



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN
NEUMÁTICA A UN PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO Y
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO.**

**AUTORES: VILLAFUERTE CARRILLO, RICARDO PATRICIO
VIZCAÍNO NARVÁEZ, DAVID ARTURO**

DIRECTOR: SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN NEUMÁTICA A UN PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO”** realizado por los estudiantes **RICARDO PATRICIO VILLAFUERTE CARRILLO** y **DAVID ARTURO VIZCAÍNO NARVÁEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **RICARDO PATRICIO VILLAFUERTE CARRILLO** y **DAVID ARTURO VIZCAÍNO NARVÁEZ** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, marzo del 2018

Ing. Luis Segura Sangucho
DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN NEUMÁTICA A UN PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

Sangolquí, marzo del 2018

Ricardo Patricio Villafuerte Carrillo
C.C 1804593406

David Arturo Vizcaíno Narváez
C.C 040122097-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **RICARDO PATRICIO VILLAFUERTE CARRILLO** y **DAVID ARTURO VIZCAÍNO NARVÁEZ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN NEUMÁTICA A UN PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, marzo del 2018



Ricardo Patricio Villafuerte Carrillo
C.C 1804593406



David Arturo Vizcaíno Narváez
C.C 040122097-5

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mis Padres Hernán y Sandra, pues ellos son quienes día a día me han apoyado en todo ámbito de mi vida y gracias a su cariño, esfuerzo y buena educación he logrado culminar mis estudios universitarios, esperando que este nuevo logro los llene de orgullo y felicidad. A mi hermano, quien mediante palabras de aliento ha sido mi gran apoyo en cada paso y hacerme sentir que tengo la gran responsabilidad de ser un buen ejemplo para él, esperando que mediante esta meta alcanzada le sirva de una pequeña guía en su vida.

A mis amigos y compañeros tanto de clases como de vida social, quienes siempre me han demostrado su respaldo y confianza, a lo largo de un camino lleno de alegrías y sufrimientos.

Ricardo Patricio Villafuerte Carrillo

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres Arturo y Katya, que siempre han estado incondicionalmente apoyándome, tanto emocional como económicamente, e impulsándome siempre a ser una mejor persona. A mi hermano, con quien en varias ocasiones compartimos noches de desvelo, espero que esta meta alcanzada le sirva de guía y ejemplo, y le inspire a culminar su carrera universitaria de la mejor manera posible.

Dedico también de manera especial este trabajo a mi abuelito Wilson quien fue la persona que desde pequeño me inspiró a seguir una ingeniería técnica, y estuvo junto a mi durante todos estos años universitarios apoyándome, ayudándome con diversos proyectos, siempre dispuesto a brindarme su mano amiga y sabiduría.

David Arturo Vizcaíno Narváez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la sabiduría, paciencia e inteligencia para poder sobrellevar cada adversidad, le agradezco por la vida, salud y bendiciones que me da lo cual hizo que pueda culminar con éxitos el presente proyecto.

A mi madre Sandra Carrillo, quien ha sido mi ejemplo a seguir, brindándome su cariño y educación; a mi padre Hernán Villafuerte quien mediante su excelente ejemplo de perseverancia, cariño y educación me ha enseñado a siempre seguir adelante; a mi hermano Carlos Villafuerte quien con sus palabras de aliento me ha levantado de cada caída, ellos han sido mi modelo a seguir tanto a nivel humano como profesional.

A mis abuelitos, Guillermo y Bolívar quienes ahora son mis ángeles que guían mi camino en cada paso que doy; a mis abuelitas Marcela y Aidé las que con su inmenso cariño siempre me han respaldado; a toda mi familia por siempre estar pendientes de mí.

A mis amigos, por hacer de mi vida universitaria un camino de aventuras, alegrías y obstáculos pero que con su apoyo y confianza siempre me sentí resguardado.

A mi compañero de proyecto David que ha sido una excelente persona y amigo, siempre responsable para poder finalizar con éxito esta investigación, a sus padres y hermanos que estuvieron brindándonos su apoyo cada día.

Finalmente, a los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, que a lo largo de la carrera tuve sus sabias instrucciones y enseñanza para poder superarme y llegar a ser un buen profesional y de calidad humana.

Ricardo Patricio Villafuerte Carrillo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Arturo Vizcaino y Katya Narváez, por todo el apoyo brindado durante todos estos años, por su cariño incondicional, por los valores que desde pequeño me inculcaron, siempre han sido mi ejemplo a seguir tanto en la vida cotidiana como profesional, este logro es tanto mío como de ustedes. A mis hermanos, Santiago y María Cristina, por su cariño y comprensión.

A mis abuelitos, Wilson y Clemencia, por siempre estar presentes en todo momento, por su preocupación, paciencia y cariño, supieron levantarme el ánimo cuando más necesitaba, gracias por siempre abrirme las puertas de su hogar, durante todo este tiempo han sido como unos segundos padres para mí. A mi abuelito, Arturo, por siempre estar pendiente de mis estudios, por su preocupación y cariño.

A mis amigos, Diego, Juan pablo y Nury, quienes con sus palabras de aliento me ayudaron siempre a superar cada tropiezo impulsándome a levantarme y continuar adelante, gracias por brindarme una amistad verdadera. A mis amigos de infancia, por siempre levantarme el ánimo con sus bromas y buenas energías

A mi compañero de tesis, Ricardo por toda la ayuda, disposición, buenas energías y empeño puesto en este proyecto que hemos realizado llevándolo de la mejor manera posible hasta su culminación, tu aporte ha sido invaluable.

A mis profesores de universidad gracias por todos los conocimientos brindados, por siempre exigirnos a ser mejores e impulsarnos a soñar en grande.

David Arturo Vizcaino Narváez.

TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICADO	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
TABLA DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO 1	
GENERALIDADES	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Justificación e importancia	2
1.3 Área de influencia	3
1.4 Alcance.....	3
1.4.1 Componentes del Subsistema mecánico.....	4
1.4.2 Componentes del Subsistema electrónicos/eléctricos	4
1.4.3 Componentes del Subsistema de control	6
1.4.3.1 Diagrama de flujo general del proceso	7
1.4.4 Software para implementación, análisis y simulación	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo General	9
1.5.2 Objetivos Específicos	9
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Importancia del galvanizado	10
2.1.1 Tipos de Galvanizado	10

2.2 Sistemas neumáticos	12
2.2.1 Criterio para la selección de actuadores	13
2.2.2 Materiales de empleo dentro del sistema neumático para galvanizado electrolítico	14
2.2.2.1 Material empleado en la construcción de cubas	14
2.2.3 Sistema para el tratamiento de aire comprimido	15
2.2.3.1 Filtro de aire	15
2.2.3.2 Unidad de mantenimiento	16
2.3 Sistemas de Agitación	17
2.3.1 Método de agitación Air-Lift	18
2.3.2 Aire	18
2.3.2.1 Unidades de presión	19
2.3.2.2 Densidad del aire comprimido	19
2.3.3 Agitación Neumática	20
2.3.3.1 Determinación del diámetro de las burbujas (<i>dbms</i>)	21
2.3.3.2 Trayectoria de ascenso de las burbujas	21
2.3.3.3 Velocidad de ascenso de las burbujas	23
2.3.3.4 Velocidad del aire comprimido	23
2.3.4 Distribución de los Ser-Ductor para la agitación del fluido y configuraciones	24
2.4 Métodos de simulación para el comportamiento del fluido	24
2.4.1 Software para la simulación de fluidos	24
2.5 Importancia del pH	24
2.5.1 Importancia del pH en aplicaciones Industriales	25
2.5.2 Métodos de medición de pH	26
2.5.2.1 pH-metro de línea	27
2.6 Criterio para la selección de sensores	27
2.7 Tipos de Baños de Zinc	28
2.7.1 Solución empleada dentro del sistema de galvanizado electrolítico	29
2.7.2 Análisis de concentración del baño de zinc ácido	30
2.7.2.1 Formulación del baño de zinc ácido	30

2.7.2.2	Pre tratamiento y post tratamiento del baño de Zinc Ácido.....	30
2.7.2.3	Preparación del baño	31
2.7.3	Leyes de Faraday	34
2.7.3.1	Peso real del electrodepósito	35
2.7.3.2	Intensidad de corriente.....	36
2.7.3.3	Eficiencia catódica	36
2.7.3.4	Tiempo de electrodeposición	37
2.7.3.5	Espesor del metal depositado	38
2.7.3.6	Cantidad de masa depositada.....	38
2.7.4	Número de Reynolds	38
2.8	Métodos de optimización de parámetros	39
2.8.1	Determinación de parámetros de interés.....	40
2.8.2	Metodología Seis Sigma	40
2.8.2.1	Metodología Taguchi.....	42
2.8.2.2	Metodología de superficies de Respuesta (RSM)	44
2.8.2.3	Procedimiento para análisis de superficies de Respuesta.....	52
CAPÍTULO 3		
DISEÑO MECATRÓNICO		54
3.1	Método QFD.....	54
3.1.1	Introducción	54
3.1.2	Fases del QFD.....	54
3.1.3	Beneficios del QFD	56
3.1.4	Inconvenientes del QFD.....	57
3.2	Matriz de calidad	58
3.2.1	Definición de los requerimientos del cliente.	58
3.2.2	Definición de los requerimientos funcionales.....	58
3.2.3	Despliegue de la función de calidad del proyecto de galvanizado con baño de Zinc ácido QFD.	59
3.3	Diseño de detalle.....	60
3.3.1	Diseño Mecánico.....	60

3.3.1.1 Dimensionamiento de la tubería.....	60
3.3.1.2 Ancho, longitud y altura del tanque	61
3.3.1.3 Selección del tipo de tubería	66
3.3.1.4 Diseño Galvánico	68
3.3.1.5 Dinámica del sistema	71
3.3.1.6 Simulación del comportamiento del Fluido en la tubería	78
3.3.2. Diseño Eléctrico	82
3.3.2.1 Selección de elementos indicadores	82
3.3.2.2. Selección de elementos de control y potencia.....	84
3.3.2.3 Selección de elementos de protección	88
3.3.3 Diseño Electrónico	90
3.3.3.1 Selección de sensores	90
3.3.3.2 Selección de microcontrolador y controlador.....	94
3.3.3.3 Selección pantalla LCD	96
3.3.4 Construcción sistema de agitación neumático.....	96
3.3.4.1 Instalación de válvula que permite el paso del aire comprimido	96
3.3.4.2 Instalación de la Válvula de bola para medición de presión y caudal.	98
3.3.4.3 Instalación de la electroválvula de una sola vía.....	99
3.3.4.4 Conformación del sistema de agitación neumática	100
3.3.4.5 Implementación del sistema de agitación neumática dentro de la cuba de galvanizado electrolítico	100
3.3.4.6. Diagrama de flujo de proceso	101
3.3.5 Construcción sistema eléctrico.....	101
3.3.5.1 Diseño del gabinete de control.....	101
3.3.5.2 Planteamiento de la distribución de los elementos eléctricos en la puerta del gabinete de control.....	102
3.3.6 Implementación de los sensores en el equipo de galvanizado	102
3.3.7 Implementación de los componentes eléctricos y electrónicos en el gabinete de control.	103

CAPÍTULO 4**PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 105**

4.1 Pruebas de Funcionamiento.....	105
4.1.1 Pruebas Subsistema mecánico.....	105
4.1.1.1 Medición de la presión del aire comprimido	105
4.1.1.2 Comprobación de la velocidad del aire a la entrada del sistema de agitación neumática.....	106
4.1.1.3 Verificación de la agitación neumática de la solución.....	106
4.1.2 Pruebas Subsistema Eléctrico.....	107
4.1.2.1 Comprobación del encendido de la niquelina y control de la temperatura	107
4.1.2.2 Comprobación del encendido del pH-metro y lectura del pH de la solución.....	108
4.1.2.3 Verificación de activación de indicadores luminosos, pantalla LCD, selector y botones.....	108
4.1.3 Pruebas Integración de Subsistemas mecánico y eléctrico	110
4.2 Diseño Experimental	111
4.2.1 Factores de control y niveles de análisis	113
4.2.2 Arreglo ortogonal <i>L933</i>	113
4.2.3 Determinación de la relación inversamente proporcional de la intensidad de corriente y el tiempo de electrodeposición.....	115
4.3 Ejecución del galvanizado electrolítico	116
4.3.1 Pretratamiento de las probetas	116
4.3.2 Preparación manual de la solución de Zinc ácido	117
4.3.3 Configuración y comprobación de parámetros en el proceso de galvanizado	119
4.4 Ejecución de mediciones de revestimientos	119
4.4.1 Mediciones de masas original de las probetas	119
4.4.2 Mediciones de masas depositadas durante la electrodeposición	120
4.4.3 Resultados	121
4.5 Análisis de resultados por Metodología de Superficie de Respuestas (RSM).....	121

4.5.1 Aplicación del modelo de segundo orden	122
4.5.2 Modelo Ascendente-Descendente	122
4.5.3 Resultados de la metodología de Superficie de Respuestas	123
4.5.3.1 Análisis de Varianza.....	123
4.5.3.2 Resumen del modelo cuadrático	124
4.5.3.3 Coeficientes codificados	125
4.5.3.4 Ecuación de regresión en unidades no codificadas.....	125
4.5.3.5 Gráfica de contornos del proceso.....	126
4.5.3.6 Interpretación de resultados del gráfico de superficie de respuesta del proceso	127
4.5.3.7 Combinación de factores para obtener un revestimiento de $25\mu m$	128
4.6 Análisis comparativo entre resultados con metodología Taguchi y resultados con Metodología Superficie de Respuestas.....	129
CAPÍTULO 5	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
5.1 Conclusiones	132
5.2 Recomendaciones.	134
BIBLIOGRAFÍA	136
ANEXOS.....	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Materiales recomendados para el revestimiento de la cuba</i>	15
Tabla 2	<i>Composición Volumétrica del aire</i>	19
Tabla 3	<i>Características del aire</i>	19
Tabla 4	<i>Unidades de presión</i>	19
Tabla 5	<i>Densidad de aire en función de la temperatura</i>	20
Tabla 6	<i>Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías</i>	23
Tabla 7	<i>Criterios para seleccionar un sensor</i>	28
Tabla 8	<i>Formulación del baño de zinc ácido</i>	30
Tabla 9	<i>Condiciones de operación del baño de Zinc Ácido</i>	32
Tabla 10	<i>Tiempo de proceso según el amperaje empleado</i>	33
Tabla 11	<i>Espesores normados para recubrimientos</i>	38
Tabla 12	<i>Número de experimentos de un factorial 3k</i>	47
Tabla 13	<i>Requerimientos del cliente</i>	58
Tabla 14	<i>Requerimientos funcionales</i>	59
Tabla 15	<i>Resultados Requerimientos del cliente en matriz QFD</i>	59
Tabla 16	<i>Resultados Requerimientos funcionales en matriz QFD</i>	60
Tabla 17	<i>Medidas de ancho, longitud y altura del tanque</i>	61
Tabla 18	<i>Presión de Trabajo</i>	67
Tabla 19	<i>Velocidades del aire dentro del sistema de tubería</i>	74
Tabla 20	<i>Rugosidad absoluta de materiales</i>	75
Tabla 21	<i>Significado de los colores de los indicadores luminosos</i>	83
Tabla 22	<i>Características de luces piloto de 110V</i>	83
Tabla 23	<i>Características eléctricas de Módulo Relé</i>	84
Tabla 24	<i>Especificaciones Rectificador de corriente</i>	85
Tabla 25	<i>Control de temperatura</i>	86
Tabla 26	<i>Características del contactor</i>	87
Tabla 27	<i>Selector tres posiciones</i>	87
Tabla 28	<i>Cálculo para el dimensionamiento del disyuntor principal</i>	89
Tabla 29	<i>Características relé térmico 12-18A</i>	90
Tabla 30	<i>Controlador de ph-metro KEDIDA CT-6658</i>	91
Tabla 31	<i>Características electrodo CT-1001</i>	91
Tabla 32	<i>Características técnicas termocupla tipo J</i>	92
Tabla 33	<i>Características del sensor de nivel tipo flotador</i>	93
Tabla 34	<i>Anemómetro</i>	94
Tabla 35	<i>Características microcontrolador ATmega2560</i>	94
Tabla 36	<i>Controlador I2C</i>	95

Tabla 37	<i>Características lcd 20x4.....</i>	96
Tabla 38	<i>Factores de control y niveles de análisis.....</i>	113
Tabla 39	<i>Arreglo ortogonal L933</i>	114
Tabla 40	<i>Correlaciones.....</i>	115
Tabla 41	<i>Relación Intensidad de corriente vs Tiempo de electrodeposición</i>	115
Tabla 42	<i>Revestimientos y pesos de aporte</i>	121
Tabla 43	<i>Variables codificadas del proceso</i>	123
Tabla 44	<i>Análisis de Varianza.....</i>	124
Tabla 45	<i>Resumen del modelo cuadrático.....</i>	124
Tabla 46	<i>Coefficientes codificados.....</i>	125
Tabla 47	<i>Combinación de parámetros para un revestimiento de 25 micras</i>	128
Tabla 48	<i>Factores empleados en cada elemento de optimización</i>	129
Tabla 49	<i>Resultados obtenidos con metodología de Superficie de Respuestas</i>	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes del Subsistema Mecánico.....	4
Figura 2 Fuente de aire comprimido	4
Figura 3 Componentes del Sistema Eléctrico	5
Figura 4 Componentes del Subsistema de control	6
Figura 5 Diagrama de Flujo General del proceso	7
Figura 6 Circuito neumático básico.....	13
Figura 7 Componentes de un sistema neumático	13
Figura 8 Filtro de aire	16
Figura 9 Unidad de Mantenimiento FRL	17
Figura 10 Cuba con dispositivo de agitación con aire	18
Figura 11 Tamaño de la burbuja.....	21
Figura 12 Escala de Ph	25
Figura 13 pH-metro	27
Figura 14 Curva de rendimiento global vs Densidad de corriente.....	37
Figura 15 Relación entre causas y efectos	42
Figura 16 Tipos de superficies bidimensionales representadas por una ecuación cuadrática.....	46
Figura 17 Tipos de superficies tridimensionales representadas por una ecuación cuadrática.....	46
Figura 18 Diagrama de dispersión.....	48
Figura 19 Relación lineal (derecha) vs relación cuadrática (izquierda)	49
Figura 20 Diseño central compuesto para 2 factores.....	51
Figura 21 Diseño central compuesto para 3 factores.....	51
Figura 22 Número de experimentos en diseños compuesto central y Box-Behnken....	52
Figura 23 Beneficios del QFD.....	57
Figura 24 Tanque para el baño de zinc ácido.....	62
Figura 25 Ancho de trabajo	63
Figura 26 Longitud de Trabajo.....	63
Figura 27 Ramal horizontal con orificios pasantes.....	65
Figura 28 Sistema de un solo ramal para la agitación neumática	66
Figura 29 Juntas y uniones.....	68
Figura 30 Dimensiones de probetas a galvanizar	70
Figura 31 Condición de borde en el software ANSYS 18,2.....	79
Figura 32 Comportamiento del aire dentro de la tubería.....	79
Figura 33 Velocidad de entrada del sistema neumático.....	80
Figura 34 Velocidad de salida del sistema neumático	81

Figura 35 Presión en la tubería	82
Figura 36 Válvula de bola (paso del aire del compresor)	97
Figura 37 Filtro coalescente MC202-FB0	97
Figura 38 Filtro regulador de presión	98
Figura 39 Unidad de mantenimiento	98
Figura 40 Válvula de bola	99
Figura 41 Válvula de bola y acople en "T"	99
Figura 42 Instalación electroválvula monoestable	100
Figura 43 Implementación del sistema de agitación neumática	101
Figura 44 Distribución física de los elementos eléctricos en el gabinete de control	102
Figura 45 Implementación de los sensores de nivel, temperatura y pH en la cuba	103
Figura 46 Implementación de disyuntores y contactores	103
Figura 47 Implementación de la fuente para la etapa de control.....	104
Figura 48 Implementación de los relés y borneras	104
Figura 49 Presión de 0,5 bares en manómetro.....	105
Figura 50 Medición de la velocidad de entrada del aire al sistema de agitación neumática.....	106
Figura 51 Verificación de la agitación de la solución	107
Figura 52 Verificación del funcionamiento del controlador de temperatura	107
Figura 53 Comprobación de lectura del pH de la solución	108
Figura 54 Verificación del funcionamiento de indicadores	109
Figura 55 Botón de inicio del proceso de galvanizado	109
Figura 56 Activación del Paro de Emergencia	110
Figura 57 Prueba de funcionamiento subsistema mecánico y subsistema eléctrico ..	111
Figura 58 Relación intensidad de corriente vs Tiempo de electrodeposición	116
Figura 59 Rectificado de probetas	117
Figura 60 Decapado de probetas en mezcla de ácido	117
Figura 61 Calentamiento del agua a 60°C	118
Figura 62 Mezcla de sales para la solución de Zinc Ácido.....	118
Figura 63 Balanza electrónica Shimadzu UW2200H	119
Figura 64 Medición de método diagonal.....	120
Figura 65 Gráfica de contorno del proceso	126
Figura 66 Gráfica de Superficie de respuesta del proceso	128
Figura 67 Gráfico de optimización de parámetros	129
Figura 68 Resultados obtenidos con metodología Taguchi	130

RESUMEN

En este trabajo de titulación entre los objetivos de estudio y análisis, destacan como principales el diseño e implementación de un sistema de agitación neumática de la solución electrolítica. Con la cual se puede realizar ensayos de electrodeposición en frío en el equipo de galvanizado del laboratorio de procesos de manufactura y aplicar la metodología de superficie de respuestas (RSM) para poder realizar la optimización de parámetros del proceso. Con el fin de poder ejecutar un análisis estadístico y comparativo respecto a la metodología Taguchi aplicada previamente y determinar si los resultados obtenidos de revestimiento en las probetas de acero ASTM A36 cumplen con la norma ASTM B633. La primera parte consta del fundamento teórico en cuanto al tipo de baño empleado y el análisis computacional sobre el diseño de tubería más adecuado para poder realizar la agitación de la solución. Además, se basa en conocer los sistemas eléctricos, electrónicos y de control para poder realizar la automatización del equipo de galvanización. La aplicación de control de calidad se centra en el diseño de experimentos de la metodología de superficie de respuestas, luego de determinar la matriz ortogonal que se ajuste a los parámetros más influyentes del proceso para llevar a cabo el estudio de la optimización del espesor de revestimiento. Luego de seleccionar la combinación de parámetros más idónea se realiza la comparación de resultados entre ambas metodologías aplicadas. Para llevar a cabo las respectivas conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación.

PALABRAS CLAVE

- **NEUMÁTICA**
- **AGITACIÓN**
- **ELECTROLITO**
- **ELECTRODEPOSICIÓN**
- **TAGUCHI**
- **SUPERFICIE DE RESPUESTAS**
- **CALIDAD**

ABSTRACT

In this titling work the objectives of study and analysis, emphasize as primordial the design and implementation of a pneumatic agitation system of the electrolyte solution. In this way, is able to perform tests of cold electrodeposition in the galvanized equipment for the laboratory of manufacturing processes and to apply the response surface methodology (RSM) to be able to perform the optimization of the parameters in the process. In pursuance of carrying out a statistical and comparative analysis respect to the previously methodology know as, Taguchi, and determine if the results of coating obtained on ASTM A36 steel test plate are according to the norm ASTM B633. The first part consists of theoretical arguments about the type of electrolyte and the computational analysis to design the more adequate pipeline system to produce the agitation of the solution. In addition, is based on the electrical, electronic and control systems neat to perform the automation of the galvanizing equipment. The implementation of quality control focuses on the design of experiments of the response surface methodology, then determine the orthogonal matrix that fits to the most influential parameters of the process to run the study of the optimization of the thickness of coating. After selecting the most suitable combination of parameters is mandatory to do the comparison of results between the two methodologies applied, according to the norm. In order to carry out the respective conclusions and recommendations of the research project.

KEYWORDS

- **PNEUMATHIC**
- **AGITATION**
- **ELECTROLYTE**
- **ELECTRODEPOSITION**
- **COATING**
- **TAGUCHI**
- **RESPONSE SURFACE METHODOLOGY**
- **QUALITY**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Definición del problema

En el Ecuador, debido a su ubicación geográfica, existen medio ambientes de baja, media y alta corrosión. Uno de los principales inconvenientes de la corrosión es que acorta la vida útil de las piezas metálicas de un sistema, ya sean estas de acero y/o hierro.

El presente proyecto tiene como propósito el diseño e implementación de un sistema de agitación neumática para el proceso de galvanizado electrolítico ya existente en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, se implementará un sistema de tuberías las cuales, tentativamente, irán en las paredes y/o piso de la cuba electrolítica. Se controlará el caudal del aire que transita a través de las tuberías mediante el uso de válvulas y reguladores. El mencionado sistema permitirá agitar la solución, para evitar la sedimentación del material de aportación, lo que contribuirá a una adherencia más homogénea del material de recubrimiento sobre el metal.

Para llevar a cabo la optimización de los parámetros del proceso se propone utilizar un método conocido como Superficie de Respuesta (RSM), con lo cual se logrará obtener la mejor combinación de valores deseados de las variables del proceso, mejorando así el acabado superficial de las piezas tratadas.

1.2 Justificación e importancia

De los procesos de recubrimiento de metales existentes en el mercado, el galvanizado por electrólisis es una alternativa que se encuentra disponible para el empleo en procesos industriales. Entre otros, los beneficios de aplicar este proceso son: obtener un buen acabado superficial, ya sea de carácter decorativo, o para protección de metales que se encuentran expuestos a medios oxidantes; así como extender la vida útil de los mismos.

En el equipo de galvanizado existente en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE el sistema de agitación es mecánico y se lo realiza a través de un mecanismo biela-manivela. Este sistema no permite la adecuada distribución de los químicos dentro de la solución, porque, a medida que se pone en marcha el proceso, al no existir una apropiada agitación de la solución los químicos sedimentan.

Para obtener piezas con un acabado superficial de mejor calidad, dentro del procedimiento de galvanizado electrolítico, se propone implementar un sistema de agitación por aire o agitación neumática, evitando que se formen grumos dentro de la cuba, permitiendo que la sustancia se adhiera de forma más uniforme al metal base y obteniendo un acabado superficial más homogéneo en toda su superficie. También, se implantará un control de acidez para garantizar que el pH de la solución se encuentre dentro de los rangos óptimos y un control de nivel para evitar el desborde y/o desperdicio de la solución.

En análisis realizados al sistema original (sin la implementación del sistema de agitación por aire) se realizó la optimización de los parámetros del proceso de galvanizado a través de la metodología Taguchi.

Al implementar el equipo de agitación por aire, se realizará un nuevo estudio de optimización de parámetros empleando las metodologías Taguchi y de superficies de respuesta (RSM), lo que permitirá una investigación comparativa entre los resultados obtenidos en ambos métodos. Conjuntamente se explorarán y validarán modelos de optimización estadísticos en este proceso industrial.

1.3 Área de influencia

Los procedimientos a ser desarrollados sobre el galvanizado por electrólisis serán utilizados por el DECEM, concretamente por el Laboratorio de Procesos de Manufactura. Además, se beneficia la comunidad adyacente, como la industria metalúrgica, al aplicar este método anticorrosivo.

1.4 Alcance

El alcance de éste proyecto contempla el diseño e implementación de un sistema de agitación neumática y la optimización de parámetros más influyentes del proceso para obtener un galvanizado uniforme cumpliendo con el requerimiento de electrodeposición dado por la norma ASTM B633.

1.4.1 Componentes del Subsistema mecánico

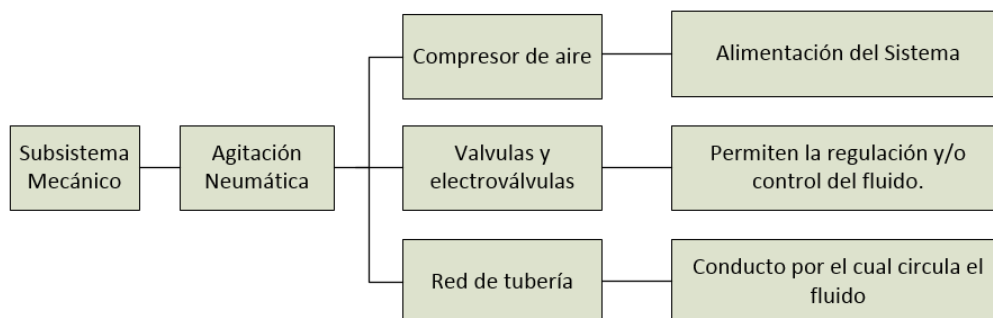


Figura 1 Componentes del Subsistema Mecánico

El subsistema mecánico del proyecto toma en cuenta el diseño, construcción e implementación de tuberías a través de las cuales se inyectará aire a presión. Lo cual da lugar a la agitación neumática controlada de la solución. Se utilizará un compresor de aire como fuente de energía y un sistema de válvulas y tuberías que se encontrarán dentro de la cuba electrolítica.

Algunos de los sistemas de inyección de aire constan de cuatro partes mecánicas: fuente de aire; tubería y filtros de entrada; boquilla y difusor de aire; tubería y filtros de salida. Y tres partes de control: control de flujo aire; control de presión de aire; control de difusión de oxígeno disuelto.



Figura 2 Fuente de aire comprimido

Fuente: (García, s.f.)

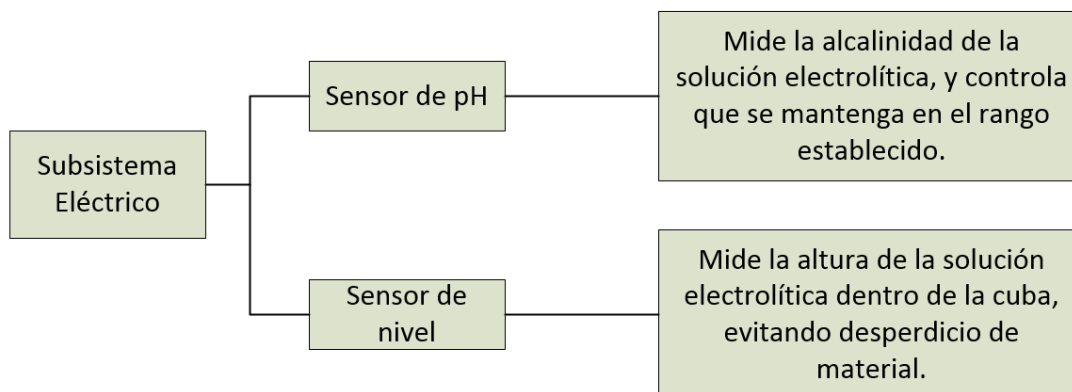


Figura 3 Componentes del Sistema Eléctrico

El subsistema eléctrico se encuentra comprendido por: la integración de los sensores a la máquina, la lectura de las señales eléctricas de estos sensores a través de la tarjeta de adquisición de datos y el cableado y conexión que estos componentes electrónicos requieren para un funcionamiento óptimo.

El sensor de pH permite garantizar que la máquina trabajará solo cuando el pH de la solución se encuentre dentro del rango adecuado, de tal manera que el acabado en las probetas de metal sea lo más homogéneo posible, mientras que el sensor de nivel ayudará a mantener controlada la altura de la solución electrolítica, evitando derrames y/o desperdicios.

1.4.3 Componentes del Subsistema de control

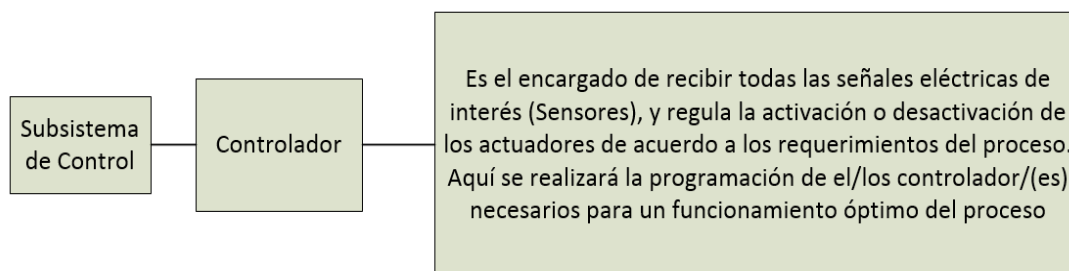


Figura 4 Componentes del Subsistema de control

El sistema de control se desarrollará de manera que la cantidad de pH sea la adecuada para la solución. Así como también, el nivel de la solución y la cantidad de aire necesaria para la agitación neumática. De ésta forma se plantea la programación y control del proyecto, ubicando en los niveles deseados los parámetros requeridos.

1.4.3.1 Diagrama de flujo general del proceso

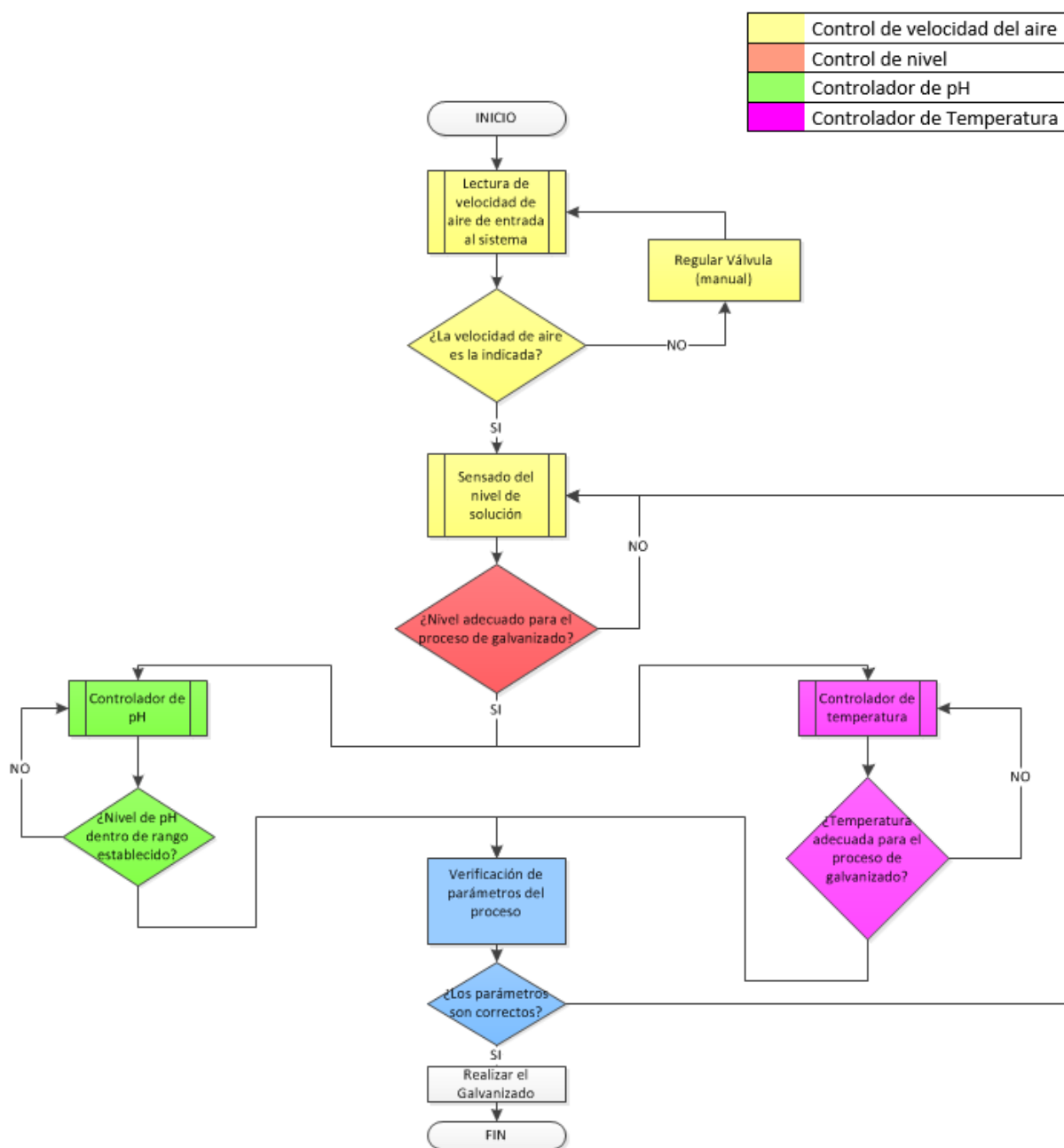


Figura 5 Diagrama de Flujo General del proceso

El proceso inicia una vez que los parámetros de interés se encuentren en los niveles establecidos. De momento se considera realizar 3 controladores como se puede observar

en el organigrama superior además del control de temperatura pre-existente en la máquina:

- Control del sistema de agitación Neumática: Dependiendo del requerimiento, se controlará el caudal y/o presión del aire que circula por las tuberías, mediante el uso de una válvula de bola.
- Control de nivel: El sensor de nivel garantiza que el nivel de la solución sea el mínimo requerido, para poder continuar con la lectura y configuración del resto de parámetros.
- Control de pH: Detección de la cantidad de alcalinidad existente en la solución electrolítica empleando una detección por sensado.

1.4.4 Software para implementación, análisis y simulación

Para el desarrollo del proyecto se pretende utilizar:

- Software CAD/CAE el cual permite diseñar y modelar el sistema de agitación por aire, y observar el comportamiento que tendrán los fluidos involucrados en el proceso.
- Software para modelamiento matemático, el cual permitirá obtener las ecuaciones de interés.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de agitación neumática a la máquina de galvanizado electrolítico existente en el laboratorio de procesos de manufactura en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, y realizar un estudio comparativo de la optimización de parámetros entre los resultados obtenidos de la metodología Taguchi y de superficies de respuestas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un sistema de agitación neumática con el fin de que los químicos de la solución no sedimenten y se distribuyan de manera uniforme.
- Realizar la lectura permanente del pH de la solución para mantenerla entre los rangos establecidos mediante el uso de un sensor de pH
- Realizar un estudio comparativo de los resultados obtenidos de la optimización de parámetros entre la metodología Taguchi y RSM.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Importancia del galvanizado

En el mundo, el metal más empleado es el acero. Satisface la mayor parte de las exigencias por parte de las industrias en términos de calidad y técnica económica para usos específicos. Sin embargo, una de las principales desventajas, es que los aceros comunes no poseen una elevada resistencia a la corrosión razón por la cual se emplea el galvanizado ya sea en frío o en caliente como un método de recubrimiento, el cual brinda entre sus beneficios una mejor resistencia a la corrosión.

2.1.1 Tipos de Galvanizado

Se aplican diferentes técnicas de protección a base de zinc, para dar la protección anticorrosiva:

- **Galvanizado por inmersión en caliente.** Habiendo limpiado previamente su superficie, se sumergen las piezas a ser tratadas en un baño de zinc fundido a una temperatura de 445° C - 460° C, aproximadamente. La capa de aleación sobre la superficie se forma debido a la reacción del zinc con el hierro o el acero. La capa más externa por lo general es de zinc dúctil no aleado. El zinc se une

metalúrgicamente al metal base para formar un recubrimiento protector el cual brinda una excelente resistencia a la corrosión. (Estudios de IHOBE, s.f.)

- **Galvanizado o zincado electrolítico.** En este proceso, mediante corriente continua a partir de una solución salina que contiene zinc, se deposita el mismo sobre la pieza a tratar. Se utiliza esta técnica para proteger piezas pequeñas que requieran un acabado más uniforme. (Estudios de IHOBE, s.f.)
- **Sherardización.** En la Sherardización las probetas preparadas de hierro o acero se calientan utilizando una mezcla de polvo de zinc y arena, para este proceso se utilizan tambores rotatorios a temperatura por debajo del punto de fusión del zinc (380°C - 400°C), hasta que se forme un recubrimiento uniforme cerrado sobre la pieza tratada. El recubrimiento es de color mate gris. Se emplea principalmente para piezas pequeñas, por la dificultad de calentamiento de grandes piezas de forma uniforme. (Estudios de IHOBE, s.f.)
- **Recubrimientos con polvo de zinc.** En este tipo de recubrimiento se emplea un polvo de zinc muy fino que se halla en suspensión en un aglutinante orgánico o inorgánico. La técnica de aplicación de laca se utiliza para este tipo de revestimiento (p. ej. proyección, inmersión). Las capas de polvo de zinc presentan una conductividad limitada, debido a que el zinc no se encuentra por toda la superficie en contacto con el material base y tampoco forma en las zonas limítrofes aleaciones de zinc-hierro. (Estudios de IHOBE, s.f.)
- **Protección anticorrosiva catódica.** Un metal en estado de corrosión se disuelve anódicamente. Cuando el metal a proteger se vuelve un cátodo, se impide la corrosión en la protección anticorrosiva catódica. Esto se consigue

disponiendo un elemento de cortocircuito compuesto del material de la pieza a proteger y de una aleación metálica menos noble; estos dos materiales presentan una conexión conductora metálica. Al sumergir la pareja de materiales en un electrolito, por ejemplo, el agua de mar, se disuelve el metal menos noble, disociándose en iones y electrones. Los iones pasan al electrolito, mientras que los electrones pasan a través de la conexión metálica a la superficie del metal más noble. La protección anticorrosiva catódica se utiliza como protección exterior de la parte sumergida de barcos, pasarelas, muelles, puertas de esclusas, boyas y equipos submarinos para la extracción de petróleo y gas natural. (Estudios de IHOBE, s.f.)

En el Anexo 1 se presenta un resumen de los tipos de galvanizado según la técnica que se utilice

2.2 Sistemas neumáticos

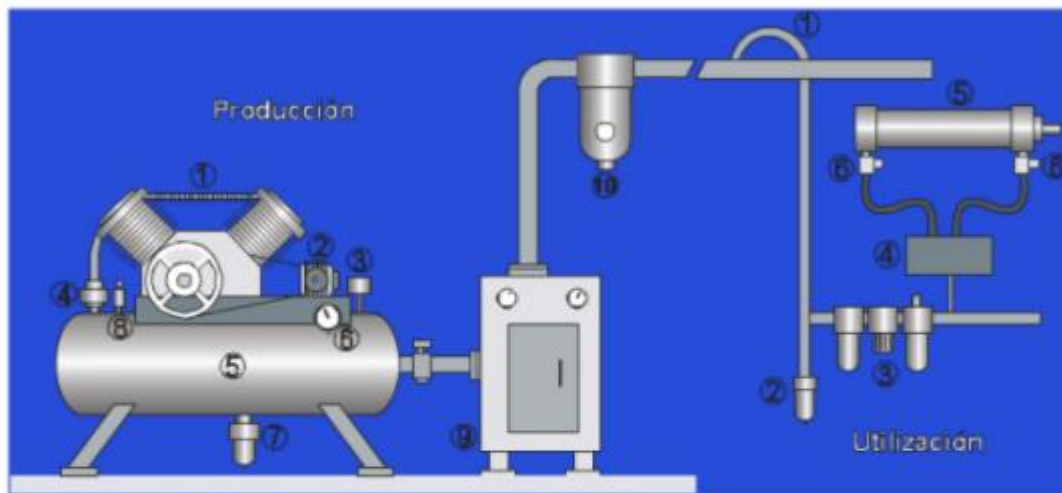
Este tipo de sistemas emplean aire u otro gas como medio para transmitir señales y/o potencia. En el campo de la neumática, se ocupa, sobre todo, aire comprimido en lo que corresponde a la automatización industrial.

Un circuito neumático puede representarse mediante el siguiente diagrama funcional. (Sistemas Neumáticos, s.f.)



Figura 6 Circuito neumático básico

Fuente: (tecnología, s.f.)



Producción

- | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 1. Compresor | 2. Motor eléctrico | 3. Presostato | 4. Válvula anti-retorno |
| 5. Depósito | 6. Manómetro | 7. Purga automática | 8. Válvula de seguridad |
| 9. Secador de aire refrigerado | 10. Filtro de línea | | |

Utilización

- | | | |
|------------------------|---------------------|---|
| 1. Purga del aire | 2. Purga automática | 3. Unidad de acondicionamiento del aire |
| 4. Válvula direccional | 5. Actuador | 6. Controladores de velocidad |

Figura 7 Componentes de un sistema neumático

Fuente: (Sánchez)

2.2.1 Criterio para la selección de actuadores

Un actuador es un dispositivo que permite transformar la energía neumática, eléctrica o mecánica en la activación de un proceso con la finalidad de ejecutarlo correctamente.

La selección de los actuadores está en función de la aplicación. Es indispensable conocer el tipo de control del proceso, los cuales pueden ser: interrupción, regulación o rotación. Los actuadores son de diversas formas según el tipo de montaje que se desee emplear.

2.2.2 Materiales de empleo dentro del sistema neumático para galvanizado electrolítico

2.2.2.1 Material empleado en la construcción de cubas

Los materiales seleccionados para la construcción de las cubas de galvanizado depende netamente de los agentes químicos de cada tratamiento. Los materiales utilizados generalmente son:

- Acero con diferentes recubrimientos de goma
- Acero inoxidable de diversas aleaciones
- Materiales plásticos PVC-PP-PE-PVDF

En la construcción se debe exigir que las cubas presenten un buen refuerzo, tanto en el fondo como en sus paredes laterales para de esta manera evitar un abombamiento.

A continuación, se presenta una tabla de la resistencia de los materiales utilizados y recomendados para el revestimiento de la cuba. (Metodos galvánicos en la industria química, 2014)

Tabla 1*Materiales recomendados para el revestimiento de la cuba*

MATERIAL	APLICACIONES
PVC	Limitado por una temperatura de 65°C como máximo
PP	En general, mayor temperatura
EBONITA	No se utiliza en baños de cromo
TEFLON ARQ	Costoso. Enjuagues y decapados suaves

2.2.3 Sistema para el tratamiento de aire comprimido

El aire comprimido contiene impurezas líquidas y sólidas. Las primeras, por lo general son residuos de aceite y vapor de agua los cuales vienen desde el compresor. Las segundas, constan de polvo aspirado y las partículas sólidas desprendidas de la instalación por efectos de la oxidación. Ambas, son razones por las cuales la vida útil de los equipos neumáticos puede acortarse.

Para el tratamiento de aire comprimido por lo general se emplean: Secador, Filtro, Regulador de presión y Lubricador.

2.2.3.1 Filtro de aire

Ayuda a eliminar las partículas en suspensión del aire. Las partículas sólidas, que están presentes al exterior de la red y las que se desprendieron durante la fase de aspiración o por desprendimiento de partículas de la propia red. También, las partículas líquidas, agua y aceite que aún queden en la instalación.

Este elemento, está constituido por un recipiente en el que entra el aire y pasa a través de una placa deflectora, con ranuras oblicuas, produciéndose aquí el centrifugado.

Las partículas sólidas, al chocar contra las paredes del vaso se desprenden y caen al fondo. Finalmente, el aire pasa a través de un filtro que tiene una porosidad entre 5 y 45 micras según el filtrado que se precise. (Automatización Industrial, 2010). Para un filtrado más riguroso se suele utilizar un filtro coalescente, el cual tiene una porosidad de 1 o 0,01 micras.

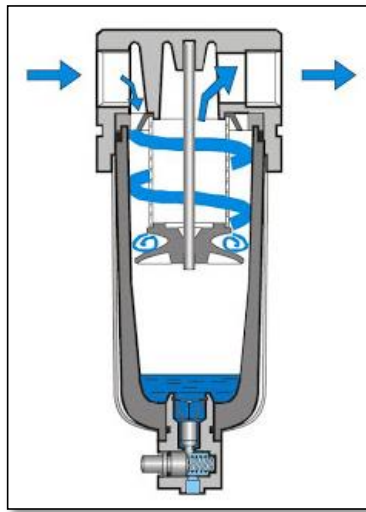


Figura 8 Filtro de aire

Fuente: (Automatización Industrial, 2010)

2.2.3.2 Unidad de mantenimiento

Para este proyecto la unidad de mantenimiento está formada por el filtro de aire, el regulador de presión y el filtro coalescente y es la encargada de realizar las funciones antes descritas. Este dispositivo se coloca en la entrada de aire de la máquina. “La unidad de mantenimiento deberá mostrarse siempre en ese orden siguiendo la circulación del aire.” (Automatización Industrial, 2010)

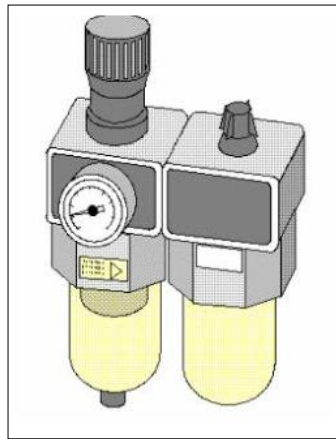


Figura 9 Unidad de Mantenimiento FRL

Fuente: *(Automatización Industrial, 2010)*

2.3 Sistemas de Agitación

La agitación en general se emplea para la disolución de reactivos, facilitando su contacto y garantizando la máxima homogeneidad posible en el transcurso del proceso de impregnación de los químicos en determinado elemento sólido (en este caso probetas de acero). En forma general existen varias formas o métodos de agitación de las soluciones, entre cuales se encuentran:

- Método de aireación y agitación
- Método de agitación Air-Lift
- Método de recirculación

Para este proyecto se empleó el método de agitación Air-Lift, debido a las razones que se explican a continuación:

2.3.1 Método de agitación Air-Lift

El aire a presión es introducido por la base de la cuba, mediante un sistema de tuberías, y la ascensión de las burbujas de aire constituye el único tipo de agitación existente.

Debido a que éste método tiene un costo inferior de energía, mantenimiento e instalación, es preferido en algunos procesos. Entre las aplicaciones industriales más comunes para este método, es en la producción de cerveza, vinagre, ácido nítrico, entre otros. (Díaz, 2013)

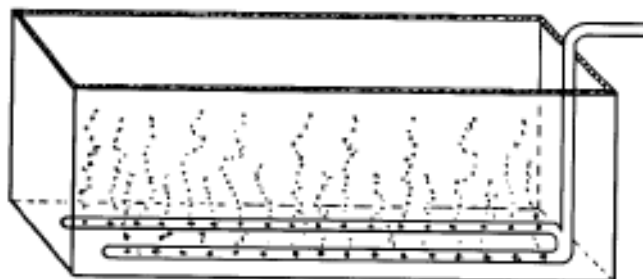


Figura 10 Cuba con dispositivo de agitación con aire

Fuente: *(Metodos galvánicos en la industria química, 2014)*

2.3.2 Aire

“Se define aire como la mezcla de gases que envuelven la esfera terrestre formando la atmósfera.” (Torres García, 2006, pág. 4)

Tabla 2*Composición Volumétrica del aire*

Compuesto	%
Nitrógeno	78
Oxígeno	20
Argón	1,3
Hidrógeno, Helio, Dióxido de Carbono	0,05
Agua y polvo	0,65

Fuente: (Torres García, 2006)

Tabla 3*Características del aire*

Peso específico (0°C, 1atm)	1,293 kg/m^3
Volumen específico (0°C, 1atm)	0,773 m^3/kg
Presión atmosférica	1,033 kg/cm^2

2.3.2.1 Unidades de presión

Tabla 4*Unidades de presión*

bares [bar]	Pascal [Pa]	atmósfera[atm]
1bar	10000	0,986

2.3.2.2 Densidad del aire comprimido

Cuando la presión del aire es superior a 4 bares está considerada como aire comprimido. En la

Tabla 5 se pueden observar los valores de la densidad del aire respecto a su temperatura. Los valores de la tabla pueden ser interpolados para poder encontrar la densidad de temperaturas medias. (Base de cálculos de tuberías, 2012)

Tabla 5*Densidad de aire en función de la temperatura*

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)
-40	1,5140
-20	1,3950
0	1,2930
5	1,2690
10	1,2470
15	1,2250
20	1,2040
25	1,1840
30	1,1650
40	1,1270
50	1,1090
60	1,0600
70	1,0290
80	0,9996
90	0,9721
100	0,9461
200	0,7461
300	0,6159
400	0,5243
500	0,4565
1000	0,2771

Fuente: (Base de cálculos de tuberías, 2012)

2.3.3 Agitación Neumática

Es importante primero definir el concepto de flujos burbujeantes como un sistema bifásico, constituido por una fase continua líquida y una fase gaseosa dispersa bajo la forma de burbujas. Debido a que existe una gran diferencia de densidad entre el gas y el líquido (sustancia), las burbujas en su recorrido de ascenso generan movimientos individuales y de conjunto lo que produce la agitación de la solución. (Alcala Bucio, Aquilar Corona, Vargas, Figueroa, & Zenit, 2012)

2.3.3.1 Determinación del diámetro de las burbujas (d_{bms})

Al realizar la agitación neumática de la solución es importante conocer el tamaño de la burbuja que se va a emplear; como se puede ver en la Figura 11 (Xylem, 2013)

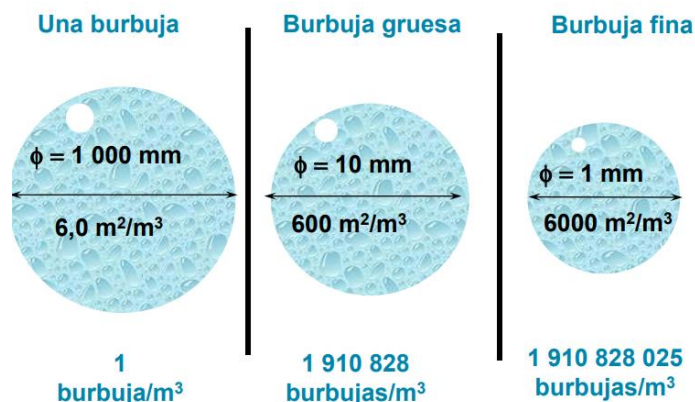


Figura 11 Tamaño de la burbuja

Fuente:(Xylem, 2013)

Existe variación en el diámetro de la burbuja, para poder determinar el diámetro estadístico o medio de Sauter de las burbujas en diversas condiciones de operaciones se empleó la relación (Guevara López, 2004):

$$d_{bms} = \frac{\sum n_i d_{bi}^3}{\sum n_i d_{bi}^2} \quad \text{Ec.1}$$

Donde: n_i = Número de veces que se presenta un diámetro determinado

d_{bi} = Valor del diámetro de las burbujas (cm)

2.3.3.2 Trayectoria de ascenso de las burbujas

Si bien, el ascenso de una sola burbuja, es un problema complejo, el análisis de un conjunto de burbujas se vuelve mucho más desafiante. Resulta indispensable considerar

la interacción hidrodinámica entre ellas. Las estelas generadas por cada burbuja van a modificar la estructura de las fluctuaciones del movimiento del fluido. Existen tres formas principales en el ascenso de las burbujas: rectilínea, oscilante y en zigzag. La forma de estos movimientos depende esencialmente del número de Weber ($We = \frac{\rho_l d V_b^2}{\sigma}$), lo cual representa la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas de tensión superficial.

De esta manera mientras el número de Weber es pequeño, las burbujas tienden a adoptar formas esféricas con una trayectoria rectilínea, a medida que este número aumenta la forma de las burbujas es oblicua con un recorrido oscilante. (Alcala Bucio, Aquilar Corona, Vargas, Figueroa, & Zenit, 2012)

De acuerdo con un balance derivado de la relación que existe entre las fuerzas de flotación (F_f) y de tensión superficial (F_{ts}) que afectan a la burbuja, se puede determinar el diámetro de la burbuja con la Ec.4

$$F_{ts} + F_f = 0 \quad \text{Ec.2}$$

$$F_f = V_b \rho_l g \quad \text{Ec.3}$$

$$F_{ts} = \sigma(\pi D_c) \quad \text{Ec.4}$$

Donde: V_b = Volumen de la burbuja

ρ_l = Densidad del líquido

σ = Tensión superficial

g = aceleración de la gravedad

D_c = Diámetro de las burbujas

2.3.3.3 Velocidad de ascenso de las burbujas

El cálculo de la agitación se encuentra basado en la velocidad fluctuante de las burbujas. De manera que, la velocidad fluctuante (V_f) es la diferencia entre la velocidad instantánea (V_{inst}) y la velocidad media (V_{med}). (Alcala Bucio, Aquilar Corona, Vargas, Figueroa, & Zenit, 2012)

$$V_f = V_{inst} - V_{med} \quad \text{Ec.5}$$

2.3.3.4 Velocidad del aire comprimido

Para instalaciones de aire comprimido, se recomienda según la Tabla 6 la velocidad se encuentre entre 9-30 (m/s), de lo contrario puede producirse deterioro, vibraciones en la tubería.

Tabla 6

Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5 - 1	0,15 - 0,30
	Entrada de bomba	1,0 - 3,0	0,3 - 0,9
	Salida de bomba	4,0 - 10,0	1,2 - 3,0
	Línea de Conducción	4,0 - 8,0	1,2 - 2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2 - 0,5	0,06 - 0,15
	Salida de bomba	0,5 - 2	0,15 - 0,6
Vapor de agua		30 - 50	9,0 - 15
Aire o gas		30 - 100	9,0 - 30

Fuente: (Granada, 2010)

2.3.4 Distribución de los Ser-Ductor para la agitación del fluido y configuraciones

Mediante el sistema Ser-Ductor, se logra realizar una agitación sin la introducción de materias extrañas como suciedades transportadas por el aire o aceite del compresor.

La agitación del Ser-Ductor en una cuba, evita que las partículas se depositen en el fondo del tanque, donde se puede formar una capa de lodo acortando la vida de la solución. Con el sistema Ser-Ductor se puede mantener esas impurezas en suspensión, además es más fácil instalar un sistema de filtración en el tanque para la eliminación de partículas. Algunas de las configuraciones comunes que permiten agitar una solución son se presentan en el Anexo 2.

2.4 Métodos de simulación para el comportamiento del fluido

2.4.1 Software para la simulación de fluidos

Ansys es una potente herramienta computacional que permite diseño y simulación del comportamiento de fluidos mediante el cálculo de elementos finitos.

2.5 Importancia del pH

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia, se expresa como el logaritmo negativo de base de 10 en la actividad de iones de hidrógeno. Su fórmula se escribe de la siguiente manera:

$$\text{pH} = -\log_{10} [a_{H^+}] \quad \text{Ec.6}$$

El pH cuenta con su propia escala de medición, de forma que encontraremos que ésta va de 0 a 14. Alcanzar el 0 es el indicador de máxima acidez, por su parte, 14 es su opuesto, base. El punto de una solución neutral es con un valor medio de 7. (Experimentos y Ciencia, 2012)

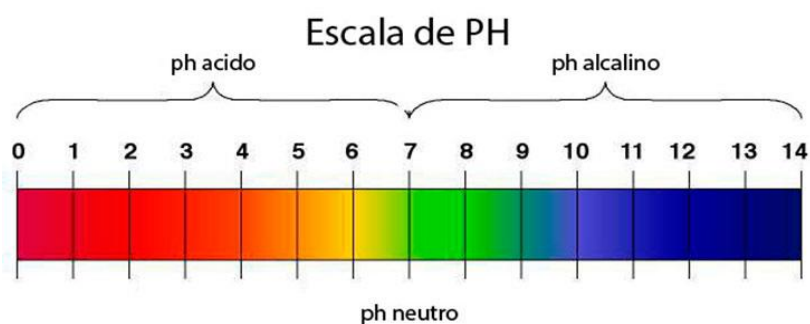


Figura 12 Escala de Ph

Fuente: (Experimentos y Ciencia, 2012)

2.5.1 Importancia del pH en aplicaciones Industriales

En muchas de las aplicaciones industriales la inspección y medición del pH es de gran importancia debido a su constante empleo en los subprocesos. Entre algunos de los campos más representativos constan:

- Tratamiento de la pureza del agua en las entradas a las calderas
- Regulación de la velocidad de reacciones químicas
- Tratamiento y neutralización de aguas residuales para su posterior utilización
- Regulación de acidez y control de activación de bacterias en la cerveza
- Regulación del pH en la fermentación del etanol
- Sulfatación en el jugo de caña

(Importancia del pH en las industrias y módulo de laboratorio, pág. 8)

En cuanto al galvanizado por electrolisis, se debe considerar las diferentes condiciones de operación entre ellas se encuentra: temperatura, tiempo de proceso, corriente, voltaje, condiciones del medio ambiente, parámetros que intervienen de manera general son:

1. Naturaleza y estado superficial del cátodo (metal base).
2. Densidad de corriente aplicada.
3. Agitación del electrolito.
4. Temperatura aplicada.
5. Concentración de iones metálicos presentes.
6. Concentración de iones hidrógeno (pH).
7. Agentes de adición.

(Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, pág. 43)

2.5.2 Métodos de medición de pH.

El pH de una solución puede medirse de distintas maneras y usando distintos instrumentos. Entre ellos constan:

- Papel indicador
- Uso de sustancias químicas
- pH-metro

Para el presente proyecto se utilizó un pH-metro de línea.

2.5.2.1 pH-metro de línea

Es un sensor que realiza internamente una medida de la diferencia de potencial entre dos electrodos, uno de referencia (generalmente 7) y otro de medida (externo). Por lo tanto, se tiene un preciso valor de diferencia de potencial y con un amplificador se puede obtener la medida exacta del valor de pH de una solución. (Importancia del pH en las industrias y módulo de laboratorio, pág. 6).



Figura 13 pH-metro

Fuente: (KEDIDA, 2017)

2.6 Criterio para la selección de sensores.

Al momento de seleccionar un sensor, es muy importante conocer bien el proceso en el cual será empleado.

En la Tabla 7 se puede observar un resumen de los criterios que se deben tomar en cuenta en cuanto a selección de los sensores dentro de un determinado proceso:

Tabla 7*Criterios para seleccionar un sensor*

Condiciones del Proceso	Características del fluido: densidad, viscosidad, oxígeno disuelto, sólidos en suspensión, etc.	Característica química del fluido: Sustancia que puede reaccionar con un determinado sensor, gas, disuelto, etc.	Características de los sólidos, Tamaño, forma		
Características Entrada-Salida	Sensibilidad	Tipo: Tensión, corriente, frecuencia, etc.	Forma de señal	Imped. de entrada y salida	Destino: Presentación analógica, digital, etc.
Alimentación	Tensión	Corriente	Potencia	Frecuen.	Estabilidad
Tipo de salida	Analógica	Digital			
Otros Factores	Peso, dimensión, vida media, disponibilidad, tiempo de instalación, situación en caso de fallo, costo de mantenimiento, costo de sustitución, limitaciones en cuanto a marcas				

Fuente: (Olvera, 2015)

2.7 Tipos de Baños de Zinc.

A lo largo del tiempo, el zinc y sus aleaciones han sido empleados como una capa de protección y decorativa sobre varios metales, en especial del acero. Para llevar a cabo la aplicación de capas de zinc, se debe tomar en cuenta los requerimientos del depósito y el costo.

En cuanto a las aplicaciones funcionales y decorativas del acero, se encuentra la electrodeposición del zinc. Cuando se selecciona un proceso de zincado es importante tomar en cuenta cuáles son las ventajas y desventajas particulares de ese proceso. Las formulaciones más utilizadas para este proceso se dividen en las siguientes categorías:

- Baños de zincado ácido
 - Baño de zincado ácido al bórico
 - Baño de zincado ácido al amonio
- Baños de zincado alcalino
 - Baño de zincado alcalino cianuro
 - Zincado al bajo cianuro
 - Zincado al medio cianuro (Santillán Espinoza & Sandoval Silva, 2013)

Se aplicó una matriz de decisión basada en los tipos de baños de zinc existentes, adaptando los requerimientos específicos del proyecto de investigación y acorde con los elementos que pueden ser adquiridos, para verificar la resolución de la matriz Anexo 2.

2.7.1 Solución empleada dentro del sistema de galvanizado electrolítico

De acuerdo a la matriz de decisión del Anexo 3 para la solución de Zinc Ácido que se empleará en el galvanizado electrolítico, para una cuba con capacidad de 32 litros, se cuentan con los siguientes componentes químicos:

- 3 kg de Cloruro de Zinc
- 7 kg de Cloruro de Potasio
- 1 kg de ácido bórico
- 1 kg de galvacid base
- 1 kg de gavacid brillo
- Ánodos de zinc

2.7.2 Análisis de concentración del baño de zinc ácido

Según metalmecánica Galvano con el afán de minimizar la contaminación ambiental, se ha lanzado al mercado el nuevo sistema de Zincado Ácido **GALVACID 2002** el cual es totalmente ecológico, reemplazando los sistemas alcalinos cianurados, de esta manera se evita los problemas de contaminación ambiental y los tratamientos de aguas residuales.

Es un proceso electrolítico de zinc, ligeramente ácido exento de sales amónicas que produce un depósito con alto brillo, excelente poder de penetración y nivelación utilizado en procesos estáticos y de tambor, logrando además de trabajar en un variado rango de temperaturas debido a su estabilidad, con agitación mecánica o por aire. Proporciona una excelente protección a la corrosión

2.7.2.1 Formulación del baño de zinc ácido

Tabla 8

Formulación del baño de zinc ácido

Cloruro de Zinc	77 g/lit
Cloruro de potasio	200 g/lit
Ácido bórico	30 g/lit
Galvacid Base	40 ml/ lit
Galvacid Brillo	4-6 ml/lit

Fuente: (GALVANO, 2017)

2.7.2.2 Pre tratamiento y post tratamiento del baño de Zinc Ácido

Existe cierto pre tratamientos por los cuales deben pasar los elementos a ser galvanizados, debido a que la superficie debe estar libre de impurezas, grasas y óxidos. Para lo cual, se deben aplicar procesos mecánicos como rectificado y pulido para luego pasar procesos químicos tales como el decapado, desengrasado.

2.7.2.2.1 Desengrasado y decapado para Zinc ácido

Para poder realizar el pre tratamiento de las piezas, se empleará una solución de ácido clorhídrico con ácido sulfúrico, con lo cual se eliminará los residuos de grasa y aceite en la superficie de la pieza a ser galvanizada. Se recomienda aplicar la solución química por un periodo de 10 a 15 minutos. Para posteriormente realizar dos enjuagues, los cuales garantizan que la solución de zinc ácido no varíe su pH.

2.7.2.3 Preparación del baño

Pesar los productos según la capacidad de la tina. Se debe calentar las 2/3 partes del volumen total del tanque a 60°C, luego se procede a disolver el ácido bórico, agitando hasta total disolución, ir añadiendo según la formulación cloruro de potasio manteniendo la temperatura del agua sobre los 60°C, una vez disueltos los productos añadidos agregar cloruro de zinc y completar luego el volumen total de la cuba. Filtrar la solución con 2 gr/lit de Polvo de Zinc, el cual se debe utilizar principalmente cuando el cloruro de potasio no es puro, se deja enfriar la solución hasta la temperatura de trabajo y se procede a electrolizar la solución a $4 \text{ Amp} / \text{dm}^2$.

Finalmente, se adicionan las cantidades necesarias de GALVACID BASE y de GALVACID BRILLO, ajustando el pH en caso de ser necesario, dejando de esta manera lista la solución para trabajar.

2.7.2.3.1 Condiciones de operación

Tabla 9

Condiciones de operación del baño de Zinc Ácido

pH	4.5 - 5.5
Densidad de corriente catódica	0.5 - 8.0
Densidad de corriente anódica	No superar los 2.5 Amp/dm ²
Temperatura	18 - 35°C
Agitación	Neumática
Ánodos	Zinc de 99.9% de pureza
Relación ánodo/cátodo	1 : 1
Tensión de corriente (Estático)	1 - 4 Voltios
Filtración	Continua
Eficiencia Catódica	95%

2.7.2.3.2 pH de la solución de Zinc Ácido

De acuerdo a las recomendaciones de metalmecánica Galvano se recomienda trabajar con un pH de 5.5 el cual debe ser medido diariamente, debido a que tiende a aumentar con trabajo continuo y se debe mantener cuidadosas adiciones de ÁCIDO CLORHÍDRICO al 10%. En caso de que el valor descienda debemos ajustarlo con adiciones de HIDROXIDO DE POTASIO.

2.7.2.3.3 Densidad de corriente

Existe la posibilidad de trabajar con un amplio rango de densidades de corriente produciendo resultados favorables. Normalmente trabajando con un rango comprendido entre 2 a 3 Amp/dm^2 , se obtienen buenas deposiciones en piezas que tienen diversas formas y dimensiones. El brillo aumenta con el espesor del depósito y la densidad de corriente empleada, aunque también depende del material base de la pieza.

2.7.2.3.4 Temperatura de trabajo del baño de Zinc Ácido

La temperatura de trabajo se encuentra en un rango comprendido entre 18°C a 35°C, se puede trabajar a temperatura ambiente e incluso a más altas temperaturas entre 35°C a 50°C. Al trabajar sobre la temperatura ambiente es factible aumentar la densidad de corriente, sobre todo en baños a tambor, de esta manera se aumenta la velocidad del depósito.

2.7.2.3.5 Tiempo del proceso

El rendimiento catódico del baño es del 95% aproximadamente, variando la velocidad de deposición según la densidad de corriente utilizada, teniendo en cuenta la

Tabla 10:

Tabla 10

Tiempo de proceso según el amperaje empleado

0,5 <i>Amp/dm²</i>	0,12 micras de Zinc por minuto
1 <i>Amp/dm²</i>	0,25 micras de zinc por minuto
4 <i>Amp/dm²</i>	1,00 micras de Zinc por Minuto

Fuente: (GALVANO, 2017)

2.7.2.3.6 Toxicología

Todos los productos utilizados para la preparación de abrillantadores y solución del baño son sustancias orgánicas, ligeramente ácidas y pueden causar daños en el organismo. Es necesario proteger las manos y ojos antes de manipular estos productos.

2.7.3 Leyes de Faraday

Entre los años 1792-1867 Faraday anunció dos leyes conocidas como las leyes de la electrólisis, las cuales son:

1. “El peso de una sustancia depositada es proporcional a la intensidad de corriente (o sea, al número de electrones por segundo) y al tiempo que ésta circula.”
2. “El peso de una sustancia depositada durante la electrólisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia.” (Epec)

Al interpretar la primera ley, se puede deducir que si una corriente que circula a través del electrolito con un valor mayor durante un mayor tiempo, depositará una mayor cantidad de sustancia que una corriente de menor valor durante un menor tiempo.

El galvanizado electrolítico, tiene como base las leyes de Faraday en la cual predomina una expresión matemática que relaciona el flujo de corriente y la cantidad de material depositado, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$W = \frac{P_a * t * I}{V_a * F} \quad \text{Ec.7}$$

Donde: P_a = Peso atómico del material que reacciona (gr)

t = tiempo de electrólisis (seg)

I = flujo de corriente (A)

V_a = número de electrones transferidos (Valencia)

F = constante de Faraday; 96500 C(A * seg) peso atómico

W = cantidad de material que reacciona (g)

De acuerdo con la segunda ley, también existe una relación matemática que permite deducir el Equivalente electroquímico

$$E_q = \frac{P_a}{V_a} \quad \text{Ec.8}$$

Donde: E_q = Equivalente Electroquímico

P_a = Peso Atómico

V_a = Valencia

La Ec.9 permite determinar la primera ley de Faraday en función de la eficiencia del sistema

$$W_{ezn} = E_q * \frac{t*3600*I}{F} * \eta_g \quad \text{Ec.9}$$

Donde: W_{ezn} = Peso del electrodepósito de zinc teórico (gr)

E_q = Equivalente electroquímico

t = Tiempo de electrólisis en (hr)

I = Flujo de corriente (A)

F = Constante de Faraday; 96500 (A – seg) peso atómico

η_g = Eficiencia global

2.7.3.1 Peso real del electrodepósito

Para determinar el peso real, se emplea una balanza electrónica de alta precisión, el cual se calcula mediante la diferencia del peso de la probeta previo al galvanizado y el peso al final del proceso, como se muestra en la Ec.10 (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016)

$$M_r = m_{azinc} - m_{dzinc} \quad \text{Ec.10}$$

Donde: M_r = Peso del electrodepósito (gr)

m_{azinc} = Peso antes del galvanizado (gr)

m_{dzinc} = Peso luego del recubrimiento (gr)

2.7.3.2 Intensidad de corriente

La intensidad de corriente se encuentra en función de la superficie catódica y de la densidad de corriente, que corresponde según el tipo de baño que se va a realizar.

$$I = A_c * \rho_I \quad \text{Ec.11}$$

Donde: I = flujo de corriente (A)

A_c = Superficie catódica (dm^2) ρ_I = Densidad de corriente (A/dm^2)

2.7.3.3 Eficiencia catódica

La eficiencia catódica se conoce como la velocidad de electrodeposición de una solución electrolito, las eficiencias varían según el tipo de baño que se realice, para este caso se empleará el valor de eficiencia catódica para procesos con ácido clorhídrico.

- Procesos no cianurados: 60%
- Procesos alcalinos cianurados: 50 – 80%
- Procesos con ácido clorhídrico: 95%

En la Figura 14 se puede observar la relación existente entre el rendimiento global de la eficiencia catódica en función de la densidad de corriente aplicada en una celda electroquímica, según el tipo de baño de zinc en frío.

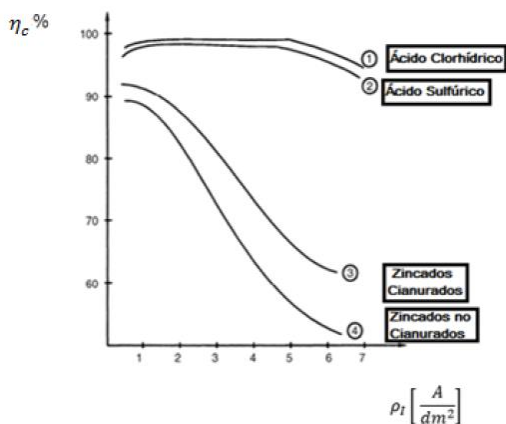


Figura 14 Curva de rendimento global vs Densidade de corrente

Fuente: (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, pág. 32)

2.7.3.4 Tempo de electrodeposición

Es necesario conocer el tiempo de electrodeposición para poder efectuar un correcto depósito del recubrimiento de zinc en las probetas, para lo cual se utiliza la Ec.12

$$t = \frac{s \cdot \rho_{zn} \cdot 10}{E_{q-q} \cdot \rho_I \cdot \eta_g} \quad \text{Ec.12}$$

Donde: t = tiempo de electrólisis en (hr)

s = espesor del recubrimiento (mm)

ρ_{zn} = Densidad del metal depositado (gr/cm^3)

E_{q-q} = Equivalente electroquímico ($gr/A * hr$)

ρ_I = Densidad de corriente (A/dm^2)

η_g = Eficiencia catódica global

2.7.3.5 Espesor del metal depositado

Realizando un despeje de la Ec.12, podemos obtener los parámetros necesarios para determinar el espesor específico de zinc durante el proceso de galvanización

$$s = \frac{E_{q-q} * \rho_I * \eta g}{\rho_{zn} * 10} \quad \text{Ec.13}$$

Los espesores de electrodeposición se encuentran dados según la norma ASTM B633, detallado en la Tabla 11

Tabla 11

Espesores normados para recubrimientos

Numero de clasificación y sufijo del recubrimiento	Condición de servicio	Espesor mínimo [µm]
Fe/Zn 25	SC 4(muy severo)	25
Fe/Zn 12	SC 3(severo)	12
Fe/Zn 8	SC 2(moderado)	8
Fe/Zn 5	SC 1(medio)	5

Fuente: (ASTM, 2015)

2.7.3.6 Cantidad de masa depositada

Para poder determinar la cantidad de masa depositada posterior al proceso de galvanizado se emplea la fórmula basada en la primera ley de Faraday, explicada en la Ec.9

2.7.4 Número de Reynolds

Número que permite caracterizar la naturaleza del flujo, si se trata de un flujo laminar o turbulento, además proporciona una indicación de la pérdida de energía

causada por efectos viscosos. Es un número adimensional que matemáticamente está definido como:

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho * D * v}{\mu} = \frac{v * D}{\nu} \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

v = velocidad del fluido

D = Diámetro interno de la tubería

ν = Viscosidad cinemática del fluido

2.8 Métodos de optimización de parámetros

La optimización es buscar la mejor forma para realizar una actividad o proceso. Todo proceso posee entradas (parámetros de interés) y salidas. La optimización consiste en encontrar la combinación óptima de los valores de las variables de entradas que permitan obtener la salida en el nivel deseado, en la industria la optimización debe ser realizada considerando aspectos técnicos, económicos, sociales, entre otros; pero siempre teniendo en cuenta que la calidad del producto o servicio (salida del proceso) debe mantenerse en el nivel más alto posible.

Existen muchos métodos que permiten optimizar los parámetros de un proceso. Su selección y aplicación depende del tipo de proceso, número de parámetros involucrados, tiempo disponible, costos, entre otros.

2.8.1 Determinación de parámetros de interés

Todo proceso tiene múltiples entradas las cuales pueden o no tener un efecto significativo en el nivel de la variable de salida. Es importante conocer qué variables afectan de forma significativa y directa al nivel de la variable de salida. Éste conjunto de variables identificadas son los parámetros de interés del estudio de optimización, ya que la combinación idónea de los niveles de estas variables producirá el nivel deseado en la variable de salida. Siempre buscando una mejora en la eficiencia y eficacia del proceso.

El reconocimiento de los parámetros de interés “es la identificación de las variables claves del proceso que afectan la variación del producto, y la definición de los niveles parámetro que producirán la menor cantidad de variación en el funcionamiento del producto.” (Nuñez Sacaluga, 2015, pág. 151)

2.8.2 Metodología Seis Sigma

Seis Sigma (6σ) es una metodología que permite medir la variabilidad en un producto y mantener sus procesos bajo control, esto quiere decir que obtener un sigma grande refleja que un producto posee mucha variabilidad, mientras que obtener un sigma pequeño refleja que el producto es muy uniforme, que su poca variabilidad no afecta en la salida el proceso o servicio. (García P, Quishpe A, & Ráez G, 2001)

La metodología Seis sigmas es una filosofía cuyo objetivo principal es reducir los errores y defectos en la fabricación de un producto a un valor cercano a cero. Intenta alcanzar una eficiencia de 100% en los procesos. Ésta una de las razones por las que en la actualidad es una metodología muy aplicada en empresas de élite y clase mundial

como el caso de Kodak, Motorola, General Electric, entre otras. (García P, Quishpe A, & Ráez G, 2001)

Seis Sigma es una metodología de mejora continua a mediano y largo plazo, plantea eliminar toda actividad que no genere valor al producto (desperdicios), mejorando tanto la calidad del producto como la eficiencia del proceso, los tiempos de ciclo, genera que el producto sea más rentable ya que se abaratan sus costos de producción precisamente por la eliminación de desperdicios, “la meta de seis sigma es llegar a un máximo de 3.4 defectos por millón de eventos u oportunidades (DPMO).” (Lean Solutions) (García P, Quishpe A, & Ráez G, 2001)

Esta metodología optimiza las salidas del proceso mediante la relación que estas posean con las variables de entrada (independientes) del mismo. Matemáticamente es descrita por una ecuación bastante simple: (Elizondo, s.f.)

$$Y = f(x) \quad \text{Ec.15}$$

Donde: **Y**: es una variable dependiente del proceso (salida a ser monitoreada)

X: son las entradas del proceso que ocasionan un cambio en la variable dependiente(**Y**) (Son las variables controlables)

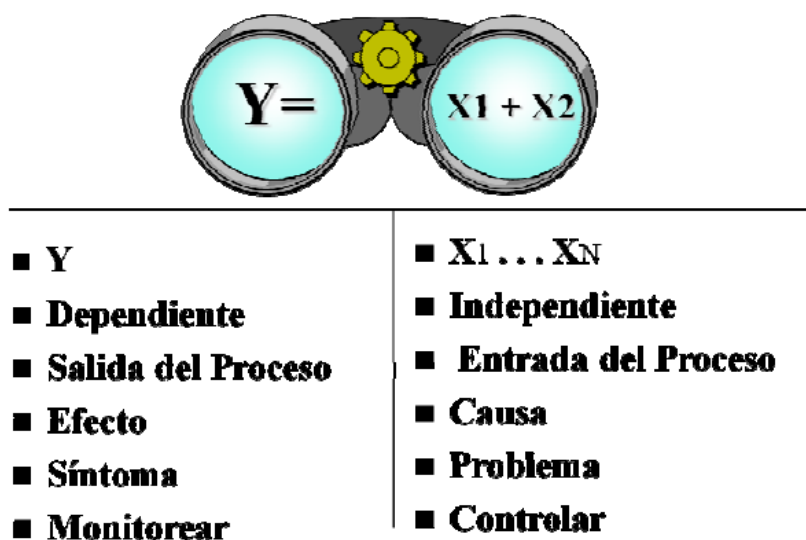


Figura 15 Relación entre causas y efectos

Fuente: (Elizondo, s.f.)

Seis Sigma permite la aplicación de algunas técnicas estadísticas y matemáticas que permiten conseguir la reducción y control de la variabilidad del proceso o servicio. Al igual que para el análisis de datos permite escoger entre muchas técnicas que son compatibles con este método; como por ejemplo los métodos basados en el Diseño de Experimentos (DDE), análisis de correlaciones o regresiones, representaciones gráficas, entre otros.

2.8.2.1 Metodología Taguchi

La metodología de Taguchi se basa en la aplicación del método del diseño de experimentos (DEE), el cual presta fundamentalmente atención al análisis de las medias de los valores de las características de calidad, como a la reducción de la variabilidad y a una robustez frente a factores que puedan afectar dicha variabilidad. (Jorba, 1993, pág. 9).

Es importante resaltar que tanto la metodología Taguchi como el DEE permiten realizar una experimentación de factores múltiples (variar más de un factor a la vez), lo cual es la principal diferencia con el método tradicional. (Jorba, 1993, pág. 123)

Entre las aportaciones de Taguchi al DEE encontramos:

- Basa su funcionamiento en el uso de matrices ortogonales, la cual es una mínima parte de los factores fraccionales, estandarizando así el DEE. (Ranjit, 2010, pág. 5)
- La inclusión de factores de ruido dentro de los experimentos, y la conocida relación señal/ruido que es utilizada para medir la robustez del proceso o sistema. (Ulrich & Eppinger, 2012, pág. 309)

$$SN = -10 \log_{10}(S) \quad \text{Ec.16}$$

$$SN = -10 \log_{10}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2\right) \quad \text{Ec.17}$$

$$SN = -10 \log_{10}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad \text{Ec.18}$$

Dónde: **S** es la desviación muestral, **n** es el número de réplicas obtenidas para una combinación determinada.

- Define calidad como “la pérdida económica causada a la sociedad desde que el producto es lanzado al mercado.” (Jorba, 1993, pág. 10)
- Define una función de pérdida la cual permite de forma sencilla cuantificar las mejoras en términos de unidades monetarias. (Ranjit, 2010, pág. 6)

$$E(L) = kE[X - T]^2 = k[\sigma^2 + [U - T]^2] \quad \text{Ec.19}$$

La metodología Taguchi consta de tres fases o etapas:

- **Diseño del sistema:** en esta etapa se crea un nuevo sistema (se patentan en caso de ser necesario), se definen las características principales, objetivos, entradas y salidas del sistema, etc. Esta etapa culmina con el funcionamiento del mismo después de haber sido probado bajo ciertas condiciones.
- **Diseño de parámetros:** en esta etapa se encuentran los niveles adecuados para cada uno de los parámetros de interés, que son los niveles con los cuales se experimentará en el arreglo ortogonal. En esta etapa se busca dar una robustez al sistema y evitar un cambio significativo en la variabilidad del mismo.
- **Diseño de tolerancias:** en esta etapa se realiza una evaluación entre la calidad y el coste del producto, se afinan las respuestas de los parámetros para que el coste sea lo más bajo posible sin afectar la calidad.

(Yuin Wu, 1997)

2.8.2.2 Metodología de superficies de Respuesta (RSM)

La metodología de superficies de respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten construir un modelo empírico del proceso. El objetivo principal de esta metodología es optimizar la salida del proceso a través de una serie de pruebas en las que se varían los parámetros de entrada (variables independientes), todo a fin de conocer las razones del cambio en la salida del proceso. (Alvarez, 2000)

Este método se emplea cuando se necesita explorar la relación existente entre el parámetro de interés y la variable de salida dentro de la región experimental, constituyen

la parte final del proceso de optimización. Por lo tanto, antes de aplicar este método se requiere haber identificado los parámetros más relevantes del proceso; ya sea mediante el uso de experimentación, experiencia o de forma teórica. En caso de emplearse esta técnica antes de la identificación de los parámetros más relevantes los resultados obtenidos serán incompletos o imprecisos. (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

Existen varias clases de diseños de superficies de respuesta, entre las más usadas se tienen:

2.8.2.2.1 Modelo cuadrático empírico

Es el modelo más simple que representa la relación Y contra X. Una de las ventajas de usar este método es que su error se distribuye a lo largo de toda la región (sacrificando algo de precisión en la región central). Es aplicable para regiones de tamaño moderado. Se recomienda su uso para la optimización de pocos factores ($k < 3$) ya que el requisito factorial es 3^k .

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{i < j=2}^k b_{ij} X_i X_j \quad \text{Ec.20}$$

Como se puede observar se añaden términos X_i^2 que son los que permiten darle la curvatura a este modelo. Mediante el uso de este modelo se puede caracterizar una gran variedad de superficies tanto en 2 como en 3 dimensiones como se observa en la Figura 16 y Figura 17 respectivamente.

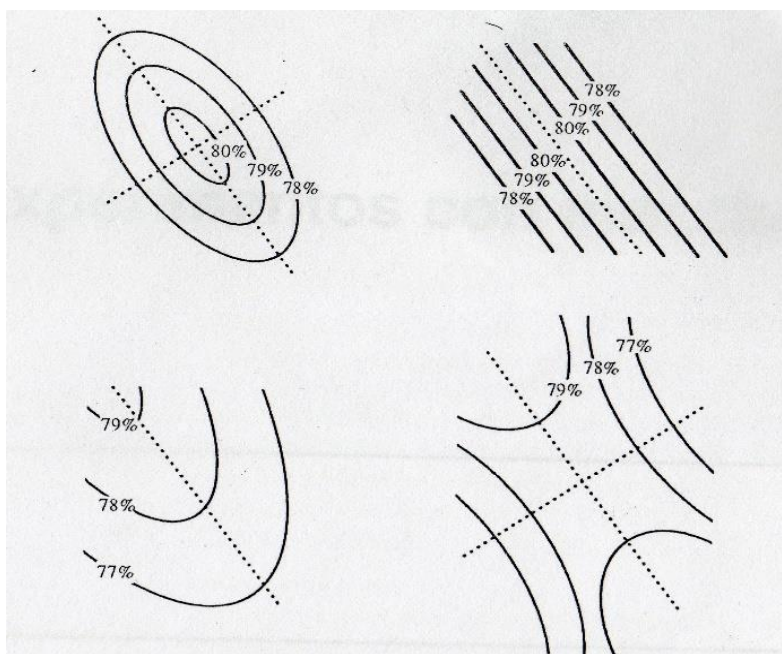


Figura 16 Tipos de superficies bidimensionales representadas por una ecuación cuadrática

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

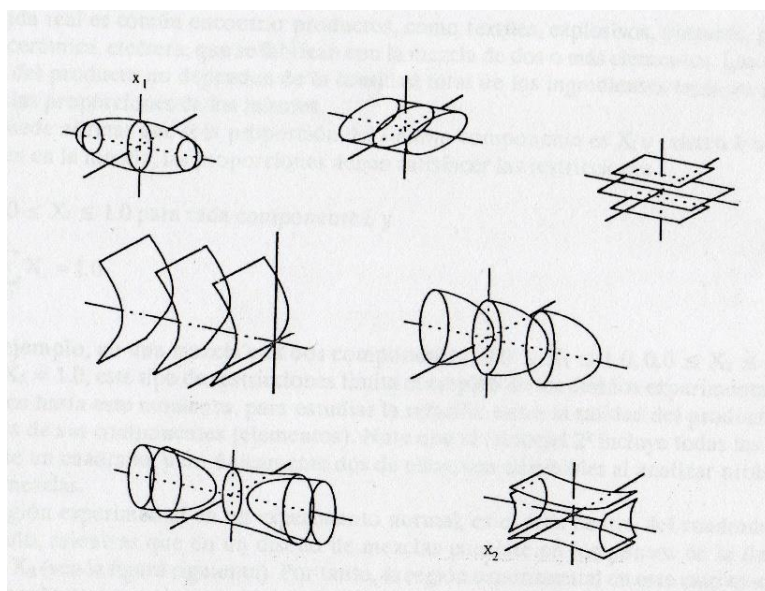


Figura 17 Tipos de superficies tridimensionales representadas por una ecuación cuadrática

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992, pág. 183)

Tabla 12

Número de experimentos de un factorial 3^k .

No. De factores k	No de experimentos en un diseño 3^k	No. De coeficientes en ecuación cuadrática
2	9	6
3	27	10
4	81	15
5	243	21
6	729	28
7	2187	36

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992, pág. 187)

2.8.2.2.2 Regresión Lineal

Una regresión es un método que nos permite encontrar (cuantificar) la relación de dependencia existente entre la variable dependiente o respuesta y la/las variables independientes o predictorias. El modelo matemático más simple para expresar esta relación es mediante el uso de una ecuación lineal de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_k \quad \text{Ec.21}$$

(Ferre Jaén, 2014-2015)

Cuando:

$k=1$ se conoce como regresión lineal simple y el modelo matemático partiendo de la Ec.21 queda expresado como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e \quad \text{Ec.22}$$

Donde: β_0 y β_1 son los coeficientes de regresión

- β_0 es la ordenada en el origen
- β_1 es la pendiente de la recta del modelo de regresión
- e es el error aleatorio.

$k > 1$ se llama regresión lineal múltiple y el modelo matemático partiendo de la Ec. 21 queda expresado como:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ki}) + e_i \quad \text{Ec.23}$$

Donde:

β_i : son los coeficientes de regresión

β_0 : es el valor medio de la variable dependiente cuando las predictorias son cero

β_i : es el efecto medio sobre la variable dependiente al aumentar en una unidad el

valor de la predictorias X_i $i = 1, \dots, k$

e : es la diferencia entre el valor observado y el ajustado.

(Ferre Jaén, 2014-2015)

Se recomienda realizar un diagrama de dispersión (nube de puntos) para determinar si existe o no dependencia entre las variables.

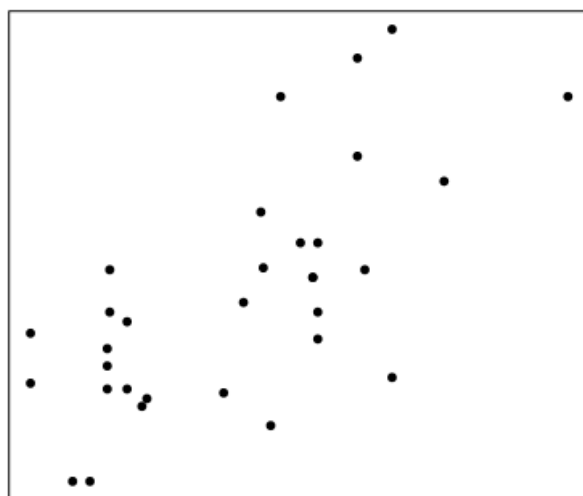


Figura 18 Diagrama de dispersión

Fuente: (Ferre Jaén, 2014-2015)

- **Relación lineal positiva:** Es cuando la relación entre las dos variables es directa (varía de forma parecida), si la primera variable aumenta la segunda también tiende a aumentar y viceversa.
- **Relación lineal negativa:** Es cuando la relación entre las dos variables es inversa, es decir si la una variable aumenta (valores grandes) la otra disminuye (valores pequeños) y viceversa.

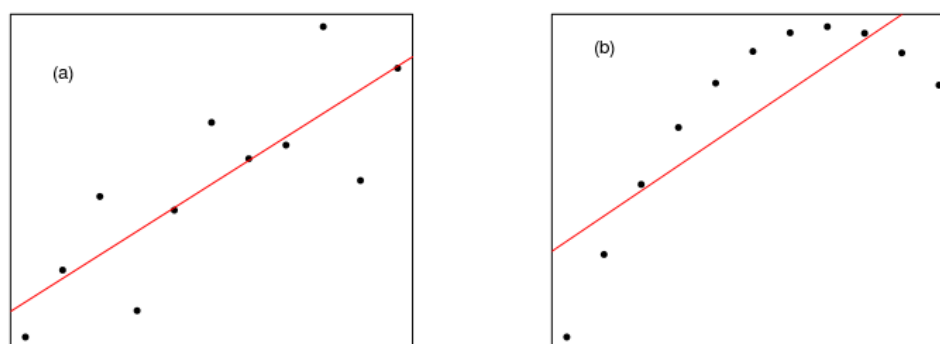


Figura 19 Relación lineal (derecha) vs relación cuadrática (izquierda)

Fuente: (Ferre Jaén, 2014-2015)

2.8.2.2.3 Coeficientes de correlación

2.8.2.2.3.1 Coeficiente de Pearson

El coeficiente de correlación lineal de Pearson permite medir el grado de relación existente entre dos variables, siempre y cuando estas variables sean cuantitativas, viene definido como:

$$r = \frac{cov(x,y)Sd(y)}{Sd(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Ec.24}$$

Si:

- $r = 0$ no existe relación entre las variables.
- $r = 1$ o $r = -1$ asociación lineal perfecta.
- $r > 0$ existe relación directa entre las variables
- $r < 0$ existe una relación inversa entre las variables.

2.8.2.2.3.2 Coeficiente de Spearman

Este coeficiente es una alternativa a Pearson cuando las variables no son cuantitativas, permite trabajar con variables ordinales.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2-1)} \quad \text{Ec.25}$$

Donde: d es la distancia entre los $X - Y$

n es el número de datos

2.8.2.2.4 Diseño central compuesto

Este tipo de diseños se realizan con factores a tres niveles. Requiere de menos experimentos que el modelo cuadrático, cuando se trabaja entre 2 y 6 factores.

En este modelo “los factores generalmente se codifican, pues facilita los cálculos, estandariza las variables eliminando las unidades de medida de las variables originales y se incrementa la precisión al estimar los coeficientes del modelo.” (Jiménez Careaga, 2015). Se trabaja mediante el uso de un conjunto de puntos en los ejes, mismos que se conocen como puntos estrella, y un conjunto de punto(s) central(es) (repetido). La combinación de todos estos puntos representa una experimentación conocida como “uno

a la vez". Para mayor facilidad se recomienda estructurar este tipo de experimentación en bloques como se muestra en la Figura 20 y Figura 21.

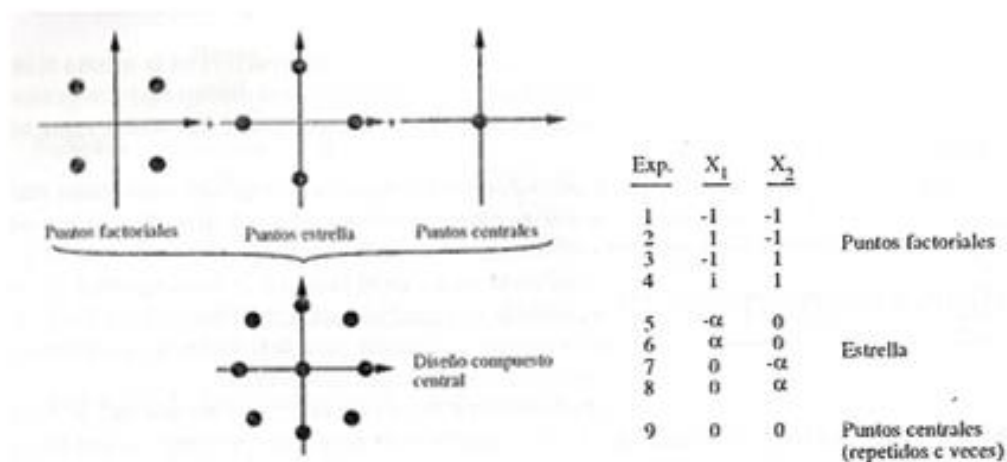


Figura 20 Diseño central compuesto para 2 factores

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

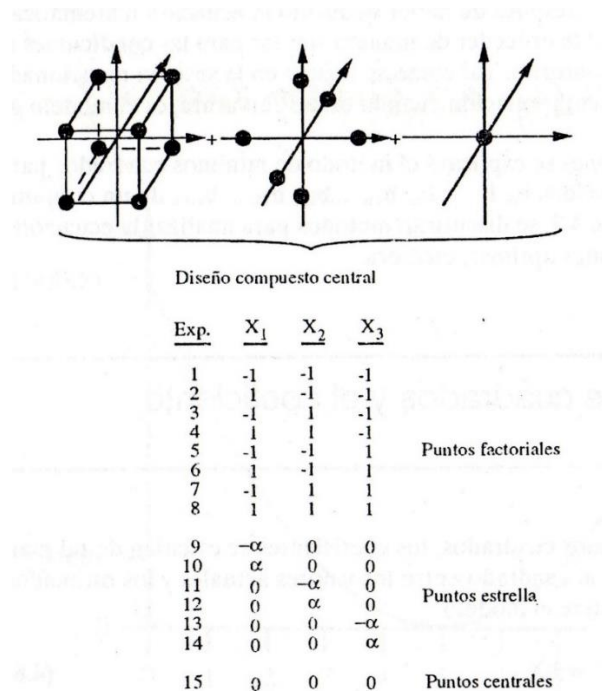


Figura 21 Diseño central compuesto para 3 factores

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

2.8.2.2.5 Diseño de box - Behnken

Requiere de un menor número de experimentos que el modelo compuesto (cuando se trabaja hasta con 5 factores), entre cinco y siete factores el ahorro experimental es mínimo, tal como se puede apreciar en la Figura 22. Una gran ventaja de estos diseños es que solamente trabajan a 3 niveles. (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

No. de factores	Diseño compuesto central con 5 niveles No. de experimentos <u>Factorial+estrella+central=totat</u>	Diseño Box-Behnken con 3 niveles No. de experimentos <u>Estructura+central=totat</u>	Diseños compuestos centrales sin bloques	No. de coeficientes en el modelo cuadrático
2	$2^2 + 4 + 5 = 13$ ($\alpha = 1.41$; un bloque)	(Sin diseño)	6	6
3	$2^3 + 6 + 6 = 20$ ($\alpha = 1.73$; dos bloques)	$12 + 3 = 15$ (Un bloque)	10	10
4	$2^4 + 8 + 9 = 33$ ($\alpha = 2.00$; tres bloques)	$24 + 3 = 27$ (Tres bloques)	16	15
5	$2^4 + 10 + 6 = 32$ ($\alpha = 2.00$; dos bloques)	$40 + 6 = 46$ (Dos bloques)	21	21
6	$2^5 + 12 + 9 = 53$ ($\alpha = 2.24$; tres bloques)	$48 + 6 = 54$ (Dos bloques)	28	28
7	$2^6 + 14 + 15 = 87$ ($\alpha = 2.45$; cinco bloques)	$56 + 6 = 62$ (Dos bloques)	39	36

Figura 22 Número de experimentos en diseños compuesto central y Box-Behnken

Fuente: (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992)

2.8.2.3 Procedimiento para análisis de superficies de Respuesta.

De acuerdo a (Lawson, Madrigal, & Erjavec, 1992), se recomienda realizar el análisis con los pasos mostrados a continuación:

1. Elaborar lista de variables independientes significativas con sus respectivos rangos.
2. Listar las variables dependientes y sus unidades.
3. Seleccionar la clase de diseño de superficie de respuesta que mejor se adapte a la necesidad del proceso, tomando en cuenta los requerimientos del mismo, numero de factores, numero de niveles de cada factor, etc.

4. Obtener el diseño codificado de las X, las cuales se encuentran en tablas.
5. Analizar si se debe ejecutar los experimentos en bloques o no.
6. Asignar los experimentos de forma aleatoria dentro de cada bloque.
7. Decodificar el diseño experimental (decodificar las X).
8. Analizar factibilidad de las condiciones experimentales.
9. Realizar los experimentos y recopilación de datos.
10. Analizar datos mediante un análisis de regresión en una computadora.
11. Interpretar la superficie de respuesta obtenida.

(págs 236-238).

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECATRÓNICO

3.1 Método QFD

3.1.1 Introducción

QFD corresponde a las siglas inglesas Quality Function Deployment (Despliegue de la Función de Calidad). Es una herramienta que desarrolla “una sistemática para transmitir las características que deben tener los productos a lo largo de todo el proceso de desarrollo.” La metodología QFD, también conocida como “la voz del cliente”, permite la transmisión de requisitos del producto, denominada “la casa de la calidad”, por el aspecto de sus construcciones gráficas.

QFD se puede conceptualizar de la siguiente manera: “Un sistema detallado para transformar las necesidades y deseos del cliente en requisitos de diseño de producto o servicio.” (Ruiz & Rojas, 2009)

3.1.2 Fases del QFD

Para poder relacionar las matrices del QFD y poder responder “que” necesitan los clientes, nos ayudamos de un “como” conseguir satisfacer esas necesidades. Para lo cual, se realizan las 6 fases que se explican a continuación: (Silva, 2015)

1.- Identificar y jerarquizar a los clientes: En esta fase se identifica al cliente que va a ser encuestado y de esta manera obtener las necesidades del consumidor y a quien va dirigido el producto. (Silva, 2015, pág. 25)

2.- Identificación de las expectativas del cliente: Durante esta fase se formula los requerimientos del cliente en “sus propias palabras”, de tal manera que se capte sus necesidades de la mejor manera. Es recomendable acudir al lugar de los hechos, para tener la información directamente del cliente mediante encuestas, quejas, informes, entre otros. Se establece criterios y pautas para determinar que tanto se satisfacen las necesidades. (Silva, 2015, págs. 25-26)

3.- Conversión de la información en descripciones verbales específicas: Con la información obtenida anteriormente se puede convertirla en información verbal más precisa y a un lenguaje técnico de la empresa. El trabajo de esta fase se lo lleva a cabo completando la primera matriz y realizando nuevas matrices. (Silva, 2015, pág. 26)

4.- Elaborar y gestionar la encuesta a clientes: Aquí se distribuye encuestas para valorar las expectativas sobre el producto ofrecido y el de la competencia de acuerdo a los requerimientos de las fases anteriores. (Silva, 2015, pág. 26)

5.- Despliegue de la calidad demandada: De acuerdo a los requerimientos del cliente, así como las valoraciones hechas a cada uno de ellos, se obtiene la tabla de planificación de calidad. En la cual se tiene los factores calificados en la encuesta y la información obtenida del cliente. Procediendo a realizar las relaciones correspondientes, con el fin de llegar a determinar qué aspectos del servicio requiere mayor enfoque. (Silva, 2015, págs. 26-27)

6.- Despliegue de las características de calidad: Se debe determinar cómo mejorar el producto o servicio. Para lo cual se debe encontrar una tabla en la que se cruzan los elementos de calidad que demanda el cliente con las características de calidad. Estas últimas son los elementos que necesita el cliente y se le ofrece. Por lo cual, estos son los indicadores sobre los cuales se va a trabajar en la organización. (Silva, 2015, pág. 27)

3.1.3. Beneficios del QFD

La metodología QFD contribuye con varios beneficios para las organizaciones que buscan mejorar su calidad e incrementar su competitividad y productividad. El principal propósito es beneficiar al cliente, eficiente en tiempo, orientado al trabajo en equipo y a la documentación.

- **Eficiente en tiempo:** QFD se centra en requerimientos específicos y claramente identificados por el cliente
- **Orientado al trabajo en equipo:** QFD se basa en decisiones y consenso, con discusiones y lluvia de ideas
- **Orientado a la documentación:** Mediante el uso de documentos se puede controlar los procesos y actualizar la información cada que sea necesario.

(Silva, 2015, págs. 27-28)

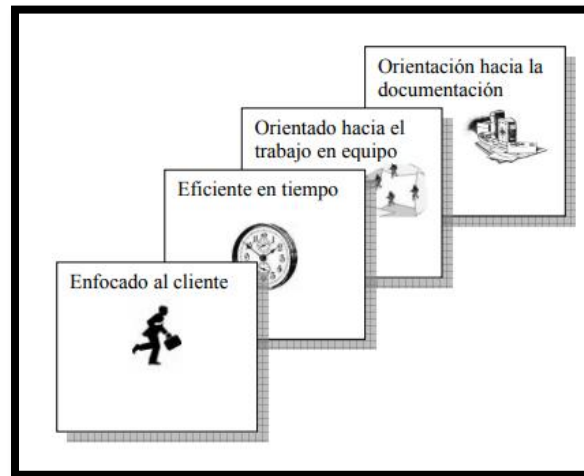


Figura 23 Beneficios del QFD

Fuente: (Silva, 2015, pág. 28)

3.1.4 Inconvenientes del QFD

- La mayoría de información que se presenta en el QFD es imprecisa, lo cual puede causar posibles fallas en los resultados del producto diseñado.
- Se requiere un previo entrenamiento de los involucrados sobre el proyecto en cuestión, debido a que las técnicas de análisis pueden complicarse a medida que aumenta la complejidad del estudio.
- En la etapa preliminar del diseño, se presentan parámetros vagos e inexactos, los cuales se expresan en forma lingüística.
- Al realizar la encuesta a usuarios, normalmente se obtiene respuestas cualitativas, lo cual puede generar conflictos debido a que marketing e ingeniería hablan en lenguajes diferentes.

(Olaya Escobar, Cortés Rodríguez, & Duarte Velasco, 2005)

3.2 Matriz de calidad

En la matriz de calidad se dan a conocer y se analizan todas las necesidades y requerimientos del cliente, en base a los cuales se establecen especificaciones funcionales y técnicas del sistema, jerarquizando cada uno de ellas para construir subsistemas del proyecto.

3.2.1 Definición de los requerimientos del cliente.

En esta sección se detallan las características solicitadas por el usuario, como se puede ver en la Tabla 13 las cuales sirven de base para definir los conceptos que se requieren para llevar a cabo el diseño final.

Tabla 13

Requerimientos del cliente

N°	Requerimientos del Cliente
1	Barato
2	Bajo impacto ambiental
3	Rendimiento operativo
4	Poder de penetración del Zinc
5	Disponibilidad de materiales
6	Buen acabado superficial
7	Facilidad de manejo de químicos

3.2.2 Definición de los requerimientos funcionales.

Los requerimientos funcionales, son las características técnicas o de ingeniería sobre el proyecto, mediante las cuales se da solución a las necesidades establecidas por el usuario. En la Tabla 14 se puede observar las especificaciones técnicas a partir de los requerimientos del cliente.

Tabla 14*Requerimientos funcionales*

N°	Requerimientos funcionales
1	Buena conductividad
2	Componentes químicos empleados
3	Sistema de agitación neumática
4	Poder de corrosividad
5	Tiempo de electrodeposición
6	Velocidad de operación

3.2.3 Despliegue de la función de calidad del proyecto de galvanizado con baño de Zinc ácido QFD.

La función de desarrollo de calidad (QFD) mostrada en el Anexo4, muestra las necesidades del cliente ya traducidas a requerimientos técnicos, en cuanto al proceso de galvanizado con baños de Zinc ácido y agitación neumática. Estas características son manejadas por un equipo multidisciplinario en el cual se incluye la sección de: ventas, marketing, ingeniería de diseño, ingeniería de manufactura, entre otras, logrando la satisfacción de los requerimientos del cliente.

Las necesidades del cliente y su relación con las características de ingeniería, posteriormente se analiza la puntuación obtenida en cada una de las características técnicas de tal manera que se las ordena de mayor a menor, como se puede ver en la Tabla 15.

Tabla 15*Resultados Requerimientos del cliente en matriz QFD*

#	Requerimientos del cliente
1	Buen acabado superficial
2	Bajo impacto ambiental
3	Facilidad de manejo de químicos



Continúa

4	Barato
5	Rendimiento operativo
6	Poder de penetración del Zinc
7	Disponibilidad de materiales

En la Tabla 16 se puede observar los resultados ordenados de mayor a menor, luego de analizar los resultados de las características de ingeniería de la matriz QFD.

Tabla 16

Resultados Requerimientos funcionales en matriz QFD

N°	Requerimientos funcionales
1	Componentes químicos empleados
2	Buena conductividad
3	Poder de corrosividad
4	Sistema de agitación neumática
5	Tiempo de electrodeposición
6	Velocidad de operación

3.3 Diseño de detalle

3.3.1 Diseño Mecánico

3.3.1.1 Dimensionamiento de la tubería

De acuerdo a las especificaciones físicas del dimensionamiento del tanque tomadas de (ASME, 2013, págs. 182-185), en la cual se basó el equipo de galvanizado electrolítico realizado por (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016) el tanque con el que se cuenta para la implementación del sistema de agitación neumática tiene las siguientes medidas:

3.3.1.2 Ancho, longitud y altura del tanque

Tabla 17

Medidas de ancho, longitud y altura del tanque

Volumen Electrolito [L]	25,23	Formula
Ancho del tanque(B) [m]	0,3	$B_{ASME} = \sqrt[3]{V}; V \rightarrow ft^3$
Longitud del tanque(L) [m]	0,44	$L_{ASME} = 1,5 * B$
Altura del tanque(H) [m]	0,2	$H_{ASME} = 0,66 * B$

De los datos obtenidos, tomando en cuenta los factores de seguridad en función del espacio para el galvanizado, en cuanto al ancho, largo y altura recuperados de (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, págs. 69-71), se definen como:

La longitud final del tanque, tomando en cuenta los espacios entre probetas y el factor de seguridad de dos es de:

$$L_{tanque} = 60[cm]$$

En cuanto ancho final del tanque, considerando la separación del ánodo y el cátodo adecuados, se obtiene

$$W_{tanque} = 35[cm]$$

Para la altura final del tanque se toma en cuenta la altura a la que se debe colocar el electrolito:

$$H_{electrolito} = \frac{V_{electrolito}}{L_{tanque} * W_{tanque}} = 12,014 [cm]$$

Utilizando un factor de altura de 5[cm], para evitar derrames de líquido y extracción segura de las probetas, la altura de trabajo queda definida:

$$f_{altura} = 5[cm]$$

De lo cual se define la altura del tanque como:

$$H_{tanque} = H_{electrolito} + f_{altura} = 17,014[cm]$$

Se considera el mayor valor de la altura del tanque, por lo tanto:

$$L_{tanque} = 60[cm]; \quad W_{tanque} = 35[cm]; \quad H_{tanque} = 20[cm]$$

Se considera que la altura final del electrolito es:

$$H_{finalelectrolito} = H_{ASME} - f_{altura} = 15[cm]$$

El volumen final del tanque es:

$$V_{tanque} = L_{tanque} * W_{tanque} * H_{tanque} = 42[L]$$

El volumen final del electrolito es:

$$V_{electrolito} = L_{tanque} * W_{tanque} * H_{finalelectrolito} = 31,5 [L]$$

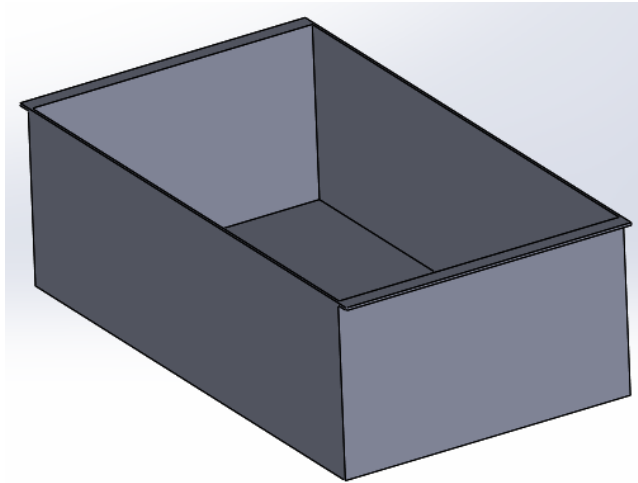


Figura 24 Tanque para el baño de zinc ácido

Fuente: (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016)

3.3.1.2.1 Volumen de trabajo para instalación de la tubería dentro de la cuba

De acuerdo con el espacio que se tiene en el interior de la cuba de galvanizado, tomando en cuenta la ubicación de la niquelina y los soportes sobre los cuales se encuentra la misma, se tiene:

3.3.1.2.2 Ancho de trabajo para la instalación de la tubería

El ancho de trabajo, de acuerdo al espacio físico disponible queda definido por la región sombreada de la siguiente manera, a partir de una vista superior de la cuba:

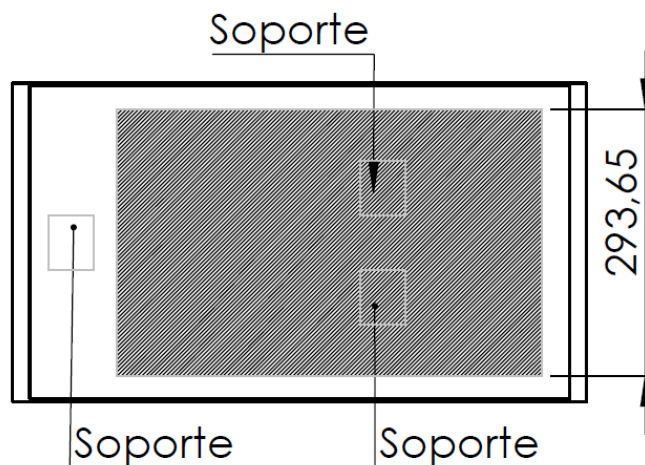


Figura 25 Ancho de trabajo

3.3.1.2.3 Longitud de trabajo para la instalación de la tubería

La longitud de trabajo está definida por la región sombreada, a partir de una vista superior de la cuba, tenemos:

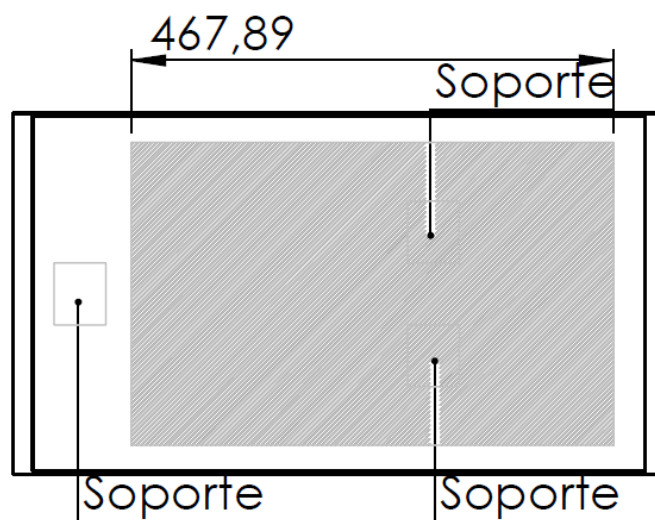


Figura 26 Longitud de Trabajo

3.3.1.2.4 Altura de trabajo para la instalación de la tubería

Debido a la altura a la que se encuentra la resistencia, tomada desde a base de la cuba, la altura de trabajo está dada por:

$$H_{trabajo} = 60[mm]$$

Por lo cual el diámetro adecuado para la tubería, en base a (Plastigama, 2014) es de:

$$\phi_{int} = 12,5[mm] \rightarrow 1/2 \text{ pulgada}$$

$$\phi_{ext} = 19,3 [mm]$$

Por lo tanto, se puede determinar la altura necesaria para establecer la presión en fluido estático, considerando que los orificios se encuentran a los costados de la tubería:

$$H_{presion} = H_{finalelectrolito} - \frac{1}{2}\phi_{ext} \quad \text{Ec.26}$$

$$H_{presion} = 150[mm] - 9,65[mm] = 140,35[mm]$$

3.3.1.2.5 Forma y Longitud de la tubería

A partir del volumen de trabajo existente, podemos determinar la longitud de la tubería que se utilizará, y mediante el valor de la longitud se puede determinar la caída de presión en los orificios más lejanos, considerando que, mediante una matriz de decisión que se muestra en el Anexo 5, se determinó la forma más eficiente para realizar la agitación neumática con la menor pérdida de presión posible y una agitación equitativa en la solución, tomando en cuenta esos factores se optó, por un sistema de un solo ramal, en forma de “L” con una extensión de manguera hasta la toma de aire.

$$L_{tubería} = 841,8 [mm]$$

$$L_{manguera} = 1220 [mm]$$

$$L_{total} = L_{manguera} + L_{tubería} = 2061,8[mm]$$

De acuerdo a pruebas realizadas en el simulador de fluido ANSYS 18.2 y comprobadas físicamente en el equipo de galvanizado, se determinó que se debe realizar 7 orificios pasantes con un diámetro de 2 [mm], a una separación de 50[mm] entre ellos a lo largo de la tubería de PVC de 400[mm], como se ve en la Figura 27, en la cual se observa el ramal con el número total de orificios numerados del 1 al 14

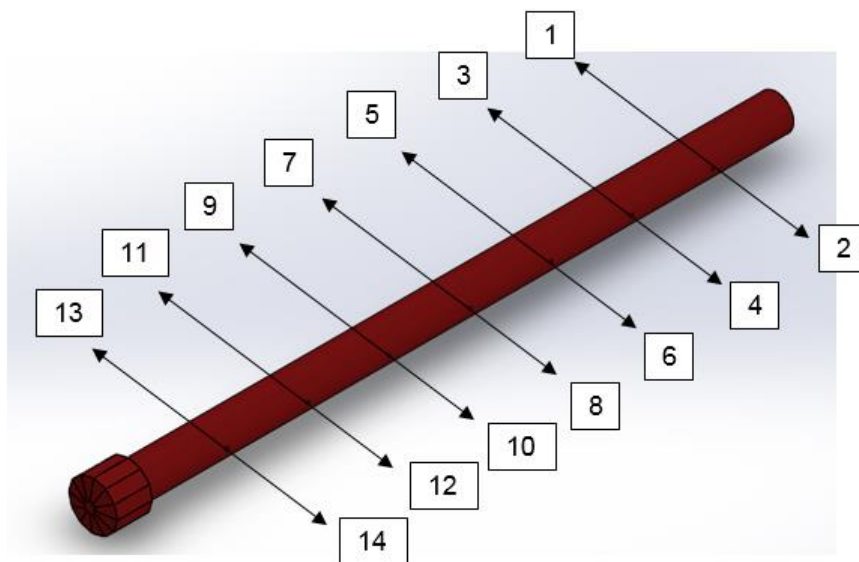


Figura 27 Ramal horizontal con orificios pasantes

El sistema de agitación completo, se encuentra en la Figura 28, presenta dicha forma debido a los elementos que se encuentran en la cuba, y son parte del galvanizado como: varillas de cobre (cátodos), varilla de cobre (ánodo), niquelina, soportes de niquelina.

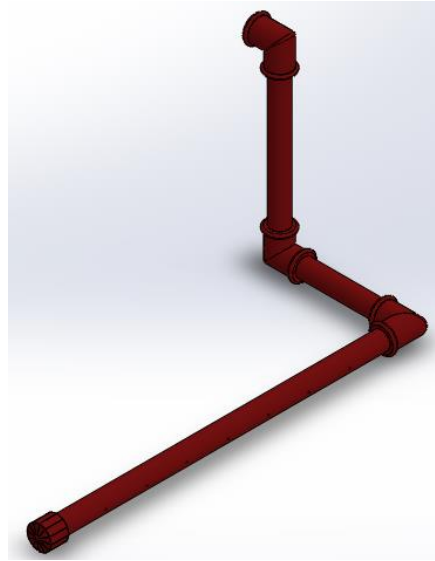


Figura 28 Sistema de un solo ramal para la agitación neumática

3.3.1.3 Selección del tipo de tubería

Para seleccionar tuberías se debe considerar los siguientes factores: material, diámetro, espesor, presión de trabajo, juntas y uniones

3.3.1.3.1 Material

Para seleccionar el material se aplicó una matriz de decisión expuesta en el Anexo 6 como resultado de esta matriz se seleccionó el PVC como material más adecuado.

El PVC es la denominación por la que se lo conoce al policloruro de vinilo, el cual es un plástico que se genera por la polimerización del monómero de cloroetileno. Debido a sus materiales presenta una alta resistencia al impacto y a la influencia de fuerzas.

3.3.1.3.2 Diámetro

Tomando en cuenta al volumen de la cuba dentro de la cual se implementa la tubería y la altura de trabajo respecto a la ubicación de la resistencia (niquelina), se optó por adquirir tuberías de media pulgada pues se ajustan correctamente al espacio de trabajo.

$$\emptyset_{int}=12,5[mm]$$

3.3.1.3.3 Espesor

El espesor del tubo de acuerdo a (Plastigama, 2014) es de:

$$Espesor = 3,4[mm]$$

3.3.1.3.4 Presión de trabajo

La presión de trabajo de la tubería seleccionada se determina de acuerdo a la temperatura a la que se encuentra sometida. Lo cual influye en el tiempo de vida útil de la tubería como se puede ver en la Tabla 18:

Tabla 18

Presión de Trabajo

Temperatura °C	Tiempo de vida útil (años)	Presión nominal (1Mpa)	
		Mpa	psi
20	25	1,15	166,8
	50	1	145
30	25	0,9	130,5
	50	0,9	130,5
40	25	0,7	101,5
	50	0,65	94,3
50	25	0,5	72,5
	50	0,45	65,3
60	25	0,35	50,8
	50	0,3	43,5
70	20	0,25	36,3

 Continúa

	25	0,2	29
80	10	0,2	29
	20	0,2	21,8
95	10	0,1	14,5
	5	0,1	14,5

Fuente: (Plastigama, 2014)

3.3.1.3.5 Juntas y uniones

Gracias a su versatilidad admite la combinación con un gran número de accesorios.



Figura 29 Juntas y uniones

Fuente: (Tuberías de PVC)

3.3.1.4 Diseño Galvánico

De acuerdo con metalmecánica Galvano se debe colocar agua a dos tercios del volumen total del tanque y el restante luego de realizar la disolución de los químicos:

$$V_{H_2O} = \frac{2}{3} * V_{electrolito} = 21[L]$$

Para el cloruro de zinc se requieren 77 [g] por cada litro de solución ácida.

$$g_{ZnCl_2} = 77[g]$$

Se calcula la cantidad de gramos en peso total mediante una regla de tres simple:

$$X_{g_{ZnCl_2}} = \frac{g_{ZnCl_2} * V_{electrolito}}{1[L]} = 2,425[kg]$$

Para el cloruro de potasio, debe existir 200 [g] de cloruro de potasio por cada litro de solución ácida.

$$g_{KCl} = 200[g]$$

Se calcula la cantidad de gramos de la solución:

$$X_{KCl} = \frac{g_{KCl} * V_{electrolito}}{1[L]} = 6,300[kg]$$

Debe existir 30 [g] de ácido bórico por cada litro de solución

$$g_{H_3BO_3} = 30[g]$$

La cantidad de gramos de la solución queda definida por:

$$X_{H_3BO_3} = \frac{g_{H_3BO_3} * V_{electrolito}}{1[L]} = 0,945[kg]$$

En cuanto a Galvacid Base debe existir 40 [ml] por cada litro de solución ácida.

$$V_{GalvacidBase} = 40 [ml]$$

Entonces se calcula la cantidad de litros de volumen total en la solución:

$$XV_{GalvacidBase} = \frac{V_{GalvacidBase} * V_{electrolito}}{1[L]} = 1,26[L]$$

Debe existir de 4 a 6 [ml] de Galvacid Brillo por cada litro de solución, para lo cual tomaremos una media:

$$V_{GalvacidBrillo} = \frac{4 + 6}{2} = 5[ml]$$

La cantidad en litros de Galvacid Brillo es:

$$XV_{GalvacidBrillo} = \frac{V_{GalvacidBrillo} * V_{electrolito}}{1[L]} = 0,157[L]$$

3.3.1.4.1 Área Catódica

De acuerdo a la norma ASTM B633, en cuanto a ensayos de recubrimientos las dimensiones de las probetas que se van a galvanizar son:

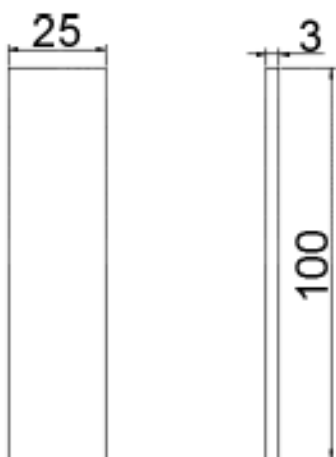


Figura 30 Dimensiones de probetas a galvanizar

Fuente: (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, pág. 163)

$$A_c = 4 * [2 * (25 * 100) + 2 * (3 * 25) + 2(3 * 100)]$$

$$A_c = 2300[mm^2] = 2,3[dm^2]$$

3.3.1.4.2 Determinación del equivalente electroquímico del Zinc

$$E_{q-q[Zn]} = \frac{E_{q[Zn]}[gr/mol]}{F[A*hr]} \quad \text{Ec.27}$$

$$E_{q[Zn]} = \frac{PA_{[Zn]}}{Va_{[Zn]}} = \frac{65,39[gr/mol]}{2} = 32,695[gr/mol]$$

$$F = 96500[A * seg] = 26,81[A * hr]$$

$$E_{q-q[Zn]} = \frac{32,695 \left[\frac{gr}{mol} \right]}{26,81 [A * hr]} = 1,22 \left[\frac{gr}{A * hr} \right]$$

3.3.1.4.3 Cálculo del tiempo de electrodeposición

De acuerdo a la Ec.12, se determina el tiempo del proceso de galvanización:

$$t = \frac{s * \rho_{zn} * 10}{E_{q-q} * \rho_l * \eta_g}$$

$$t = \frac{0,025 [mm] * 7,14 \left[\frac{gr}{cm^3} \right] * 10}{1,22 \left[\frac{gr}{A * hr} \right] * 2 \left[\frac{A}{dm^2} \right] * 0,95} = 0,77 [hrs]$$

$$t = 46 [min]: 13 [seg]$$

De acuerdo a la Ec.11 la corriente para realizar el proceso de Zincado es:

$$I = 2,3 [dm^2] * 2 \left[\frac{A}{dm^2} \right] = 4,6 [A]$$

3.3.1.5 Dinámica del sistema

3.3.1.5.1 Velocidad del aire comprimido

Para este proyecto, se tomará un promedio para determinar la velocidad máxima del aire comprimido de acuerdo a la Tabla 6, la misma velocidad del aire comprimido adopta el fluido por lo cual:

$$v = \frac{9 + 30}{2} = 19,5 [m/s]$$

3.3.1.5.3 Densidad y viscosidad dinámica de la solución de zinc ácido

De acuerdo al análisis de viscosidad realizado en el laboratorio de reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (ver Anexo 7), para una solución de Zinc ácido a una temperatura de 16°C, con lo cual se tiene:

$$\mu_{Zacido} = 0,003 \left[\frac{kg}{m * s} \right]$$

La densidad de la solución en grados Baumé (°Bé) es de 24 a 25, de manera que tomamos el valor promedio.

$$\rho_{Zacido} = \frac{24 + 25}{2} = 24,5 \text{ (°Bé)}$$

Para obtener la gravedad específica de una sustancia a partir de sus grados Baumé se aplica la expresión mostrada en la siguiente ecuación:

$$G_{Zacido} = \frac{145}{145 - \rho_{Zacido}} \quad \text{Ec.28}$$

$$G_{Zacido} = \frac{145}{145 - \rho_{Zacido}} = 1,203$$

Por lo tanto, la densidad está definida por

$$\rho_{Zacido} = 1203 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Entonces el número de Reynolds de acuerdo a la Ec.14 viene dado por:

$$Re = \frac{1203 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0,0125 [m] * 19,5 \left[\frac{m}{s} \right]}{0,003 \left[\frac{kg}{m * s} \right]} = 97743,75 \quad \text{Turbulento}$$

3.3.1.5.4 Cálculo de la velocidad del aire desde el compresor hasta la entrada del sistema de agitación

De la Ec.30 todos los parámetros pueden ser fácilmente medidos, excepto el factor de fricción (f). De hecho, la velocidad del aire por la tubería (v) es directamente proporcional al caudal o flujo de aire (Q) el cual es un dato conocido por el punto de suministro o compresor. Por lo cual:

$$Q = v.A = v * \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Ec.29}$$

Donde: Q = Flujo de aire o caudal volumétrico (m^3/s)

v = Velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)

A = Área transversal de la tubería (m^2)

D = Diámetro interior de la tubería

De la Ec.29 se despeja la velocidad en función del diámetro de la tubería, lo cual permite determinar la velocidad promedio que proviene desde el compresor, según el catálogo (Machines) se tiene una caudal de:

$$Q = 19,7 \text{ ft}^3/\text{min} = 0,009298 \text{ m}^3/s$$

Con lo cual se obtiene una velocidad promedio de salida del compresor de:

$$v = \frac{4 * Q}{\pi * D^2}$$

$$v = \frac{4 * 0,009297 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\pi * (0,0193[m])^2}$$

$$v = 31,78 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Debido a esto se requiere de una válvula de bola ubicada luego de la unidad de mantenimiento, que permita regular el caudal de flujo volumétrico del compresor a un máximo de:

$$Q = 1 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

De esta manera en base a la Ec.29, se tiene una velocidad de entrada al ramal de $3,84 \left[\frac{m}{s} \right]$. Debido al diámetro de los orificios, la velocidad de salida aumenta, de acuerdo a las pruebas realizadas, se tiene una velocidad de salida promedio mostrada en la Tabla 19

Tabla 19

Velocidades del aire dentro del sistema de tubería

V entrada [m/s]	Presión de entrada [Pa]	V salida [m/s]	Numero de orificio
3,84	202,427	10,751	1
		10,243	2
		10,695	3
		10,227	4
		10,565	5
		10,177	6
		10,766	7
		10,300	8
		10,477	9
		10,160	10
		10,621	11
		10,345	12
		10,401	13
		10,139	14
V. Promedio [m/s]		10,41907143	

3.3.1.5.5 Factor de fricción de Darcy

El factor de fricción en el flujo de tubos turbulentos, depende del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ/D), que es la relación entre la rugosidad del tubo

y el diámetro del mismo, el factor de fricción de Darcy es un número adimensional. La rugosidad dentro de un tubo de PVC es $\varepsilon = 0,0015 [mm]$ de acuerdo a la Tabla 20.

Tabla 20

Rugosidad absoluta de materiales

RUGOSIDAD DEL MATERIAL			
Material	$\varepsilon(mm)$	Material	$\varepsilon(mm)$
Platico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06 - 0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12 - 0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03 - 0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03 - 0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06 - 0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18 - 0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3 - 3

Fuente: (Rural, 2010)

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,0015[mm]}{12,5[mm]} = 0,000120$$

En 1939, F. Colebrook combinó los datos disponibles para la transición y flujo turbulento en tuberías lisas y rugosas la siguiente relación conocida como la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec.30}$$

La Ec.30 está implícita en f , y por lo tanto la determinación del factor de fricción f requiere de algunas iteraciones. Por lo que una relación explícita aproximada para f fue dada por S. E. Haaland en 1983, definida como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad \text{Ec.31}$$

Los resultados obtenidos de esta relación se encuentran dentro del 2% de los obtenidos por la ecuación de Colebrook. Resolviendo la Ec.31 se tiene:

$$f = \frac{0.308}{\left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon * Re + 25.53 * D}{D * Re}\right) - 0.5682\right)^{\frac{11}{50}} + \left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon * Re + 25.53 * D}{D * Re}\right) - 0.568\right)^2}$$

$$f = \frac{0.308}{\left(\log_{10} \left(\frac{0,0015[mm] * 97743,5 + 25.53 * 12,5[mm]}{12,5[mm] * 97743,5}\right) - 0.5682\right)^{\frac{11}{50}} + \left(\log_{10} \left(\frac{0,0015[mm] * 97743,5 + 25.53 * 12,5[mm]}{12,5[mm] * 97743,5}\right) - 0.568\right)^2}$$

$$f = 0,0184$$

Conocido el coeficiente de fricción de Darcy y reemplazando en la Ec.32 se determina el Δ_{p1}

Además, el coeficiente de fricción de Darcy puede ser determinado mediante la conocida tabla de Moody la cual se encuentra en función del número de Reynolds y ε/D en un amplio rango. Es probablemente uno de los gráficos más aceptados y usados en ingeniería. Ver Anexo 8.

3.3.1.5.6 Cálculo de la caída de presión de aire comprimido

Existe una ecuación matemática que permite determinar la pérdida presión en un tramo determinado de la tubería, definida como ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta_{p1} = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho * V_{avg}^2}{2} \quad \text{Ec.32}$$

Donde: Δ_{p1} = Caída de presión media según la altura manométrica (Pa)

L = Longitud del diámetro de la tubería

ρ = Densidad del aire comprimido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ (a 20°C), ver

Tabla 5

D = Diámetro exterior de la tubería (m)

V_{avg} = Velocidad promedio del en el interior de la tubería (m/s)

f = Factor de fricción de Darcy – Weisbach

$$\Delta_{p1} = 0,018 * \frac{2,06[m]}{0,0193[m]} \frac{1,204 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * \left(10,419 \left[\frac{m}{s} \right] \right)^2}{2}$$

$$\Delta_{p1} = 0,125[kPa] \cong 0,00125 [bar]$$

Debido a que existe una presión ejercida por el fluido, se debe vencer esta presión para que se pueda ejecutar la agitación al momento de romper la tensión superficial existente, para lo cual se emplea la ecuación de presión en fluido estático, definida como:

$$\Delta_{p2} = \rho gh \quad \text{Ec.33}$$

Por lo tanto, la presión del fluido estático (Δ_{p2}) queda definida por:

$$\Delta_{p2} = \rho_{Z\acute{a}cido} g h_{presión}$$

$$\Delta_{p2} = 1203 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 0,143[m] = 1,685[kPa] \cong 0,0168[bar]$$

3.3.1.5.7 Cálculo de la presión de entrada al sistema

Para poder determinar la presión necesaria que realice la agitación de la solución se requiere conocer la suma total de las caídas de presión Δ_{p1} , Δ_{p2} por lo tanto:

$$P_{entradamínima} = \Delta_{p1} + \Delta_{p2}$$

$$P_{entradamínima} = 0,126 + 1,685 = 1,811 [kpa] \cong 0,018[bar]$$

Para la práctica se usará una presión de entrada de 0,5 [bar], en función de que se cumpla con la velocidad de aire requerida a la entrada del sistema.

3.3.1.6 Simulación del comportamiento del Fluido en la tubería

3.3.1.6.1 Determinación del flujo másico

Para poder determinar las velocidades de salida, y observar el comportamiento del fluido dentro del ramal de tubería se utilizó el software ANSYS 18.2 Academic, debido a que el software necesita de condiciones de borde se introduce el flujo másico a la entrada del sistema:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \rightarrow \dot{m} = \rho * \dot{V} \quad \text{Ec.34}$$

Donde: ρ = Densidad del fluido (aire comprimido)

\dot{m} = Flujo másico

\dot{V} = Flujo volumétrico

De acuerdo a la

Tabla 5 la densidad del aire comprimido a 20°C es de $1,204 \frac{kg}{m^3}$, y el flujo volumétrico que entra al sistema es de 1 [CFM].

$$1[CFM] \cong 0,00047201 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Por consiguiente, de la Ec.34, se tiene:

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = 0,0005683 \left[\frac{kg}{s} \right] \cong 0,001252 \left[\frac{lb}{s} \right]$$

Con este flujo másico se trabaja en el software:

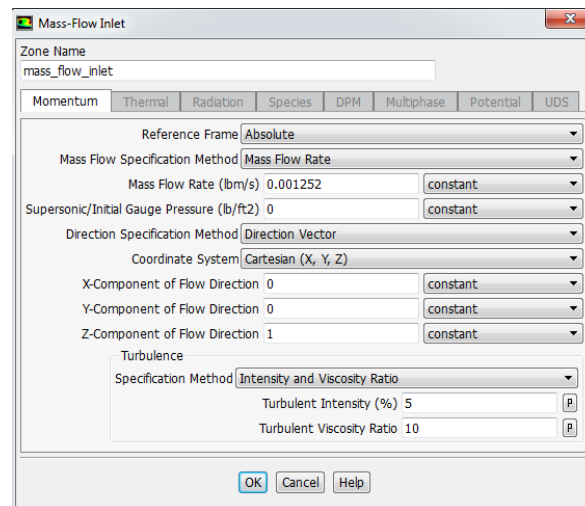


Figura 31 Condición de borde en el software ANSYS 18,2

3.3.1.6.2 Comportamiento del aire dentro del sistema neumático

Con las condiciones de borde establecidas se obtuvo el siguiente resultado:

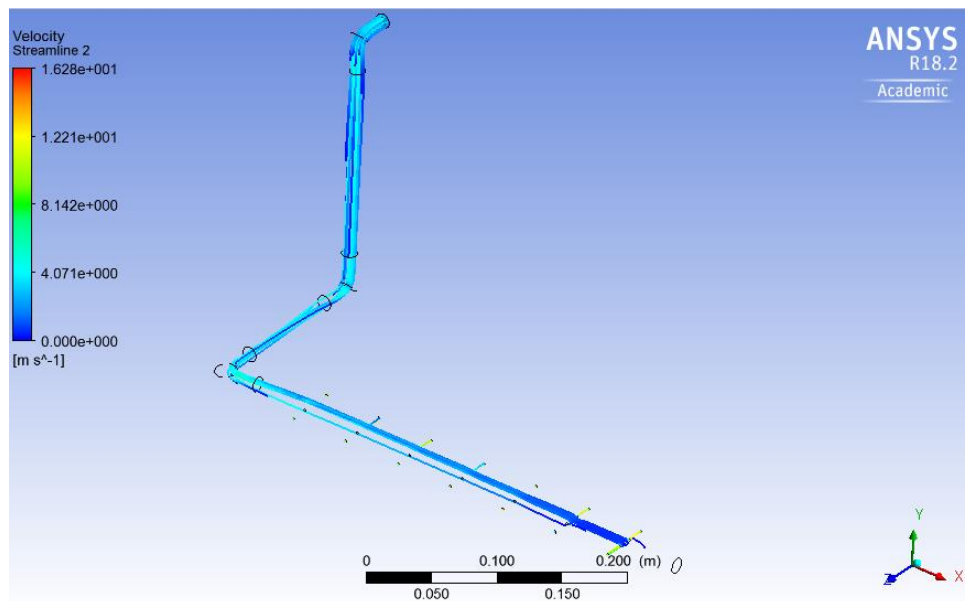


Figura 32 Comportamiento del aire dentro de la tubería

Como se puede observar, el comportamiento del aire es constante a lo largo del ramal horizontal con orificios, de manera que las pérdidas por caída de presión son despreciables.

3.3.1.6.3 Velocidad del aire dentro del sistema neumático

La velocidad de entrada al sistema es baja, debido al diámetro de los orificios (2mm) en el ramal horizontal, la velocidad de salida aumenta ver (Figura 33 y Figura 34) y se encuentra dentro del rango óptimo para aire comprimido. La velocidad promedio de salida del aire es de: $10,419 [m/s]$ Ver Tabla 19.

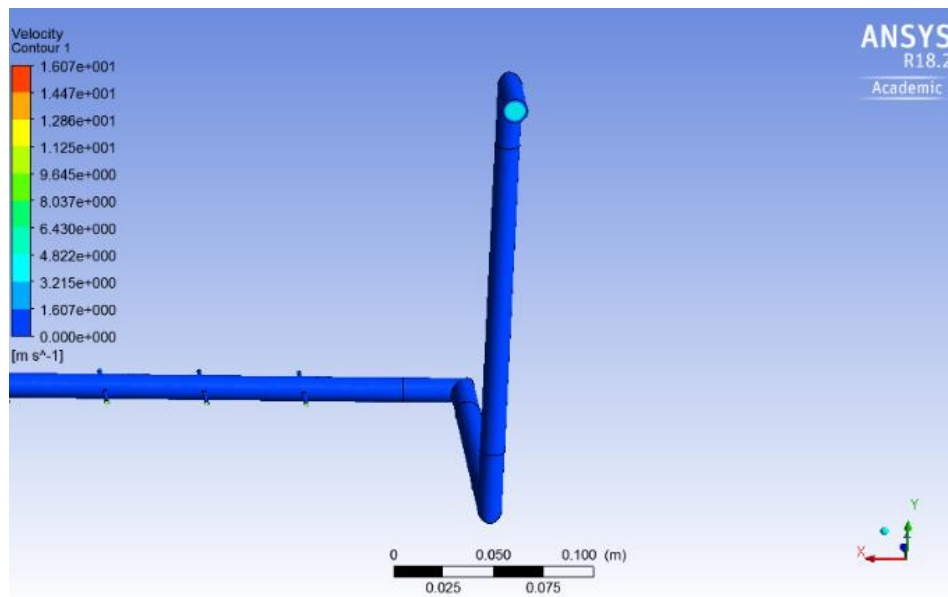


Figura 33 Velocidad de entrada del sistema neumático

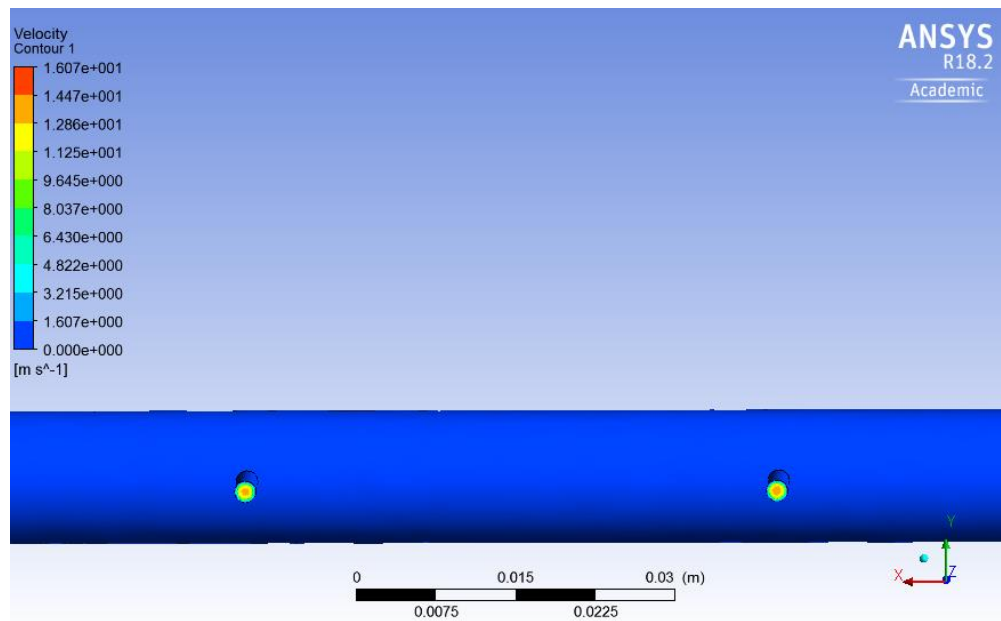


Figura 34 Velocidad de salida del sistema neumático

3.3.1.6.4 Presión del aire dentro del sistema neumático

- La presión de entrada en la tubería es de: 207,14[Pa]
- La presión en el sistema completo de tubería es de: 84,13[Pa]

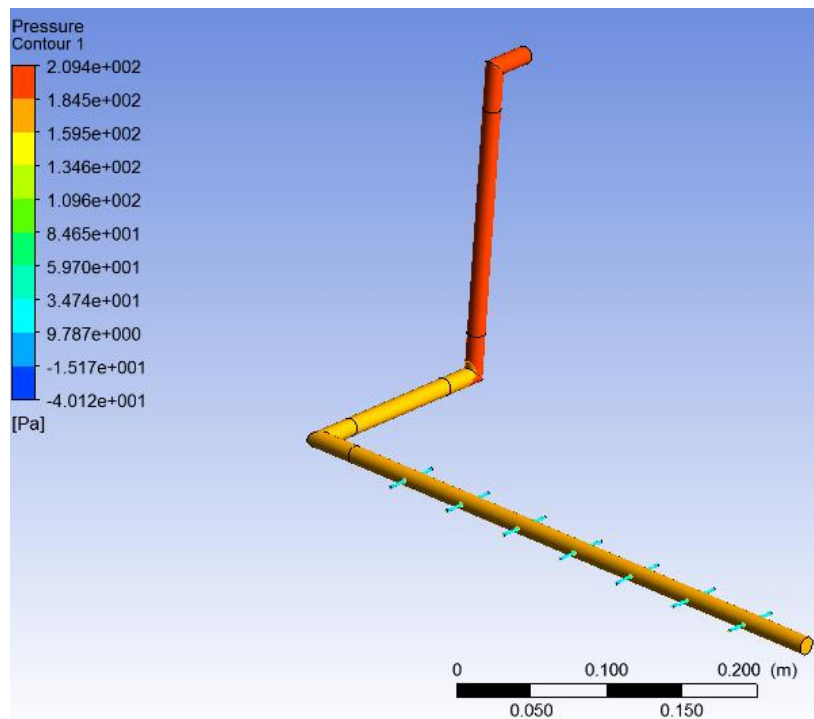


Figura 35 Presión en la tubería






3.3.2. Diseño Eléctrico

3.3.2.1 Selección de elementos indicadores

3.3.2.1.1 Selección de luces piloto

Los indicadores luminosos cumplen la función de advertir sobre eventos que sucedan durante los procesos, en el control de mando del galvanizado electrolítico se usará luces piloto a 110V AC para mostrar el estado de los parámetros de interés. En la Tabla 21 se describe los tipos de indicadores luminosos disponibles.

Tabla 21*Significado de los colores de los indicadores luminosos*

Color de luz piloto	Estado del proceso	Descripción	Imagen
Rojo	En reposo	Indicador del paro o anomalía del proceso <hr/> Indicador de tomar acciones en cuanto al proceso	
Amarillo	Atención o precaución	Indicador de ciclo automático <hr/> Indicador de proximidad a un valor máximo admisible	
Verde	Proceso correcto	Indicador que el proceso se encuentra en óptimas condiciones	
Blanco	Baja tensión en circuito eléctrico	Indicador de maquina o proceso en marcha	
Azul	Funciones varias	Indicador usado en diversas aplicaciones	

3.2.2.1.2 Descripción de las luces piloto**Tabla 22***Características de luces piloto de 110V*



Tipo de indicador	Luz piloto verde/amarilla/roja
Marca	Camsco
Diámetro de montaje	22mm
Consumo de corriente	20mA
 Continúa	

Imagen	
Fuente	(Camsco, 2015)


3.3.2.2. Selección de elementos de control y potencia

3.3.2.2.1 Modulo Relé

Se usan para separar la etapa de control con la etapa de potencia, se emplean relés o módulos relé que permiten una activación de hasta 220V AC, a partir de una señal de 5V DC.

Tabla 23

Características eléctricas de Módulo Relé

Voltaje de activación de la bobina[V DC]	5
Carga máxima [A]	10
Carga máxima [V AC]	250
Carga máxima [V DC]	30
Número de entradas	1,2,4,8,16
Peso[gr]	14
Imagen	
Fuente	(T-Bem, 2018)

3.3.2.2 Selección de Electroválvulas

Las electroválvulas o válvulas solenoides permiten controlar el flujo (ON-OFF) de un fluido. Se encuentran diseñadas para utilizarse con agua, gas, aire, gas combustible, vapor entre otros. Las electroválvulas pueden ser de dos hasta cinco vías, las cuales están fabricadas de, latón, acero o PVC.


Para este caso, se usará una electroválvula monoestable normalmente cerrada, lo cual significa que el comando eléctrico acciona directamente la apertura de la válvula, por medio de un solenoide. Ver Anexo 9.

3.3.2.3 Rectificador de corriente

El equipo cuenta con un rectificador de corriente, el cual es el encargado de suministrar la corriente necesaria para el proceso de galvanizado electrolítico. La función del rectificador de corriente es transformar de corriente alterna a continua. El dispositivo cuenta con un regulador de voltaje e intensidad de corriente que se desea suministrar.

Tabla 24

Especificaciones Rectificador de corriente


Modelo	KXN-3010D
Voltaje de entrada [V AC]	220
Salida de voltaje [VDC]	0-30
Salida de corriente [A]	0-10
Frecuencia [Hz]	50-60
Resistencia de aislamiento (Ω)	≥ 20
Voltaje de salida [V DC]	0-30
Corriente de salida [A]	0-10
Dimensiones [mm]	275x126x155
Peso [kg]	2.58
Imagen	

3.3.2.2.4 Controlador de temperatura (reóstato)

Para tener mejores acabados en el galvanizado electrolítico, se debe mantener la solución a una temperatura adecuada de acuerdo al tipo de baño. Mediante el termostato se pretende realizar este control, se utilizó el termostato que ya se encontraba en el equipo, el cual se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25


Control de temperatura

Modelo	XMTG-808
Dimensión [mm]	48x48x109,98
Entrada	Termocupla tipo J
Salida (s) de control	1 Relé
Modo de control	PID
Alimentación [VAC]	110/220
Rango [°C]	de -20 a 600
Consumo de corriente[mA]	20
Display	3 dígitos
Imagen	
Fuente	(Hanna Instruments, 2016)

3.3.2.2.5 Contactor

El contactor es un elemento de potencia, que permite mediante una activación proveniente de la etapa de control activar o desactivar las cargas correspondientes al circuito de potencia.

Tabla 26*Características del contactor*

Marca	Schutz
Tipo	C1-D1810
Temperatura de trabajo	de -5°C a 40°C
Voltaje principal [VAC]	110
Polos	4P
Bobina del contactor frecuencia	50Hz,60Hz
Corriente máxima térmica [A]	32
Corriente nominal [A]	18
Material	Metal, Plástico
Imagen	
Fuente	(Us Breaker, 2017)

3.3.2.2.6 Selector de tres posiciones

Es un elemento de maniobra que permite cerrar el circuito, en esta ocasión será un selector de tres posiciones que permita en posición 1 (izquierda) preparar la solución para el galvanizado, posición 0 (centro) apagar el equipo, posición 2 (derecha) proceso de galvanizado.

Tabla 27*Selector tres posiciones*

Características	NO(normalmente abierto) Una vez se active cierra el circuito (izquierda)
	COM (Común) No existe contacto
	NO(normalmente abierto) Una vez se active se cierra el circuito (derecho)



3.3.2.3 Selección de elementos de protección

Para proteger los elementos eléctricos y electrónicos, es fundamental el uso de disyuntores para cada etapa que consume una cantidad de corriente determinada. En caso de los contactores se empleará relés térmicos para la protección de las cargas (niquelina).

3.3.2.3.1 Disyuntor principal

Es importante el correcto dimensionamiento del disyuntor principal, ya que este es el encargado de la protección de toda la parte eléctrica de la maquina en caso de una sobrecarga

$$P_c = V * I$$

$$I = \frac{P_c}{V * \text{Cos}\varphi}$$

Donde: P_c = Valor de potencia consumida

I = Corriente en los ramales de alimentación

V = Voltaje nominal de alimentación

$\text{Cos}\varphi$ = valor estimado del factor de potencia de la carga

Tabla 28*Cálculo para el dimensionamiento del disyuntor principal*

Elemento	Potencia Nominal [W]	Voltaje de Trabajo [V]	Factor de potencia	Corriente Calculada[A]
Rectificador	1800	220	0,85	9,63
Niquelina	2500	220	0,85	13,37
Motor	160	48	0,85	3,92
ph-Metro	5	110	0,85	0,05
Electroválvula	55	110	0,85	0,59
Controlador de temperatura	5	110	0,85	0,05
Control digital	6	5	0,85	1,41
Consumo total				29,02

En base al análisis realizado, se instaló un disyuntor de 32[A] que es el valor comercial superior más próximo al calculado.

3.3.2.3.2 Disyuntores secundarios

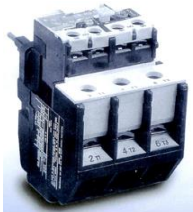
Para que exista una protección en los elementos más susceptibles, se colocó dos disyuntores de 16[A], pues es el valor comercial más próximo al consumo de la Niquelina y el rectificador; además estos disyuntores ya se encontraban con anterioridad en la máquina.

Para la protección del circuito y los elementos de control se instaló un disyuntor de 6[A].

3.3.2.3.3 Relé térmico

El Relé térmico permite proteger las cargas que se encuentran conectadas a los contactores, en caso de que exista un sobre corriente (aumento de la temperatura en el cable).

Tabla 29*Características relé térmico 12-18A*

Marca	Camsco
Tipo	R2D1321
Corriente de trabajo[A]	12 a 18
Frecuencia[Hz]	50-60
Imagen	
Fuente	(Camsco, 2015)

3.3.3 Diseño Electrónico

3.3.3.1 Selección de sensores

3.3.3.1.1 Selección de pH-Metro y calibración

Dentro del proceso es de suma importancia controlar el pH de la solución ácida, el que debe estar en un rango de 4.5 a 5.5, para lo cual se empleará un pH-metro de línea el cual emite de forma constante los valores de pH. De esta manera se puede controlar en tiempo real la acides de la solución durante el proceso de galvanizado.

Para el proceso se utiliza un controlador de pH con las características que se indican en la

Tabla **30**. Antes de trabajar con el dispositivo, este debe ser calibrado, según el manual de operación se utiliza dos puntos de calibración las cuales son sustancias de pH 4.00 y 9.18 conocidos como buffers.

Tabla 30*Controlador de ph-metro KEDIDA CT-6658*


Fuente de alimentación	110-220 [VAC]
Frecuencia	50Hz
Consumo de energía	<5W
Exactitud	±0,01pH; ±1mV
Rango de medición	0,00 a 14,00pH; ±1000mV
Set point	2
Temperatura ambiente	0 a 50°C
Compensación manual de temperatura	0 a 100°C
Mostrar	Pantalla LCD doble cuatro, indicación LED de control alto y bajo
Humedad ambiental	35 a 85% de HR
Guarde los parámetros	≥10 años
Modo de salida	ENCENDIDO/APAGADO 4 a 20 mA
Capacidad de salida	AC 250V / 3A DC 30V / 3A
Impedancia de entrada	≥10 ¹² Ω
Aislamiento R	≥10MΩ
Tamaño del instrumento	96mmX96mmX125mm
Imagen	
Fuente	(KEDIDA, 2017)

A este controlador se conecta una sonda (electrodo/sensor) compatible, la cual es la encargada de la medición del pH.

Tabla 31*Características electrodo CT-1001*

Modelo	CT-1001C
Temperatura [°C]	0 a 80°C
Conexión	Cable
Zero potenciómetro [PH]	7±0.5
Rango de Ph	0 a 14

 Continúa

Resistencia a la presión [MPa]	0.6
Resistencia interna $M\Omega$ (25°C)	250
Pendiente de porcentaje teórico%	>95
Bloques de terminales	cabeza BNC, pieza-Y, insertos
Conexión general	3/4 pulgadas de hilo exterior
Tamaño [mm]	188*31
Imagen	
Fuente	(KEDIDA, 2017)

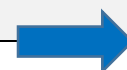
3.3.3.1.2 Termocupla tipo J

Las termocuplas son el sensor de temperatura más usado en la industria. En este caso, la termocupla tipo J consta de dos alambres de distinto material, un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel). Al aplicar temperatura en la unión de estos metales se genera un voltaje en el orden de los milivolts, el cual aumenta a medida que se incrementa la temperatura, hasta un límite de 750°C con un voltaje de 42.2 [mV].

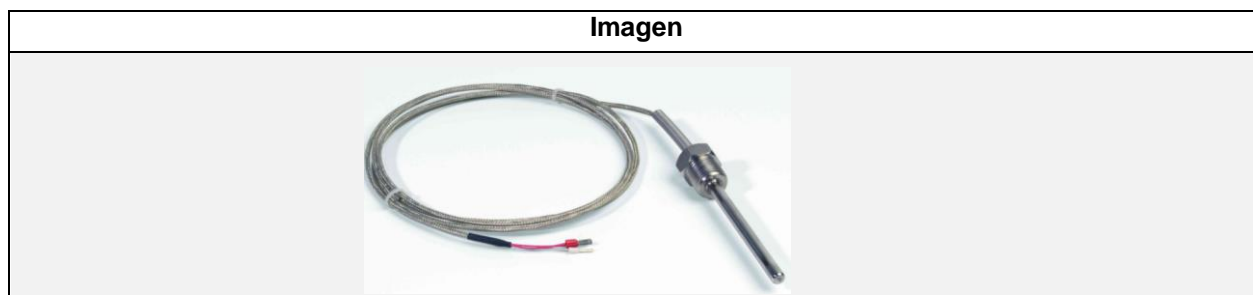
Tabla 32

Características técnicas termocupla tipo J

Termocupla	
Tipo	J
Rango de temperatura general	de -40 a 750°C
Sensibilidad	50 μ V/°C
Límites de error	
Temperatura	0 - 750°C
Estándar	$\pm 2,2^\circ\text{C}$ o $\pm 0,75\%$
Especial	$\pm 1,1^\circ\text{C}$ o $\pm 0,4\%$



Continúa




Fuente: (Weisz, 2017)

3.3.3.1.3 Selección del sensor de nivel

El sensor de nivel que se usará es un sensor tipo flotador, el cual es normalmente abierto y su activación se realiza a 5[V].

Tabla 33

Características del sensor de nivel tipo flotador


Contactos	NA o NC
Voltaje máximo de conmutación [DC]	100
Corriente máxima de conmutación [A]	0,5
Voltaje máximo de ruptura [DC]	220
Corriente máxima de carga[A]	1
Resistencia máxima de contacto[Ω]	100
Grado de temperatura [°C]	de -10 a 85
Material del cuerpo del flotador	Plástico
Peso[g]	15
Longitud total del cuerpo [mm]	68
Imagen	
Fuente	(Direct Industry, 2018)

3.3.3.1.4 Anemómetro

Este dispositivo permite medir la velocidad, temperatura y caudal del aire.

Tabla 34

Anemómetro

Medición	Velocidad de aire/Temperatura
Rango de velocidad	0.3 - 30 [m/s]
Rango de Temperatura	de -10°C a 45°C ($\pm 2^\circ$)
Resolución	0,2°C, 0,2[m/s]
Auto apagado	14 min sin operación
Alimentación	Batería 3[V]
Imagen	
Fuente	(PCE instruments, 2017)

3.3.3.2 Selección de microcontrolador y controlador

3.3.3.2.1 Microcontrolador ATmega2560

Se utiliza el microcontrolador ATmega2560 para realizar la programación lógica del proceso, así como también la adquisición de datos en tiempo real que se requieran.

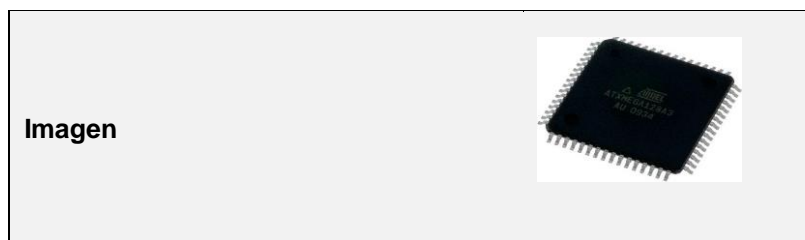
Tabla 35

Características microcontrolador ATmega2560

Tamaño de memoria de programación	256KB
Tamaño de datos RAM	8KB
Velocidad	16MHz
Puertos de entrada/salida	86
Temporizadores	6
Canales de ADC	16 canales de 10 bits
Empaquetado	TQFP-100



Continúa




Fuente: (Atmel, 2014)

3.3.3.2 Controlador I2C

El controlador por bus I2C y puerto serie facilita el manejo de la pantalla LCD 20x4, pues requiere de una alimentación de 5 voltios y dos pines de conexión de datos. De la misma manera, se tiene varias opciones de formato de texto además de la capacidad de introducir caracteres personalizados para utilizarse cuando se requiera. Tiene un buffer de 64 bytes con sistema FIFO (First in First Out, primero en entrar, primero en salir), que garantiza un mínimo retardo en la escritura del display. (Nova electrónica, 2017)

Tabla 36
Controlador I2C

Características I2C	Interfaz de comunicación simple, pero potente y flexible, solo dos líneas de autobús necesarias
	Operación maestra y esclava admitida
	El dispositivo puede funcionar como transmisor o receptor
	Espacio de direcciones de 7 bits Permite hasta 128 direcciones diferentes de esclavos
	Velocidad de transferencia de datos de hasta 400 kHz
	Circuito de supresión de ruido rechaza picos en líneas de autobús
Imagen	
Fuente	(Atmel, 2014, pág. 260)

3.3.3.3 Selección pantalla LCD

3.3.3.3.1 Pantalla LCD 20x4

Se seleccionó una lcd de tamaño 20x4 debido a los mensajes que deben ser desplegados a lo largo del galvanizado electrolítico. En la pantalla se mostrará los mensajes de funcionamiento y/o anomalía de cualquiera de los componentes que llevan a cabo el proceso.

Tabla 37

Características lcd 20x4

Voltaje de alimentación	5 [VDC] via pin
Interfaz	CII/TWIx1, x2idc10
Angulo de visión	amplio (-60° a 35°)
Tamaño de punto	0.55x0.55[mm]
Tamaño de carácter	2.96x4.75[mm]
Caracteres	20x4
Luz de fondo	Azul
Control	I2C
Dimensiones	98x62x13[mm]
Consumo	2,5[mA]
Peso	68[g]
Imagen	
Fuente	(Systronix, 2000)

3.3.4 Construcción sistema de agitación neumático

3.3.4.1 Instalación de válvula que permite el paso del aire comprimido

Esta válvula de bola permite el paso del aire que proviene desde el compresor hacia la unidad de mantenimiento.



Figura 36 Válvula de bola (paso del aire del compresor)

3.3.4.2. Ubicación de la unidad de mantenimiento

Debido a que el compresor, no presenta las condiciones ideales en cuanto a pureza del aire suministrado, es necesario colocar una unidad de mantenimiento, la cual presenta un filtro coalescente el cual tiene una porosidad del elemento fluente de $0,01\mu m$ lo cual garantiza que el aire comprimido salga prácticamente seco en su totalidad hacia la solución de zinc ácido y realizar la agitación neumática sin problemas. Ver Anexo 10.



Figura 37 Filtro coalescente MC202-FB0

Fuente: (CAMOZZI, 2017)

Para poder regular la presión necesaria que se requiere para la agitación neumática, se tiene un filtro regulador de presión el cual permite el seteo a 0,5 [bar]. Ver Anexo 13



Figura 38 Filtro regulador de presión

Fuente: (CAMOZZI, 2017)



Figura 39 Unidad de mantenimiento

3.3.4.2 Instalación de la Válvula de bola para medición de presión y caudal.

Para poder realizar el seteo de la presión de entrada se debe tener la válvula de bola en la posición cerrada, y se regula la entrada de presión en la unidad de manteniendo, la cual tiene incorporado un manómetro.

Es importante tener la presión adecuada para evitar accidentes, derrames o lesiones hacia el operador de la máquina ya que se trabaja con químicos que pueden ser nocivos para la salud.

Una vez que se tenga la presión deseada, se debe medir la velocidad del aire sacando el tapón que se encuentra en un acople en "T" entre esta válvula (la cual se abre de a poco) y la válvula de paso al sistema de agitación (la cual se encuentra completamente cerrada), la regulación se realiza con ayuda del anemómetro (ver Tabla 34) que indica la velocidad del aire y mediante el uso de la Ec.29 se puede determinar el caudal.



Figura 40 Válvula de bola

Fuente: (*Fluids*, 2017)



Figura 41 Válvula de bola y acople en "T"

3.3.4.3 Instalación de la electroválvula de una sola vía

Para poder llevar a cabo la agitación neumática-automática de la solución, se instaló una electroválvula de una sola vía con activación a 110 Voltios. La cual se observa en la

Figura 42. La electroválvula, se encuentra ubicada de tal manera que permite el paso del aire comprimido, luego de haber seteado la presión deseada.

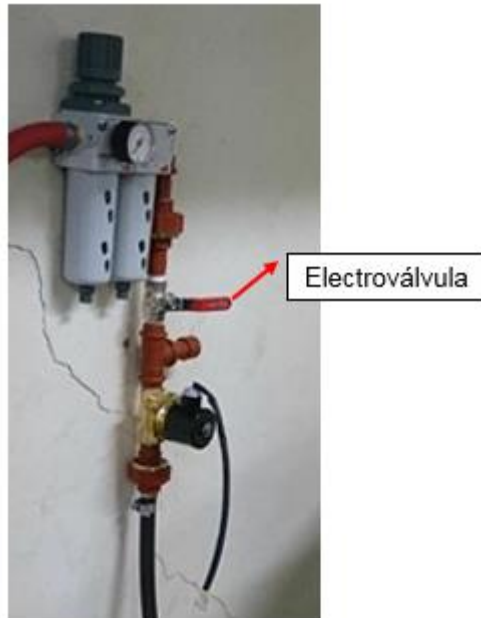


Figura 42 Instalación electroválvula monoestable

3.3.4.4 Conformación del sistema de agitación neumática

El sistema de agitación neumática está compuesto como se detalla en el Anexo 11.

3.3.4.5 Implementación del sistema de agitación neumática dentro de la cuba de galvanizado electrolítico

La implementación del sistema de agitación neumática, se observa en la Figura 43



Figura 43 Implementación del sistema de agitación neumática

3.3.4.6. Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo del proceso de galvanizado electrolítico con agitación neumática en un baño de Zinc ácido se lo describe en el Anexo 12.

3.3.5 Construcción sistema eléctrico

3.3.5.1 Diseño del gabinete de control

Los planos del diseño del gabinete de control se adjuntan en el Anexo Diagrama Gabinete de Control. Además las conexiones se encuentran detalladas en el Anexo Diagramas Eléctricos.

3.3.5.2 Planteamiento de la distribución de los elementos eléctricos en la puerta del gabinete de control.

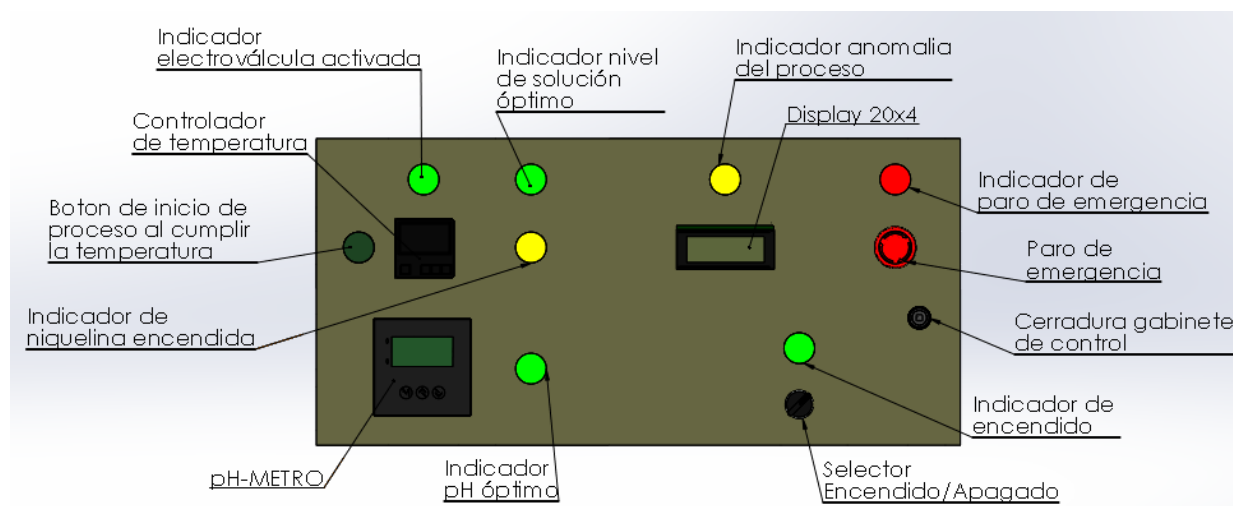


Figura 44 Distribución física de los elementos eléctricos en el gabinete de control

En la Figura 44 se puede visualizar la distribución física de los elementos eléctricos con sus respectivos indicadores luminosos.

3.3.6 Implementación de los sensores en el equipo de galvanizado

En la cuba de galvanizado electrolítico, se ubicaron tres sensores: Sensor de nivel (Flotador), sensor de temperatura (Termocupla tipo J), sensor de pH (sonda de pH) como se ve en la Figura 45 para poder tener controlado dichos parámetros durante el proceso. Los sensores se encuentran a una altura determinada, acorde con el nivel del electrolito, que permitan una lectura clara durante todo el galvanizado.

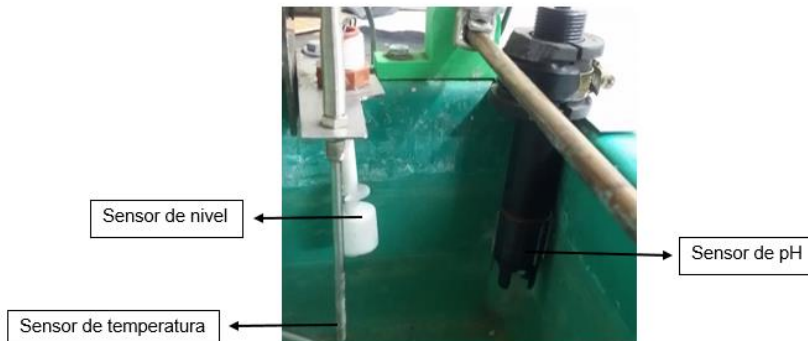


Figura 45 Implementación de los sensores de nivel, temperatura y pH en la cuba

3.3.7 Implementación de los componentes eléctricos y electrónicos en el gabinete de control.

A continuación, se instalan los componentes eléctricos y electrónicos, los cuales fueron calculados previamente entre los cuales tenemos: disyuntores, contactores, riel DIN, fuente, selector de tres posiciones, botón, paro de Emergencia, luces piloto, entre otros. Lo cual se muestra en la: Figura 46, Figura 47 y Figura 48.

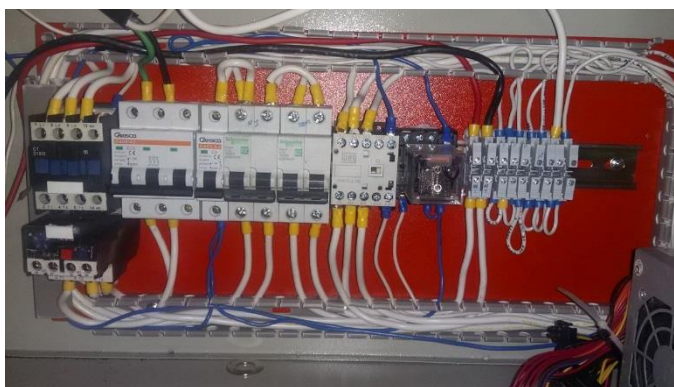


Figura 46 Implementación de disyuntores y contactores



Figura 47 Implementación de la fuente para la etapa de control

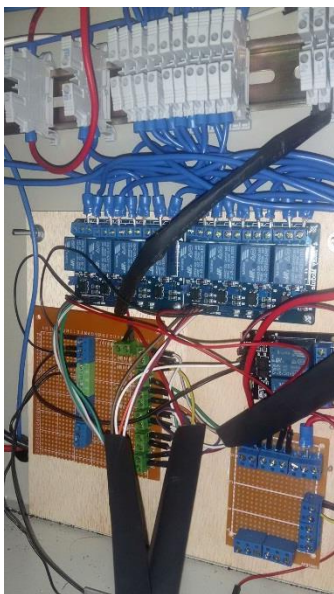


Figura 48 Implementación de los relés y borneras

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Pruebas de Funcionamiento

4.1.1 Pruebas Subsistema mecánico

4.1.1.1 Medición de la presión del aire comprimido

Para poder tener una agitación neumática adecuada se establece una presión de 0,5 [bar] en el manómetro de la unidad de mantenimiento, como se observa en la Figura 49. Es importante purgar la unidad de mantenimiento cada cierto tiempo para evitar que el aire condensado sea arrastrado por el aire comprimido.



Figura 49 Presión de 0,5 bares en manómetro

4.1.1.2 Comprobación de la velocidad del aire a la entrada del sistema de agitación neumática.

Es importante controlar que la velocidad de la entrada de aire al sistema sea según los cálculos, de 3,84[m/s] para tener una velocidad de salida del aire dentro de los rangos establecidos, y por ende una buena agitación de la solución.



Figura 50 Medición de la velocidad de entrada del aire al sistema de agitación neumática

4.1.1.3 Verificación de la agitación neumática de la solución.

De acuerdo a los cálculos de la velocidad de salida del aire en el sistema, la caída de presión calculada para la longitud de la tubería utilizada y las simulaciones en el software ANSYS FLUENT Academic para determinar el número y diámetro de los orificios a lo largo de la tubería. Se tiene una agitación mediante burbujeo, aceptable de la solución.



Figura 51 Verificación de la agitación de la solución

4.1.2 Pruebas Subsistema Eléctrico

4.1.2.1 Comprobación del encendido de la niquelina y control de la temperatura

Mediante el controlador de temperatura y la termocupla tipo J, se puede controlar constantemente la temperatura del medio, pues se tiene por actuador a una niquelina de 2500[W] la que se encarga de mantener a una determinada temperatura a la solución.

El control que se realiza es un control ON/OFF, para poder mantener la temperatura en el nivel deseado.

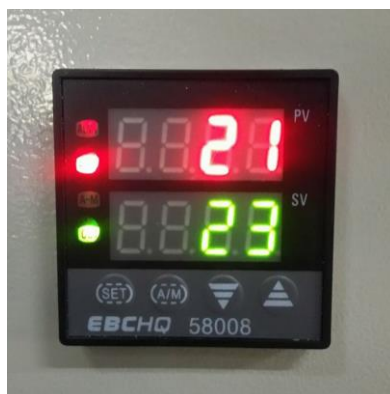


Figura 52 Verificación del funcionamiento del controlador de temperatura

4.1.2.2 Comprobación del encendido del pH-metro y lectura del pH de la solución

Si la sonda se encuentra bien calibrada y lo suficientemente sumergida en la solución, empieza a dar una lectura correcta de pH, la cual es estable acorde a los químicos empleados dentro de un rango de 4,5 a 5,5.



Figura 53 Comprobación de lectura del pH de la solución

4.1.2.3 Verificación de activación de indicadores luminosos, pantalla LCD, selector y botones.

Los indicadores luminosos funcionan correctamente y se activan de acuerdo a los parámetros de interés que se desee verificar en el proceso. Durante el galvanizado electrolítico se cuenta con una pantalla LCD la cual despliega mensajes que informan sobre los pasos que se debe seguir para realizar el galvanizado, al igual que advertencias y/o alarmas en el transcurso del baño de zinc ácido.

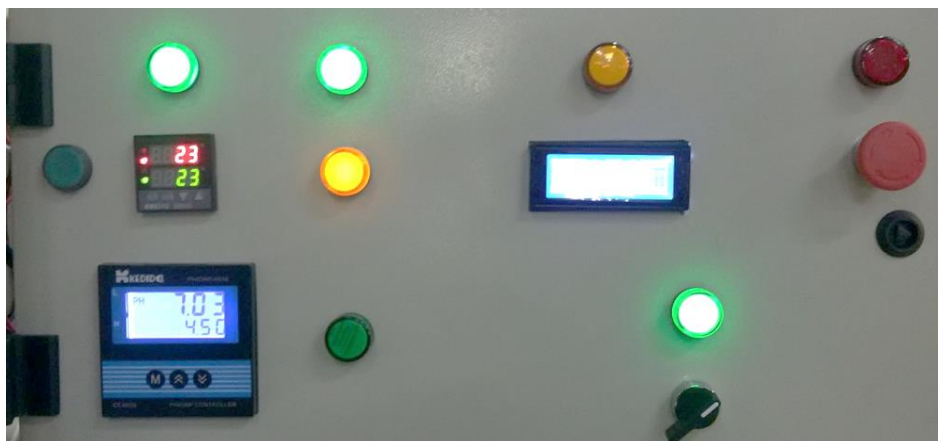


Figura 54 Verificación del funcionamiento de indicadores luminosos y pantalla LCD

El panel de control cuenta con un botón que permite arrancar el proceso en caso de que la temperatura y el pH de la solución sean los correctos.

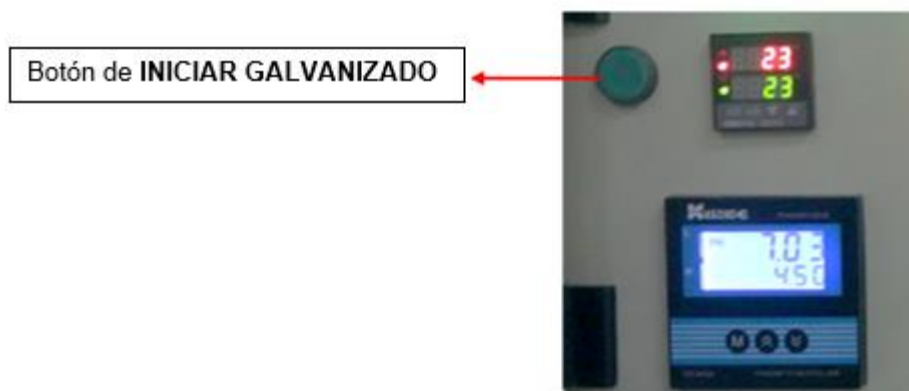


Figura 55 Botón de inicio del proceso de galvanizado

El equipo cuenta con un Paro de Emergencia, al momento de activar el Paro de emergencia se desactiva todos los componentes del equipo, y se prende el indicador luminoso de paro de emergencia.



Figura 56 Activación del Paro de Emergencia

4.1.3 Pruebas Integración de Subsistemas mecánico y eléctrico

Al integrar y poner en funcionamiento ambos subsistemas se obtuvo los resultados esperados, esto es, un equipo automático listo para poder realizar un galvanizado electrolítico con Zinc ácido con agitación neumática; teniendo un control del nivel, temperatura y pH acorde a los rangos establecidos para el baño.

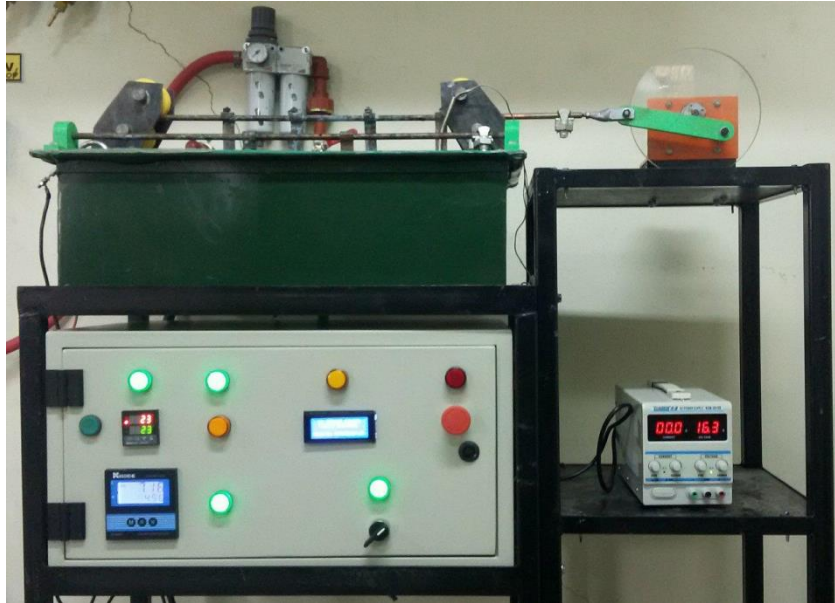


Figura 57 Prueba de funcionamiento subsistema mecánico y subsistema eléctrico

4.2 Diseño Experimental

En este capítulo se empleará la metodología de superficie de respuestas, para poder comparar los resultados obtenidos por la metodología Taguchi efectuados en la tesis previa realizada por (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016) manteniendo el rango de espesores de electrodeposición recomendado por la norma ASTM B633.

De acuerdo a los parámetros expuestos en el capítulo 2, se toman en cuenta varios factores, entre los cuales tenemos:

- Intensidad de corriente
- Tiempo de electrodeposición
- Temperatura de la solución
- pH de la solución
- Agitación catódica (neumática)

Como se analizó en la Ec.11 y en la Ec.12, existe una relación inversamente proporcional entre el tiempo de electrodeposición y la intensidad de corriente, la cual determina la cantidad de iones que circulan en la solución electrolítica y el espesor del metal depositado, por lo cual se utilizará como factor la intensidad de corriente con su respectivo tiempo de electrodeposición.

La temperatura será considerada como otro factor, de acuerdo a una recomendación de Metalmecánica Galvano, se trabaja entre los 18°C a 35°C.

El pH (potencial Hidrogeno), tiene mucha influencia en el resultado del producto final, por razones de costos de producción y químicos se lo mantendrá en un valor estándar recomendado por Metalmecánica Galvano entre 4,5 a 5,5. Cabe recalcar que el alcance del proyecto de investigación está orientado a controlar parámetros de una agitación neumática y no química por lo cual el pH no se considerará como un factor.

La Agitación neumática de la solución, es de suma importancia para que se produzca una electrodeposición uniforme y de acuerdo a las velocidades recomendadas para fluidos en tuberías de la Tabla 6. Se trabajará en el rango de 3 m/s a 8 m/s para producir una velocidad de salida en el rango de 9 m/s a 30 m/s según las simulaciones realizadas en la dinámica de fluidos computacionales (CFD).

Los factores a controlar son tres, y debido al tipo de metodología de optimización de parámetros se utilizará tres niveles y así verificar en cada experimento, la variabilidad del espesor obtenido.

De acuerdo a la corriente de electrodeposición para baños de Zinc Ácido, se encuentran en un rango de $1,5\left[A/dm^2\right]$ a $2,5\left[A/dm^2\right]$ lo cual significa una intensidad de

corriente en un rango de $3,5 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ a $5,8 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ según la Ec.11, como valores límites para el presente proyecto de investigación.

Como se tienen tres factores a tres niveles, se debe seleccionar un arreglo ortogonal acorde para el experimento, por lo cual la matriz escogida es una $L_9(3)^3$.

4.2.1 Factores de control y niveles de análisis

En resumen, se presenta la Tabla 38 con los factores y los niveles considerados para la optimización de parámetros.

Tabla 38

Factores de control y niveles de análisis

Factores de control	Denominación	Niveles		
		1	2	3
A	Temperatura [°C]	20	26	35
B	Velocidad de entrada del [m/s]	3	3,8	4,5
C	Corriente [A]	3,5	4,6	5,8

4.2.2 Arreglo ortogonal $L_9(3)^3$

Se escogió una matriz ortogonal L_9 tomando en cuenta varios factores:

- Se tiene tres factores en el proceso
- Es obligatorio el uso de tres niveles debido a que se emplea la metodología de superficie de respuestas
- Los costos de los químicos empleados para la preparación de la solución

Tabla 39Arreglo ortogonal $L_9(3)^3$

Ensayos	Factores			Factor de ruido [μm]			Desviación estándar (σ)	S/R
	A	B	C	Y_1	Y_2	Y_3		
1	1	1	1					
2	1	2	2					
3	1	3	3					
4	2	1	2					
5	2	2	3					
6	2	3	1					
7	3	1	3					
8	3	2	1					
9	3	3	2					

La respuesta de Señal a Ruido se resuelve aplicando la Ec.35

$$S/R = 10 * \log_{10} \left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2} \right) \quad \text{Ec.35}$$

Debido a efectos de medición y niveles de los factores empleados, se toma en cuenta un valor mínimo de recubrimiento de 25 micras de acuerdo a la norma establecida en la Tabla 11. Los valores superiores son permitidos acorde con la norma B633 del estándar de electrodeposición.

Los experimentos se llevarán a cabo de la siguiente manera:

Experimento 1:

Temperatura 20°C (A1), velocidad 3[m/s] (B1) y una intensidad de corriente de 3,5 [A] (C1).

Experimento 9:

Temperatura 35°C (A3), velocidad 4,5[m/s] (B3) y una intensidad de corriente de 4,6 [A] (C2).

De esta manera se complementarán los 9 ensayos para poder medir los espesores del metal depositado.

4.2.3 Determinación de la relación inversamente proporcional de la intensidad de corriente y el tiempo de electrodeposición.

De acuerdo a las leyes de Faraday explicada en el capítulo 2, la relación entre los factores intensidad de corriente y tiempo tiene un coeficiente de Pearson menor a 0, como se observa en la Tabla 40, por lo tanto son inversamente proporcionales como se aprecia en la Tabla 41, si no se cumple la relación entre dichos factores la cantidad de material depositado puede ser mayor a la esperada o a su vez saturar la solución electrolítica y no obtener buenos acabados de galvanización.

Tabla 40*Correlaciones*

Correlaciones	
Correlación de Pearson	-0,988
Valor P	0,098

Tabla 41*Relación Intensidad de corriente vs Tiempo de electrodeposición*

Intensidad de corriente [A]	Tiempo de electrodeposición [hrs]	Espesor del metal depositado teórico [µm]
3,45	1,03	24,34
4,6	0,77	32,45
5,75	0,62	40,57

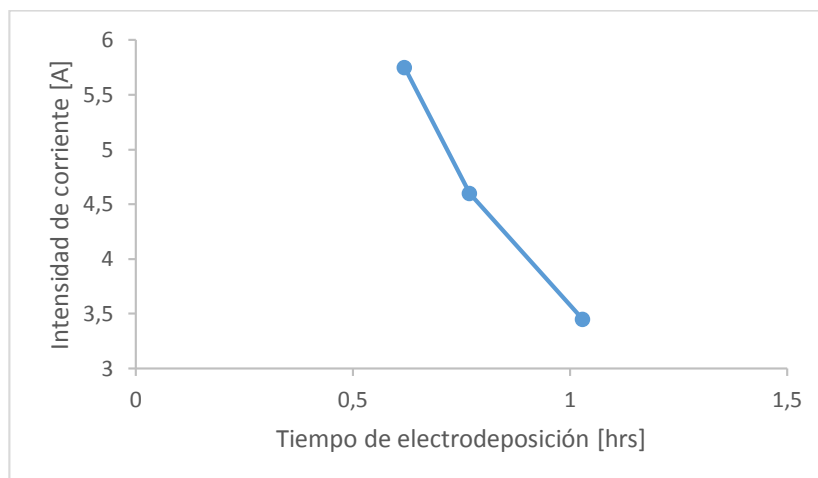


Figura 58 Relación intensidad de corriente vs Tiempo de electrodeposición

4.3 Ejecución del galvanizado electrolítico

4.3.1 Pretratamiento de las probetas

Las probetas de acero ASTM A36, o acero negro como se lo conoce en el mercado, deben pasar por procesos mecánicos y químicos antes de ser galvanizadas. Luego de ser cortadas con las dimensiones especificadas en el apartado 3.3.1.4.1 Área **Catódica**, deben ser rectificadas o pulidas, como se observa en la Figura 59. Para posteriormente pasar a un tratamiento químico de ácido clorhídrico con ácido sulfúrico y enjuagar dos veces la probeta antes de colocar en la máquina, ver Figura 60



Figura 59 Rectificado de probetas



Figura 60 Decapado de probetas en mezcla de ácido clorhídrico con ácido sulfúrico

4.3.2 Preparación manual de la solución de Zinc ácido

De acuerdo a lo que indica metalmecánica Galvano, vertemos 21,3 litros de agua en la cuba, es decir los $\frac{2}{3}$ del volumen total y procedemos a calentarla a 60°C mediante

el uso de la niquelina instalada. Dicho volumen de agua tarda alrededor de unos 30 minutos 33 segundos en alcanzar la temperatura deseada.

Una vez que el agua se encuentre por sobre los 60°C se prepara la solución con las cantidades de sales especificadas en la 2.7.2.3 Preparación del baño, como se puede ver en la Figura 62.



Figura 61 Calentamiento del agua a 60°C



Figura 62 Mezcla de sales para la solución de Zinc Ácido

4.3.3 Configuración y comprobación de parámetros en el proceso de galvanizado

Si se realizó la mezcla correctamente, el pH-metro muestra un valor de 5 aproximadamente, lo cual indica que el pH de la solución se encuentra dentro del rango establecido. En caso de que el pH se encuentre por encima del valor deseado se debe agregar ácido cítrico a la solución y si por el contrario el valor es demasiado bajo se procede a añadir Cloruro de Sodio. En el momento en que la velocidad de entrada de aire, temperatura y corrientes de ánodo y cátodo son las adecuadas se procede a la galvanización.

4.4 Ejecución de mediciones de revestimientos

4.4.1 Mediciones de masas original de las probetas

Para realizar los análisis respectivos, en primer lugar se llevó a cabo el pesaje de 27 probetas para conocer el peso promedio original (ver Anexo 14), con el uso de la balanza electrónica del laboratorio de reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



Figura 63 Balanza electrónica Shimadzu UW2200H

Se realiza cinco mediciones de espesor en cada probeta, empleando el método de la diagonal de cara (Figura 64), teniendo un total de tres probetas por cada ensayo, por lo tanto se miden las respuestas (Y_1, Y_2, Y_3) en la matriz ortogonal. Para luego proceder a calcular la media aritmética de las respuestas (\bar{Y}) y la desviación estándar (σ) para cada uno de los 9 ensayos.

Las mediciones fueron realizadas por un medidor electrónico digital marca *Elcometer*. Con este equipo se puede realizar mediciones precisas de espesor de revestimientos ya sea ferroso o no.



Figura 64 Medición de método diagonal

Fuente: (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, pág. 168)

4.4.2 Mediciones de masas depositadas durante la electrodeposición

La medición se llevó a cabo, en la balanza Shimadzu UW2200H del laboratorio de reología. Se midió la masa de cada probeta al final de cada ensayo realizado, efectuando un total de 27 mediciones, los resultados se muestran en el Anexo 15.

4.4.3 Resultados

La Tabla 42 se muestra los resultados de los 9 ensayos realizados., cabe señalar que la tabla mostrada es un resumen de los resultados obtenido, la tabla completa se muestra en el Anexo 16.

Tabla 42

Revestimientos y pesos de aporte

Factores			Factor de ruido			\bar{Y}	(σ)	Mi [gr]	Mf [gr]	Δ [gr]	Δte [gr]
T [°C]	Vel [m/s]	I [A]	Y_1	Y_2	Y_3						
20	3	3,5	19,40	17,10	23,40	19,97	3,19	43,81	46,76	2,96	4,11
20	3,8	4,6	28,40	23,20	18,60	23,40	4,90	42,47	46,18	3,71	4,11
20	4,5	5,8	30,20	15,00	21,10	22,10	7,65	43,52	47,03	3,52	4,11
26	3	4,6	27,70	25,80	24,30	25,93	1,70	41,56	45,51	3,95	4,11
26	3,8	5,8	22,10	20,30	15,20	19,20	3,58	43,64	46,80	3,16	4,11
26	4,5	3,5	21,90	27,20	22,83	23,98	2,83	44,11	47,26	3,15	4,11
35	3	5,8	30,50	35,70	38,90	35,03	4,24	43,25	48,74	5,49	4,11
35	3,8	3,5	23,60	20,80	18,10	20,83	2,75	43,95	47,54	3,59	4,11
35	4,5	4,6	26,17	25,60	22,40	24,72	2,03	43,85	47,55	3,70	4,11

De los resultados obtenidos, se puede observar que en la combinación de factores del ensayo 4, se obtuvo una masa de aporte cercano al valor teórico, además presenta un revestimiento por sobre las 25 micras tal como indica la norma ASTM B633 como un requisito de cumplimiento para una condición severa.

4.5 Análisis de resultados por Metodología de Superficie de Respuestas (RSM)

La metodología de superficie de respuesta, presenta dos etapas: modelamiento y desplazamiento, las cuales son repetidas tantas veces cuantas fueran necesarias, para poder alcanzar una región óptima sobre una superficie investigada. Por lo general, se realiza un modelamiento ajustándose a modelos como: general, lineares o cuadráticos.

El desplazamiento se produce a lo largo del camino de máxima inclinación para un determinado modelo el cual es una trayectoria que presenta una respuesta que varía de forma más pronunciada.

De acuerdo a (Seob Kwak, 2005), cuando se aplica la metodología de superficie por lo general se utiliza un modelo de segundo orden como se lo mostró en la Ec.20

4.5.1 Aplicación del modelo de segundo orden

El objetivo principal, es modelar el comportamiento del proceso en una región muy precisa y relativamente pequeña, de manera que se pueda obtener la combinación de factores que pueden ser considerados como óptimos. Por lo cual, para el presente proyecto se empleará el procedimiento denominado Escalamiento Ascendente-Descendente.

4.5.2 Modelo Ascendente-Descendente

Lo primero que se debe hacer es elegir un tamaño de incremento o “escalón” acorde con las variables de los parámetros del experimento, es decir un Δx_j . Acorde con el incremento, mediante el uso de la Ec.36 se puede obtener las variables codificadas como se observa en la Tabla 43, en la cual el 0 son los puntos centrales. Lo que se procede, es a obtener la mejor combinación de factores para que la respuesta \bar{Y} tenga valor de $25\mu\text{m}$ para poder cumplir con la norma B633.

$$X_i = \frac{\xi - X_{central}}{\Delta x_j} \quad \text{Ec.36}$$

Tabla 43*Variables codificadas del proceso*

Corridas	Variables del proceso		Variables codificadas		$\bar{Y}_{\mu m}$
	Temp [°C]	Velocidad [m/s]	X1	X2	
1	20	3	-1	-1	19,97
2	20	3,8	-1	0	23,40
3	20	4,5	-1	1	22,10
4	35	3	1,5	-1,14285714	35,03
5	35	3,8	1,5	0	20,83
6	35	4,5	1,5	1	24,72
7	26	3	0	-1,14285714	25,93
8	26	3,8	0	0	19,20
9	26	4,5	0	1	23,98

4.5.3 Resultados de la metodología de Superficie de Respuestas

4.5.3.1 Análisis de Varianza

Para poder obtener el modelo que mejor se ajuste a la respuesta, lo que se pretende es obtener un Coeficiente de determinación (R cuadrado) lo más próximo al 100% para que exista un mayor ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar, por el contrario, si el valor tiende al 0% el modelo se encuentra menos ajustado, es decir es menos fiable.

Además, se obtiene un R cuadrado ajustado el cual penaliza la inclusión de variables en el modelo. De manera que el R cuadrado ajustado aumenta, aunque las variables que se incluya no sean relevantes.

Para este análisis, se empleó una combinación cuadrática completa de todos los factores independientes. Como se observa en la Tabla 44.

Tabla 44
Análisis de Varianza

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	176,668	25,238	9,87	0,24
Lineal	3	39,165	13,055	5,11	0,312
Temp [°C]	1	36,588	36,588	14,31	0,165
Velocidad [m/s]	1	1,187	1,187	0,46	0,619
Corriente [A]	1	4,103	4,103	1,61	0,425
Cuadrado	1	33,158	33,158	12,97	0,172
Corriente [A]*Corriente [A]	1	33,158	33,158	12,97	0,172
Interacción de 2 factores	3	92,419	30,806	12,05	0,208
Temp [°C]*Velocidad [m/s]	1	46,632	46,632	18,24	0,146
Temp [°C]*Corriente [A]	1	42,741	42,741	16,72	0,153
Velocidad [m/s]*Corriente [A]	1	6,126	6,126	2,4	0,365
Error	1	2,556	2,556		
Total	8	179,224			

Es importante señalar que, para poder diseñar un modelo, hay que regirse en el Valor P, el cual es un indicativo de cuan ajustado está el modelo lineal con las variables independientes por separado, el modelo cuadrático y la interacción entre factores, mientras el Valor P tiende a cero el factor se encuentra ajustado.

4.5.3.2 Resumen del modelo cuadrático

Al escoger un modelo cuadrático con las interacciones de factores correctas, se obtuvo un ajuste aceptable, brindando una alta confianza en el modelo seleccionado, mostrado en la Tabla 45

Tabla 45
Resumen del modelo cuadrático

Resumen del modelo cuadrático			
S	R-cuadrado	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,59877	98,57%	88,59%	0,00%

4.5.3.3 Coeficientes codificados

En base a los valores obtenidos, el programa estadístico empleado para obtener la ecuación del modelo cuadrático en cuanto a cantidad de revestimiento aportado, nos muestra los siguientes coeficientes que corresponden a cada factor.

Tabla 46

Coeficientes codificados

Coeficientes codificados		
Término	Coef	Valor P
Constante	27,7	0,0026
Temp [°C]	4,1	0,165
Velocidad [m/s]	0,627	0,619
Corriente [A]	-1,32	0,425
Corriente [A]*Corriente [A]	-5,34	0,172
Temp [°C]*Velocidad [m/s]	-7,45	0,146
Temp [°C]*Corriente [A]	5,87	0,153
Velocidad [m/s]*Corriente [A]	2,64	0,365

4.5.3.4 Ecuación de regresión en unidades no codificadas

La ecuación de regresión del revestimiento obtenido en unidades no codificadas queda diseñada de la siguiente manera:

Ec.37

$$Revest = -68,5A + 22,99B + 6,2C - 4,04C^2 - 1,324A * B + 0,681A * C + 3,07B * C$$

Donde:

A: Temperatura [°C]

B: Velocidad [m/s]

C: Corriente [A]

4.5.3.5 Gráfica de contornos del proceso

Mediante la gráfica de contornos se puede explorar la relación entre tres variables. Se grafican los factores X y Y que son Temperatura y velocidad del aire, respectivamente. Y la respuesta, el Revestimiento, se expresa mediante contornos, el cual es como un mapa topográfico en el cual se grafican los valores mencionados.

En la Figura 65, cuando la temperatura se encuentra en un rango de 26°C en adelante revelan un revestimiento superior a 25 μ m, lo recomendado por la norma B633, dentro de todo el rango de velocidad de agitación por aire. Cuando la temperatura es inferior a los 26°C se requiere de velocidades superiores para tener un revestimiento adecuado.

Las regiones más oscuras nos revelan que se tendrá un revestimiento, superior a las 35 μ m, lo cual podría causar problemas durante el proceso de galvanizado.

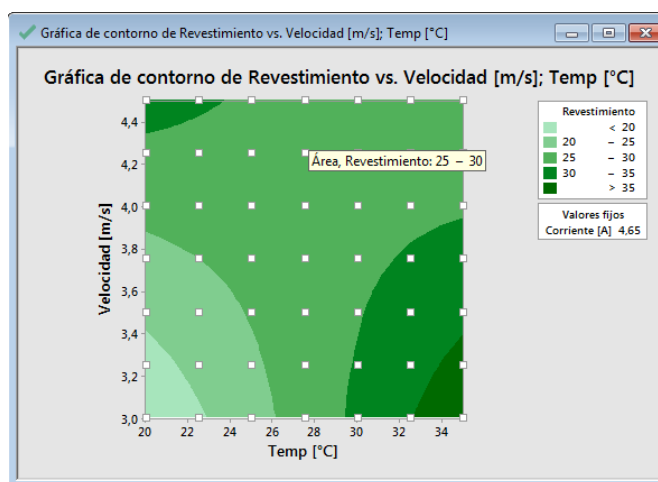


Figura 65 Gráfica de contorno del proceso

4.5.3.6 Interpretación de resultados del gráfico de superficie de respuesta del proceso

La gráfica de superficie 3D, se utilizan para explorar el campo de relación entre tres variables. Las variables predictoras que son Temperatura y Velocidad y la variable respuesta que es el Revestimiento. Mediante la gráfica de superficie en combinación con la gráfica de contornos, se puede establecer los valores de superficie y las condiciones de operación que se desee.

En la Figura 66 se encuentra la gráfica de superficie del proceso de galvanizado realizado, como se puede observar a medida que aumenta la temperatura de la misma forma aumenta el revestimiento, hasta cierto punto que por más que se incremente la temperatura del electrolito el revestimiento se mantiene y ya depende de la velocidad de agitación para conservar un revestimiento adecuado. Debido a que la velocidad y la temperatura son factores con interacción, cuando ambos factores se encuentran con valores bajos no existe una electrodeposición adecuada y por ende el revestimiento es bajo. Por el contrario, cuando solamente uno de los factores tiene una valor elevado el revestimiento se encuentra por sobre las $30\mu m$.

Como se puede observar, a medida que aumenta la temperatura por sobre los $26^{\circ}C$ y la velocidad tiene un valor adecuado por sobre los $3\ m/s$, nos encontramos en una respuesta de revestimiento estable y con un valor aceptable por sobre las $25\mu m$ y que si aumentamos la temperatura ese valor de respuesta de revestimiento empezará a descender.

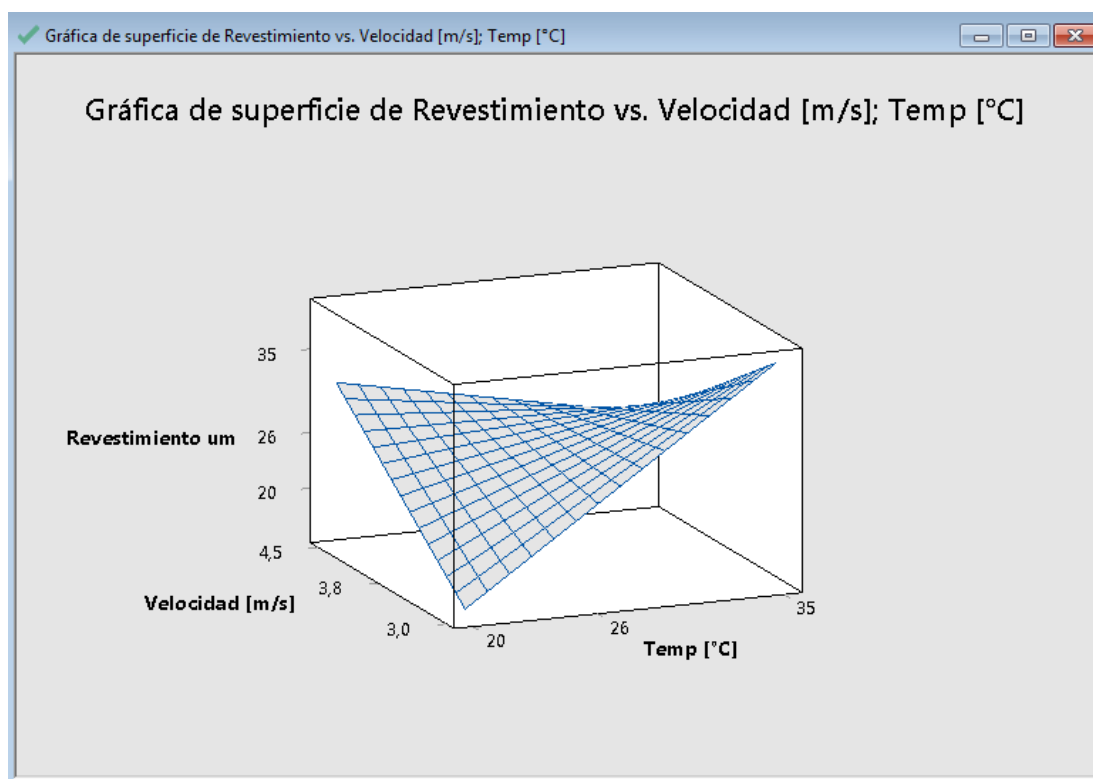


Figura 66 Gráfica de Superficie de respuesta del proceso

4.5.3.7 Combinación de factores para obtener un revestimiento de $25\mu m$

Con el uso del programa estadístico se puede, minimizar, indicar un valor de respuesta específico o maximizar el resultado. Para el estudio de esta investigación se optó por especificar un valor de respuesta el cual, rigiéndose a la norma (ASTM, 2015) de parámetros de revestimiento es de $25\mu m$. Teniendo los resultados mostrados en la Tabla 47 para llegar a un valor óptimo de revestimiento

Tabla 47

Combinación de parámetros para un revestimiento de 25 micras

Factores			Y [μm]
Temp [°C]	Velocidad [m/s]	Corriente [A]	
34,035	3,49	3,5	25,00

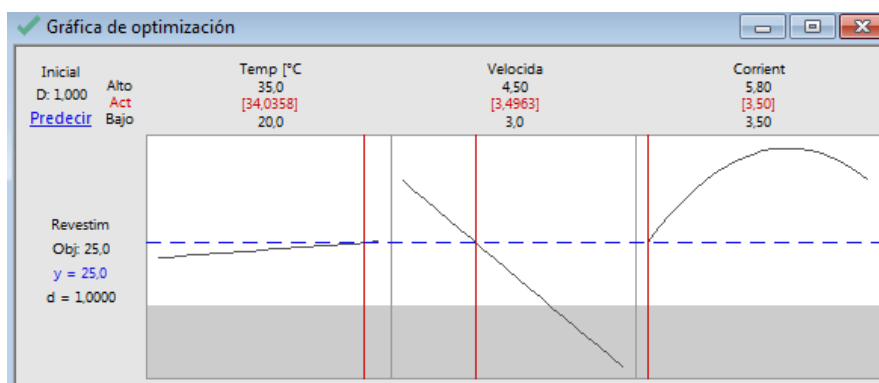


Figura 67 Gráfico de optimización de parámetros

4.6 Análisis comparativo entre resultados con metodología Taguchi y resultados con Metodología Superficie de Respuestas.

Para realizar el análisis de resultados, se debe tomar en cuenta dos factores importantes los cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 48

Factores empleados en cada elemento de optimización

Factores empleados en cada metodología de optimización		
	Taguchi	Superficie de Respuestas
Tipo de Baño	Zinc sin cianuro	Zinc ácido
Tipo de agitación	Mecánica (Biela-Manivela)	Neumática

En el trabajo de titulación de (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016), se empleó zinc sin cianuro y una agitación mecánica, que luego de realizar la optimización de parámetros mediante la metodología Taguchi, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Figura 68 :

Ensayo confirmatorio ANOVA y el análisis de medias.

I	T	t	Y1	Y2	Y3	Y4	\bar{Y}	w_I	w_f	Δw	Δw_{te}
[Amp]	[°C]	[hr]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]
4,6	30	0,88	28,5	29,6	30	29,1	29,3	46	50	4	4,14

Figura 68 Resultados obtenidos con metodología Taguchi

Fuente: (Ávila Brito & Pazmiño Salgado, 2016, pág. 179)

En el cual se observa un valor de revestimiento de 29,3 [μm], valor que se encuentra por sobre las 25 [μm] como se establece en la norma B633, pero que a nivel de optimizar recursos y minimización costos no es un revestimiento lo suficientemente eficiente. Teniendo un error de:

$$e\% = \frac{29,3 - 25}{29,3} * 100 = 14,67\%$$

En el presenta trabajo de titulación, empleando zinc ácido y una agitación neumática, se obtuvo los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 49.

Tabla 49

Resultados obtenidos con metodología de Superficie de Respuestas

Factores			Factor de ruido			\bar{Y}	Mi [gr]	Mf [gr]	Δ Mpra [gr]	Δ Mte [gr]
Temp [°C]	Vel. [m/s]	Corriente [A]	Y_1	Y_2	Y_3					
26	3	4,6	27,70	25,80	24,30	25,93	41,56	45,51	3,95	4,11

Teniendo un revestimiento de 25,93 [μm], cumpliendo con el estándar especificado de electrodeposición además de lograr optimizar la mayor cantidad de recursos. Teniendo un error de:

$$e\% = \frac{25,93 - 25}{25,93} * 100 = 3,6\%$$

Adicionalmente, empleando la metodología de superficie de respuesta se puede predecir los valores específicos de cada factor para tener un revestimiento exacto de $25[\mu m]$, los cuales se detallan en la Tabla 47.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se diseñó el sistema de agitación neumática con una presión de entrada de 0,5 [bar] y una velocidad estimada de 3 a 4,5 [m/s], de tal manera que las pérdidas a lo largo de la tubería sean mínimas y la agitación no produzca derrames de solución innecesarios durante el proceso, garantizando también una velocidad de salida comprendida entre 10 a 11 [m/s] misma que será la que produzca la agitación necesaria en la cuba.
- Se construyó un sistema neumático el cual mediante el burbujeo agita la solución impidiendo que los químicos sedimenten dentro de la cuba durante el proceso y acumulando en los bordes de la misma las impurezas existentes a causa de los materiales utilizados y por efectos del proceso como tal, impidiendo que estas tengan contacto con las placas que se galvanizan.
- Se logró la lectura, de forma continua, del valor de pH de la solución con la implementación de un sensor o electrodo de línea, el cual monitorea en tiempo real ésta variable. Para efectos de este trabajo de titulación se trabajó con un pH de 5.5.

- Teóricamente se determinó que los parámetros más influyentes del proceso son Temperatura (T), Velocidad del aire (Vel), e Intensidad de corriente (I), cabe resaltar que la variable Tiempo es influyente, pero se encuentra relacionada de manera inversa a la Intensidad de corriente (I), esta relación se encuentra expresada en la Ec.12 del capítulo 2, y debido a factibilidad económica no se tomó en cuenta esta interacción dentro de la matriz ortogonal de experimentación. Las variables dependientes en este proceso son Voltaje, dependiente de la intensidad de corriente, y pH dependiente de la preparación de la solución.
- Tomando en cuenta el número de variables influyentes (factores), y el tipo de metodología a ser utilizada para la optimización, se decidió utilizar una matriz ortogonal $L_9(3)^3$, la cual permite trabajar con tres factores a tres niveles cada uno, cumpliendo así con los requerimientos de la metodología RSM.
- Los parámetros seleccionados para el análisis fueron una temperatura de 18°C, 26°C, 35°C, una velocidad de 3 m/s , $3,8 \text{ m/s}$, $4,5 \text{ m/s}$ y una densidad de corriente de $1,5 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$, $2 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$, $2,5 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$, correspondientes a una intensidad de corriente de (3,5[A]), (4,6[A]), (5,8[A]) respectivamente.
- Utilizando el software estadístico se encontró que los valores óptimos para tener un revestimiento mínimo de 25μ y cumplir con el valor establecido por la norma B633 son: 34,04°C, $3,49 \left[\frac{m}{s} \right]$ y 3,5[A].
- Se realizó el estudio comparativo de la optimización de parámetros entre las metodologías Taguchi, realizada en el trabajo de titulación previo y la metodología de Superficie de Respuestas empleada en el presente trabajo de titulación,

obteniendo revestimientos de $29,3[\mu m]$ y $25,93[\mu m]$, respectivamente. Al aplicar la metodología de superficie de respuestas, se logra una mayor optimización de recursos además de poder predecir valores exactos de los factores temperatura, velocidad del aire y corriente, para un revestimiento mínimo de $25[\mu m]$.

5.2 Recomendaciones.

- Para poder manipular los materiales y químicos usados durante el proceso de galvanizado, es importante usar el EPP (Elementos de protección personal), entre los cuales constan: gafas de seguridad, mandil, botas, guantes de látex, mascarilla para gases. Cabe recalcar que el extractor ubicado sobre el equipo debe estar encendido durante todo el proceso.
- Tomar en cuenta que una vez rectificadas las probetas, se debe evitar que las mismas tengan contacto con el medio ambiente pues tienden a oxidarse con facilidad, lo cual puede ocasionar defectos al momento de realizar el pretratamiento químico.
- Se deben realizar los enjuagues de las probetas con agua destilada, luego del pretratamiento químico de ácido clorhídrico, con el fin de que la electrodeposición de zinc sea satisfactoria.
- Medir el pH de la solución de zinc ácido a diario pues tiende a disminuir o aumentar el valor conforme se llevan a cabo las pruebas, luego de realizar la preparación de la mezcla dejarla reposar por un tiempo de 2 horas aproximadamente para tener un valor de pH estable.

- Se recomienda que para realizar la agitación neumática el compresor y la unidad de mantenimiento deben estar en óptimas condiciones para evitar que pase aceite a la solución y dañe la calidad del acabado superficial de las probetas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcala Bucio, R., Aquilar Corona, A., Vargas, C., Figueroa, B., & Zenit, R. (21 de Septiembre de 2012). *Agitación en una suspensión de burbujas*. Michoacan, México.
- Alvarez, L. F. (2000). University of Bradford. *Approximation model building for design optimization using the surface response methodology and genetic programming*. Obtenido de University of Bradford: http://www.bradford.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/thesis_luis/chapter3.pdf
- ASME. (2013). Recipientes sujetos a presión. Obtenido de http://docentes.uto.edu.bo/mruizo/wp-content/uploads/P%C3%A1ginasTanques_rectangulares.pdf
- ASTM. (2015). Norma para standard de electrodeposición de Zinc ASTM B633. *Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/B633.htm>
- Ávila Brito, J. E., & Pazmiño Salgado, D. A. (2016). Análisis, control y optimización de parámetros del proceso de galvanizado electrolítico de zinc. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Base de cálculos de tuberías*. (2012). Universidad de Cataluña. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17145/ANEXO?sequence=7>
- Chamorro, R., & Rodriguez, N. (2012). *Universidad de Chile*. Obtenido de <http://www.cec.uchile.cl/~nerodrig/cero/main.html>
- Diaz, L. F. (13 de Noviembre de 2013). *Biorreactores*. Obtenido de <http://biofermt.blogspot.com/2013/11/la-entrada-de-los-tipos-de.html>
- Elizondo, C. (s.f.). *Universidad de las Americas Puebla*. Obtenido de Universidad de las Americas Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmnf/elizondo_c_a/capitulo2.pdf
- Ferre Jaén, M. E. (2014-2015). *FEIR 40: Modelos de Regresión*. Obtenido de Universidad de Murcia: <http://www.um.es/>
- García P, M., Quishpe A, C., & Ráez G, L. (2001). Sistema de calidad Seis Sigma. Lima, Perú. Obtenido de <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/>
- Granada, U. d. (2010). *Diseño del sistema de tubería y calculo de bombas*. Obtenido de <http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIA S.pdf>
- Guevara López, E. (Diciembre de 2004). *Diseño, construcción y caracterización hidrodinámica de un biorreactor multifunción*. Obtenido de http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9359.pdf
- Importancia del pH en las industrias y módulo de laboratorio*. (s.f.). Obtenido de Capitulo 1: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirUDEP/tesis/pdf/1_197_184_140_1851.pdf

- Jiménez Careaga, M. G. (2015). Superficies de Respuesta mediante un Diseño Central Compuesto. *Revista Varianza*.
- Jorba, L. S. (1993). *El secreto de la calidad japonesa: el diseño de experimentos clásico, Taguchi y Shainin*. Barcelona: Marcombo.
- Lawson, J., Madrigal, J. L., & Erjavec, J. (1992). Estrategias Experimentales para el Mejoramiento de la Calidad en la Industria. México D.F.: Grupo Editorial Iberoamérica S.A.
- Metodos galvánicos en la industria química*. (2014). Universidad de Cataluña. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6180/01_Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Nuñez Sacaluga, C. F. (2015). *Creatividad el Aura del Futuro*. San Juan: Planeta Alvi, Ltd.
- Olaya Escobar, E. S., Cortés Rodríguez, C. J., & Duarte Velasco, O. G. (4 de Febrero de 2005). *QFD: beneficios y protesos detectados en su aplicacion al diseño de protesis mioelectricas*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/643/64325105/>
- Ranjit, K. R. (2010). *A primer on The taguchi method* (Vol. Segunda Edicion). Birmingham, Alabama., United States of America: Society of Manufacturing Engineers.
- Ruiz, A., & Rojas, F. (Abril de 2009). *Despliegue de la funcion de calidad (QFD)*. Obtenido de <http://web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf>
- Rural, H. (2010). *Hidráulica. Universidad de Castilla - La Mancha*. Obtenido de https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMaterial.es.pdf
- Santillán Espinoza, D. I., & Sandoval Silva, O. R. (2013). *Implementacion y pruebas de una planta de galvanizado*. Riobamba, Ecuador.
- Seob Kwak, J. (Marzo de 2005). *Application of Taguchi and response surface methodologies*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504001907>
- Serfilco. (s.f.). Obtenido de Ser-Ductor Pumped Agitation : <http://www.sat-eng.com/SerfilcoBulletins/CH-26B.pdf>
- Silva, C. (2015). *La metodología del QFD*. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lat/silva_c_sl/capitulo3.pdf
- Torres García, L. (28 de Abril de 2006). *Propuesta de una red de aire comprimido*. Guatemala.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Yuin Wu, A. W. (1997). *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

ANEXOS