizarlo antes, el decapado consiste en eliminar óxido presente en la superficie sumergiendo la pieza en una solución ácida o alcalina dependiendo del proceso posterior (García, 2009).

Si la solución es ácida puede ser ácido sulfúrico, clorhídrico o fluorhídrico en un rango de concentración del 40 al 60%, por otro lado si la solución de decapado es alcalina estará constituida por surfactantes y se acompaña por una limpieza ultrasónica (CNPMLTA, n.d.).

#### 4.7.2.5 Activación.

Se realiza para eliminar rastros de compuestos orgánicos o inorgánicos que pueden generar manchas en la superficie y prevenir la formación de óxido sobre la superficie, en esta operación se emplea soluciones ácidas diluidas en agua (CNPMLTA, n.d.). Los ácidos empleados en esta operación varían de acuerdo al material de la superficie, la tabla 2 muestra las diferentes concentraciones que se manejan del ácido en función del metal base.

Tabla 2. Niveles de concentración de los ácidos de acuerdo al metal base (superficie de la pieza de trabajo).

<b>Metal Base</b>	<b>Concentración HCl (g/l)</b>	<b>Concentración H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (g/l)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo de inmersión (s)</b>
<b>Piezas ferrosas</b>		20-30	50	60
<b>Piezas de Zinc y aleaciones</b>	10-30		30	30
<b>Piezas de Cobre y aleaciones</b>	35-70	85-170	25	60
<b>Piezas de Níquel y aleaciones</b>		85-170	25	60

#### 4.7.3 Pos-tratamiento.

#### 4.7.4 Electro deposición de multilayers.

El recubrimiento con una capa metálica contrarresta el problema de la corrosión, sin embargo, cuando empieza a desgastarse o está dañado la corrosión sigue atacando por lo que una solución que se creó fue el sistema de multicapas (*multilayers*). (Schweitzer, 2013).

La técnica de multicapas consiste en aplicar a la superficie capas de diferentes características, por ejemplo de acuerdo a la norma ASTM 456 el recubrimiento decorativo consiste en la aplicación de Cobre, Níquel y Cromo , específicamente en ese orden brinda no solo buena apariencia y brillo también protege a la superficie de la corrosión (Hayyat & Ali, 2019)(Dorfman, 2005).

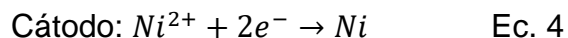
#### 4.7.5 Recuperación y secado

Al ser recubierta por electrodeposición la pieza debe enjuagarse posteriormente a fin de eliminar restos de la solución electrolítica de la superficie y posteriormente se lleva al secado para eliminar el agua presente de la actividad anterior en la superficie (Voytko, 2008).

### 4.8 MECANISMOS DE ELECTRODEPOSICION DE LOS RECUBRIMIENTOS

#### 4.8.1 Cinética de la deposición de níquel

El níquel se encuentra en la solución como iones divalentes es decir  $Ni^{2+}$ , al aplicar corriente estos iones reaccionan con los  $2e^-$  convirtiéndose en níquel metálico ( $Ni^0$ ) y depositándose en el cátodo de esta manera, mientras en el ánodo ocurre el proceso contrario, el níquel metálico se disuelve para formar iones divalentes ( $2e^-$ ).

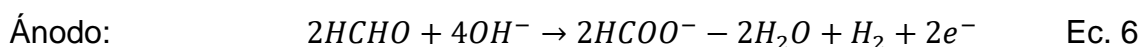
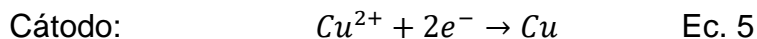


El ánodo utilizado para la deposición debe ser del mismo metal ya que permite mantener constante la relación de níquel depositado y níquel en solución. La cantidad que se deposita sobre el cátodo depende de la cantidad de corriente aplicada y del tiempo y son proporcionados por el sulfato de níquel y el cloruro de níquel aunque este último en menor proporción (Dibari, 2013).

El ácido bórico actúa como amortiguador de la solución además de controlar el pH, el sistema de reacción no se tiene del todo claro sin embargo se dice que existe iones de borato en solución y ácido bórico no ionizado el cual se ioniza cuando se produce el hidrogeno ( $H^+$ ) reformando el ácido bórico, la función de los iones de cloruro provenientes del cloruro de níquel es evitar los efectos secundarios como el aumento de la tensión dentro de los depósitos, además generan depósitos con un color más blanco y aumentan la eficiencia del ánodo hasta valores próximos al 100% (Baudrand, 2008).

#### 4.8.2 Cinética de la deposición de cobre

Los estudios por conocer la reacción que se da en un baño de cobre hoy día aún se estudia puesto que se producen varias reacciones en simultaneo, consecuentemente se dan reacciones intermedias difíciles de determinar en un orden exacto, sin embargo, se exponen dos casos según los componentes que constituyan el baño. En el primer caso se exponen las reacciones generales para un proceso constituido por formaldehído y un hidróxido.

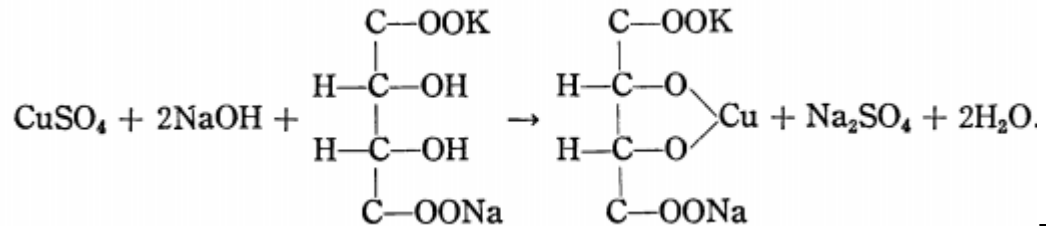


En donde el  $Cu^{2+}$  proviene ya sea de la solución de cobre o del sulfato de cobre, este puede variar de acuerdo al subtipo de baño que se presente, para finalmente reducirse a Cu, mientras tanto en el ánodo la reacción entre el formaldehído y el hidróxido produce agua e hidrogeno (Okinaka & Osaka, 2008).

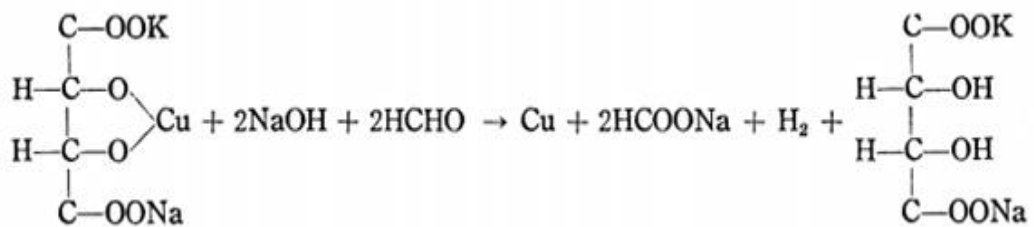
En la formulación de baños de cobre decorativos como es el cobre acido brillante requieren la adición de abrillantadores, estos actúan como estabilizadores del depósito, si la solución está compuesta por EDTA o tartrato estos actúan como agentes acomplejantes (Wiley, 2010).

Por otra parte, donde las soluciones de cobre están constituidas por hidróxido y tartrato como es el siguiente caso donde la reacción que se da entre el sulfato de

cobre, el hidróxido de sodio y el tartrato de sodio y potasio (sal de Rochelle) para llegar al cobre (Cu) se produce por las siguientes reacciones.



Ec. 7



Ec. 8

La tasa de deposición del cobre es proporcional a la cantidad contenida de sulfato de cobre e hidróxido de sodio, pero también a la temperatura de trabajo, en este tipo de baño la deposición se promueve por la agitación mecánica de la solución, evitándose además la auto-descomposición de la misma, aunque una alternativa a la auto-descomposición es mediante la adición de 1-3 g/l de cianuro de potasio, sin embargo, repercutir en una menor tasa de deposición y una variación en el color (Konishi, 1965).

#### 4.9 BAÑO DE NIQUEL

El níquel es usado industrialmente en varios artículos desde la fabricación de monedas hasta la industria automotriz y aeronáutica por su capacidad de resistencia a la corrosión y buena apariencia que puede brindar. Las aplicaciones principales del níquel en la galvanoplastia son: decorativos, funcionales y el electro formado.

El sistema multicapa es utilizado generalmente para el recubrimiento de níquel y en su mayoría para la deposición posterior de cromo o en combinación con este, son sistemas capaces de proteger materiales como acero, zinc y cobre de la corrosión por periodos prolongados de tiempo (Di Bari, 2011).

Aunque existen diversos tipos de recubrimiento de níquel, el más usado en sistemas decorativos es el níquel Watts y a partir de este se crean los níqueles brillantes y

semi-brillantes, todos estos enchapados de Níquel han sido importantes en la industria mundial, desde su descubrimiento se han estudiado técnicas para mejorar su apariencia como su poder de protección, el desarrollo más importante recientemente es la creación de superficies hidrofóbicas y súper hidrofóbicas (Shen, Fan, Qiu, Jiang, & Wang, 2019) (Belmont, n.d.).

#### 4.9.1 Níquel Watts

Es el baño base para la preparación de otros tipos de baño de níquel, este baño se compone de sulfato de níquel, cloruro de níquel y ácido bórico, para su preparación se recomienda disolver los componentes en agua desionizada a una temperatura mayor a 50°C a fin de facilitar la disolución. La mayoría del níquel depositado proviene del sulfato de níquel y este se encuentra de una manera estable que no se reduce por el cátodo, ni es oxidado por el ánodo y tampoco se volatiliza, por otra parte, el ácido bórico se encarga de mantener el control del pH y se encuentra en menor cantidad respecto a los otros (Belmont, n.d.).

#### 4.9.2 Níquel brillante

El níquel brillante está compuesto por la base de níquel watts, adicionalmente contiene abrillantadores que proporcionan el brillo al depósito y pueden ser de primera o segunda clase. Los abrillantadores de primera clase se usan en menor concentración respecto de los de segunda clase. En el uso de abrillantadores de segunda clase ayudan a la reducción de la tensión y aumentan el brillo en casos donde ya se cuente con un brillo insuficiente, por lo que generalmente se usan en conjunto con los de primera clase (Metal Finishing association, 2000).

#### 4.9.3 Níquel semibrillante

En este tipo el brillo pasa a segundo plano dando importancia a la dureza y ductilidad de la pieza, pero manteniendo apariencia aceptable e igualmente su composición se basa en el baño de níquel watts, a partir de este se puede producir níquel semibrillante por dos medios diferentes, mediante la adición de abrillantadores orgánicos o presentándose una aleación de níquel-cobalto (Nelson, 2008).

## 4.10 BAÑO COBRE

El recubrimiento de cobre es uno de los metales más comunes usados en la galvanoplastia, su uso se extiende en diversas áreas como las placas de circuito, la electrorefinación y el electroformado. El cobre funciona perfectamente como capas inferiores en un recubrimiento, puesto que permite cubrir imperfecciones menores del metal base, además de ser inerte frente a la mayoría de los baños electrolíticos de otros metales, tiene una eficiencia de recubrimiento alta que puede llegar en partes difíciles de penetrar y una alta conductividad. Usualmente las formulaciones que trabajan a altas velocidades generan depósitos con recubrimientos gruesos para la protección de objetos, mientras las soluciones de cobre que trabajan a velocidades bajas son aplicables en los sistemas de circuitos (Baudrand, 2008).

Los baños de cobre están constituidos por soluciones electrolíticas que contienen especies iónicas de cobre y aditivos que controlan la deposición haciéndola lisa, homogéneas y algo brillantes, además de contar con una eficiencia alta de recubrimiento produciendo una alta cobertura incluso en piezas difíciles de mejorar por otro metal (Kang, Park, Hyong, & Oh, 2014).

Por otra parte La empresa HRS S.A.S. maneja una gama variada en recubrimientos de Cobre para cumplir las diversas funciones que se presenten, como el cobre flash, cobre alcalino, cobres ácidos brillantes y cobre mate (HRS, 2020).

### 4.10.1 Cobre flash

El proceso de Cobre flash es utilizado en operaciones de revestimiento como en capas intermedias formando una delgada capa con una buena adhesión hacia la superficie, es utilizado previamente al baño de Cobre Alcalino, es el tipo de recubrimiento de cobre más utilizado. En los acabados de ciertos metales como el níquel se recomienda realizar una deposición de control de cobre que genere una mejor adhesión de las capas posteriores (Metal Finishing association, 2000).

### 4.10.2 Cobre Alcalino

El sistema de cobre alcalino ofrece depósitos libres de asperezas y picaduras haciéndolo apto para pulimento, recubrimiento previo para los siguientes baños del proceso, cuenta con un excelente poder de penetración, los ánodos utilizados deben ser de cobre. Este depósito aunque es cianurado se caracteriza por ser mucho más

grueso que el cobre flash ya que se encarga de dar protección a la pieza (HRS, 2020; Konishi, 1965).

#### 4.10.3 Cobre acido brillante

Este tipo de recubrimiento de cobre se utiliza en circuitos impresos, electroformado, semiconductores; la química de estos baños consiste en sulfato de cobre y ácido sulfúrico, los cuales son los que aportan los iones a depositar. Este tipo de baño es altamente conductivo y funciona bien a temperatura ambiente.

Las piezas que son fundidas en zinc u otros metales deben contar con un depósito previo para evitar el ataque del ácido sulfúrico sobre la pieza. Los ánodos deben ser de cobre fosforados y deben contar con bolsas de protección, las densidades de corriente son bajas ya que el uso de densidades altas puede causar el desprendimiento de la capa protectora de los ánodos y producir depósitos ásperos (Konishi, 1965).

Es utilizado para la deposición de recubrimientos brillantes, dúctiles y de excelente nivelación. En el campo de los recubrimientos protectores y decorativos, es utilizado como recubrimiento base para procesos posteriores de acabados de bronce blanco y bronce amarillo (HRS SAS, 2018).

### 4.11 EQUIPOS PRINCIPALES EN UNA PLANTA DE GALVANIZADO

#### 4.11.1 Contenedor electrolítico

Los materiales de construcción dominantes y más económicos utilizados en la industria del acabado de metales fueron el acero y el hormigón. Desafortunadamente, ambos materiales son altamente susceptibles al ataque corrosivo de muchos de los químicos utilizados en la industria de acabado de metales (Coleman & Roy, 2018).

Con el desarrollo de materiales plásticos vino el cloruro de polivinilo el cual es uno de los plásticos probados más antiguos para la fabricación de estructuras altamente resistentes a los productos químicos, su excelente resistencia química, térmica y física supera otros materiales. Otros materiales utilizados en la fabricación de tanques para la industria de galvanizado es el caucho natural, el estireno-butadieno, el acrílico, el acetato de polivinilo, epoxi y el polipropileno (Coleman & Roy, 2018).

En el modelamiento de los tanques de procesamiento las longitudes de ancho y profundidad dependerán del tamaño, forma y número de piezas a recubrir en el mismo lote, generalmente en plantas de mediano tamaño los tanques usan un espacio de 24 pulgadas entre el ánodo y el objeto (Donaldson, 2008).

#### 4.11.2 Calefactores

Los principales calentadores utilizados en la galvanotecnia son fabricados de cuarzo y cerámica puesto que permiten alcanzar temperaturas altas con poco uso de energía, son altamente resistentes a los químicos utilizados en este sector y evitan que el material del calentador contamine el baño. La forma de calentamiento más usada es la calefacción eléctrica por inmersión puesto que permite alcanzar una temperatura determinada con una tolerancia de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  que es muy pequeño e insignificante para las operaciones de recubrimiento, sin embargo es importante analizar los requisitos de calentamiento individuales de cada proceso (García, 2009; Richards, n.d.).

#### 4.11.3 Fuente de corriente

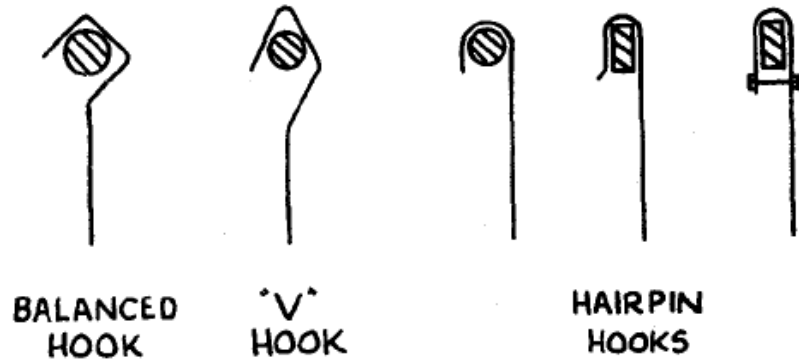
Los contactos utilizados para suministrar corriente a una línea de galvanizado deben estar diseñados para ser efectivos y confiables y para requerir poca atención porque incluso períodos muy breves de contacto intermitente resultarán en la producción de muchos áreas de material defectuoso, el equipo requiere que transforme la corriente alterna en corriente alterna con regulador de voltaje (Johnson, 2008).

#### 4.11.4 Sujetadores

Los sujetadores o gancheras como son conocidos comúnmente junto con los bastidores son parte del sistema que permite introducir la pieza en el baño. En una línea manual es necesario determinar la distancia anódica más pequeña para que el bastidor o sujetador del cátodo se ajuste a todos los tanques de proceso, otro factor es asegurarse que se pueda introducir y sacar fácilmente de cada tanque de proceso sin golpear las piezas. La figura 6 muestra las diferentes formas que puede presentar la ganchera, en el diseño de gancho el V es el más utilizado hoy en día (B. M. Co, n.d.).



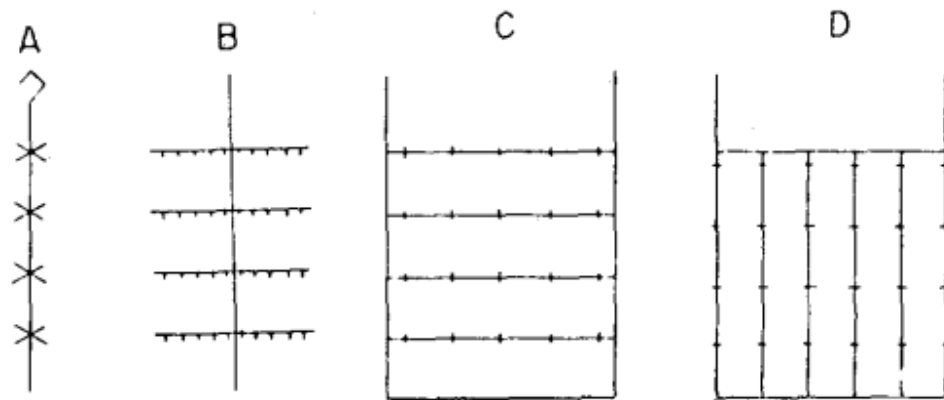
Figura 6. Formas de las gancheras.



Fuente: fundamentals of plating rack design

En cuanto a los bastidores conocidos también como espinas o columnas vertebrales por su forma que se asemejan estas, son los encargados de porta las piezas y deben ser capaces de transportar la corriente necesaria a cada punta, debe tener la resistencia adecuada para soportar todas las piezas y deben ser resistentes al desgaste (B. M. Co, n.d.).

Figura 7. Formas básicas de los bastidores.



Fuente: fundamentals of plating rack design.

Las formas básicas de bastidores se clasifican en cuatro, los tipo A son llamados espigas simples, los B son llamados tipo T, los C son los tipo caja y los D son conocidos como espina múltiple (B. M. Co, n.d.).

#### 4.11.5 Agitadores

Los sistemas de agitación son importantes en baños que trabajan a una temperatura mayor que la ambiental puesto que proporciona que el calor se distribuya a lo largo de todo el volumen de control, por otra parte, una deposición sin agitación lleva a una reducción del metal presente en la solución circundante al cátodo lo que puede provocar que se genere un depósito áspero o quemado (NIIR, 2006) .

El sistema más usado habitualmente es la agitación de aire comprimido a baja presión, mediante la instalación de tuberías en el fondo del tanque generalmente debajo de donde se situó el cátodo, el aire utilizado debe estar libre de impurezas como compuestos orgánicos o partículas sólidas ya que puede causar contaminación en el tanque, el uso de este sistema implica también un buen sistema de filtrado ya que la contaminación que se puede presentar en el baño el aire impulsado en fondo impulsa a que esta contaminación llegue al cátodo más fácilmente (Berreto & Buitrago, 2018)

Por otra parte, los agitadores mecánicos son una buena alternativa al sistema de agitación con aire, es usado cuando las soluciones tienen adiciones de agentes humectantes (surfactantes) o componentes fácilmente oxidables que impiden el empleo del aire como fuente de agitación, el movimiento puede darse horizontal o verticalmente y se sitúa cerca al cátodo, en casos como el electropulido y anodizado el movimiento es aplicado en el ánodo (NIIR, 2006).

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 PREPARACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS BAÑOS DE RECUBRIMIENTO

Se partió de la fabricación de los baños a ser dispuestos para la planta piloto a manera de comprobar si las formulaciones químicas que maneja la empresa y que dispone a sus clientes se encuentran en los rangos aceptables y a partir de esto se realizó el estudio mediante deposiciones sobre placas por medio de la Celda Hull hasta lograr el recubrimiento deseado.

#### 5.1.1 Preparación de la pieza a recubrir

La pieza a ser utilizada para estudiar la calidad del recubrimiento de las soluciones electrolíticas se debe preparar adecuadamente para que el resultado obtenga la mejor calidad posible; de acuerdo al tipo de recubrimiento se utilizó una lámina de Bronce-Latón, a fin de asemejar el tipo de piezas que se van a emplear en la planta piloto.

##### 5.1.1.1 Nivelación y limpieza de la superficie.

Para que el recubrimiento tuviese un buen nivel y aceptación por parte de la superficie se realizó un tratamiento mecánico a fin de eliminar la rugosidad, en este caso se empleó el tratamiento mecánico mediante el lijado manual de la superficie utilizando lijas de tamaño de grano medio y fino obteniéndose un acabado mate y se lavó con agua para eliminar los residuos de la operación.

##### 5.1.1.2 Desengrase.

El desengrase se realizó en dos secciones, primero se hizo un desengrase por inmersión en donde previamente se calentó la solución del desengrasante a fin de mejorar el rendimiento de la remoción, posteriormente sobre el mismo sistema se realizó un desengrase electrolítico, esto con la ayuda de unas pinzas con polos positivo y negativo respectivamente y un rectificador, la tabla a continuación muestra los datos operativos.

Como es recomendable después de cada operación se hizo el lavado respectivo con agua a la lámina a fin de eliminar rastros de desengrasante.

Tabla 3. Datos operativos trabajados en el desengrase electrolítico.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>Voltaje</b>	7 V
<b>Amperaje</b>	3 A
<b>Tiempo</b>	40 s
<b>Temperatura</b>	60 °C

#### 5.1.1.3 Activación.

Se realizó la activación sumergiendo la pieza por unos segundos en una solución de Ácido sulfúrico diluida en agua (2%- 5% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) con ayuda de ganchos para asegurar que toda la superficie de la lámina entrara en contacto con la solución y a temperatura ambiente. Al extraerse de la solución se lavó, en este caso con agua desionizada a fin de no alterar la carga eléctrica de la superficie.

#### 5.1.2 Preparación de los baños

Todas las soluciones se realizaron con base en los requerimientos de la empresa para la implementación de la planta piloto, para el cual proporcionaron un valor estipulado de 20 litros en todas las operaciones a lo largo del proceso. A partir de este dato y con la formulación de baños proporcionada por la entidad se realizaron los cálculos necesarios para determinar la cantidad de cada uno de los compuestos necesarios en las soluciones. Una vez obtenidos los baños de recubrimiento se extrajeron muestras representativas para llevar a cabo el estudio de calidad mediante el análisis en la celda Hull.

##### 5.1.2.1 Preparación y optimización del baño de níquel

La preparación del baño de níquel se realizó a partir de los datos reportados en la tabla 4, una vez obtenida la solución se procedió a estudiar el recubrimiento

mediante la celda Hull, las variables que se controlaron y sus respectivos valores se encuentran en la tabla 5.

Para la optimización del baño de níquel se utilizaron adiciones de dos tipos de abrillantadores y un antipicado para lograr llegar al brillo y nivel deseado.

*Tabla 4. Formulación base del baño de níquel.*

<b>Compuesto</b>	<b>Concentración (g/l)</b>
<b>NiSO<sub>4</sub></b>	200-400
<b>NiCl<sub>2</sub></b>	40-70
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	38-53

*Tabla 5. Condiciones de operación para la deposición de níquel*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>Voltaje (V)</b>	~7
<b>Amperaje (A)</b>	3
<b>Densidad de corriente (A/dm<sup>2</sup>)</b>	3-7
<b>Tiempo (min)</b>	5
<b>Temperatura (°C)</b>	60
<b>Agitación</b>	si

#### 5.1.2.2 Preparación y optimización del baño de cobre flash

La solución de flash de cobre se preparó a partir de la formulación proporcionada por la empresa y se muestra en la tabla 6 esta formulación es básica, a partir de ella se realizó un recubrimiento y se analizó para conocer el estado de la deposición, la tabla 7 presenta las condiciones de operación, exceptuando el tiempo que para el primer recubrimiento fue de 60 segundos.

Tabla 6. Formulación base para el baño de cobre flash

Componente	Concentración (g/l)
Cu	15-23
NaOH	1.3-3.8

Tabla 7. Condiciones de operación para la deposición de cobre flash.

Variable	Valor
Voltaje	~6 V
Amperaje	2 A
Densidad de corriente	1-3 A/dm <sup>2</sup>
Tiempo	45 s
Temperatura	60 °C

### 5.1.2.3 Preparación y optimización del baño de cobre alcalino

La solución de cobre alcalino se preparó de acuerdo a lo especificado en la tabla 9 y se procedió a hacer la prueba de recubrimiento en la celda Hull y trabajándose a las condiciones reportadas en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones de operación utilizadas en el recubrimiento de cobre alcalino

Variable	Valor
Voltaje	3-9 V
Amperaje	2 A
Densidad de corriente	1-4 A/dm <sup>2</sup>
Tiempo	5 min
Temperatura	60 °C
Agitación	si

Tabla 9. Formulación base para el baño cobre alcalino.

<b>Componente</b>	<b>Concentración (g/l)</b>
<b>Cu</b>	35-75
<b>NaOH</b>	14-30

A pesar de que este recubrimiento no se utiliza para un acabado, es útil para brindar protección a la pieza de recubrimiento posteriores, por lo que lo favorable es que se genere un recubrimiento grueso, de este modo para hacerlo más homogéneo y disminuir la diferencia de las zonas marcadas en la placa se adicionó tartrato de sodio y potasio sin ningún tipo de abrillantador ya que no es necesario debido a que llevará capas posteriores de otros recubrimientos.

#### 5.1.2.4 Preparación y optimización del baño de cobre ácido brillante

La preparación del baño de cobre ácido brillante se realizó de acuerdo a las cantidades reportadas en la tabla 11 (cantidades proporcionadas por la empresa), seguidamente el recubrimiento se realizó bajo las condiciones presentadas en la tabla 10 y bajo el análisis de este primer deposito se realizaron adiciones de abrillantadores y pruebas seguidamente hasta que se obtuvo un deposito con buen nivel, brillante y uniforme.

Tabla 10. Datos de operación del cobre ácido brillante.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>Voltaje</b>	3-9 V
<b>Amperaje</b>	2 A
<b>Densidad de corriente</b>	1.5-6 A/dm <sup>2</sup>
<b>Tiempo</b>	10 min
<b>Temperatura</b>	20-25 °C
<b>Agitación</b>	si

Tabla 11. Formulación base para el baño de cobre ácido brillante.

Componente	Concentración (g/l)
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	180-250
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	40-70
<b>HCl (ion cloruro)</b>	20-80

## 5.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN EL PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN

Las variables involucradas en cada recubrimiento pueden variar de acuerdo al baño con el que se vaya a realizar la electrodeposición, a continuación, se muestra los valores utilizados en el análisis de Celda Hull, todos estos parámetros se trabajaron bajo las indicaciones proporcionadas por la empresa.

### 5.2.1 Temperatura

La temperatura es un factor importante puesto que en la mayoría de baños se realizan por encima de los 50°C, el calentamiento en la celda Hull se logró mediante una resistencia que comúnmente traen incorporada y se mantuvo en constante lectura mediante el uso de un termómetro el cual fue introducido en la solución.

### 5.2.2 Masa del metal depositada

De acuerdo a las reacciones que se presentan en los cátodos (ecuaciones 4 y 5) se calcularon las masas a depositar tomando en cuenta que para ambos casos se requieren de 2 electrones para depositar el metal, recordando la ley de Faraday y los parámetros de operación se determinaron los valores máxicos mostrados en la tabla 12. Para este caso se determinó la masa a partir de las moles que deben reaccionar con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{I \cdot t}{F} \quad \text{Ec. 9}$$



Donde  $I$  es el paso de la corriente dada en amperios,  $t$  el tiempo al que se expondrá la pieza a esta corriente y  $F$  corresponde a la constante de Faraday, los moles obtenidos son los moles de electrones y estequiometricamente con las reacciones del catodo se llegó a la masa que se espera depositar. Las masas depositadas halladas son valores teóricos, pero muestra una cantidad aproximada del metal adherido a la superficie respecto del área a recubrir, este depende de la cantidad de corriente aplicada y el tiempo utilizado.

Por otra parte, la tabla 13 muestra los valores de las variables utilizadas y las masas depositadas halladas para cada electrorecubrimiento, pero en base al área a recubrir, este cálculo se realizó mediante la ecuación 3, donde se tomó en cuenta los equivalentes electroquímicos de la tabla 1.

Posteriormente se determinó la diferencia de los valores hallados de las masas en función de las reacciones catódicas y las masas en función del área de recubrimiento.

### 5.2.3 Densidad de corriente

La densidad de corriente es uno de los factores importantes en el momento de la deposición puesto que relaciona la cantidad a depositar de acuerdo al tiempo de ejecución, en este caso se tomó en cuenta los valores estandarizados de la empresa para el manejo de cada uno de los baños, los cuales previamente han sido calculados y revisados de acuerdo a la literatura, a partir de las densidades de corrientes anteriormente reportadas para cada baño y de la masa teórica depositada calculada por la ecuación 3 se establece el tiempo estimado de electrodeposición en la planta piloto para que se realice un deposito como el que se presenta en los análisis de celda Hull, utilizando la misma ecuación pero reemplazando a la corriente en términos de densidad de corriente y del área a recubrir, dando como resultado la siguiente ecuación.

$$t = \frac{W*t}{Eq*I} = \frac{W*t}{Eq*DC*a} \quad \text{Ec. 9}$$

La ecuación 9 permitirá establecer el tiempo necesario para que una pieza con área determinada( $a$ ) tenga un deposito lo más similar a lo obtenido en las celdas Hull, se debe tomar en cuenta que el valor de las masas depositadas ( $W$ ) varían de acuerdo al metal a depositar como se evidencia en la tabla 18 igualmente para los valores del equivalente químico( $Eq$ ).

#### 5.2.4 Poder de penetración

El poder de penetración se estudió gracias al ángulo que presenta la celda Hull respecto al ánodo puesto que esta singularidad representa las diferentes distancias que puede presentar una pieza a galvanizar respecto del ánodo y que influye directamente en la deposición del metal mismo.

## 6 RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1 NIQUEL

Se realizó la primera prueba del baño de níquel para la cual solo contaba con los componentes bases sin abrillantadores, la figura 8 muestra el deposito realizado con la formulación base donde se obtuvo un recubrimiento estable, pero con poco brillo como se muestra.

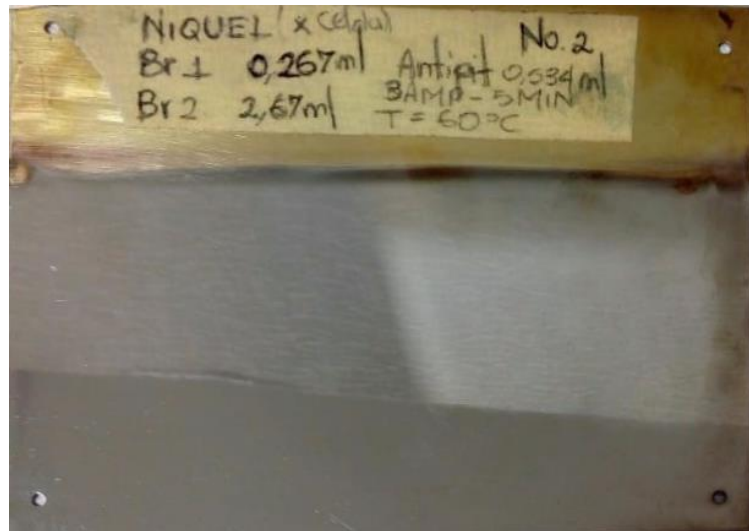
*Figura 8. Prueba número 1 del baño de níquel.*



*Fuente: Autor*

A partir de este recubrimiento se evidencia la falta de abrillantadores a la solución, por lo que se procedió adicionar las sustancias brightni 1 y brightni 2 los cuales son abrillantadores junto con el antipit el cual actúa como agente surfactante; las cantidades adicionadas se hicieron en base al volumen de la celda Hull (267ml) y se procedió a realizar nuevamente el recubrimiento a las mismas condiciones reportadas en la tabla 5 y el resultado de este se evidencia en la figura 9.

Figura 9. Prueba No. 2 del recubrimiento de níquel.



Fuente: Autor.

Tabla 12. Adiciones realizadas a la muestra de baño de níquel para la muestra número 2.

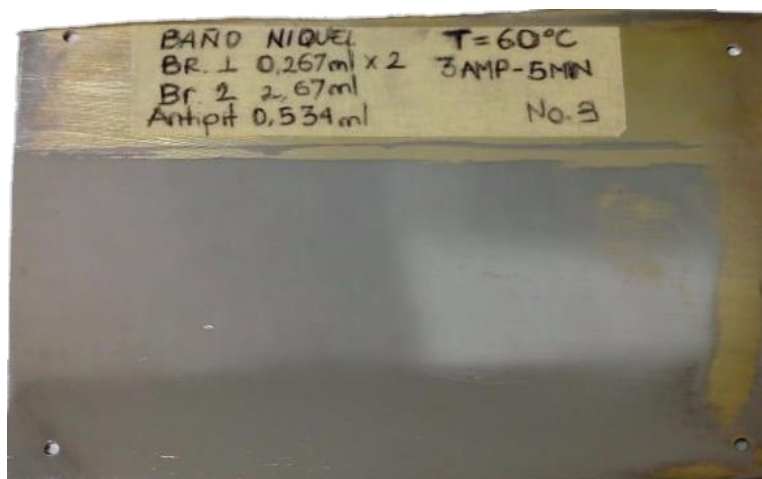
Componente	Concentración (ml/l)
Brightni 1	1
Brightni 2	10
Antipit	2

El adiconamiento de abrillantadores revela un recubrimiento con mayor brillo y la eliminación de la mancha descrita anteriormente, en este punto se puede considerar que el baño se puede encontrar óptimo para operar, basándose en el hecho que la placa presenta un recubrimiento nivelado para las diferentes distancias que se puede dar entre pieza-ánodo, sin embargo se observó un pequeño manchado en la parte superior y lateral derecho, por lo que se probó aumentar la cantidad de uno de los abrillantadores a fin de eliminarla, los datos de concentraciones adicionadas a la tercera prueba se muestra en la tabla 13 y el recubrimiento resultante en la figura 10.

Tabla 13. Adiciones realizadas al baño de níquel para la muestra número 3.

Componente	Concentración (g/l)
Brighni 1	10
Brightni 2	10
Antipit	2

Figura 10. Muestra No. 3 del recubrimiento de níquel.



Fuente: Autor.

Sin embargo, la placa número 3 que se muestra en la figura 10, a pesar de presentar buen brillo, el recubrimiento no se logra con la misma uniformidad de adherencia, determinándose así que la mejor composición para el baño de níquel es la que se dio para la muestra número dos con composiciones reportadas según la tabla 12.

## 6.2 COBRE FLASH

la figura 11 muestra la deposición realizada a partir de la formulación base para el cobre flash, nombrada como prueba uno y está realizada solo con los componentes base del baño sin ningún tipo de aditivo.

Figura 11. Prueba número 1 del recubrimiento de baño de cobre flash.



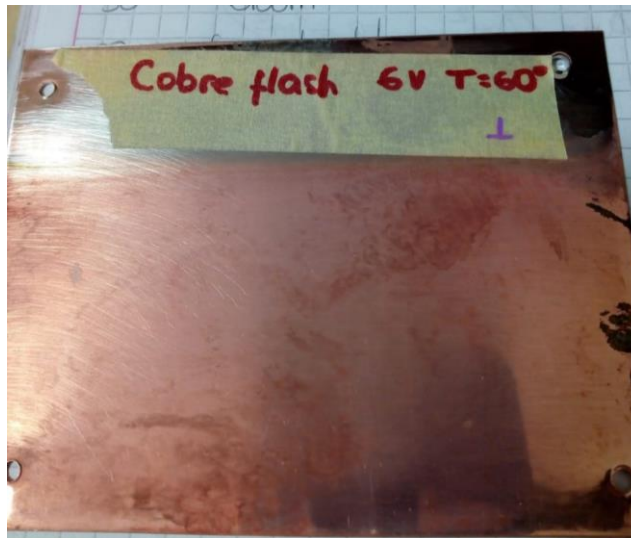
Fuente: Autor.

La muestra número 1 de este recubrimiento presenta desniveles en cuanto a la concentración depositada, esto se determinó debido a la diferencia que se presenta en cada extremo de la placa, en donde el lado izquierdo muestra un depósito opaco con un recubrimiento más denso mientras que el lado derecho presenta una película mucho más delgada y transparente, en este caso el cobre flash se debe depositar como una delgada capa por lo que se procedió a adicionar a la solución Tartrato de sodio y potasio para dar nivel al depósito y se disminuyó el tiempo de trabajo a 45 segundos, posteriormente se realizó de nuevo el análisis mediante la celda Hull y se obtuvo el recubrimiento observado en la figura 12 donde se evidencia una película mucho más pareja en cuanto al tono y concentración del cobre, tomando la formulación presentada en la tabla 14 como los valores óptimos para la solución destinada a la planta piloto, mientras la tabla 7 las condiciones a las cuales se debe operar.

Tabla 14. Formulación del baño de Cobre flash optimizado.

Componente	Concentración (g/l)
Cu	15-23
NaOH	1.3-3.8
Tartrato de Sodio y Potasio	15-30

Figura 12. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre flash.



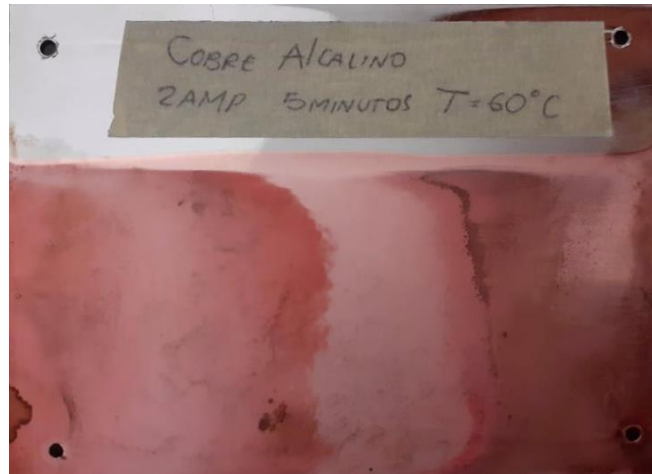
Fuente: Autor.

### 6.3 COBRE ALCALINO

En el proceso de optimización de este baño no se manejó de manera rigurosa un aspecto final detallado puesto que como se ha especificado anteriormente no es un baño decorativo, por el contrario es un baño que se encarga de darle protección a la pieza mediante un recubrimiento grueso, para este caso solo se presentaron dos pruebas la primera de control para saber el resultado, y como se evidencia en la figura 13 se presentan deposiciones más altas en la zona del medio, en este caso se procedió adicionar sal de Rochelle la cual mejora la naturaleza del depósito, mejorando el tono de la deposición haciéndola un poco más reluciente.

Para este tipo de baño se tomó en cuenta en mantener una relación 2:1 del Cu respecto al  $\text{KCN}^-$  libre es decir al tartrato de sodio y potasio.

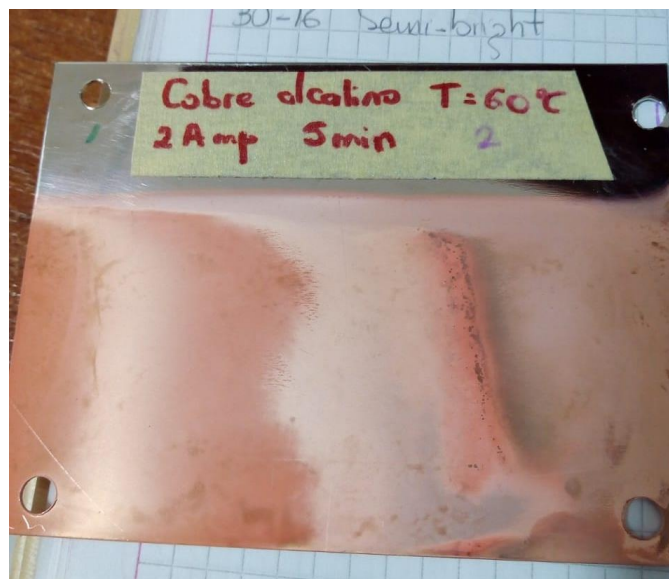
Figura 13. Prueba número 1 del recubrimiento de cobre alcalino.



Fuente: Autor.

La figura 14 muestra el resultado final del recubrimiento y se determinó este como el óptimo para operar, las cantidades finales para su formulación se muestran en la tabla 15.

Figura 14. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre alcalino.



Fuente: Autor.



Tabla 15. Formulación optimizada para el baño de cobre alcalino.

Componente	Concentración (g/l)
Cu	35-75
NaOH	14-30
Tartrato de sodio y potasio	30-45

#### 6.4 COBRE ACIDO BRILLANTE

La prueba número uno para el cobre ácido brillante se realizó de acuerdo a los parámetros y composiciones de las tablas 10 y 11, donde se obtuvo un depósito homogéneo a lo largo de la placa, pero bajo en brillo (Figura 15).

Figura 15. Prueba número 1 de la deposición de cobre ácido brillante.



Fuente: Autor.

Debido a que este depósito debe contar con brillo se adicionó una solución que contiene abrillantadores y niveladores proporcionada por la empresa y descrita bajo el nombre Make up y se continuo con la prueba en la celda Hull para conocer la calidad del recubrimiento. Las adiciones realizadas para mejorar el baño se muestran en la tabla 16 y su resultado del deposito en la figura 16.

Tabla 16. Adiciones de abrillantadores al baño de cobre acido brillante.

<b>Componente</b>	<b>Concentración (ml/l)</b>
<b>Make Up</b>	12

Figura 16. Prueba número 2 del recubrimiento de cobre acido brillante.



Fuente: Autor.

Aunque con esta adición de la solución abrillantadora reveló un brillo bastante alto, se puede observar ciertos rasguños y grietas que no logro recubrir (nivelar) por lo que se adiciono otra porción de Make up y se procedió nuevamente a realizar el depósito.

Tabla 17. Segundo sistema de concentración adicionado al cobre acido brillante.

<b>Componente</b>	<b>Concentración (ml/l)</b>
<b>Make Up</b>	24

Figura 17. Prueba número 3 del recubrimiento de cobre acido brillante.



Fuente: Autor

De acuerdo al depósito obtenido que se muestra en la figura 17 se observó un brillo parejo, buena nivelación y homogeneidad en el depósito respecto a la muestra dos y se determinó este como la composición óptima para el cobre acido brillante.

## 6.5 MASAS DEPOSITADAS

La tabla 18 reporta los valores obtenidos de las masas a depositar de acuerdo a la reacción que se da en los cátodos por otra parte, la tabla 19 presenta las masas halladas tomando en cuenta el área de la pieza a recubrir que para ese caso fue de 70cm<sup>2</sup>.

Los valores hallados de las masas obtenidas por estequiometría se compararon respecto de los valores máxicos hallados en función del área de trabajo mediante el cálculo de la diferencia de estos y el porcentaje de error que se presentan entre cada valor.

Tabla 18. Masas teóricas depositas según la reacción química

	<b>níquel</b>	<b>Cobre Flash</b>	<b>Cobre Alcalino</b>	<b>Cobre Acido</b>
<b>Masa (g)</b>	0.2736	0.02963	0.395	0,,395

Tabla 19. Masas depositadas.

	Níquel	Cobre flash	Cobre alcalino	Cobre acido brillante
<b>Corriente (A)</b>	3	2	2	2
<b>Tiempo (s)</b>	300	45	300	600
<b>Equivalente químico</b>	29.3	63.6	63.6	31.8
<b>Constante de Faraday</b>	96500	96500	96500	96500
<b>Masa depositada W (g)</b>	0.2732	0.059	0.395	0.39

Se determinó el porcentaje de error que se presenta entre los valores máxicos hallados que se presentan en las tablas 18 y 19, y se muestran a continuación.

Tabla 20. Porcentajes de error de los valores de masas depositadas

Baño	níquel	Cobre flash	Cobre alcalino	Cobre acido brillante
<b>% de error</b>	0.153 %	50 %	0.084 %	0.084 %

Esto indica que para la mayoría de los baños se depositó lo calculado teóricamente por estequiometria excepto para el cobre flash, esto puede deberse a que la masa depositada de la tabla 18 no toma en cuenta el área a recubrir y debido a la relación corriente/tiempo se esperarí un deposito menor, pero para un área inespecífica.

A partir de los valores hallados de masas depositadas respecto al área, es decir los reportados en la tabla 19 y teniendo en cuenta la densidad de corriente es posible determinar el tiempo necesario y la corriente requerida para cubrir una pieza con un área en especifica independientemente de la distancia que se presente entre los ánodos y el cátodo en la planta piloto.

## 7 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA

Se realizó el diseño de la planta tomando en cuenta el tipo de piezas a ser recubiertas los cuales son sustratos metálicos destinados a la bisutería, acabados y joyería. Para el dimensionamiento se trabajó de acuerdo al volumen producido de las soluciones electrolíticas para cada baño que previamente ya se han estudiado y optimizado para su correcta operación, las especificaciones de los equipos auxiliares con que deben contar y la ubicación de estos en cada tanque.

En el caso del dimensionamiento del tanque como el tamaño del objeto influye directamente se propuso una pieza a galvanizar con medidas máximas de 10 cm de alto por 10 cm de largo y 5 cm de ancho, o lo que puede equivaler a dos piezas de 5 cm y grosor hasta de 5 cm.

Las especificaciones de los equipos de calentamiento se hicieron de acuerdo a la potencia necesaria para que se de cada operación calculada.

### 7.1 ETAPAS PREVIAS E INTERMEDIAS AL REVESTIMIENTO

Las etapas previas al revestimiento implican el desengrase (por inmersión y electrolítico), activación y enjuague, en esta etapa se seleccionó contenedores de plástico. Las operaciones de lavado se disponen entre cada etapa de recubrimiento a fin de evitar el escurrimiento que puede llevar a la contaminación. La tabla 21 describe el número de etapas necesarias previas que requiere cada baño y su descripción.

Tabla 21. Descripción de las etapas previas a cada baño.

Baño	Numero de Etapas Previas	Descripción
<b>Cobre Flash</b>	5	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Desengrase</li><li>○ Enjuague</li><li>○ Activación acida</li><li>○ Enjuague</li><li>○ Enjuague</li></ul>
<b>Cobre Alcalino</b>	0	-
<b>Níquel</b>	5	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Enjuague</li></ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Enjuague</li> <li>○ Activación acida</li> <li>○ Enjuague</li> <li>○ Enjuague</li> </ul>
<b>Cobre acido brillante</b>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Enjuague</li> <li>○ Enjuague</li> <li>○ Activación acida</li> <li>○ Enjuague</li> <li>○ Enjuague</li> </ul>

## 7.2 EQUIPOS Y REQUERIMIENTOS

### 7.2.1 Contenedores

Los recipientes a contener las soluciones de desengrase, activación y enjuague son operaciones que no requieren de ánodos por lo tanto no requieren de distancias fijas entre ánodo y cátodo lo que genera un dimensionamiento del contenedor con una única restricción, las dimensiones de la pieza de trabajo, como consecuencia el volumen a contener para estas operaciones es función del dimensionamiento.

El volumen que ocupa la especie a recubrir es de 500cm<sup>3</sup>, a partir de este dato se definió las dimensiones del equipo y el volumen estimado que deba contener, los valores para estas etapas se describen en la tabla 22, el volumen estimado para estas operaciones es de 2 litros.

*Tabla 22. Dimensiones de los tanques de desengrase, activación y enjuague*

<b>Dimensión</b>	<b>Longitud (cm)</b>
<b>Alto</b>	15
<b>largo</b>	15
<b>ancho</b>	10

### 7.2.2 equipo de corriente

El rectificador que se requiere debe trabajar a una corriente alterna de 110 V y convertirla a un voltaje entre 0-12 V con una corriente continua hasta de 20 Amperios para cubrir los rangos de trabajo en cada etapa.

En el sistema de corriente es importante resaltar que cada baño debe contener su rectificador de corriente que a su vez debe estar calibrado de acuerdo al amperaje que maneje cada deposición. No es recomendable utilizar el mismo rectificador para todas las deposiciones puesto que se puede producir una pérdida total del revestimiento si no se maneja el amperaje y voltaje correcto.

### 7.2.3 equipo de agitación

Para el sistema de agitación de los baños se selección la agitación mecánica horizontal ya que permite un mantenimiento fácil de los contenedores y no contribuyen a la contaminación del baño. Los requerimientos mínimos para esta operación es que el movimiento se debe dar de manera longitudinal al cátodo con un recorrido de dos metros por minuto (2 m/min), con agitación de suave-moderada, ya que una agitación que genere turbulencia puede incurrir en una deficiencia de la deposición por la generación de aire en el interior de la solución.

Igualmente, que los rectificadores cada baño debe contar con sus propios agitadores, y debido a que se contara con dos ánodos dispuestos a cada cara de la pieza se recomienda dos agitadores igualmente ubicados a cada cara.

### 7.2.4 equipo de calentamiento

Para calcular el calor requerido para calentar cada una de las soluciones hasta la temperatura de trabajo y la potencia requerida se definió cada baño como un sistema cerrado estacionario y volumen constante, la ecuación 10 describe la cantidad neta de transferencia de calor que entra o sale del sistema.

$$Q = m * C_v * \Delta T \quad \text{Ec. 10}$$

Donde m es la masa involucrada del sistema en este caso la masa de la solución electrolítica,  $C_v$  es el calor específico que se representara con el calor específico del

agua (4.18 KJ/Kg °C) y  $\Delta T$  es el cambio de temperatura que se presentara en el sistema como consecuencia en el aumento de energía. La tabla 23 muestra los calores necesarios para calentar cada baño y las potencias requeridas para 4 horas de trabajo.

$$P = \frac{Q}{t} \quad \text{Ec. 11}$$

La potencia requerida se calculó a través de la ecuación 11 en base a un tiempo de 4 horas de operación de la planta

Tabla 23. Calores y potencias requeridas para el calentamiento

<b>BAÑO</b>	<b>NIQUEL</b>	<b>COBRE FLASH</b>	<b>COBRE ALCALINO</b>	<b>COBRE ACIDO BRILLANTE</b>
<b>Calor Q (KJ)</b>	4700	3492	3693	840
<b>Potencia requerida(W)</b>	326.3	242.5	256.5	58

A partir de estos datos obtenidos se determinó que los calentadores de inmersión pueden trabajar con una resistencia de 1 KW o 500 W.

### 7.2.5 dimensionamiento del reactor electrolítico

En el dimensionamiento de los tanques se estandarizo las medidas para todos los tanques y se tomó como referencia las distancias que se presentan en la celda Hull entre el ánodo y el cátodo, estos valores fueron definidos como las distancias mínimas que se pueden presentar entre los ánodos y el cátodo.

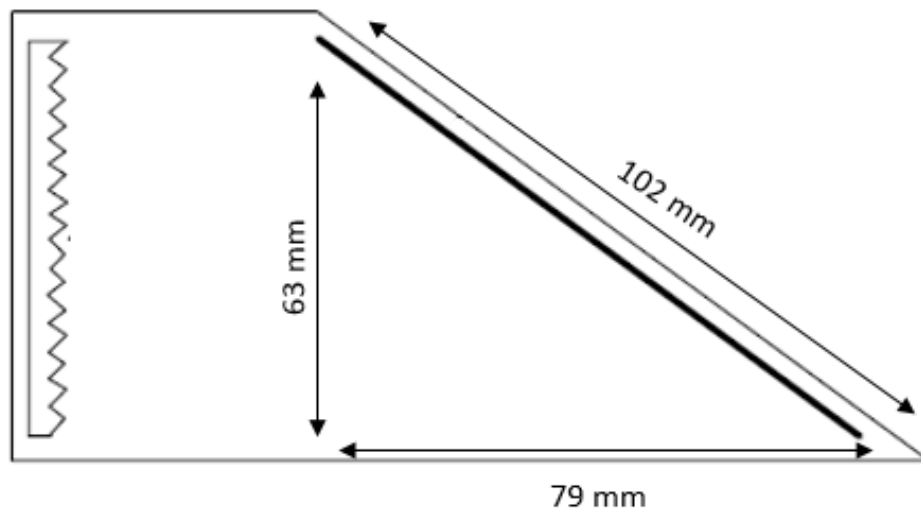
Primero se determinó la distancia media que debe existir entre el ánodo y el cátodo para ello se tomaron las longitudes mostradas en la figura 4 y mediante la demarcación del triángulo formado por el ángulo que se da entre el cátodo y el lado inferior de la celda como se muestra en la figura 16, a partir de estos datos se definieron los catetos e hipotenusa que se muestran en la tabla 24.



Tabla 24. Distancias para el dimensionamiento del equipo.

	Longitud (mm)
<b>Cateto opuesto</b>	63
<b>Cateto adyacente</b>	80
<b>Hipotenusa</b>	102

Figura 18. Medidas para el cálculo de la distancia media.



Fuente: Autor.

Tomando el cateto adyacente se determinó la distancia de la siguiente manera:

$$d_{media} = d_{total} - \frac{\text{cateto adyacente}}{2} \quad \text{Ec. 9}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$d_{media} = 126\text{mm} - \frac{80\text{mm}}{2}$$

$$d_{media} = 86 \text{ mm} = 8.6\text{cm}$$

La distancia media a la que se debe encontrar la pieza del ánodo son 8.6 cm como mínimo y como se describe en la sección de ánodos se requerirán dos dispuestos a cada extremo del tanque a fin de recubrir la pieza uniformemente por todas las caras, por lo que para determinar el largo del tanque se tomó dos veces la distancia media y se sumó el espacio que puede ocupar los ánodos asumiendo un valor de 1.5 cm para cada uno, es decir un total de 3 cm, otro valor importante es el grosor de la pieza misma, el cual se definió como 5 cm, en la tabla 25 se presenta esta información y la longitud mínima con que debe contar el largo del tanque.

*Tabla 25. Medidas a tomar en cuenta para el largo del tanque.*

	<b>Longitud (cm)</b>
<b>Distancia media total</b>	17.2
<b>Ancho de los ánodos</b>	3
<b>Ancho de la pieza</b>	5
<b>Distancia total mínima del largo del tanque</b>	25.2

A partir de estos datos se tiene que la longitud mínima del largo del tanque debe ser de 25.2 cm sin embargo es necesario sobre dimensionar por si algún equipo extra ocupa más espacio y también por seguridad, además funcionará en dado caso que la pieza sea más grande por lo que se tomó finalmente un largo de 30 cm, para el ancho y alto del tanque se tomó en cuenta que las distancias mínimas debe ser el largo y alto de la pieza a recubrir más una longitud de reserva para que la pieza pueda entrar al tanque y quede totalmente sumergida en el líquido por lo que la longitud mínima en ambos parámetros se estimó de 15 cm, igualmente se sobredimensiono en cuanto al volumen que debe contener, definiéndose así para un total de 25 litros.

Con estos datos se creó una función a fin de obtener las longitudes de ancho y alto del tanque que suplan la necesidad de contener los 25 litros y que sus valores no sean menores a 15 cm, obteniéndose finalmente los datos que se muestran en la tabla 26.

*Tabla 26. Dimensiones del reactor electrolítico.*

<b>Dimensión</b>	<b>Longitud (cm)</b>
<b>largo</b>	30
<b>Ancho</b>	24
<b>Alto</b>	35

El anexo B muestra el prototipo del tanque con sus dimensiones.

### 7.2.5.1 Material de fabricación de los tanques

Para determinar el material de los tanques se hizo una revisión sobre las características que debe presentar para cumplir adecuadamente y con seguridad las operaciones, la tabla 27 muestra las variables comprometidas y las especificaciones con que debe contar.

Tabla 27. requerimientos mínimos para la construcción del tanque.

<b>Variable</b>	<b>Especificación</b>
<b>Químicos</b>	Resistir al ataque de los productos químicos que pueden ser orgánicos o inorgánicos, oxidantes y no oxidantes
<b>Temperatura</b>	Resistir los amplios rangos de temperatura que se pueden presentar para trabajar
<b>Rendimiento</b>	Maximizar el rendimiento y facilitar el mantenimiento del mismo
<b>Condiciones externas</b>	Resistir a las condiciones climáticas que se puedan presentar externamente.

Respecto al cuadro anterior se estudió los posibles materiales y sus características más relevantes para llevar a cabo correctamente todas las operaciones, se realizó una comparación entre los posibles materiales de construcción, la tabla 28 muestra los estos materiales y sus características.

Tabla 28. Características de los posibles materiales de construcción de los tanques electrolíticos.

<b>Cloruro de Polivinilo (PVC)</b>	<b>Polipropileno (PP)</b>	<b>Plásticos reforzados con fibras (FRP)</b>
El PVC rígido tiene gran resistencia a la tracción	Buena resistencia, dureza y rigidez	Resistencia a la tracción cercana al acero inoxidable

El calentamiento prolongado puede provocar descomposición y liberar HCl	No tóxico, buena resistencia térmica.	Buen rendimiento térmico
Temperatura de trabajo: -15°C hasta 55°C	Temperatura de trabajo: 10°C hasta 100°C	La temperatura de Trabajo puede variar de acuerdo a los aditivos que presente.
Alta resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión	Aislamiento no afectado por la humedad y resistente a la corrosión	Buena resistencia a la corrosión

A partir de este cuadro se determinó como material para los tanques el polipropileno por su amplio rango de trabajo de temperatura bajo condiciones seguras y por su bajo costo frente a los plásticos reforzados con fibras.

#### 7.2.6 Ánodos

En los tanques de revestimiento se propone el uso de dos ánodos a fin de disponerlos a cada lado del objeto a recubrir y de una manera equidistante entre ánodo-objeto-ánodo para obtener un recubrimiento estable a lo largo de toda la superficie posible; para mantener los ánodos a una distancia estable en todo el proceso y facilitar su remoción si el tanque requiere limpieza, se propone un sistema de barras sujetadoras que atraviesen el tanque y de ellas se colgaran los sujetadores de los ánodos, estas barras deben ir atornilladas al tanque, para evitar posibles movimientos.

#### 7.2.7 Sujetadores

Para la fabricación de las gancheras y bastidores se tomó en cuenta que el material debe ser buen conductor a fin de lograr llegar a esas partes que están en contacto con el bastidor y poder recubrir todo la superficie, pero también debe ser resistente por lo que se estudió los materiales más recomendados para esta sección, determinándose así que el cobre es el material más utilizado, ya que tiene la conductividad más alta en relación con el precio, sin embargo se pueden usar ganchos fabricados de cobre y bastidores fabricados de acero, acero inoxidable, latón o aluminio si la conexión está por debajo del nivel de solución. Nuevamente, el factor principal es la conductividad. El acero, el acero inoxidable, el latón y el

aluminio tienen una conductividad menor que el cobre. La práctica más común es usar acero para lograr soportar el peso de las piezas y no contar con la mejor conductividad (B. M. Co, n.d.).

En este caso las piezas a soportar no generan mucho peso y se propone un sistema de una ganchera tipo V con un bastidor tipo T. Este sistema se diseñó en el software inventor tomando en cuenta las dimensiones del tanque.

### 7.3 DESCRIPCION DEL PROCESO DE LA PLANTA

El anexo A muestra un esquema general de las operaciones de una planta de galvanizado y se observa como independientemente del acabado que se quiera dar, es indispensable que la pieza o artículo pase por operaciones como el proceso de flash de Cobre, Cobre alcalino, Cobre Ácido brillante y Níquel para luego si ser recubiertas por enchapados como Bronces, Oro y Plata, a partir de esta esquematización se planteó el diseño de la planta piloto, en donde se cuenta con las operaciones principales ya nombradas , como proyecto futuro se espera ampliar con la implementación de las operaciones posteriores.

#### 7.3.1 DIAGRAMA PFD

El diagrama PFD se partió del diagrama de bloques general de una planta para galvanizado presentado en el anexo A, se identificaron previamente las necesidades de cada operación, se identificó cada operación con la asignación de

De acuerdo al proceso de galvanizado que se llevara a cabo se realizó el diagrama PFD, los datos de requerimiento y descripción de cada etapa se encuentran en la tabla 29.

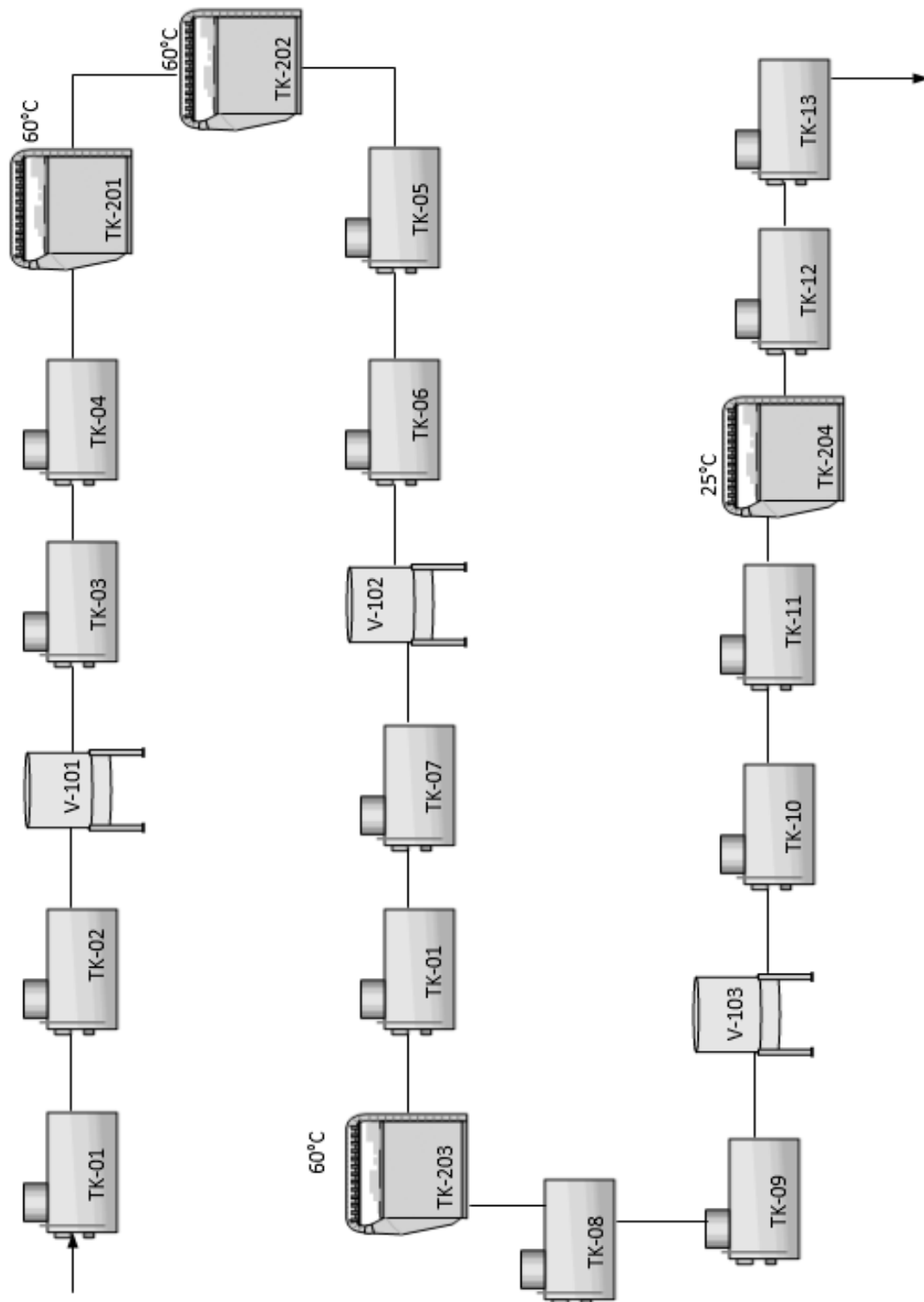
*Tabla 29. Necesidades de los equipos de acuerdo a la operación.*

	<b>Operación</b>	
<b>TK-01</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-02</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>V-101</b>	Activación	Tanque polipropileno 2 litros

<b>TK-03</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-04</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-201</b>	Recubrimiento de cobre flash	Tanque polipropileno 20 litros Calentador
<b>TK-202</b>	Recubrimiento de cobre alcalino	Tanque polipropileno 20 litros Calentador Agitador
<b>TK-05</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-06</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>V-102</b>	Activación	Tanque polipropileno 2 litros
<b>TK-07</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-08</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-203</b>	Recubrimiento de níquel	Tanque polipropileno 20 litros Calentador Agitador
<b>TK-09</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-10</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>V-103</b>	Activación	Tanque polipropileno 2 litros
<b>TK-11</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-12</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-204</b>	Recubrimiento cobre acido	Tanque polipropileno 20 litros

	brillante	Calentador Agitador
<b>TK-13</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)
<b>TK-14</b>	Desengrase	Tanque polipropileno 2 litros Calentamiento (opcional)

Figura 19. Descripción de la línea de galvanizado de la planta piloto.

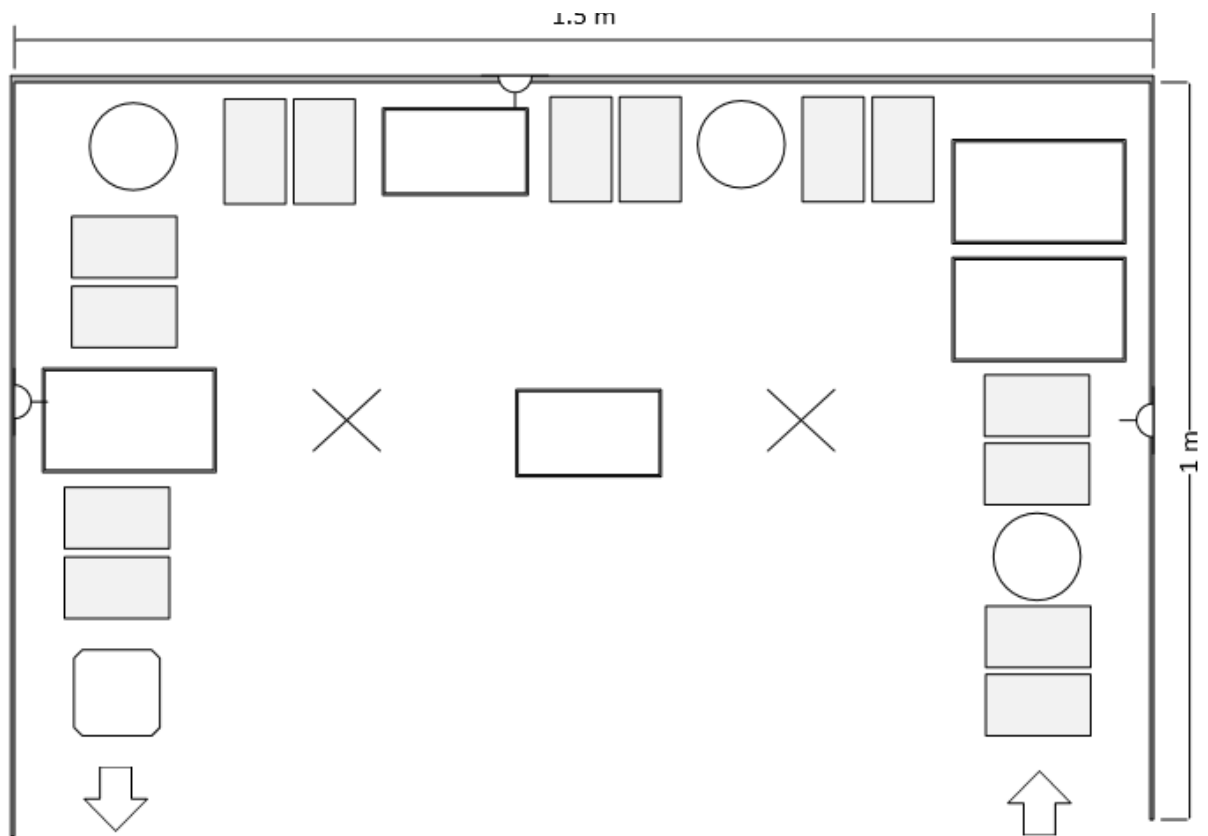




### 7.3.2 Distribución de la planta





En la distribución de la planta se tuvo en cuenta que entre cada operación debe haber la distancia más mínima posible para que no haya derramamientos fuera de los tanques de las sustancias y puedan generar riesgos o daños a la estructura a partir de los datos de dimensionamiento de los equipos se realizó un escalamiento de la planta como se evidencia en la figura 20.

Figura 20. Dimensionamiento y distribución de la planta.



Fuente: Autor

Tabla 30. Descripción de la simbología.

<b>Símbolo</b>	<b>Operación</b>
	Lavado
	Activación
	Baño de electrodeposición
	Secado

De acuerdo a esta distribución planteada solo se requiere un área de 1.5 m<sup>2</sup> para la instalación de la planta.

## 8 ANALISIS ECONOMICO

En el presente capítulo se determinaron los costos para el montaje de la planta piloto tomando en cuenta las operaciones secundarias como lavado, desengrase y activación, y las operaciones principales como lo son el galvanizado de níquel, cobre flash, cobre alcalino y cobre ácido brillante, para el análisis se tomó en cuenta los costos directos que vienen siendo la inversión en equipos y materias primas también los costos indirectos como el consumo de servicios.

Para el análisis se tomó en cuenta los parámetros que influirían en el costo total de la planta, sin embargo, se excluyeron ciertos parámetros como costo del sitio ( $C_{site}$ ) ya que la empresa cuenta con una zona habilitada para la disposición de la planta, la tabla 31 muestra los parámetros determinantes en el proceso del diseño conceptual para la instalación de la planta piloto y sus respectivas representaciones simbólicas.

Tabla 31. Costos a tomar en cuenta para el análisis económico.

Símbolo	Costo	Descripción del costo
<b>Costos directos (<math>C_{DC}</math>)</b>		
$C_p$	Costo de equipos	Equipos principales y que influyen en el costo de instalación
$C_{oL}$	Costos asociados a mano de obra	Costos dirigidos a personal de manejo de la planta
$C_{RM}$	Costos de materia prima	
<b>Costos indirectos</b>		
$C_{UT}$	Costos de servicios públicos	Servicios que requiere la planta para funcionar

### 8.1 COSTOS DIRECTOS

#### 8.1.1 Costo de equipos ( $C_p$ )

Para la estimación del costo de equipos se calculó el número de unidades requerido de cada equipo para la planta y se estableció el costo total de acuerdo al total de unidades y finalmente se calculó el costo total de equipos. Los valores de los

equipos presentados aquí se basaron en costos reales presentes en el mercado actualmente. Algunos equipos se cotizaron en el mercado internacional por lo que se utilizó la tasa de cambio representativa al día de la elaboración del análisis el cual se cotizó a \$3.643,02 por dólar estadounidense (“Tasa Representativa del Mercado (TRM - Peso por dólar) | Banco de la República (banco central de Colombia),” n.d.)

Los costos de los ánodos se realizaron por escalamiento de similaridad, debido a que no se encontró precios de acuerdo al tamaño requerido para la planta, sin embargo se pueden fabricar a la medida especificada, por lo que se tomó el precio para un ánodo de 7cm x 7cm y se calculó el porcentaje de incremento del precio en función del área de aumento por medio de la ecuación 10 (Turton, Bailie, Whiting, & Shaeiwitz, 2015).

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{A_a}{A_b}\right)^n \quad \text{Ec. 10}$$

Donde A es el atributo del costo, C el costo de compra y n el exponente de costo, de acuerdo a la literatura se tomó como n=6, *a* se refiere al equipo con el atributo requerido y *b* con el atributo base. Esta ecuación representa la relación entre el costo comprado de un equipo y los atributos de este y del esperado.

De acuerdo a las dimensiones del artículo base y del artículo que se requiere la relación de capacidad es de casi el triple por lo que se estableció de 2.8:1, quedando la ecuación 10 de la siguiente manera.

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{2.8}{1}\right)^{0.6}$$

A partir de esta relación se estableció el porcentaje de incremento y se determinó el costo para el tamaño requerido de los ánodos, los datos se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Precios de los ánodos.

	<b>Precio <i>b</i> (Dólar EEUU)</b>	<b>% incremento</b>	<b>Precio <math>\alpha</math> (dólar EEUU)</b>	<b>Precio a la tasa de cambio</b>
<b>Ánodo de Níquel</b>	\$25.75	85.47 %	47.76	\$173.985
<b>Ánodo de Cobre</b>	\$ 24.15	85.47 %	44.79	\$165.174

Tabla 33. Costo de equipos

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>No. De unidades</b>	<b>Precio por unidad (\$- peso colombiano)</b>
<b>Ánodo de Níquel</b>	Ánodo de 20x20cm Con bolsa de polietileno	2	173.985
<b>Ánodo de Cobre</b>	Ánodo de 20x20cm Con bolsa de polietileno	6	163.184
<b>Rectificador</b>	Entrada 115v Salida 0-12V con DC hasta 25 amperios Control de voltaje	4	4.174.900
<b>Calentadores</b>	Calentador de inmersión marca Denord acero inoxidable 12V-600W Dimensiones: diámetro 8mm Largo 180mm	5	223.000
<b>Agitadores mecánicos (Agitador de celda 115V)</b>	Agitador horizontal 115V Agitación suave-moderada	4	1.229.411

<b>Tanque para baños (25 litros)</b>	Tanque polipropileno 26l Dimensiones: 30alto x 30ancho x 30 largo Temperatura máxima:100°C	4	346.086
<b>Tanque para enjuagues</b>	Tanque en polipropileno Volumen: 1 galón (aprox. 3.7 litros)	16	134.800
		<b>C<sub>p</sub> total</b>	<b>27.600.462</b>

A partir de los costos reportados en la tabla 33 se calculó el costo total de los equipos, para el cual fue de \$27.600.462.

#### 8.1.2 Costo de materia prima ( $C_{RM}$ )

En la evaluación del costo de materia prima se tomó en cuenta los componentes para preparar cada una de las soluciones y las cantidades necesarias para el volumen de trabajo, los precios de cada reactivo se presentan en la tabla 34.

Tabla 34. Costo de materias primas

<b>Reactivo</b>	<b>Costo (\$)</b>
<b>Sulfato de níquel (Kg)</b>	930.000
<b>Cloruro de níquel (Kg)</b>	1.260.000
<b>Ácido bórico (Kg)</b>	116.000
<b>Hidróxido de Sodio (Kg)</b>	70.000
<b>Sulfato de Cobre (Kg)</b>	182.000
<b>Cianuro de potasio (Kg)</b>	1.820.000
<b>Ácido sulfúrico (l)</b>	150.000
<b>Ácido clorhídrico (l)</b>	52.000
<b>Agua desionizada (l)</b>	6.000
<b>Costo total C<sub>RM</sub></b>	<b>\$ 17.210.520</b>

Fuente Elementos químicos Ltda. y Auros Químicos Ltda.

### 8.1.3 Costo mano de obra operativa ( $C_{OL}$ )

Para este ítem se tomó en cuenta que se requerirían dos personas máximo para operar la planta en el momento del galvanizado, donde uno se encargaría de supervisar todas las etapas y sus respectivos controles de temperatura, mientras el otro funcionario realiza la supervisión de la electrodeposición, a partir de esto se estimó que el costo de mano de obra incurre en el salario de cada empleado, del cual se asumió como el salario mínimo legal vigente (“Inicio Ministerio del Trabajo - Ministerio del trabajo,” n.d.), los datos se muestran en la tabla 35.

Tabla 35. Costo de mano de obra

<b>SMLV 2020</b>	<b>Subsidio de Transporte</b>	<b>Total salario mínimo</b>
<b>877.803</b>	102.854	980.803
	COL mensual	\$1.961.606
	COL anual	\$23.539.272

De acuerdo a los costos obtenidos para equipos, materias primas y mano de obra, se calculó el total de los costos directos mediante la suma de estos costos (Turton et al., 2015).

$$C_{DE} = C_P + C_{RM} + C_{OL} \quad \text{Ec.11}$$

Finalmente, el costo directo fue de \$ 68.350.254.

## 8.2 COSTOS INDIRECTOS

### 8.2.1 Costo de consumo energético

El consumo energético se estableció en función de los rectificadores y calentadores quienes son los consumidores de energía eléctrica en este proceso. En el caso de los calentadores se tomaron las potencias requeridas para calentar cada operación reportadas en la tabla 23 y se determinó la cantidad de energía requerida para un tiempo de operación de 4 horas en un día, asumiendo que será utilizada solo una vez por semana, de esta manera se fijó el precio para el consumo anual.

Los datos de consumo por tiempo y costos se muestran en la tabla 36.

Tabla 36. costo energético de las operaciones

	Consumo KWh	Consumo anual KWh	Costo anual por operación (\$/año)
<b>Níquel</b>	1.3	62.649	139.600
<b>Cobre flash</b>	0.97	46.560	103.793
<b>Cobre alcalino</b>	1.02	49.248	109.785
<b>Cobre acido brillante</b>	0.23	11.136	24.824
		<b>Costo total anual</b>	<b>378.064</b>

Para determinar el consumo de los rectificadores se tomó en cuenta el consumo que requieren a la entrada es decir en la toma cuando aún no ha transformado la corriente alterna en continua, para ello se tomó en cuenta las especificaciones del rectificador propuesto en el costo de equipos, el cual trabaja con 115 Voltios y 25 amperios y mediante la ecuación 12 la cual me define cuanta de la potencia tomada es aprovechada por el circuito (“Formulae for Calculating Amperes, Horsepower, Kilowatts, and KVAs - Electrical References - Elliott Electric Supply,” n.d.; Mayacela & Otañez, 2013).

$$P (KW) = \frac{I*V*1.73*PF}{1000} \quad \text{Ec. 12}$$

La potencia utilizada por el rectificador es de 4.67KW, a continuación, se muestran la potencia requerida en una hora de trabajo, consumo y costo anual que conlleva operarlo 4 veces al mes por 4 horas.

Tabla 37. Costo energético de los rectificadores

Potencia	Consumo hora por unidad (KWh)	Consumo anual Total (KW)	Costo total Anual (\$/año)
<b>4.67</b>	74.8052	3.590	2.001.104



Finalmente se calculó el costo energético como la suma de los costos totales anuales de rectificadores y calentadores dando un total de \$2.379.169.

### 8.2.2 Costo de servicio de acueducto

El consumo de agua se dispone para operaciones de lavado y se estimó a partir de registros anteriores por el valor de \$80.000 mensuales, lo que indica un costo anual de \$960000.

Para el costo total de los servicios públicos se sumó los costos de energía y consumo de agua, los datos se observan a continuación.

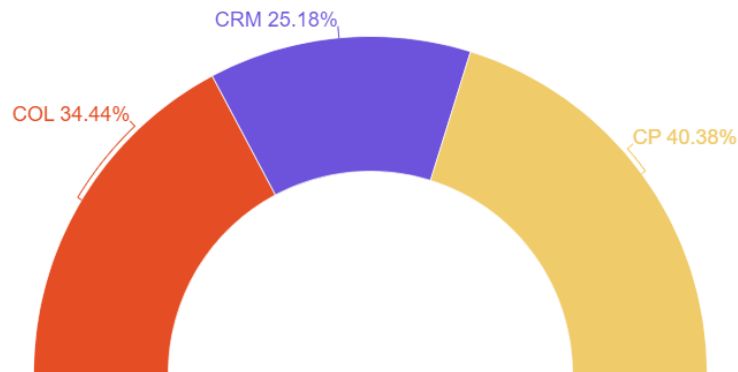
Tabla 38. Costos indirectos

Costo de energía (\$/año)	Costo acueducto (\$/año)	C <sub>UT</sub> (\$)
2.379.169	960000	3.339.169

### 8.3 ANALISIS DE COSTOS TOTALES

De acuerdo a los costos directos e indirectos se estima que el costo de montaje y operación anual es de aproximadamente \$ 72.000.000, por otra parte, el costo directo que viene siendo la inversión que se requiere para la instalación se analizó y se determinó la influencia de cada costo en este, como se presenta en la figura 21.

Figura 21. Análisis de los costos directos.

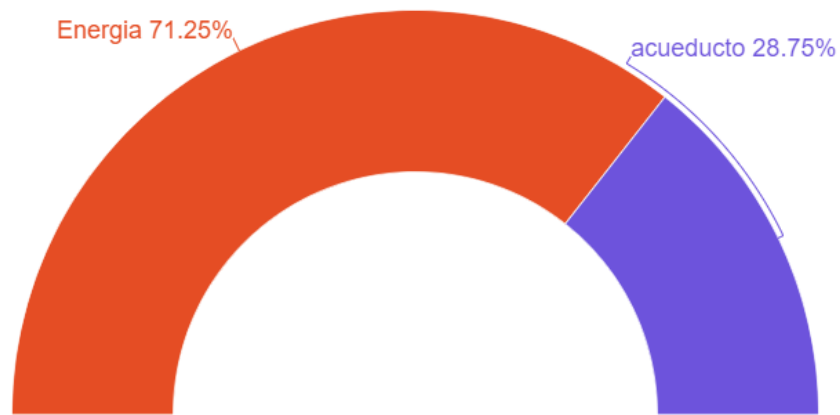


Fuente Autor.

Como se observa el costo más influyente es el costo de los equipos con un aporte del 59%, mientras que la adquisición de las materias primas abarca el 36,8% del costo directo.

De igual manera se analizó la influencia de los servicios en el costo indirecto y se muestran en el siguiente gráfico.

Figura 22. Análisis de costos indirectos.



Fuente: Autor.

El costo de energía anual influye hasta en un 71.25 % en los costos indirectos esto puesto que los equipos como calentadores y rectificadores requieren de ella para su funcionamiento, mientras que el servicio de agua solo será necesario para la limpieza de los equipos y la preparación de los desengrasantes que solo consumiría 28 litros aproximadamente para toda la planta, el lavado de equipos puede realizarse de 3 a 6 meses de acuerdo con la frecuencia de uso de la planta.

## CONCLUSIONES

Se logró encontrar los mejores valores de concentraciones para cada uno de los componentes de las soluciones electrolíticas que generaran el mejor recubrimiento posible sobre la pieza, observándose finalmente un buen nivel, brillo y recubrimiento en los diferentes metales depositados sobre las placas utilizadas. Se determinó las condiciones de operaciones que favorecen la deposición en el menor tiempo posible, como la agitación, la densidad de corriente, la temperatura de trabajo, la cual esta última para la mayoría de los baños un aumento leve en los baños mejora la velocidad de los iones metálicos.

El dimensionamiento de equipos en una línea galvánica es influenciado directamente por las distancias que se presente entre el ánodo y el cátodo (pieza a recubrir), pero también por el tipo de baño a trabajar, la temperatura, y el área a recubrir; por otra parte la celda Hull permitió establecer la distancia mínima entre ánodo y cátodo, la cual deberá ser la misma que se presente en un proceso a escala mayor, puesto que la pieza corre el riesgo de presentar un sobre deposito si la distancia es menor y se desconoce el tipo de deposición que se puede dar en zonas más cercanas, mientras que si la distancia es mayor simplemente por las densidades de corriente proporcionadas y el área de trabajo se puede establecer el tiempo, el voltaje y la corriente de recubrimiento óptimo para que se dé la deposición en zonas más alejadas. Si una pieza presenta lugares difíciles de deposición como huecos, los ánodos se pueden posicionar para favorecer el depósito o anexar más ánodos para que logre depositar el metal en ese tipo de morfologías superficiales.

Por último, se estableció un costo total de inversión y operación a lo largo de un año evaluado en \$72.000.000, en el cual el costo de los equipos se ve influenciado en mayor proporción por los rectificadores, el costo de las materias primas por el cianuro de potasio y el sulfato de níquel que, aunque este último no cuenta con un alto costo en comparación del cianuro de potasio, si se requiere gran cantidad.

Para la instalación y espaciamiento de la planta se determinó un área de 1.5m<sup>2</sup> tomándose en cuenta que el recorrido que debe realizar la pieza entre baño y baño sea el mínimo posible para evitar escurrimientos, daños colaterales en la instalación o riesgos para el personal que labora, como otra medida preventiva a estos riesgos, en el proceso de enjuague de la pieza se plantea dos operaciones seguidas, de este modo se retienen y eliminan la mayor cantidad de rastros de la solución electrolítica y que si no es removida puede causar contaminación en un baño posterior.

## BIBLIOGRAFIA

- 17.7 Electrolysis – Chemistry. (n.d.). Retrieved May 13, 2020, from <https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/17-7-electrolysis/>
- Alonso, N., & Scharifker, B. (2002). *Electroquímica y electrocatalisis* (N. Alonso, Ed.). Buenos Aires.
- B. B. Damaskin, O. A. P. (1980). *Fundamentos de Electro Química Teórica*. (MIR).
- Baudrand, D. (2008). Electroless processes. *Plating and Surface Finishing*, 95(11), 22–24.
- Belmont. (n.d.). Níquel - Belmont Metals. Retrieved April 29, 2020, from <https://www.belmontmetals.com/es/categoria-producto/niquel/>
- Berreto, D., & Buitrago, B. (2018). *Diseño conceptual de una línea de galvanoplastia en la empresa nacional de licuadoras Nailet S.A.S.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Chávez Porras, Á., Cristancho Montenegro, D., & Ospina Granados, É. (2009). Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: revisión bibliográfica. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 8(14), 39–50.
- CNPMLTA. (n.d.). *Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia*. Retrieved from [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Guías Resolución 1023 del 28 de julio de 2005/INDUSTRIAL Y MANUFACTURERO/Guias de buenas prácticas ambientales para recubrimientos electrolíticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Guías_Resolución_1023_del_28_de_julio_de_2005/INDUSTRIAL_Y_MANUFACTURERO/Guias_de_buenas_prácticas_ambientales_para_recubrimientos_electrolíticos.pdf)
- Co, B. M. (n.d.). *fundamentals of plating rack design*. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)82070-0](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82070-0)
- Co, R. . H. and C. (2001). Plating Quality Hull Cell Method. *Ipc*, (2), 2–4. Retrieved from <https://www.ipc.org/TM/2.3.21.pdf>

- Coleman, S. J., & Roy, S. (2018). Design of an ultrasonic tank reactor for copper deposition at electrodes separated by a narrow gap. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42(July 2017), 445–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.038>
- Design, specification, inspection of galvanized products. (n.d.). *Victoria*, 33–45.  
 Retrieved from  
[https://www.academia.edu/36344104/GALVANIZE\\_STANDARD](https://www.academia.edu/36344104/GALVANIZE_STANDARD)
- Di Bari, G. A. (2011). Electrodeposition of Nickel. *Modern Electroplating: Fifth Edition*, 79–114. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch3>
- Diaz del Castillo, F. (2008). *Principios de Electrodeposicion*.
- Dibari, G. (2013). Nickel plating. *Elsevier*. Retrieved from [www.inco.com](http://www.inco.com)
- Donaldson, J. (2008). Continuous strip plating of electronic components. *Metal Finishing*, 559–571.
- Dorfman, M. R. (2005). Thermal spray coatings. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 405–422. <https://doi.org/10.1016/B978-081551500-5.50022-7>
- Dummer, G. W. A. (1983). A Concise Description of Each Invention in Date Order. In *Electronic Inventions and Discoveries* (pp. 48–217).  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-029354-7.50016-3>
- Electroplating - Chemistry LibreTexts. (2019). Retrieved May 19, 2020, from [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Analytical\\_Chemistry\)/Electrochemistry/Electrolytic\\_Cells/Electroplating](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Electrochemistry/Electrolytic_Cells/Electroplating)
- Encyclopedia Britannica. (2020). Electroplating | Britannica. Retrieved May 19, 2020, from <https://www.britannica.com/technology/electroplating>
- Formulae for Calculating Amperes, Horsepower, Kilowatts, and KVAs - Electrical References - Elliott Electric Supply. (n.d.). Retrieved June 10, 2020, from <http://www.elliotelectric.com/StaticPages/ElectricalReferences/Calculations/EI>

ectrical\_Formulas.aspx

- FUNDES. Red de soluciones empresariales. (2010). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica*. 87.
- Gabe, D. R. (David R. (1978). *Principles of metal surface treatment and protection*. Pergamon Press.
- Gallego, A., Gil, J. F., Castro, E., & Piotrkowski, R. (2007). Identification of coating damage processes in corroded galvanized steel by acoustic emission wavelet analysis. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4743–4756.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.018>
- García, E. R. (2009). *Guía para la implementación del proceso de galvanolastía, en el laboratorio de metalurgia y metalografía de la facultad de ingeniería, USAC*. 103.
- Glayman, J., & Faros, G. (1969). Galvanotecnia. Técnicas y procedimientos. Retrieved May 25, 2020, from [https://books.google.com.co/books?id=12ovAAAAYAAJ&q=galvanotecnia.tecnicas+y+procedimientos,+glayman&dq=galvanotecnia.tecnicas+y+procedimientos,+glayman&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwibhLb5vt\\_pAhWEdt8KHR5zA5IQ6AEIKDAA](https://books.google.com.co/books?id=12ovAAAAYAAJ&q=galvanotecnia.tecnicas+y+procedimientos,+glayman&dq=galvanotecnia.tecnicas+y+procedimientos,+glayman&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwibhLb5vt_pAhWEdt8KHR5zA5IQ6AEIKDAA)
- Hayyat, U., & Ali, A. (2019). Analysis of electroplating plant on different materials Final Project On Analysis of electroplating plant on different materials. *Mechanical Engineering Technology*, 2015–2019.
- History of Galvanizing. (n.d.). Retrieved April 27, 2020, from <https://www.galvanizing.org.uk/hot-dip-galvanizing/history-of-galvanizing/>
- HRS. (2020). Baños De Cobre – Industrias HRS. Retrieved June 3, 2020, from <https://www.industriahrs.com/main/banos-de-cobre/>
- HRS SAS. (2018). *Hoja Técnica Cobre Acido Brillante HRS SAS*.
- lii, R. L. Z., & Jr, L. S. (1994). Effects of Phosphorus on Corrosion Resistance of Electroless Nickel. *Corrosion Science*, 50(6).

- INGAL Specifiers Manual. (2005). *Industrial Galvanizers Australian Galvanizing Division*. Retrieved from [www.ingal.com.au](http://www.ingal.com.au).
- Inicio Ministerio del Trabajo - Ministerio del trabajo. (n.d.). Retrieved June 10, 2020, from <https://www.mintrabajo.gov.co/web/guest/inicio>
- Johnson, D. (2008). DC power supplies. *Control Engineering*, 55(6), 72–76. [https://doi.org/10.1016/s0026-0576\(99\)80067-1](https://doi.org/10.1016/s0026-0576(99)80067-1)
- Julve, E. (2009). Historia de la galvanotecnia y técnicas afines. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*, 105(3), 227–233.
- Kang, K., Park, J., Hyoung, S., & Oh, J. Y. (2014). Apparatus for controlling thickness uniformity of electroplated and electroetched layers. *United States Patent*, 2(12).
- Konishi, S. (1965). Electroless Studies of Plating Copper Plating ( Part II). *Industrial Research Institute Osaka Prefecture*.
- Kreysa, G., & Schutze, M. (2011). Handbook of Hot-dip Galvanization. Retrieved May 7, 2020, from <https://books.google.com.co/books?id=BBK95gdN9sUC&pg=RA4-PA6&lpg=RA4-PA6&dq=PARAMETER+AND+REQUIREMENT+OF+GALVANIZE&source=bl&ots=ZF8iN1haVr&sig=ACfU3U3q9suePFFOFCYqDbb6kOtjETIxyg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiZ697hx4vpAhVkmuAKHbaKAq0Q6AEwCXoECAoQAQ#v=onepage>
- Lima, F., Mescheder, U., & Reinecke, H. (2012). Simulation of Current Density for Electroplating on Silicon Using a Hull Cell. *2012 COMSOL Conference*, (February 2015), 1–7.
- Mayacela, C., & Otañez, N. (2013). *Diseño, construcción e implementación de un sistema de pulido electrolítico de materiales ferrosos para el proceso de cromado en la empre “Ingenieros Lara Nuñez CIA LTDA.”*
- Metal Finishing association. (2000). *Guidebook and Directory Issue*. 98.

- Milad, B. G. (2005). *Acid copper plating evolves from early days of double and single-sided printed wiring boards*. 29–33.
- Miyake, M., Kubo, Y., & Hirato, T. (2014). Hull cell tests for evaluating the effects of polyethylene amines as brighteners in the electrodeposition of aluminum from dimethylsulfone-AlCl<sub>3</sub> baths. *Electrochimica Acta*, 120, 423–428.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.12.046>
- Nelson, A. (2008). Diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo de electrodeposición de cromo para el laboratorio de Ingeniería Química. *Ciudad Universitaria Rodrigo Facio*. Retrieved from  
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/968/1/29961.pdf>
- NIIR. (2006). The Complete Technology Book on Electroplating, Phosphating, Powder Coating and Metal Finishing. Retrieved June 4, 2020, from  
[https://books.google.com.co/books?id=klc8AgAAQBAJ&pg=PT45&lpg=PT45&dq=cathode+rod+agitation+\(non-air+agitation\)&source=bl&ots=mmgnN\\_1TFQ&sig=ACfU3U1fSh0h6qP08oG8w7wnLTmqWVx5fg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi0n-rkoufpAhVoUN8KHfVZC5cQ6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q=](https://books.google.com.co/books?id=klc8AgAAQBAJ&pg=PT45&lpg=PT45&dq=cathode+rod+agitation+(non-air+agitation)&source=bl&ots=mmgnN_1TFQ&sig=ACfU3U1fSh0h6qP08oG8w7wnLTmqWVx5fg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi0n-rkoufpAhVoUN8KHfVZC5cQ6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q=)
- Okinaka, Y., & Osaka, T. (2008). Electroless deposition processes: Fundamentals and applications. *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, 3, 55–116. <https://doi.org/10.1002/9783527616770.ch2>
- Raheja, D. G., & Allocco, M. (2005). Assurance Technologies Principles and Practices: A Product, Process, and System Safety Perspective: Second Edition. In *Assurance Technologies Principles and Practices: A Product, Process, and System Safety Perspective: Second Edition*.  
<https://doi.org/10.1002/0470009403>
- Richards, T. (n.d.). Immersion heater design. *Metal Finishing*, 678–698. Retrieved from [www.process-technology.com](http://www.process-technology.com)



- Schällibaum, J., Burbach, T., Münch, C., Weiler, W., & Wahlen, A. (2015). Nickel plating Handbook. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 46(7), 704–712. <https://doi.org/10.1002/mawe.201500402>
- Schweitzer, P. A. (2013). Fundamentals of Corrosion-Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Shen, L., Fan, M., Qiu, M., Jiang, W., & Wang, Z. (2019). Superhydrophobic nickel coating fabricated by scanning electrodeposition. *Applied Surface Science*, 483(April), 706–712. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.019>
- Tasa Representativa del Mercado (TRM - Peso por dólar) | Banco de la República (banco central de Colombia). (n.d.). Retrieved June 10, 2020, from <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm#gsc.tab=0>
- The Hull Cell: Key to Better Electroplating - Part I | Products Finishing. (n.d.). Retrieved May 2, 2020, from <https://www.pfonline.com/articles/the-hull-cell-key-to-better-electroplating-part-i>
- Tratamiento de aguas residuales industriales - Aguas residuales urbanas. (n.d.). Retrieved March 7, 2020, from <https://oplusdepuernord.com/es/sectores/industria-galvanica>
- Turton, R., Bailie, R., Whiting, W., & Shaeiwitz, J. (2015). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (3ra ed., Vol. 3). Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Voytko, J. E. (2008). Organic finishing & pretreatment. *Plating and Surface Finishing*, 95(11), 29–31.
- Wiley, J. (2010). Modern Electroplating. Retrieved May 26, 2020, from <https://books.google.com.co/books?id=j3OSKTCuO00C&pg=PA112&lpg=PA112&dq=O.+I.+Pavlova,+Electrodeposition+of+Metals—An+Historical+Survey,+U.S.+Department+of+Commerce,+Springfield,+VA;+C.+A.+Smith,+“Early+Electroplating,+Part+2,+Commencement+of+Industrial+A>

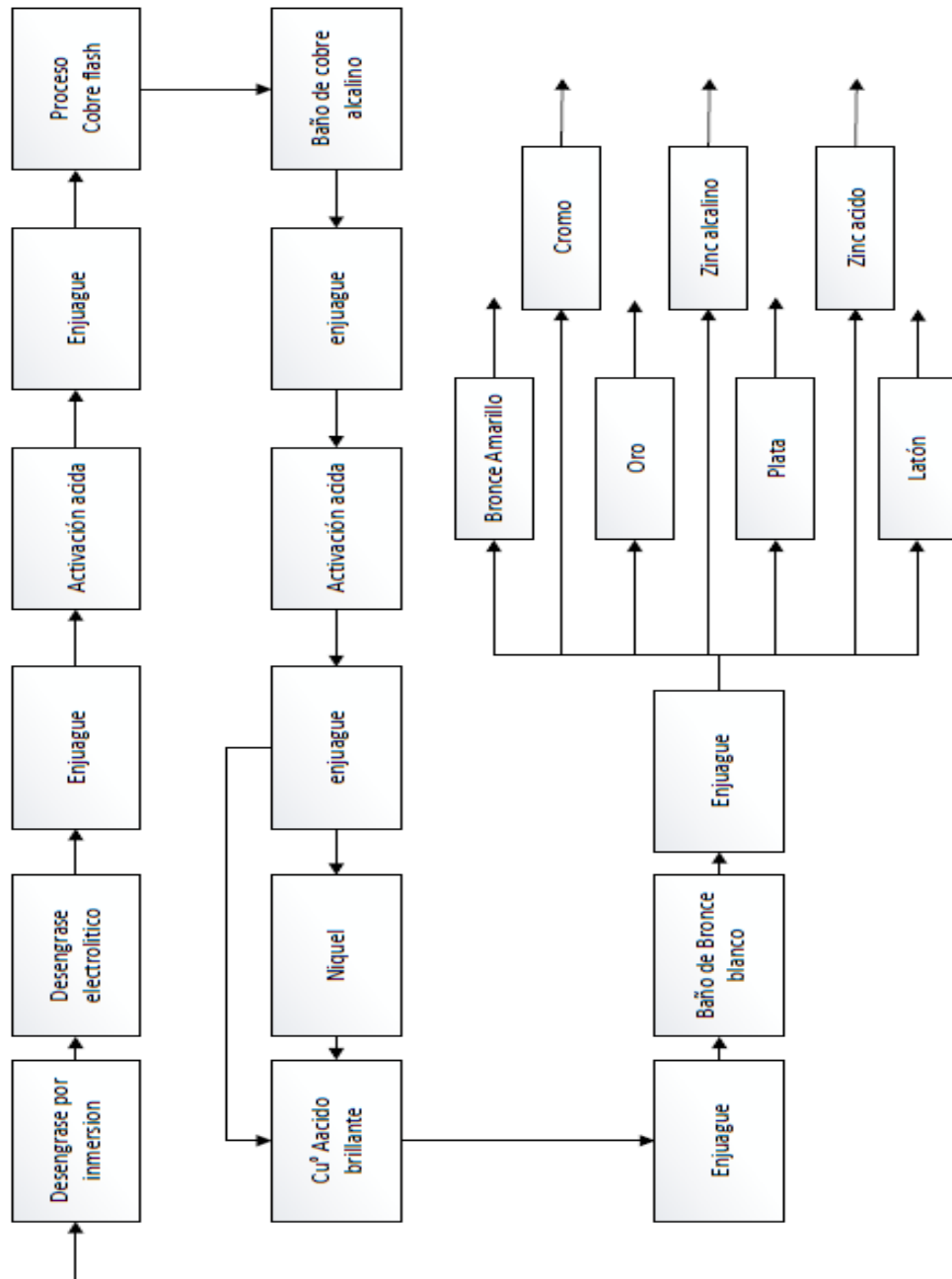
Yamada, T., Data, R. U. S. A., Examiner, P., & Ryan, P. (2010). *APPARATUS FOR CONTROLLING THICKNESS UNIFORMITY OF ELECTROPLATED AND ELECTROETCHED LAYERS*. 2(12).

Zaputt, P. (n.d.). Galvanotecnia. Retrieved May 19, 2020, from <https://www.academia.edu/33537050/Galvanotecnia>

## ANEXOS

### ANEXO A

Diagrama de bloques para una planta de galvanizado.



ANEXO B

Dimensionamiento del tanque para los baños, con soporte para ánodos y sistema de seguridad de ajuste para el sujetador.

