



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

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

**ANÁLISIS, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL
PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO DE ZINC (ZINC
PLATING) SOBRE ACERO, MEDIANTE MÉTODOS Y MODELOS
ESTADÍSTICOS CUMPLIENDO CON LA NORMA ASTM B633.**

AUTORES:

- **ÁVILA BRITO, JOSÉ EDUARDO.**
- **PAZMIÑO SALGADO, DIEGO ALBERTO.**

DIRECTOR: RIOFRÍO VILLENA, PATRICIO GUSTAVO.

SANGOLQUÍ

2017



CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

El proyecto "ANÁLISIS, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO DE ZINC (ZINC PLATING) SOBRE ACERO, MEDIANTE MÉTODOS Y MODELOS ESTADÍSTICOS CUMPLIENDO CON LA NORMA ASTM B633" fue realizado en su totalidad por Ávila Brito José Eduardo y Pazmiño Salgado Diego Alberto, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Patricio Ríosfrío
DIRECTOR

Sangolquí, Marzo 1 del 2017



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros JOSÉ EDUARDO ÁVILA BRITO con cédula de identidad N° 171855348-8 y DIEGO ALBERTO PAZMIÑO SALGADO con cédula de identidad N° 171284962-7, declaramos que este trabajo de titulación "ANÁLISIS, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO DE ZINC (ZINC PLATING) SOBRE ACERO, MEDIANTE MÉTODOS Y MODELOS ESTADÍSTICOS CUMPLIENDO CON LA NORMA ASTM B633", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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



JOSÉ EDUARDO ÁVILA BRITO

171855348-8



DIEGO ALBERTO PAZMIÑO SALGADO

171284962-7

Sangoquí, 24 de febrero del 2017



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, JOSÉ EDUARDO ÁVILA BRITO y DIEGO ALBERTO PAZMIÑO SALGADO, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación, "ANÁLISIS, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE GALVANIZADO ELECTROLÍTICO DE ZINC (ZINC PLATING) SOBRE ACERO, MEDIANTE MÉTODOS Y MODELOS ESTADÍSTICOS CUMPLIENDO CON LA NORMA ASTM B633", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

JOSÉ EDUARDO ÁVILA BRITO

171855348-8

DIEGO ALBERTO PAZMIÑO SALGADO

171284962-7

Sangolquí, 24 de febrero del 2017

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación en primer lugar a mi abuelita Anita, que ha sido la persona que me ha brindado la fuerza, cariño y tiempo que en momentos duros más necesité, siendo la persona que me inculcó desde los nueve años los valores de respeto, solidaridad, transparencia y paciencia, para tomar cada decisión de mi vida hasta el día de hoy.

A mi Padre Juan Carlos, que ha sido el pilar fundamental de mi progreso y avance como persona de bien y responsabilidad.

A mi madre Mireya Soledad, que con su infinito amor de siempre ha vivido al pendiente de que no me faltara nada en ningún día de mi vida.

A mis abuelitos José María y Jaime Eduardo, que fueron y son base fundamental de mi niñez y adolescencia, como olvidar sus interminables e interesantes historias, clases de ajedrez y partidos de fútbol, que desde muy pequeño me inculcaron el amor interminable como hincha de Liga de Quito, que nunca voy a olvidar.

A mi abuelita mamá Elisita, que del mismo modo, fue quien me crió de niño, su sentido del humor e infinito carisma con la gente jamás será posible borrar de mi corazón.

José Eduardo Ávila Brito

AGRADECIMIENTO

Agradezco por este logro alcanzado en general a mis padres y abuelitos que siempre estuvieron al pendiente de mí en todas las etapas de mi vida.

A mis compañeros y amigos de todas las etapas de estudio, a mis panas de fiestas y malos momentos, sobre todo a los de la universidad que trabajando juntos logramos salir de exámenes, deberes interminables, trabajos en grupo enmarañados e informes sin fin.

A mi tía Teresita que ha sido como una segunda madre para mí, siempre ha vivido al pendiente de mis pasos y ha velado por mi progreso.

A mis hermanos Juan Carlos, Daniel, Andrés, Juan Diego y Ariel, que han sido el aporte moral y felicidad de cumplir la tarea de ser el hermano guía de sus vidas.

A mi compañero de proyecto Diego que ha sido una persona de bien y responsable para llevar a cabo esta investigación, una excelente persona y amigo.

A los docentes de la CIME de mi querida ESPE, que a lo largo de la carrera supieron inculcarme la propia responsabilidad de superarme a mí mismo, como persona y profesional.

José Eduardo Ávila Brito.

AGRADECIMIENTO

Agradezco por este logro en primer lugar a Dios.

A mis familiares, por el apoyo brindado a lo largo de mi vida.

A mis amigos, que brindaron su compañía y tiempo.

A mi compañero José que me ha ayudado a culminar este proyecto de la mejor manera y es una excelente persona.

Diego Alberto Pazmiño Salgado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.2 ANTECEDENTES.	2
1.3 OBJETIVOS.	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	4
1.4 ALCANCE.	5
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	6
MARCO TEÓRICO	8
2.1 PRINCIPIOS DE ELECTROQUÍMICA.	8
2.1.1 IÓN.	8
2.1.2 ELECTROLITO.	9
2.1.2.1 Tipos de electrolitos.	9
2.1.3 REACCIONES DE OXIDACIÓN/REDUCCIÓN (REDOX).	9
2.2 ELECTRÓLISIS.	11
2.2.1 CELDA ELECTROLÍTICA.	12
2.3 LEYES DE FARADAY.	12
2.3.1 PESO REAL DEL ELECTRODEPÓSITO.	14
2.3.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE.	15
2.3.3 EFICIENCIA CATÓDICA.	15
2.3.4 TIEMPO DE ELECTRODEPOSICIÓN.	16
2.3.5 ESPESOR DEL METAL DEPOSITADO.	17
2.4 PRE Y POST TRATAMIENTOS DEL ZINCADO ELECTROLÍTICO. ..	17
2.4.1 DESENGRASE.	18
2.4.2 DECAPADO.	18
2.4.3 EL ACTIVADO.	18
2.4.4 PASIVADO.	18
2.5 SELECCIÓN DEL PROCESO DE ZINCADO ELECTROLÍTICO.	19
2.5.1 FACTORES PRIMARIOS.	19

2.5.2	FACTORES SECUNDARIOS.....	19
2.5.3	REQUISITOS EN BAÑOS ELECTROLÍTICOS.....	22
2.5.4	GALVANIZADO ELECTROLÍTICO ALCALINO SIN CIANUROS.....	23
2.5.4.1	Constituyentes del baño alcalino sin cianuros.....	24
2.5.4.1.1	Zinc.....	24
2.5.4.1.2	Soda Cáustica (NaOH).....	25
2.6	POTENCIAL HIDRÓGENO (PH).....	26
2.7	PARÁMETROS DEL ELECTROGALVANIZADO.....	26
2.7.1	ESTADO SUPERFICIAL DEL CÁTODO (METAL BASE).....	27
2.7.2	DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA.....	27
2.7.3	AGITACIÓN DEL ELECTROLITO.....	28
2.7.4	TEMPERATURA APLICADA.....	28
2.7.5	CONCENTRACIÓN DE LOS IONES METÁLICOS.....	28
2.7.6	AGENTES DE ADICIÓN.....	29
2.7.6.1	Abrillantadores.....	29
2.7.6.2	Nivelantes.....	29
2.7.6.3	Humectantes.....	29
2.7.6.4	Agentes disminuidores de tensiones o ductilizantes.....	29
2.8	TIPOS DE ELECTRODEPOSICIÓN.....	30
2.8.1	GALVANIZADO EN BASTIDOR (RACK PLATING).....	30
2.8.2	GALVANIZADO EN MASA.....	31
2.8.2.1	Galvanizado en tambor (Barrel plating).....	31
2.9	DISEÑO DE PLANTAS GALVÁNICAS Y EQUIPOS.....	32
2.9.1	PARTES DEL EQUIPO DE ZINCADO.....	33
2.9.1.1	Tanque.....	33
2.9.1.2	Revestimientos.....	34
2.9.1.2.1	Materiales de los revestimientos.....	34
2.9.1.3	Calentamiento y enfriamiento.....	35
2.9.1.4	Control de temperatura.....	37
2.9.1.5	Bastidores (racks).....	37
2.9.1.6	Filtración.....	38

2.9.1.7	Agitación.	39
2.9.1.8	Fuente eléctrica (rectificador de corriente).	39
2.10	NORMA ASTM B633.	40
2.10.1	ALCANCE.	40
2.10.2	CLASIFICACIÓN.	40
2.11	MÉTODOS ESTADÍSTICOS.	41
2.11.1	METODOLOGÍA TAGUCHI.	41
2.11.1.1	Razón señal-ruido (S/R).	43
2.11.1.2	Análisis de varianza (ANOVA).	45
2.11.1.2.1	Anova simple.	45
2.11.1.2.2	Anova doble.	47
3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	48
3.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE BAÑO.	48
3.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE GALVANIZADO.	48
3.3	DIMENSIÓN DE LAS PIEZAS.	48
3.4	SELECCIÓN DEL RECTIFICADOR.	49
3.5	TANQUE O CUBA ELECTROLÍTICA.	50
3.5.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL TANQUE.	50
3.5.2	DIMENSIONES DEL TANQUE.	50
3.5.2.1	Diseño ASME.	52
3.5.2.1.1	Ancho del tanque.	52
3.5.2.1.2	Longitud del tanque.	52
3.5.2.1.3	Altura del tanque.	52
3.5.2.2	Diseño galvánico.	53
3.5.2.2.1	Longitud del tanque.	53
3.5.2.2.2	Ancho del tanque.	54
3.5.2.2.3	Altura del tanque.	55
3.5.2.3	Concentraciones y densidad de solución electrolito.	55
3.5.2.3.1	Propiedades físicas y químicas de los compuestos.	56
3.5.2.3.2	Análisis de concentraciones del baño.	57
3.5.2.4	Densidad de la solución alcalina no cianurada.	59

3.5.2.5	Espeor del tanque.....	61
3.5.2.6	Elementos atiesadores.....	62
3.5.2.7	Soldadura en el tanque.	64
3.5.2.7.1	Primera opción.	64
3.5.2.7.2	Segunda opción.....	65
3.5.2.7.3	Tercera opción.....	65
3.5.2.8	Aperturas en el tanque.....	66
3.5.2.8.1	Espeor del recipiente base.	66
3.5.2.8.1.1	Presión de diseo.	66
3.5.2.8.2	Espeor del tubo base.	67
3.5.2.9	Recubrimiento del tanque.....	68
3.6	BASTIDORES (RACKS).....	68
3.6.1	CARGA DE LAS PROBETAS.	69
3.6.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COBRE ELECTROLÍTICO..	69
3.6.3	PARÁMETROS DE DISEÑO Y FACTORES DE SEGURIDAD....	69
3.6.4	SOPORTE.....	71
3.6.5	DISEÑO MECÁNICO DEL BASTIDOR.	72
3.6.5.1	Esfuerzo de diseo.....	72
3.6.6	BARRAS CONDUCTORAS.....	72
3.6.6.1	Diseo eléctrico.	72
3.6.6.2	Longitud del bastidor.	74
3.6.6.3	Volumen y peso del bastidor.	74
3.6.6.4	Ánodo de zinc.	75
3.6.6.4.1	Volumen y peso del ánodo.	76
3.6.6.5	Barra catódica.....	77
3.6.6.5.1	Límite de flexión en barra catódica.....	83
3.6.6.6	Barras anódicas.....	84
3.6.6.6.1	Límite de flexión en las barras anódicas.....	88
3.6.6.7	Pérdidas eléctricas en elementos conductores.....	89
3.6.6.7.1	Pérdidas de voltaje en las barras conductoras.	89
3.6.6.7.2	Pérdidas de voltaje en los soportes.	90

3.6.6.7.3	Pérdidas de calor en elementos conductores.	90
3.7	MECANISMO DE AGITACIÓN.	91
3.7.1	SÍNTESIS DEL MECANISMO.	91
3.7.1.1	Longitudes de los eslabones.....	92
3.7.2	ANÁLISIS CINEMÁTICO.....	93
3.7.2.1	Análisis de posición.....	94
3.7.2.2	Análisis de velocidad.	95
3.7.2.3	Análisis de aceleración.	97
3.7.2.4	Comparación de resultados con software.....	99
3.7.3	ANÁLISIS DINÁMICO.	100
3.7.3.1	Análisis de la manivela.	100
3.7.3.1.1	Aceleración del centro de gravedad de la manivela... ..	102
3.7.3.2	Análisis de la biela.....	103
3.7.3.2.1	Aceleración del centro de gravedad de la biela.....	105
3.7.3.3	Fuerzas dinámicas en los eslabones.....	107
3.7.3.3.1	Fuerzas dinámicas en la manivela.	107
3.7.3.3.2	Fuerzas dinámicas en la biela.	108
3.7.3.3.3	Fuerzas dinámicas en la corredera (barra catódica).. ..	108
3.7.3.3.3.1	Fuerza hidrodinámica de resistencia o arrastre (Drag)... ..	110
3.7.3.3.3.1.1	Número de Reynolds.	111
3.7.3.3.3.1.2	Viscosidad dinámica y densidad del electrolito.....	111
3.7.3.3.3.1.3	Longitud característica.	112
3.7.3.3.3.1.4	Coeficiente de arrastre y área de ataque.....	112
3.7.3.3.3.1.5	Simulación por elementos finitos.....	113
3.7.3.3.3.2	Coeficiente de fricción estático.....	114
3.7.3.3.4	Solución de las ecuaciones vectoriales.	115
3.7.3.3.5	Potencia útil, arranque y real del motor DC.	116
3.7.3.3.5.1	Potencia de arranque.....	116
3.7.3.3.5.2	Potencia útil.....	117
3.7.3.3.5.3	Potencia real.....	117
3.7.3.3.5.4	Selección del motor.....	117

3.7.3.3.5.5	Volante de inercia.	118
3.8	EQUIPO DE CALENTAMIENTO Y TERMOSTATO.	119
3.8.1	MATERIAL DEL CALENTADOR ELÉCTRICO.	119
3.8.2	CONDICIONES DE CALENTAMIENTO.	120
3.8.3	PÉRDIDAS POR TRANSFERENCIA DE CALOR.	122
3.8.3.1	Pérdidas en la superficie expuesta del líquido.	123
3.8.3.1.1	Coeficiente de amplificación de pérdidas.	123
3.8.3.2	Pérdidas en las paredes.	124
3.8.3.2.1	Resistencias térmicas en las paredes.	124
3.8.3.2.1.1	Convección natural del electrolito.	124
3.8.3.2.1.1.1	Coeficiente de expansión volumétrica.	125
3.8.3.2.1.1.2	Propiedades del agua a temperatura ambiente.	125
3.8.3.2.1.1.3	Propiedades del agua a temperatura de película.	125
3.8.3.2.1.1.4	Número de Grashof.	126
3.8.3.2.1.1.5	Número de Reynolds.	126
3.8.3.2.1.1.6	Número de Rayleigh.	127
3.8.3.2.1.1.7	Número de Nusselt.	127
3.8.3.2.1.1.8	Recálculo de la temperatura en la pared de PVC.	128
3.8.3.2.1.2	Conducción.	130
3.8.3.2.1.2.1	Cloruro de polivinilo (PVC).	130
3.8.3.2.1.2.2	Acero A36.	130
3.8.3.2.1.2.3	Pared de PVC.	130
3.8.3.2.1.2.4	Pared de acero.	131
3.8.3.2.1.3	Convección natural del aire y radiación de las paredes.	131
3.8.3.2.1.3.1	Coeficiente de convección natural externo del aire.	132
3.8.3.2.1.3.2	Coeficiente de radiación de las paredes.	132
3.8.3.2.1.4	Coeficiente global de transferencia de calor.	133
3.8.3.2.1.5	Pérdidas de transferencia de calor total en las paredes.	133
3.8.3.3	Pérdidas de calor por la inmersión de las probetas.	133
3.8.3.4	Potencia real requerida en la resistencia.	134
3.8.3.5	Potencia de electrolisis.	134
3.9	MESAS SOPORTE.	135

3.9.1	MESA SOPORTE DEL SISTEMA DE AGITACIÓN.	135
3.9.2	MESA SOPORTE DE LA CUBA ELECTROLÍTICA.....	136
3.10	SISTEMA DE AISLAMIENTO.....	137
3.10.1	AISLAMIENTO DE LA BARRA CATÓDICA.....	137
3.10.2	AISLAMIENTO BARRAS ANÓDICAS.....	139
3.11	SISTEMA ELÉCTRICO Y CONTROL DE TEMPERATURA.....	140
4	DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LA METOLOGÍA TAGUCHI	142
4.1	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	142
4.1.1	ELECTRODEPOSICIÓN DE ZINC PARA 25 [μm].....	146
4.1.1.1	Cálculo del área catódica.....	147
4.1.1.2	Cálculo del equivalente electroquímico del zinc.	147
4.1.2	EFICIENCIA CATÓDICA.....	148
4.1.3	CÁLCULO DEL TIEMPO DE ELECTRODEPOSICIÓN.	149
4.1.4	DETERMINACIÓN DE LA MASA DEPOSITADA.	149
4.1.5	DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO.....	150
4.2	EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	150
4.2.1	EJECUCIÓN DE PRETRATAMIENTOS.....	150
4.2.2	EJECUCIÓN DE LAS MEDICIONES DE REVESTIMIENTOS... ..	151
4.2.3	MEDICIONES DE MASAS DEPOSITADAS.....	153
4.3	RESULTADOS.....	153
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS POR METOLOGÍA TAGUCHI	155
5.1	Análisis por ANOVA.....	155
5.1.1	Análisis de Medias.....	159
5.2	Análisis de la relación señal-ruido (S/R).	162
5.3	ANÁLISIS RESULTADOS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO.....	165
5.4	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA GLOBAL DEL SISTEMA.....	167
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
6.1	CONCLUSIONES.....	169
6.2	RECOMENDACIONES.....	170

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características de iones.	8
Tabla 2	Características de oxidación y reducción.	10
Tabla 3	Características de celda electrolítica.	12
Tabla 4	Atributos de electrogalvanizado de zinc.	21
Tabla 5	Requerimientos tecnológicos.	22
Tabla 6	Constituyentes baño alcalino no cianurado.	24
Tabla 7	Propiedades físicas del zinc.	25
Tabla 8	Propiedades Soda Cáustica Na (OH).	26
Tabla 9	Clases de espesores para recubrimientos.	41
Tabla 10	Tipo de acabado y resistencia a la corrosión.	41
Tabla 11	Ejemplo de arreglo $L4(2)3$	42
Tabla 12	Características rectificador de corriente.	50
Tabla 13	Tipos de uniones soldadas en tanques rectangulares.	64
Tabla 14	Bastidores y barras conductoras.	70
Tabla 15	Coefficientes de fricción estáticos de polímeros.	114
Tabla 16	Características del motor DC.	118
Tabla 17	Materiales metálicos de calefactores eléctricos.	119
Tabla 18	Dimensiones de aisladores tipo carrete.	138
Tabla 19	Elementos eléctricos y de control del sistema.	141
Tabla 20	Factores de control y niveles de análisis.	145
Tabla 21	Arreglo ortogonal final metodología Taguchi $L16(4)2$	145
Tabla 22	Comprobación de la influencia del tiempo.	150
Tabla 23	Revestimientos y pesos de aporte.	154
Tabla 24	Resultados de la variación del parámetro tiempo.	154
Tabla 25	Análisis de Varianza (ANOVA).	159
Tabla 26	Medias de cada factor y nivel.	160
Tabla 27	Ensayo confirmatorio ANOVA y el análisis de medias. ...	162
Tabla 28	Ensayo confirmatorio de la relación S/R.	164
Tabla 29	Resultados S/R y espesor óptimo.	165
Tabla 30	Resultados de la variación del tiempo.	166
Tabla 31	Análisis de la variación del tiempo.	166
Tabla 32	Eficiencia global del sistema de electrodeposición.	168

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Zonas de yacimientos de Zinc en ppm del Ecuador.....	3
Figura 2 Flujo de electrones vs flujo convencional de corriente.....	10
Figura 3 Proceso de electrólisis, flujo de corriente a través del cátodo....	11
Figura 4 Curva de rendimiento global vs densidad de corriente.....	16
Figura 5 Tipos de zincado electrolítico.....	20
Figura 6 Proceso de zincado electrolítico.....	23
Figura 7 Bastidor de soporte en sistema "rack".....	31
Figura 8 Esquema de un tambor galvánico (Barrel plating).....	32
Figura 9 Partes y equipos del zincado electrolítico en sistema rack.....	33
Figura 10 Cuba electrolítica rectangular.....	34
Figura 11 Revestimiento de tanque.....	35
Figura 12 Resistencias eléctricas.....	36
Figura 13 Serpentes de enfriamiento.....	36
Figura 14 Equipo de control de temperatura (reóstato).....	37
Figura 15 Bastidor de soporte (rack).....	38
Figura 16 Equipo de filtración.....	38
Figura 17 Sistema de agitación mecánico.....	39
Figura 18 Rectificador de corriente.....	40
Figura 19 Tipos de análisis de varianza (ANOVA).....	45
Figura 20 Distribución espacial de las probetas en el interior del tanque.....	53
Figura 21 Cargas distribuidas para elementos atiesadores.....	63
Figura 22 Alturas necesarias en el diseño de bastidores.....	71
Figura 23 Vista superior del tanque.....	78
Figura 24 Fuerza cortante y momento flector (sin carga distribuida).....	79
Figura 25 Fuerza cortante y momento flector (con carga distribuida).....	81
Figura 26 Fuerza cortante y momento flector (sin carga distribuida).....	85
Figura 27 Fuerza cortante y momento flector (con carga distribuida).....	87
Figura 28 Síntesis de longitudes del mecanismo de agitación.....	93
Figura 29 Esquema de análisis de posición del mecanismo.....	93
Figura 30 Velocidad en <i>mm</i> en función del ángulo de giro.....	97
Figura 31 Aceleración en <i>mseg</i> ² en función del ángulo de giro.....	99
Figura 32 Fuerzas y torques dinámicos en la manivela.....	101
Figura 33 Fuerzas dinámicas en la biela.....	104
Figura 34 Fuerzas dinámicas en la corredera (barra catódica).....	109
Figura 35 Motor DC PeeiMoger 160 W (3000[RPM]).....	118
Figura 36 Esquema de pérdidas de transferencia de calor.....	122
Figura 37 Mesa soporte de la agitación y del rectificador.....	135
Figura 38 Mesa soporte de la cuba electrolítica.....	136
Figura 39 Escala de resistividad específica volumétrica.....	137

Figura 40 Dimensiones aislador tipo carrete ANSI 53-1.....	138
Figura 41 Aisladores ANSI 53-1, manufacturados por impresión 3D.....	139
Figura 42 Aisladores fijos de barras anódicas.....	139
Figura 43 Gabinete eléctrico y de control industrial.....	140
Figura 44 Probetas regidas por la norma ASTM B633.....	147
Figura 45 Curva de ajuste de la eficiencia catódica	148
Figura 46 Decapado ácido y desengrase de las piezas de ASTM A36.....	151
Figura 47 Medidor de recubrimientos electrónico (elcometer-456).....	152
Figura 48 Esquema de medición método de la diagonal.	152
Figura 49 Balanza electrónica TRANSCCELL PBSL.	153
Figura 50 Efecto del factor A (intensidad de corriente).....	161
Figura 51 Efecto del factor B (temperatura de solución).....	161
Figura 52 Relaciones S/R de cada experimento.....	163

RESUMEN

En esta investigación los objetivos de estudio y análisis, destacan como primordiales el diseño y construcción de un equipo prototipo, destinado a ensayos de laboratorio para electrodeposición en frío, y seleccionar el diseño de experimentos más adecuado, con el objeto de encontrar los parámetros de proceso más apropiados para optimizar el espesor del revestimiento de zinc sobre especímenes de acero ASTM A36 de acuerdo con la norma ASTM B633. El estudio del arte y fundamento teórico se basan en conocer qué sistemas lo comprenden, como mecánicos, eléctricos y de control. Se introduce en el estudio de la metodología Taguchi, desde sus dos métodos de análisis como lo son ANOVA o la razón señal ruido (S/R). El diseño, construcción e implementación del equipo de galvanizado en frío se ajusta a recomendaciones y normas de construcción de empresas fabricantes, que brindan este tipo de servicio en el mercado, y como base fundamental el manual de ingeniería de electrogalvanizado y electropulido de Durney & Graham publicado en el año de 1985. La aplicación del control de calidad se centra en el diseño de experimentos de la metodología Taguchi, en la búsqueda de la matriz ortogonal más adecuada para llevar a cabo el estudio predefinido de la optimización del espesor de revestimiento. Se verifican los parámetros y niveles finales para el análisis final de resultados, seleccionando la combinación óptima de parámetros y verificando a su vez el espesor óptimo del proceso. Para llevar a cabo las respectivas conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación.

PALABRAS CLAVE

- **ELECTRODEPOSICIÓN**
- **REVESTIMIENTO**
- **TAGUCHI**
- **GALVANIZADO**
- **CALIDAD**

ABSTRACT

In this research the objectives of study and analysis, emphasize as primordial the design and construction of a prototype equipment, destined to laboratory tests for cold electrodeposition, and to select the most suitable design of experiments, in order to find the process parameters more suitable to optimize the thickness of the zinc coating on ASTM A36 steel specimens in accordance with ASTM B633. The study of art and theoretical foundation are based on knowing which systems understand it, such as mechanical, electrical and control. It is introduced in the study of the Taguchi methodology, from its two methods of analysis such as ANOVA or signal noise ratio (S / R). The design, construction and implementation of the cold galvanizing equipment conforms to the recommendations and standards of construction of manufacturing companies that provide this type of service in the market, and as a fundamental basis the engineering manual of electroplating and electropolished by Durney & Graham published in the year 1985. The application of quality control focuses on the design of experiments of the Taguchi methodology, in the search of the most suitable orthogonal matrix to carry out the predefined study of the optimization of the coating thickness. The final parameters and levels are checked for the final analysis of results, selecting the optimal combination of parameters and verifying the optimum thickness of the process. To carry out the respective conclusions and recommendations of the research project.

KEYWORDS

- **ELECTRODEPOSITION**
- **COATING**
- **TAGUCHI**
- **GALVANIZING**
- **QUALITY**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

“La corrosión es el deterioro de una sustancia (usualmente un metal) o sus propiedades debido a la reacción con su medio ambiente.” (NACE INTERNATIONAL, 2004)

En las diferentes industrias del Ecuador, por su localización geográfica, o por su tipo de producción, se prestan a convivir con medios ambientes bajos, medios y altamente corrosivos, por lo que las partes o sistemas metálicos de hierro y/o acero sufren un desgaste elevado, disminuyendo sus horas de servicio en las aplicaciones para las que fueron diseñadas.

El zincado electrolítico, tiene como objetivo fundamental brindar protección contra la corrosión a las piezas metálicas, tiene limitaciones debido a las dimensiones máximas de los especímenes a recubrir, y de acuerdo a las condiciones de servicio a las que se exponen los mismos.

Los costos de producción en empresas que cuentan con el zincado electrolítico en el Ecuador son elevados, en comparación con otros métodos de recubrimiento como el galvanizado en caliente o chapado mecánico, razón por la cual no es un método demandante en el mercado, sobre todo cuando las dimensiones de las piezas son grandes, como en el ámbito estructural, para la respectiva protección de los perfiles de acero. Igualmente los costos de implementación del zincado en frío en empresas, son elevados, por la calidad y disponibilidad en el mercado ecuatoriano de los equipos que se requieren, especialmente para producciones en grandes cantidades.

Éste proyecto tiene como premisa fundamental hallar las diferentes vías de optimización y mejora del proceso de galvanizado electrolítico de zinc, mediante modelos matemático-estadísticos utilizados en control de calidad.

En la actualidad se han venido utilizando nuevos métodos de optimización de procesos en el estudio de diseño de experimentos como la metodología Taguchi, superficies de respuesta (RSM), etc., es así que, se analizará y escogerá el camino más adecuado para el mejoramiento del zincado electrolítico.

1.2 ANTECEDENTES.

El galvanizado electrolítico o en frío como es conocido más comúnmente, es un proceso de recubrimiento superficial, que tiene como objetivo principal evitar la corrosión de piezas metálicas.

La galvanotecnia, es el proceso, que por medio de electricidad, se cubre un metal sobre otro, a través de un medio electrolito (líquido con sales metálicas), por medio de electrólisis, fenómeno químico-físico regido por las leyes del inglés Michael Faraday (1791-1867), a fin de modificar sus propiedades superficiales, incrementando su resistencia a la corrosión, resistencia a la fricción y rayado.

En la actualidad sus aplicaciones son variadas, como la industria automotriz, electrodomésticos, construcción, salubridad, joyería, plomería, utilería de oficina, electrónica, ferretería, etc.

Este proceso de acabado viene regido mediante normas americanas como europeas, que para este caso de estudio, esta investigación se rige mediante la norma ASTM B633 (Recubrimientos electrodepositados de Zinc sobre Hierro y Acero).

El Ecuador es un país con gran potencial de crecimiento en exploración y aprovechamiento de yacimientos minerales, palanca para la generación de empleo, factor para el desarrollo local y regional equilibrado.

Los yacimientos de zinc en el Ecuador, se concentran en la zona centro-oriente del país como se observa en la figura 1. Tiene como objetivo primordial la prevención de la corrosión, brinda una mayor duración, bajo costo y alta disponibilidad con respecto a sus competidores directos como el estaño y el cobre.

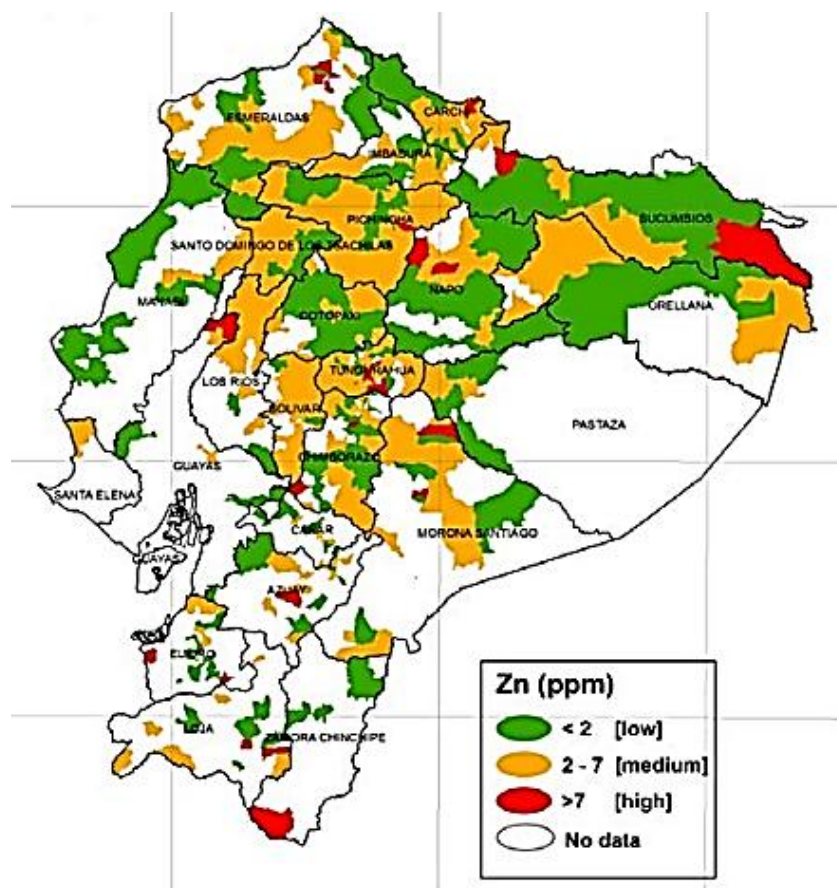


Figura 1 Zonas de yacimientos de Zinc en ppm del Ecuador.

Fuente: (Martínez, y otros, 2012)

[Recuperado y editado el 08/09/2016]

De esta manera se puede afirmar que es muy viable para las empresas ecuatorianas realizar la galvanización con zinc. Actualmente muy pocas empresas ecuatorianas brindan este servicio, y no se han realizado estudios de mejora y/u optimización de este sistema de recubrimiento como se puede evaluar en los siguientes estudios previos:

- Métodos Galvánicos en la industria química (Alcaraz, 2005).
- Diseño y construcción de una planta piloto para recubrimientos metálicos (Álvarez & Chango, 2012).
- Rediseño del proceso de cincado de la empresa metalquímica Galvano (Cevallos & Defaz, 2008).
- Zinc Electroplating (CHOOSING THE BEST PROCESS FOR YOUR OPERATION) (Biddulph, 2011).

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

- Ejecutar un análisis y control de parámetros del galvanizado electrolítico de zinc (zinc plating) sobre acero, con el fin de optimizar el proceso mediante métodos y modelos estadísticos cumpliendo con la norma ASTM B633.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Construir un equipo de zincado electrolítico para realizar los ensayos respectivos para la conformación de una base de datos de los parámetros a optimizar.
- Verificar la eficiencia global de electrodeposición del equipo para galvanizado de zinc en frío.

- Realizar un análisis físico-funcional de los parámetros del proceso.
- Seleccionar el método estadístico más adecuado para realizar el control de calidad del proceso a fin de optimizarlo.
- Realizar un análisis con el modelo estadístico seleccionado, y determinar los parámetros para la optimización del zincado electrolítico según criterios establecidos.
- Verificar la optimización conforme a la norma ASTM B633 para galvanizado por electrodeposición en frío.

1.4 ALCANCE.

Este proyecto de titulación comprende el diseño, construcción, puesta en marcha del equipo en el que solo se realiza la electrodeposición, como primera parte del trabajo; cabe recalcar que no se diseña ni se construye la fuente de energía y únicamente se escoge el tipo de transformador para el proceso de electrodeposición.

A continuación, se realiza el análisis de los parámetros para el zincado, su control, y optimización de las variables que intervienen en el galvanizado electrolítico del zinc en especímenes de prueba, los mismos que son de las siguientes dimensiones; 100mm de largo, 25 mm de ancho y 3 mm de espesor en acero ASTM A36.

El diseño del tanque va acorde a donde se alojan estas piezas y la distribución espacial que tienen las mismas.

Se señala en que los procesos de post-tratamiento están fuera del alcance de este proyecto de titulación.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

Según plantea El Plan Nacional del Buen Vivir (SENPLADES, 2013) resulta indispensable revalorizar la educación superior técnica y tecnológica, para formar profesionales que aporten al cambio en un contexto social, político, económico y que garantice los derechos de la naturaleza y promueva un ambiente sano y sustentable. Es por esta razón que la aplicación de este plan de desarrollo constituye el motor que genera la transformación en el país.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE está empeñada en ser generadora del conocimiento. Esta institución propone la innovación, la ciencia y tecnología, como fundamentos para el cambio de la matriz productiva, acorde al Plan Nacional del Buen Vivir.

La carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas–ESPE, se basa en la creación, aplicación y difusión de alternativas de solución a los problemas productivos del país. Con esto se logra emprender procesos eficientes para alcanzar cambios en la estructura competitiva de la industria ecuatoriana.

El proyecto está dirigido al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM) de la Universidad de la Fuerzas Armadas-ESPE, sus principales beneficiarios son los laboratorios de Procesos de Manufactura y Ciencia de Materiales, debido que se desea implementar un prototipo del proceso de galvanizado por electrólisis en baños de zinc, y caracterizar el comportamiento que tiene el acero ASTM A36 en soluciones galvánicas para aplicaciones en varios tipos de productos.

El uso de los métodos estadísticos es esencial para la optimización de los parámetros del galvanizado por electrodeposición porque nos permiten apoyarnos en técnicas que nos dan soluciones de mejora a problemas de

variabilidad en los resultados que se presentan en el proceso mediante un sistema organizado en el diseño de experimentos.

Adicionalmente este equipo al término de su construcción será empleado para futuras investigaciones que se realicen en el DECEM, por lo cual la finalidad es construir un equipo económico y a su vez accesible para los estudiantes, docentes e investigadores, que pretendan profundizar en el estudio de la electrodeposición en frío.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 PRINCIPIOS DE ELECTROQUÍMICA.

La corrosión ocurre mediante reacciones electroquímicas y estas se producen en:

- En electrolitos; los cuales son líquidos que pueden conducir una corriente eléctrica.
- Mediante intercambio de electrones entre átomos o moléculas, ocurriendo en sitios separados.

2.1.1 IÓN.

Es un átomo o molécula con carga, puede ser un anión (cargado negativamente) o bien un catión (positivamente), en la tabla 1 se observa las características y propiedades físicas de ambos.

Tabla 1
Características de iones.

ANIÓN	CATION
Ión negativo	Ión positivo
Carga neta negativa	Carga neta positiva
Formado por la adición de electrones.	Formado por la pérdida de electrones.
Atraído hacia el ánodo	Atraído hacia el cátodo

Fuente: (NACE INTERNATIONAL, 2004)

2.1.2 ELECTROLITO.

Contiene tanto aniones como cationes, puede conducir electricidad mediante el flujo de iones, los aniones fluyen hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo, contiene igual cantidad de cargas dependiendo de los iones que contiene.

2.1.2.1 Tipos de electrolitos.

Los electrolitos pueden ser débiles o fuertes, se subdividen según estén, parcial, totalmente ionizados o disociados en medio acuoso.

- **Electrolito fuerte:** es toda sustancia que siendo disuelta en agua lo hace de manera completa y provoca exclusivamente la formación de iones con reacción de disolución prácticamente irreversible.
- **Electrolito débil:** es una sustancia que al disolverse en agua lo hace parcialmente y produce iones parciales con reacciones de tipo reversibles.

2.1.3 REACCIONES DE OXIDACIÓN/REDUCCIÓN (REDOX).

La mayoría de reacciones de corrosión generan respuestas electroquímicas, éstas ocurren mediante el intercambio de electrones, la corrosión, ocurre en sitios específicos, la oxidación en **ánodos**, y en la reducción en **cátodos**.

Los electrones despedidos de los ánodos viajan hacia el cátodo, donde son consumidos en la reacción de reducción, en la tabla 2 se muestra diferentes propiedades de las reacciones redox.

Tabla 2
Características de oxidación y reducción.

OXIDACIÓN	REDUCCIÓN
Pérdida de electrones	Ganancia de electrones
Aumento en carga positiva	Aumento en carga negativa
Reducción de carga negativa	Reducción en carga positiva
Ocurre en el ánodo	Ocurre en el cátodo
Los electrones permanecen en el metal	El metal es la fuente de electrones

Fuente: (NACE INTERNATIONAL, 2004)

En los primeros estudios de la electricidad se dictaron teorías de que los metales con áreas de cargas positivas más grandes se dirigían hacia áreas con cargas negativas pequeñas y se estableció la convención de flujo de un circuito eléctrico, pero más tarde se descubrió que era el proceso contrario (NACE INTERNATIONAL, 2004), como se observa en la figura 2:

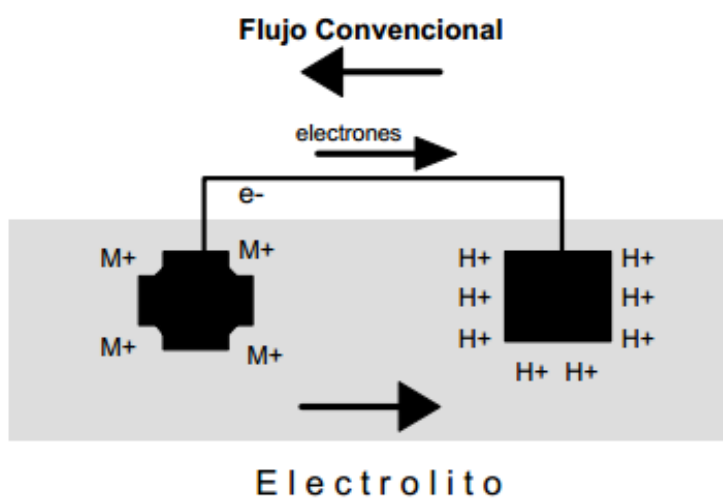


Figura 2 Flujo de electrones vs flujo convencional de corriente.

Fuente: (NACE INTERNATIONAL, 2004) [Recuperado el 11/09/2016]

2.2 ELECTRÓLISIS.

Se designa a la electrólisis como el proceso químico en el que se aplica energía eléctrica a una célula o celda electrolítica para que se produzca una reacción química que no es espontánea (Petrucci & Harwood, 2003), la figura 3 muestra el principio básico de funcionamiento.

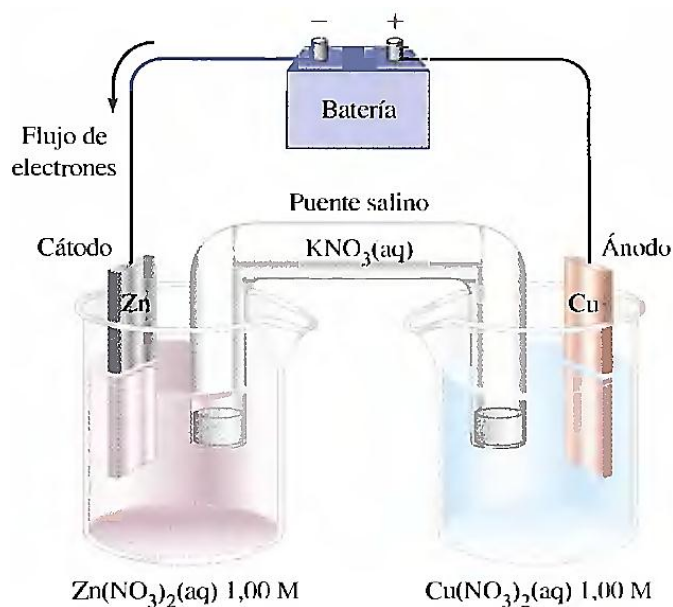


Figura 3 Proceso de electrólisis, flujo de corriente a través del cátodo.

Fuente: (Petrucci & Harwood, 2003)

[Recuperado el 11/09/2016]

En la electrólisis, al aplicar una diferencia de potencial se producen reacciones químicas, tanto de oxidación como de reducción en los electrodos que están inmersos en la solución.

Se debe tener en cuenta lo siguiente: los cationes tienden a reducirse en el cátodo y los aniones son más fáciles de oxidar en el ánodo. (Chang, 2002)

2.2.1 CELDA ELECTROLÍTICA.

En su versión más básica la celda electrolítica está formada por un recipiente; el mismo que contiene al electrolito, dos electrodos (el uno es el cátodo y el otro es el ánodo) los cuales permiten el paso de la electricidad que es generada por una fuente de energía eléctrica.

Las características de una célula electrolítica se resumen en la tabla 3 mostrada a continuación:

Tabla 3
Características de celda electrolítica.

CÉLDA ELECTROLÍTICA		
Oxidación	$B \rightarrow B^+ + e^-$	Ánodo (positivo)
Reducción	$A^+ + e^- \rightarrow A$	Cátodo (negativo)
Global	$A^+ + B \rightarrow A + B^+$	
La reacción redox no espontánea absorbe energía para llevarse a cabo.		
Los alrededores (fuente de energía) realizan trabajo sobre el sistema.		

Fuente: (Petrucci & Harwood, 2003)

2.3 LEYES DE FARADAY.

Existen dos leyes que enunció Faraday (1791-1867) que se las conoce como las leyes de la electrólisis y son:

La primera ley se designa de la siguiente manera:

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

Esto quiere decir que en un hipotético, si una corriente que circula a través del electrolito es de mayor valor durante mayor tiempo, depositará más sustancia que una corriente de menor valor durante un tiempo menor.

El electrogalvanizado es un proceso electrolítico que sigue los principios de las leyes de Faraday donde predomina la siguiente expresión matemática de la relación entre el flujo de corriente y la cantidad de material depositado, y está dada por la siguiente expresión matemática:

$$W = \frac{P_a * t * I}{V_a * F} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

W= cantidad de material que reacciona (gr).

Pa= peso atómico del material que reacciona (gr).

t= tiempo de electrólisis (seg).

I= flujo de corriente (A).

Va= número de electrones transferidos (Valencia).

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

La segunda ley expresa lo siguiente:

- 2) *“El peso de una sustancia depositada durante la electrólisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia”* (Epec, s.f.).
Matemáticamente se expresa mediante la ecuación 2.2:

$$E_q = \frac{P_a}{V_a} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

E_q = Equivalente electroquímico.

P_a = Peso Atómico.

V_a = Valencia.

La ecuación 2.3 muestra la primera ley de Faraday en función de la eficiencia del sistema de baño.

$$w_e = E_q * \frac{t * 3600 * I}{F} * \eta_g \quad \text{Ec. 2.3}$$

w_e = Peso del electrodepósito teórico (gr).

E_q = Equivalente electroquímico (gr/mol).

t = tiempo de electrólisis en (hr).

I = flujo de corriente (A).

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

η_g = Eficiencia global.

2.3.1 PESO REAL DEL ELECTRODEPÓSITO.

Se lo halla mediante medición y análisis mediante una balanza electrónica de alta precisión, midiendo el peso de la probeta previo al proceso de recubrimiento y al término de éste, evaluando su respectiva diferencia como lo muestra la ecuación 2.4:

$$G_d = m_{az} - m_{dz} \quad \text{Ec. 2.4}$$

G_d = Peso del electrodepósito (gr).

m_{az} = Peso inicial de la parte a recubrir (gr).

m_{dz} = Peso de la parte recubierta (gr).

2.3.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE.

Viene dada por los parámetros de proceso como los son la superficie que se desea recubrir de una pieza y la densidad de corriente que se brinda para efectuar dicho proceso como lo muestra la ecuación 2.5:

$$I = A_c * \rho_I \quad \text{Ec. 2.5}$$

I = flujo de corriente en (A).

A_c =Superficie catódica (dm^2).

ρ_I =Densidad de corriente (A/dm^2).

2.3.3 EFICIENCIA CATÓDICA.

Se describe como la velocidad de electrodeposición de una solución electrolito, en el caso del proceso con ácido clorhídrico la eficiencia es sobre el 95%, los procesos alcalinos cianurados se encuentran en el rango del 50 al 80%, y los no cianurados alrededor del 60%, en la figura 4 se muestran las diferentes curvas de rendimiento de los diferentes procesos de electrogalvanizado tanto alcalinos como ácidos, pudiéndose obtener una eficiencia catódica global, partiendo de los valores de rendimiento teóricos previamente enunciados.

Ésta gráfica relaciona el rendimiento global en función de la densidad de corriente aplicada en una celda electroquímica, para los diferentes tipos de zincados en frío:

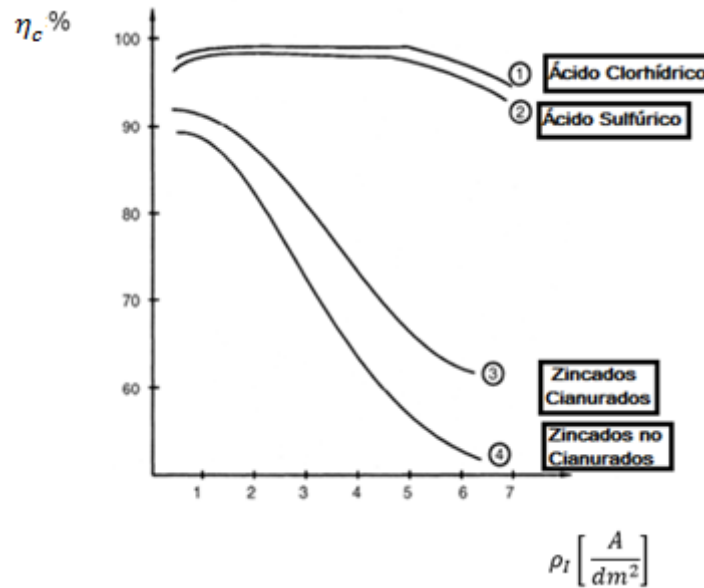


Figura 4 Curva de rendimiento global vs densidad de corriente.

Fuente: (Sierka, 2015) [Recuperado y editado el 11/09/2016]

2.3.4 TIEMPO DE ELECTRODEPOSICIÓN.

Por motivos del análisis de producción, es requerido saber el tiempo necesario para realizar un correcto depósito del recubrimiento de zinc en la parte de interés, entonces, mediante la ecuación 2.6 se cuantifica dicho valor.

$$t = \frac{s * \rho_{zn} * 10}{E_{q-q} * \rho_I * \eta_c} \quad \text{Ec. 2.6}$$

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.

2.3.5 ESPESOR DEL METAL DEPOSITADO.

De la misma forma realizando un simple despeje de la ecuación previa se obtiene la relación de parámetros para obtener un espesor específico de zinc mostrados en la ecuación 2.7:

$$s = \frac{E_{q-q} * \rho_I * t * \eta_g}{\rho_{zn} * 10} \quad \text{Ec. 2.7}$$

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 ($gr/A*hr$).

η_g = Eficiencia Catódica global.

ρ_I = flujo de corriente (A/dm^2).

2.4 PRE Y POST TRATAMIENTOS DEL ZINCADO ELECTROLÍTICO.

Para realizar una electrodeposición correcta, la superficie a cubrir debe estar libre de impurezas, como grasa y óxidos, para esto es necesario pre-tratamientos como el pulido y procesos químicos, como el desengrase, por medio de agentes limpiadores alcalinos, hidrocarburos clorados, o por vía electrolítica, como el decapado, previo a esto debe realizarse una inspección visual de la pieza, para verificar imperfecciones que no se puedan corregir

mediante el zincado, para esto se recurre a procesos mecánicos como el esmerilado y pulido.

2.4.1 DESENGRASE.

Busca eliminar los residuos de grasa y aceite del área de la pieza a galvanizar, brinda un mayor humedecimiento, donde el vapor es el fluido más utilizado para realizar dicho proceso, y consiste en el calentamiento de solventes como los limpiadores, llevándolo a su fase de ebullición por un tiempo alrededor de 3 minutos.

2.4.2 DECAPADO.

Normalmente se lo realiza mediante una solución de ácido, con el objeto de eliminar contaminaciones en la superficie mediante un ataque químico, y debe ser aplicado a continuación de un enjuague alcalino, puede ser utilizado, el ácido clorhídrico (más aplicado en la industria) por ser el más eficaz. Es recomendable aplicar durante un periodo entre 10 y 15 minutos (Álvarez & Chango, 2012).

2.4.3 EL ACTIVADO.

Más conocido como neutralizado o decapado suave, normalmente es aplicable en situaciones de limpieza de oxidación, mediante la reiteración de enjuagues y etapas de tratamientos, permite además eliminar imperfecciones generadas por compuestos orgánicos e inorgánicos según (Álvarez & Chango, 2012).

2.4.4 PASIVADO.

También llamado tropicalizado, según (Álvarez & Chango, 2012) es una capa ligera de cromo o bien un cromatizado al zincado, con el objeto de

brindarle mayor resistencia a la corrosión desde ambientes de servicio ligero a condiciones severas de operación.

2.5 SELECCIÓN DEL PROCESO DE ZINCADO ELECTROLÍTICO.

El zinc y sus aleaciones han sido utilizados por alrededor de cien años, con fines protectores y decorativos de una variedad de bases metálicas, con el paso del tiempo y el mejoramiento de la tecnología, han aparecido nuevos y mejores procesos de recubrimientos metálicos de zinc dependiendo de los requerimientos de utilización y costos. Existen ventajas y desventajas entre estos procesos dependiendo de los siguientes factores a considerar:

2.5.1 FACTORES PRIMARIOS.

- Especificaciones de recubrimiento de zinc puro o aleación de zinc.
- Requerimientos de protección de corrosión.
- Requerimientos de uniformidad en el recubrimiento del galvanizado.
- Sustratos (Zn) a galvanizar el metal base.

2.5.2 FACTORES SECUNDARIOS.

- Características de deposición (apariencia, ductilidad, adhesión, etc.).
- Costos de pretratamientos, operación y post-tratamientos.
- Factores de operación (eficiencia, densidad de corriente, temperatura de operación, nivel pH, agitación, filtración).
- Restricciones ambientales.

Existen diferentes procesos de galvanizado electroquímico dependiendo de los requerimientos de protección y utilización de acuerdo a las características químicas del electrolito como lo muestra la figura 5:

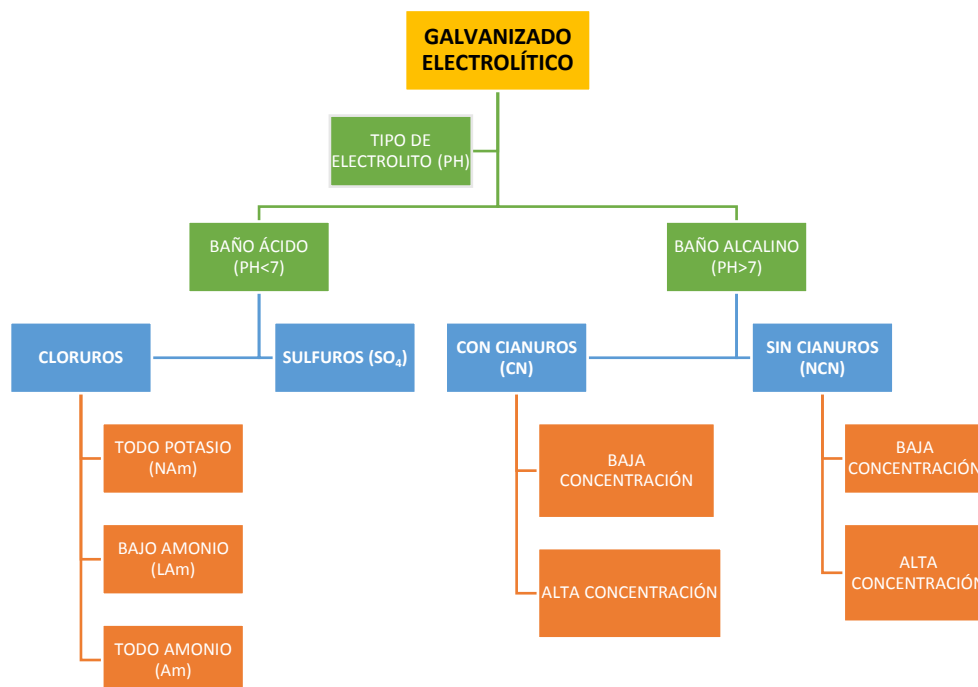


Figura 5 Tipos de zincado electrolítico.

Una vez aplicado los factores previamente enunciados se puede tener claro qué proceso de galvanizado es el más conveniente, para cumplir los requisitos del cliente, y utilizando la tabla 4 de atributos, implementada, según un estudio realizado a diferentes empresas dedicadas a la electrodeposición de zinc con respecto a su experiencia, se establece el proceso indicado de acuerdo a la aplicación requerida para las piezas.

Tabla 4
Atributos de electrogalvanizado de zinc.

	ZINC ALCALINO				ZINC ÁCIDO			
	CN		NCN		CLORURO			SO ₄
	LC	HC	LC	HC*	Nam	Lam	Am	
5= Excelente 4=Muy bueno 3=Bueno 2=Pobre 1=Malo								
Sustrato¹	2	3	3	4	5	5	5	4
Precauciones Ecológicas²	2	1	5	5	5	4	4	5
Costos de aditivos	5	3	5	4	3	3	3	3
Costos de operación³	3	2	4	4	3	3	3	3
Pre-galvanizado⁴	5	5	2	3	3	3	3	3
Corrosividad de solución	4	4	4	4	3	2	2	1
Conductividad de solución	2	3	2	3	4	4	4	3
Abrillantado	2	2	4	3 ⁺	3	3	3	3
Facilidad de operación	4	5	4	3	3	3	4	4
Velocidad de deposición	2	3	2	4	5	5	5	5
Poder de penetración	4	4	3	5	3	3	3	2
Poder de recubrimiento	2	2	3	3	4	4	5	3
Ductilidad de deposición	4	5	4	4	3	3	3	3
Adhesión	5	5	3	3	4	4	4	4
Apariencia	3	3	3	4	5	5	5	2
Receptividad al cromado	5	5	4	5	4	4	4	4
Protección a la corrosión	2	2	2	3	2	2	2	2

1) Habilidad para galvanizar una amplia variedad de sustratos como: aceros endurecidos, hierro de fundición o metal estampado.

2) Toxicidad, tratabilidad a los desperdicios.

3) Costo directo de operación del baño incluido el tratamiento de desperdicios, no se toman en cuenta los costos de pregalvanizado y posgalvanizado, así como el costo de los equipos.

4) Habilidad del baño a tolerar o compensar preparaciones pobres.

(*) Baños de sodio y potasio son válidos (usando un baño a base de potasio los valores mostrados pueden ser afectados.).

(+ o -) Indica el efecto que produce en los valores si se utiliza un baño a base de potasio en reemplazo de un baño de sodio.

Fuente: (Biddulph, 2011)

2.5.3 REQUISITOS EN BAÑOS ELECTROLÍTICOS.

Todo baño electrolítico requiere el manejo de parámetros del proceso mediante la implementación y utilización de diferentes sistemas anexos que facilitan el zincado. A continuación se muestra en la tabla 5 un resumen detallado de los respectivos requerimientos tecnológicos para los diferentes tipos de baño, tanto para ácidos como alcalinos.

Tabla 5
Requerimientos tecnológicos.

Requerimientos	Zincado Ácido Clorhídrico	Zincado Alcalino sin cianuros	Zincado Alcalino con cianuros
Polarización Anódica	Raramente	Requerido	Requerido
Conductividad del baño de la solución	Excelente	Dependiente de la corriente directa (DC).	Justa
Agitación por aire	Requerido	No Requerido	No requerido
Calentamiento	Requerido	Requerido	Requerido
Filtración	Requerido	Requerido	No Requerido
Ajuste pH	Requerido	No requerido	No Requerido
Aditivos de purificación	No requerido	Requerido	Requerido
Receptividad del cromado	Buena	Dependiente de la corriente directa (DC).	Excelente
Tratamiento de desechos	Simple	Simple	Complejo
Tratamiento del hierro por Óxido	Requerido	No requerido	No requerido

Fuente: (Sierka, 2015)

2.5.4 GALVANIZADO ELECTROLÍTICO ALCALINO SIN CIANUROS.

Este zincado es más confiable en comparación con el resto de procesos, económicamente es más eficiente en implementación y costos de producción, menos perjudicial para el medio ambiente, el proceso se muestra en la figura 6:

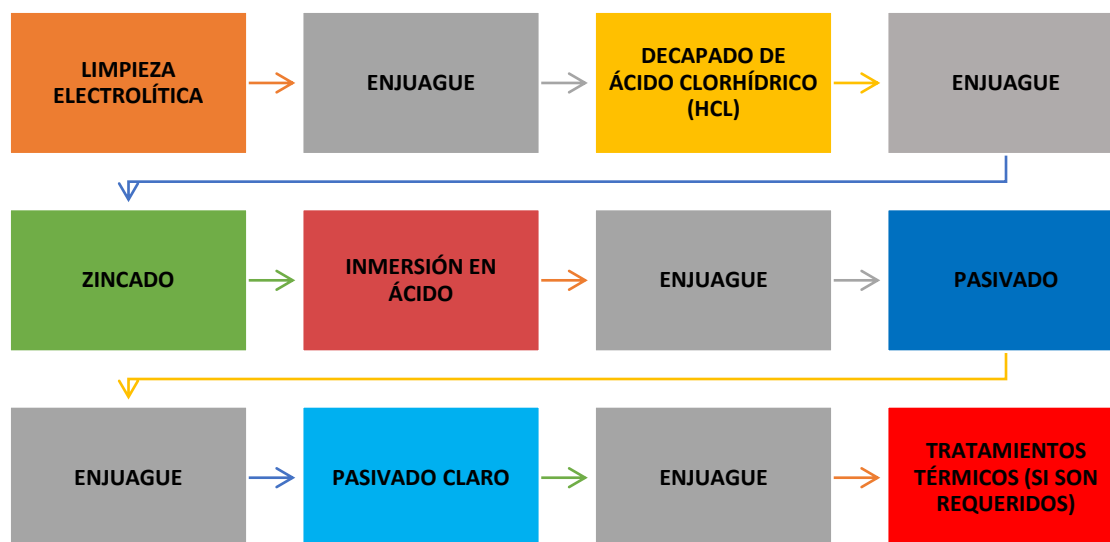


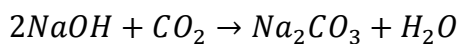
Figura 6 Proceso de zincado electrolítico.

Fuente: (Sierka, 2015) [Recuperado y editado el 11/09/2016]

La reacción de electrodeposición de solución alcalina no cianurada es la siguiente:



El primer gran inconveniente de este tipo de galvanizado alcalino es la presencia de altos niveles de carbonatos en la solución, y esto ocurre debido a grandes cantidades de CO_2 .



Los carbonatos aumentan proporcionalmente al incremento de la agitación del electrolito y aumento de temperatura que conlleva al deterioro de la conductividad del líquido, un rango recomendado de cantidades de carbonatos es de 50-100 g/L. (Sierka, 2015).

2.5.4.1 Constituyentes del baño alcalino sin cianuros.

En la tabla 6 se describen los constituyentes principales que están presentes en el baño alcalino no cianurado como concentración volumétrica.

Tabla 6
Constituyentes baño alcalino no cianurado.

<i>QUÍMICOS Y REQUERIMIENTOS</i>	TIPO DE BAÑO			
	TAMBOR		BASTIDOR	
	gr/L	onz/gal	gr/L	onz/gal
<i>ZN (METAL)</i>	8-15	1-2	6-12	0.8-1.6
<i>NaOH</i>	80-150	10-20	60-120	8-16
<i>TEMPERATURA OPERACIÓN °C (°F)</i>	18-35 (65-95)		18-35 (65-95)	
<i>DENSIDAD DE CORRIENTE</i>	0.5-1.2[A/dm ²] (5-12 asf.)		1-2.5[A/dm ²] (10-25 asf.)	

Fuente: (Durney & Graham, 1985)

2.5.4.1.1 Zinc.

Elemento químico esencial, es un metal o mineral, una de sus aplicaciones más importantes es el galvanizado de acero. Tiene color blanco azulado, no sufre ante el aire seco, pero la humedad genera una capa superficial de óxido o carbonato básico con fin de dar protección contra la corrosión, sus propiedades físicas se muestran en la tabla 7:

Tabla 7
Propiedades físicas del zinc.

Propiedad Física	Valor
Densidad	7140 Kg/m ³
Punto de Fusión	420°C
Punto de Ebullición	907°C
Temperatura límite de empleo	350°C

Fuente: (Ruiz, 2006)

Bajas concentraciones de zinc disminuyen la eficiencia catódica, la potencia de recubrimiento y penetración. En concentraciones altas de zinc se genera un proceso contrario. La concentración óptima del metal depende de los siguientes factores:

- Configuración de la parte mecánica a recubrir.
- Potencia de electrodeposición.
- Velocidad de deposición.

2.5.4.1.2 Soda Cáustica (NaOH).

Es utilizada únicamente en altos grados de pureza, el hidróxido de sodio en forma líquida no es recomendado ya que genera altos niveles de impurezas metálicas, bajas concentraciones, bajan la conductividad electrolítica y la polarización anódica. Altas concentraciones delimitan el brillo en la capa depositada, y pueden incrementar la concentración de metal zinc en la solución, sus propiedades físicas y químicas que se muestran a continuación en la tabla 8:

Tabla 8
Propiedades Soda Cáustica Na (OH).

Propiedades	Valor
Gravedad Específica	2.13 a 25°C
Punto de Ebullición	1390°C
Punto de Fusión	318°C
Viscosidad (cp.)	4 a 350°C
pH	14 en solución al (5%)
Solubilidad	En agua, alcohol y glicerol.

Fuente: (FUJIAN SHAN S.A., 2009)

2.6 POTENCIAL HIDRÓGENO (PH).

El potencial hidrógeno es la relativa acidez o alcalinidad de una solución.

“La importancia del pH de una solución para el control de calidad en las mediciones es importante en operaciones de acabado de un metal” (Campbell & Walsh, 1992). Un pH de siete es el valor neutro, uno menor es ácido y uno mayor alcalino, donde se maneja una escala de 0 a 14. Para efectos de este proyecto de investigación se utiliza una solución alcalina de pH de 11 a 12.

2.7 PARÁMETROS DEL ELECTROGALVANIZADO.

Uno de los principales aspectos para la elección del tipo de baño ya sea ácido o alcalino, es conocer sus diferentes condiciones de operación (parámetros), como la temperatura, tiempo de proceso, corriente, voltaje, concentraciones de los constituyentes, condiciones ambientales, etc., entonces a continuación se enunciarán los diferentes parámetros del proceso que intervienen de manera general:

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.

2.7.1 ESTADO SUPERFICIAL DEL CÁTODO (METAL BASE).

No todos los recubrimientos metálicos pueden ser depositados en cualquier metal base, si éste no es el indicado, el recubrimiento se depositará de manera imperfecta, o pueden ocurrir futuros desprendimientos del mismo, con cualquier impacto o tensión de las partes recubiertas.

Otro aspecto importante, es el estado superficial del cátodo, ya que la estructura que posea influye directamente en la electrocristalización (crecimiento de los granos de recubrimiento) (Alcaraz, 2005).

2.7.2 DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA.

Parámetro muy utilizado para modificar rápidamente la estructura del electrodepósito en formación. Densidades de corriente bajas producen velocidades de electrodeposición lentas.(Grases, Costa, & Söhnel, 2000).

Aumentando la densidad de corriente, dentro de cierto rango, produce un aumento de velocidad del galvanizado, el mismo que favorece la polarización catódica (técnica de control de corrosión galvánica) y se obtienen recubrimientos de grano fino; si se supera éste rango, la velocidad de crecimiento del grano aumenta tanto, que se da especialmente en ciertos lugares, con una superficie rugosa, con protuberancias, incluso esponjosa o pulverulenta (indeseables).

2.7.3 AGITACIÓN DEL ELECTROLITO.

Favorece los cambios entre la capa o zona catódica y el resto del electrolito, ayuda con la disminución de la polarización de concentración, formando recubrimientos más uniformes, además permite elevar la densidad de corriente sin que produzca electrodepósitos indeseables.

Existen dos tipos agitaciones las cuales son:

- Agitación de la solución (por aire).
- Agitación mecánica.

2.7.4 TEMPERATURA APLICADA.

El aumento de la temperatura facilita la difusión, al mismo tiempo produce una disminución o anulación del desprendimiento de hidrógeno sobre el cátodo, permite aumentar la densidad de corriente (mayor movilidad de los iones metálicos, alta conductividad), genera una disminución de la viscosidad, generando granos finos y brillantes, es importante saber que el aumento de la temperatura no se completa con un incremento de la densidad de corriente, el efecto de ésta combinación permite un mayor tamaño de los cristales y una disminución de la polarización.

Existen dos sistemas utilizados de calentamiento que son por resistencia eléctrica y calentamiento por vapor con eficiencias del 100 y 85 por ciento respectivamente (Alcaraz, 2005).

2.7.5 CONCENTRACIÓN DE LOS IONES METÁLICOS.

Una composición adecuada del electrolito o líquido conductor será aquella que posea pocos iones metálicos, para depósito y muchas moléculas no

disociadas dispuestas a descomponerse rápidamente, dando así a una liberación de los iones metálicos, para sustitución de los desaparecidos de la película líquida catódica durante la deposición.

2.7.6 AGENTES DE ADICIÓN.

Son aquellos compuestos de naturaleza inorgánica u orgánica, que su adición al electrolito, generalmente en pequeñísima cantidad, modifican la textura cristalina, en los cuales tenemos a los purificadores, abrillantadores, nivelantes, humectantes y agentes disminuidores de tensiones internas o ductilizantes (Alcaraz, 2005).

2.7.6.1 Abrillantadores.

Influyen en el crecimiento en las puntas, dando más velocidad al crecimiento en los valles del cristal.

2.7.6.2 Nivelantes.

Inhiben el crecimiento en las puntas, dando más velocidad al crecimiento en los valles del cristal.

2.7.6.3 Humectantes.

Mojan la superficie catódica, reduciendo la tensión superficial en las burbujas de hidrógeno y facilitando su desprendimiento de la misma.

2.7.6.4 Agentes disminuidores de tensiones o ductilizantes.

Disminuyen o suprimen las tensiones internas, asociadas a ciertos tipos de crecimiento cristalino.

2.8 TIPOS DE ELECTRODEPOSICIÓN.

El zinc usualmente es utilizado para recubrimientos de partes de hierro y acero, como objetivo primario tiene la protección a la corrosión y fines decorativos, los mismos que se subdividen de acuerdo al funcionamiento y capacidad de producción.

Según el funcionamiento:

- Plantas galvánicas manuales.
- Plantas galvánicas semiautomáticas.
- Plantas galvánicas automáticas.

Según la capacidad de producción:

- Galvanizado tipo Rack (sujeción de las piezas de metal base por medio de bastidores soporte).
- Galvanizado tipo Barrel (sujeción de las piezas dentro de un tambor giratorio).

Según la concentración de los componentes:

- Alta concentración.
- Baja concentración.

2.8.1 GALVANIZADO EN BASTIDOR (RACK PLATING).

Los componentes terminados o semi-manufacturados, los cuales, debido a su tamaño, forma o características especiales de construcción, no pueden ser terminados en masa, son agregados a bastidores (racks). (Kanani, 2004),

La figura 7 muestra un ejemplo de bastidor estándar utilizado en la industria de la galvanoplastia.

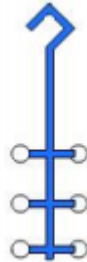


Figura 7 Bastidor de soporte en sistema "rack".

Fuente: (Ayala, Flores, & Mendoza, 2004) [Recuperado el 12/09/2016]

2.8.2 GALVANIZADO EN MASA.

Entre los varios tipos de componentes, los cuales son galvanizados, están pequeñas piezas tales como tuercas o tornillos. El galvanizado por bastidor (rack plating) no es una proposición factible en casos donde los productos pueden ser millones de ítems por día. Estos son procesados por uno u otros métodos conocidos como terminados en masa:

2.8.2.1 Galvanizado en tambor (Barrel plating).

Los tambores para galvanizados, los cuales han sido probados por su importancia en grandes cantidades de pequeñas piezas para el aprovechamiento en masa, son perforados y son cilíndricos o poligonales en aspecto. Típicamente rotan alrededor de un eje horizontal o inclinado como se observa en la figura 8:

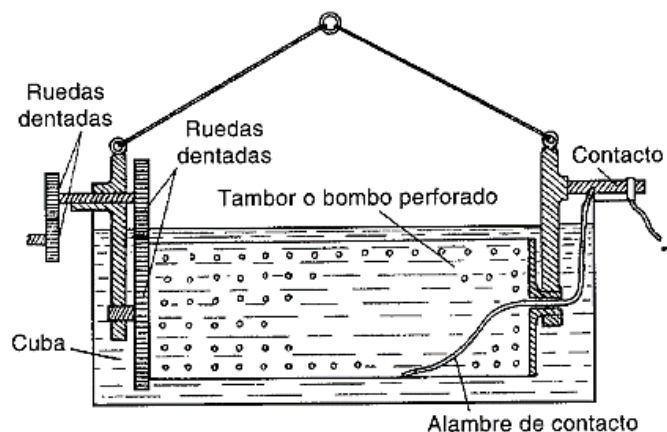


Figura 8 Esquema de un tambor galvánico (Barrel plating).

Fuente: (Alcaraz, 2005) [Recuperado el 12/09/2016]

2.9 DISEÑO DE PLANTAS GALVÁNICAS Y EQUIPOS.

El diseño de plantas galvánicas es relativamente complejo gracias a la gran variedad de tratamientos que pueden y deben aplicarse, toda instalación requiere de elementos auxiliares y los siguientes puntos a considerar;

Premisas generales:

1. Almacenamiento de piezas a ser tratadas.
2. Sección de pulido.
3. Almacenamiento de bastidores o tambores.
4. Zona de carga (colocación de piezas).
5. Área de procesamiento.
6. Layout destinado a la preparación, filtración, purificación, de los baños.
7. Almacenamiento de componentes químicos, ánodos y aditivos.
8. Laboratorio y control de calidad.
9. Storage temporal.
10. Área de tratamientos de efluentes.
11. Zona de vestuarios, servicios biológicos y de salubridad.

Premisas particulares:

1. Metal base a ser recubierto.
2. Recubrimientos necesarios.
3. Estado superficial.
4. Tipo de pieza a recubrir.
5. Capacidad de producción.
6. Inversión estimada.

2.9.1 PARTES DEL EQUIPO DE ZINCADO.

Para el correcto funcionamiento de una planta galvánica se requiere de sistemas y equipos que son fundamentales para dicha tarea, como lo muestra la figura 9, donde se observa los componentes para un proceso simple y sencillo de laboratorio.

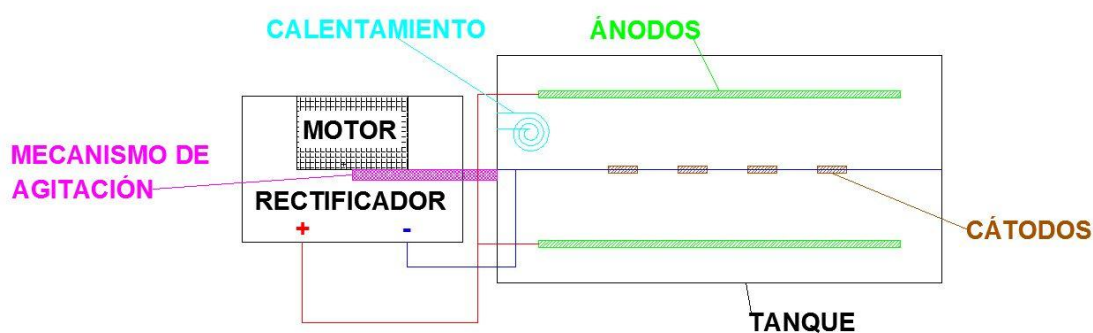


Figura 9 Partes y equipos del zincado electroquímico en sistema rack.

2.9.1.1 Tanque.

El objetivo primario de un tanque para una instalación de zincado es contener el líquido prescrito sin fugas durante el periodo de tiempo deseado.

Los materiales usualmente usados son: plástico de diferentes tipos, cerámicos, concreto, o aceros, en la figura 10 se muestra un ejemplo de cuba electrolítica de material pvc.



Figura 10 Cuba electrolítica rectangular.

Fuente: (APR PLASTIC FABRICATING, INC., s.f.)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.2 Revestimientos.

Estos protegen al tanque de la contaminación de los baños que se producen en ellos.

Las formas de los recubrimientos más usados son; de láminas, revestimientos de tanques, revestimientos de aplicación líquida.

2.9.1.2.1 Materiales de los revestimientos.

Deben ser clasificados acorde a su tipo, el cual refleja sus propiedades físicas y resistencias, existiendo los siguientes:

- **Gomas:** a excepción por la goma dura, son reconocidas por su resiliencia y características elásticas.
- **Termoplásticos:** los más reconocidos (PVC, polietileno, polipropileno, fluorocarbonos, poli éter clorado).

- **Resinas termoestables:** Epoxi, uretanos, poliésteres acrilatos.
- **Metálicos:** Plomo.

La figura 11 muestra un tipo de recubrimiento muy utilizado en la industria para tanques de paredes de acero dulce.



Figura 11 Revestimiento de tanque.

Fuente: (witt lining systems, s.f.)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.3 Calentamiento y enfriamiento.

Tanto el calentamiento como el enfriamiento son importantes para mantener la temperatura deseada en el baño electrolítico.

En la industria en su mayoría se utiliza un calentamiento por resistencia eléctrica y el enfriamiento por intercambiador de calor por serpentín, donde se aplican modelos tubulares, tal y como muestran las figuras 12 y 13 respectivamente.



Figura 12 Resistencias eléctricas.

Fuente: (ERMALO TECHNICAL SUPPLY, 2014)

[Recuperado el 12/09/2016]

Para el enfriamiento se tiene por:

- Agua fría.
- Salmuera.



Figura 13 Serpentes de enfriamiento.

Fuente: (PRODUCTS FINISHING (PF), 2013)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.4 Control de temperatura.

Para el correcto funcionamiento del galvanizado electrolítico, la temperatura debe mantenerse en rangos establecidos de acuerdo al tipo de baño.

La selección del termostato se da originalmente por la necesidad de controlar la temperatura de las sustancias químicas del baño en la cuba, el mismo que se aprecia en la figura 14.



Figura 14 Equipo de control de temperatura (reóstato).

Fuente: (DIRECT INDUSTRY, 2016)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.5 Bastidores (racks).

Estos elementos son los encargados de mantener a los especímenes para galvanizar dentro del baño electrolítico, pudiendo tener diferentes formas para su uso; un buen diseño de estos elementos es muy importante.

El material más usado para estos tipos de elementos es: cobre, otros materiales en menor uso son acero, latón, aluminio y acero inoxidable, un bastidor clásico se observa en la figura 15:



Figura 15 Bastidor de soporte (rack).

Fuente: (PHILIP MACHINE, 2014)

Recuperado y editado el 12/09/2016]

2.9.1.6 Filtración.

La finalidad del sistema de filtración es la de separar las partículas sólidas de un líquido, la figura 16 muestra un equipo de filtración clásico utilizado en la galvanoplastia.



Figura 16 Equipo de filtración.

Fuente: (Marshal Laboratories, s.f.)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.7 Agitación.

Cuando las partes están siendo galvanizadas a densidades de corriente altas o durante largos ciclos de tiempo, el oxígeno liberado al ánodo puede causar estragos en huellas, filos, etc.; la agitación tiende a lidiar con esta condición.

Puede ser de dos clases, por el movimiento del cátodo (con un mecanismo de movimiento recíprocante) y por el movimiento de la solución, siendo frecuente el uso de los dos al mismo tiempo como se observa en la figura 17:



Figura 17 Sistema de agitación mecánico.

Fuente: (TECHNIC INC., s.f.)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.9.1.8 Fuente eléctrica (rectificador de corriente).

Es el elemento encargado de suministrar la electricidad para el proceso de galvanizado electrolítico. Efectúa una transformación de corriente alterna a continua, teniendo también en el mismo dispositivo el control de voltaje e intensidad de corriente que se suministran, la figura 18 muestra un rectificador de baja intensidad, utilizado en laboratorios galvánicos.



Figura 18 Rectificador de corriente.

Fuente: (AliExpress, 2016)

[Recuperado el 12/09/2016]

2.10 NORMA ASTM B633.

Esta es la especificación para recubrimientos de zinc por electrodeposición en acero y hierro.

2.10.1 ALCANCE.

La norma cubre los materiales y procesos requeridos para recubrimientos de zinc por electrodeposición aplicados al hierro o acero; se provee de cuatro clases de espesores con cinco tipos de acabados suplementarios.

2.10.2 CLASIFICACIÓN.

De acuerdo al espesor, los recubrimientos deberán estar provistos de cuatro clases de espesores de acuerdo como se muestra en la tabla 9:

Tabla 9
Clases de espesores para recubrimientos.

Número 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 INTERNATIONAL, 2013)

El acabado del recubrimiento deberá tener uno de los valores establecidos en la tabla 10:

Tabla 10
Tipo de acabado y resistencia a la corrosión.

Tipo	Descripción	Tiempo mínimo en cámara salina, horas
I	Sin tratamientos suplementarios	-----
II	Depósitos cromatizados coloreados	96
III	Depósitos cromatizados incoloros	12
IV	Depósitos fosfatados	-----
V	Pasivados incoloros	72
VI	Pasivados coloreados	120

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2013)

2.11 MÉTODOS ESTADÍSTICOS.

2.11.1 METODOLOGÍA TAGUCHI.

El enfoque de la metodología Taguchi destaca la importancia del control de la calidad, se utiliza fundamentalmente el diseño de experimentos como herramienta para fabricar productos más robustos y, por tanto, reducen los

efectos de la variabilidad sobre las características de la calidad del producto y del proceso.

La metodología Taguchi se basa en el empleo de matrices ortogonales para llevar a cabo el diseño de experimentos, así como en el posterior diagnóstico mediante el análisis regular, con el fin de evaluar los factores controlables y de ruido con sus niveles adecuados.

A esta serie de arreglos se los nombra:

$$L_a (b)^c \quad \text{Ec. 2. 9}$$

Dónde:

a = número de pruebas o condiciones experimentales que se toman. Por lo tanto es el número de filas del arreglo.

b = diferentes niveles que toma cada factor.

c = número de factores que se pueden analizar.

Un ejemplo de arreglo ortogonal se ejemplifica en la tabla 11:

Tabla 11
Ejemplo de arreglo $L_4(2)^3$.

PRUEBAS (a)	FACTORES (c)			RESULTADO
	A	B	C	
1	1	1	1	Y1
2	1	2	2	Y2
3	2	1	1	Y3
4	2	2	1	Y4

Fuente: (Reyes, 2008)

La metodología Taguchi se realiza en varias etapas, a conocer:

- El diseño del sistema: se establecen las características generales, parámetros a tomar en cuenta, objetivos, etc.

- El diseño de parámetros: se encarga de determinar los niveles de los factores que producen el mejor rendimiento del producto o proceso a experimentar.
- La tolerancia de diseño: es el modo de afinar las respuestas de los parámetros con influencia significativa sobre el producto o el proceso.

A parte de esto la metodología Taguchi pone énfasis en:

- El diseño robusto: se trata de un producto o proceso lo menos variable posible ante cambios del medio que lo rodea.
- La maximización de la razón señal ruido: se trata de alcanzar los mejores objetivos del producto o proceso bajo las condiciones no controlables (ruido).

2.11.1.1 Razón señal-ruido (S/R).

La metodología Taguchi es útil para establecer qué combinación de los factores controlables ofrece mayor insensibilidad de la variable de interés a los factores de ruido.

Aunque hay diferentes relaciones S/R, tres de ellas son consideradas estándar y son de aplicación general en las siguientes situaciones:

- Mayor es mejor.
- Menor es mejor.
- Nominal es mejor.

Cuando la característica de calidad se trata de mayor es mejor se tiene la ecuación 2.10:

$$\frac{S}{R} = -10 * \log_{10} \left(\frac{\mu^2}{S^2} \right) \quad \text{Ec. 2. 10}$$

En el caso de que la característica de calidad se trata de menor es mejor se tiene la ecuación 2.11:

$$\frac{S}{R} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Ec. 2. 11}$$

En el caso de que la característica de calidad se trata de nominal es mejor se tiene la ecuación 2.12:

$$\frac{S}{R} = -10 * \log_{10} \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad \text{Ec. 2. 12}$$

Dónde:

S= Desviación estándar de la muestra.

μ =Media de los datos.

La forma de desarrollar la metodología Taguchi de acuerdo con (Ranjit, 2010) p. 37, se basa en los siguientes pasos:

1. Lluvia de ideas sobre las características de calidad y diseño de parámetros, importantes para el producto y/o proceso bajo estudio.
2. Diseñar el experimento.
3. Analizar los resultados que determinan las condiciones óptimas.

Existe una expresión en la metodología Taguchi que permite conocer el valor numérico crítico, producto de la selección de los parámetros óptimos en el proceso por medio de ANOVA o señal ruido (S/R), matemáticamente se halla definida en la ecuación 2.13:

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left(\frac{\sum A_x}{N_A} - \frac{T}{N} \right) + \left(\frac{\sum B_x}{N_B} - \frac{T}{N} \right) + \dots + \left(\frac{\sum n_x}{N_n} - \frac{T}{N} \right) \quad \text{Ec. 2. 13}$$

2.11.1.2 Análisis de varianza (ANOVA).

El análisis de varianza, es un caso especial donde el conjunto de variables explicativas (independientes) son ficticias y la variable dependiente continua.

Los tipos de anova existentes se muestran en la figura 19:

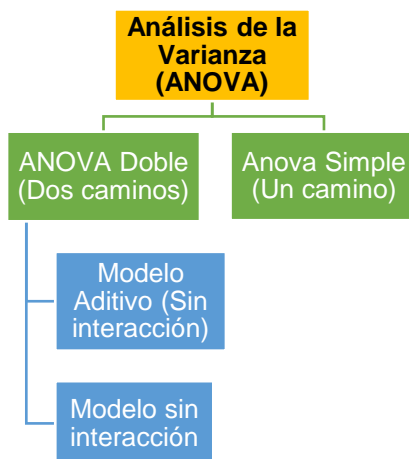


Figura 19 Tipos de análisis de varianza (ANOVA).

2.11.1.2.1 Anova simple.

El objetivo principal de esta metodología, es determinar el efecto sobre alguna variable dependiente continua “Y” que tienen distintos niveles de algún parámetro “X” (variable independiente discreta).

De acuerdo con (Terrádez & Ángel, s.f.), la técnica anova simple, tiene la premisa de comparar las medias de la variable dependiente, a partir de los distintos niveles del factor independiente (x_1, x_2, \dots, x_n) .

De manera similar como la regresión lineal el modelo matemático que rige esta herramienta estadística se expresa en la ecuación 2.14:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. 2. 14}$$

Dónde:

Y_{ij} = Variable dependiente, objeto de estudio.

τ_j = Es el efecto diferencial del nivel j. Guarda la importancia de cada tratamiento y es el objeto de análisis, ya que éstos son efectos diferenciales sobre la media tenemos que; $\sum \tau_j = 0$.

μ_i = Constante media de todos los niveles (media poblacional).

ε = Es un término de error, considerado como variable aleatoria en una distribución normal con media 0 y varianza σ^2 .

El ANOVA tradicional parte de descomponer la variación total del conjunto de datos en dos componentes y su expresión matemática más desarrollada es mostrada en la ecuación 2.15:

VARIACIÓN TOTAL	=	VARIACIÓN ENTRE	+	VARIACIÓN INTRA
--------------------	---	--------------------	---	--------------------

$$\sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_t)^2 = \sum_{j=1}^g n_j (\bar{Y}_{gj} - \bar{Y}_t)^2 + \sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_{gj})^2$$

Ec. 2. 15

Dónde:

\bar{Y}_t = La media total de los datos.

\bar{Y}_{gj} = Media de grupo o nivel j.

Y_{ij} = Dato del grupo o nivel j en la posición i.

n_j = Número o cantidad de datos de un grupo o nivel j.

g = grados de libertad.

j = nivel o grupo.

i = dato de un grupo o nivel j .

Con esto se puede obtener los diferentes factores de libertad de las variaciones como se muestra a continuación;

- Variación **ENTRE**: $g-1$.
- Variación **INTRA**: $n-g$.
- Variación **TOTAL**: $n-1$.

2.11.1.2.2 Anova doble.

Este modelo de varianza es utilizado para posibles efectos causados por diferentes niveles de dos factores sobre la variable dependiente. Anova doble es utilizada para contrastar, para cada uno de los dos parámetros, la hipótesis nula, que el resultado de la variable dependiente, no depende del factor en análisis (Terrádez & Ángel, s.f.).

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

3.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE BAÑO.

En la selección del tipo de baño se aplicó una matriz de decisión basada en la tabla 4 de atributos y adaptada para los requerimientos específicos de producción del proyecto de investigación, para verificar la resolución de la matriz (ver anexo 1).

Como tal se escoge el **zincado alcalino sin cianuros (NCN)**.

3.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE GALVANIZADO.

De la misma manera se selecciona el tipo de sistema de galvanizado, ya sea de bastidor o tambor. La matriz de decisión mostrada en el anexo 2 permite encontrar la vía más adecuada de acuerdo a los requerimientos del proyecto, dando como resultado un tipo de operación de bastidor (rack).

3.3 DIMENSIÓN DE LAS PIEZAS.

Para el dimensionamiento estándar de las piezas a recubrir, se impone un criterio de maniobrabilidad, tanto para el proceso de zincado, verificación de espesor del recubrimiento y corrosión acelerada en cámara de niebla salina, ensayos requeridos para aprobación de los especímenes de prueba (ASTM INTERNATIONAL, 2013), entonces:

$$t_{probeta} = 1 [cm]; \quad l_{probeta} = 5 [cm]; \quad w_{probeta} = 4 [cm]$$

El área de zincado de cada probeta es:

$$A_{probeta} = 2(l_{probeta} * w_{probeta}) + 2(t_{probeta} * l_{probeta}) + 2(w_{probeta} * t_{probeta})$$

$$A_{probeta} = 58 [cm^2]$$

El número de probetas que se va a utilizar es de **cuatro**, para evitar alta variabilidad en los resultados, entonces el área total de galvanizado es:

$$num_{probetas} = 4$$

$$A_{total} = num_{probetas} * A_{probeta} = 232 [cm^2]$$

3.4 SELECCIÓN DEL RECTIFICADOR.

Para seleccionar la cantidad máxima de corriente que debe proveer el transformador se utiliza la tabla 6 de parámetros para recubrimiento no cianurado (NCN). Se efectúa la media aritmética en la densidad de corriente, realizando el producto de ésta por el área de zincado total.

$$\rho_{corriente} = \frac{10 \left[\frac{A}{ft^2} \right] + 25 \left[\frac{A}{ft^2} \right]}{2} = 17,5 \left[\frac{A}{ft^2} \right]$$

$$Corriente = A_{total} * \rho_{corriente} = 4,37 [A]$$

Por tanto se escoge una fuente de 10 [A] por motivos de disponibilidad en el mercado, rango de operación y seguridad para el investigador, las características de la fuente de corriente se muestran en la tabla 12 y el rectificador Zhaoxin KXN – 3010D se observa en la figura 19 respectivamente.

Tabla 12
Características rectificador de corriente.

<i>Rectificador de corriente "ZHAOXIN"</i>	
<i>Modelo</i>	<i>KXN – 3010D</i>
<i>Salida de voltaje</i>	<i>0 – 30 [V]</i>
<i>Salida de corriente</i>	<i>0 – 10 [A]</i>
<i>Peso</i>	<i>2,58 [kg]</i>
<i>Frecuencia</i>	<i>50 / 60 Hz</i>
<i>Dimensiones</i>	<i>275 x 126 x 155</i>

Fuente: (AliExpress, 2016)

3.5 TANQUE O CUBA ELECTROLÍTICA.

3.5.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL TANQUE.

En cuanto al material de las cubas, (Alcaraz, 2005) p. 79 sostiene tres tipos de materiales adecuados para construcción, que son:

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

Para seleccionar el material se aplicó una matriz de decisión expuesta en el anexo 3. Se seleccionó el **acero A36**.

3.5.2 DIMENSIONES DEL TANQUE.

Existen condiciones de operación para el galvanizado electroquímico, así como para el tipo de baño específico que se desea realizar, entonces:

Condiciones:

- La primera condición de operación para galvanizado electroquímico general, es que se debe trabajar máximo con $0,132 \left[\frac{ft^2}{L} \right]$ ($0,5 \left[\frac{ft^2}{gal} \right]$) de electrolito (Fields, Duncan Ronald, & Electroless, s.f.) p. 234.
- La segunda condición de operación se basa específicamente para el baño alcalino no cianurado, que recomienda una densidad de corriente adecuada de $6 \left[\frac{A}{ft^2} \right]$ de recubrimiento (Geduld & Plating, s.f) p. 247.

Para obtener la condición de volumen final, se efectúa un producto de ambas condiciones:

$$0,132 \left[\frac{ft^2}{L} \right] * 6 \left[\frac{A}{ft^2} \right] = 0,793 \left[\frac{A}{L} \right]$$

El volumen mínimo del electrolito necesario, se obtiene dividiendo la corriente máxima que entrega la fuente para la condición de volumen:

$$V_{min} = \frac{10[A]}{0,793 \left[\frac{A}{L} \right]} = 12,618 [L]$$

De acuerdo con (Ayala, Flores, & Mendoza, 2004) en recomendaciones de construcción de tanques, para evitar derrames del líquido, prevenir sobrecarga, evitar desgastes por corrosión y calentamiento excesivo de la solución, se utiliza un factor de seguridad de dos en el diseño.

$$FS_{tanque} = 2$$

El volumen de electrolito necesario:

$$V_{electrolito} = FS_{tanque} * V_{min} = 25,236 [L]$$

De acuerdo con (ASME, 2013) se recomienda que los tanques rectangulares con valores menores a $30 [ft^3]$ de capacidad no requieren atiesadores (vigas soporte) y el espesor tanto de paredes como del fondo es el mismo.

3.5.2.1 Diseño ASME.

3.5.2.1.1 Ancho del tanque.

Una fórmula que brinda (ASME, 2013), para calcular el ancho de un tanque de acuerdo a la capacidad que se requiere, se muestra en la ecuación 3.1:

$$B = \sqrt[3]{V}; \quad V \rightarrow ft^3 \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$V_{electrolito} = 0,891 ft^3$$

$$\sqrt[3]{V_{electrolito}} = \sqrt[3]{0,891 ft^3} = 0,962[ft] = 0,293[m]$$

$$B = 0,3[m].$$

3.5.2.1.2 Longitud del tanque.

La longitud del recipiente se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$L_{ASME} = 1,5 * B \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$L_{ASME} = 0,44 [m]$$

3.5.2.1.3 Altura del tanque.

En cuanto al cálculo de la altura del tanque (ASME, 2013), se basa en la siguiente expresión:

$$H_{ASME} = 0,667 * B \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$H_{ASME} = 0,2 [m]$$

3.5.2.2 Diseño galvánico.

3.5.2.2.1 Longitud del tanque.

En la figura 20 se aprecia la distribución espacial de las probetas en el interior del tanque.

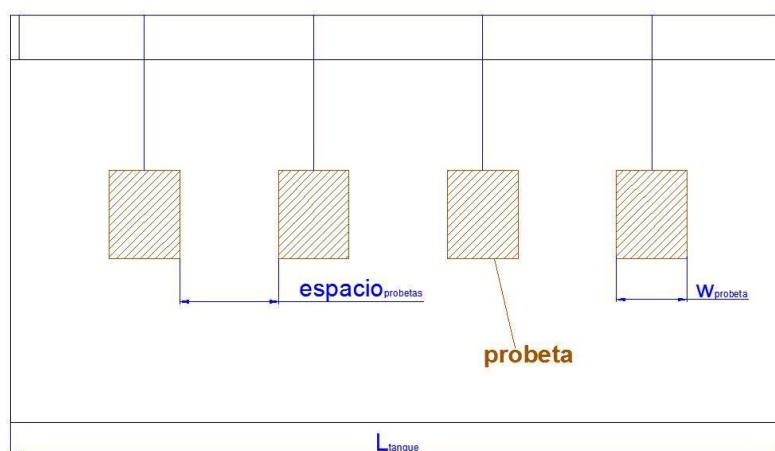


Figura 20 Distribución espacial de las probetas en el interior del tanque.

Para calcular el espacio entre ellas adecuado se procede de la siguiente manera:

$$espacio_{probetas} = \frac{L_{ASME} - num_{probetas} * W_{probeta}}{num_{probetas} + 1} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$espacio_{probetas} = 5,6 [cm]$$

Se introduce un factor de seguridad de longitud de dos en función del espacio entre probetas para facilitar a futuro la introducción de instrumentos de medida en las paredes del tanque, evitar contratiempos y mejorar la seguridad:

$$f_{largo} = 2 * espacio_{probetas} = 11,2 [cm]$$

El largo final del tanque para un diseño galvánico correcto:

$$L_{tanque} = num_{probetas} * w_{probeta} + (num_{probetas} + 1) * espacio_{probetas} + f_{largo} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$L_{tanque} = 55,2 [cm]$$

Se establece una longitud estándar final:

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

3.5.2.2.2 Ancho del tanque.

Para calcular el ancho del tanque se considera la separación del ánodo con el cátodo adicionando la separación del ánodo con las paredes del tanque, como son dos barras anódicas, todo esto se multiplica por dos:

$$W_{tanque} = 2 * (Sep_{anodo-cátodo} + Sep_{anodo-paredtanque}) \quad \text{Ec. 3.6}$$

La separación entre ánodos y las piezas a recubrir (barra catódica) debe estar entre 10 [cm] y 15 [cm] (Alcaraz, 2005) p.78.

Se calcula un promedio para un diseño equilibrado:

$$Sep_{anodo-cátodo} = \frac{10 [cm] + 15 [cm]}{2} = 12,5 [cm]$$

Se debe brindar una separación entre los ánodos y las paredes, con el objeto de que no se genere un contacto entre los mismos, y así evitar contratiempos. En este caso se le dará un valor de 4 [cm].

$$Sep_{anodo-paredtanque} = 4 [cm]$$

Entonces:

$$W_{tanque} = 2 * (12,5 [cm] + 4 [cm]) = 33 [cm]$$

El ancho final estándar es:

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

3.5.2.2.3 Altura del tanque.

Para obtener la altura del electrolito:

$$H_{electrolito} = \frac{V_{electrolito}}{L_{tanque} * W_{tanque}} = 12,017 [cm]$$

A fin de evitar derrames de líquido electrolito y extracción segura de los especímenes (probetas), se agrega un factor de altura por seguridad de 5 [cm] (Ayala, Flores, & Mendoza, 2004):

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

$$H_{tanque} = H_{electrolito} + f_{altura} = 17,017 [cm]$$

Se debe utilizar el mayor valor de las dimensiones de los dos tipos de diseño entonces:

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

La altura final del electrolito es:

$$H_{electrolito} = H_{tanque} - f_{altura} = 15 [cm]$$

El volumen final del tanque es:

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

El volumen final del electrolito es:

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

3.5.2.3 Concentraciones y densidad de solución electrolito.

De acuerdo con (GALVANO, 2012) y (Durney & Graham, 1985) la solución alcalina sin cianuros comprende de los siguientes compuestos:

- Hidróxido de Sodio (NaOH) (sólido 50% concentración).

- Óxido de Zinc (sólido $\left[\frac{g}{L}\right]$).
- MakeUp ZSC (líquido $40\left[\frac{mL}{L}\right]$).
- Abrillantador Brillo ZSC (líquido $8\left[\frac{mL}{L}\right]$).
- Purificador ZSC (líquido $4\left[\frac{mL}{L}\right]$).

3.5.2.3.1 Propiedades físicas y químicas de los compuestos.

Las propiedades físicas y termodinámicas de la soda cáustica al 50% de concentración se brindan en la hoja de seguridad mostrada en el anexo 4.

La gravedad específica del NaOH es:

$$G_{NaOH} = 2,13$$

Para el óxido de Zinc (sólido) se brinda su respectiva hoja de seguridad (ver anexo 5):

La gravedad específica es:

$$G_{ZnO} = 5,6$$

Para obtener la gravedad específica de una sustancia a partir de sus grados Baumé se aplica la expresión mostrada en la ecuación 3.7:

$$G_{MakeUp} = \frac{145}{145 - \rho_{MakeUp}} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Los grados Baumé del MakeUp ZSC están dentro del rango de 8 a 9 (ver anexo 6), tomando como referencia el promedio del mismo.

$$\rho_{MakeUp} = \frac{8 + 9}{2} = 8,5$$

$$G_{MakeUp} = \frac{145}{145 - 8,5} = 1,062$$

Del mismo modo, los grados Baumé del Brillo ZSC se hallan entre 3 y 5 (ver anexo 7), tomando como referencia el promedio del rango.

$$\rho_{Brillo} = \frac{3 + 5}{2} = 4$$

$$G_{Brillo} = \frac{145}{145 - 4} = 1,028$$

El rango de grados Baumé del Purificador ZSC es de 29 a 32 (ver anexo 8), así mismo se toma el valor promedio.

$$\rho_{purificador} = \frac{29 + 32}{2} = 30,5$$

$$G_{Purificador} = \frac{145}{145 - 30,5} = 1,266$$

3.5.2.3.2 Análisis de concentraciones del baño.

De acuerdo con (GALVANO, 2012), se debe colocar un tercio del volumen total de trabajo del tanque, agua y el restante luego de realizar la solución:

$$V_{H_2O} = \frac{1}{3} * V_{electrolito} = 10,5 [L]$$

Para el hidróxido de sodio, (Durney & Graham, 1985) dice que deben existir entre 60 [g] y 120 [g] por cada litro de solución alcalina sin cianuros, para un sistema de bastidor (rack), entonces se utilizará un promedio:

$$gr_{NaOH} = \frac{60[g] + 120[g]}{2} = 90[g]$$

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

$$X_{gr_{NaOH}} = \frac{gr_{NaOH} * V_{electrolito}}{1[L]} = 2,835[kg]$$

Para el óxido de zinc, deben existir 12 [g] de óxido de zinc por cada litro de solución alcalina sin cianuros (GALVANO, 2012).

$$gr_{ZnO} = 12[g]$$

Se calcula la cantidad de gramos total en la solución:

$$Xgr_{ZnO} = \frac{gr_{ZnO} * V_{electrolito}}{1[L]} = 0,378[kg]$$

Según (GALVANO, 2012), deben existir 40 [ml] de MakeUp ZSC en un litro de solución alcalina sin cianuros.

$$V_{MakeUp} = 40[mL]$$

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

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

Debe existir 8 [ml] de Brillo ZSC en 1 [L] de solución alcalina sin cianuros (GALVANO, 2012).

$$V_{Brillo} = 8 [mL]$$

La cantidad de litros de brillo total en la solución es:

$$XV_{Brillo} = \frac{V_{Brillo} * V_{electrolito}}{1[L]} = 0,252[L]$$

Por último, deben existir 4 [ml] de Purificador ZSC en 1 [L] de solución alcalina sin cianuros (GALVANO, 2012).

$$V_{Purificador} = 4 [mL]$$

La cantidad en litros de purificador total es:

$$XV_{Purificador} = \frac{V_{Purificador} * V_{tanque}}{1[L]} = 0,126[L]$$

3.5.2.4 Densidad de la solución alcalina no cianurada.

Ésta densidad se determina de acuerdo con (Martínez E. C., 2011) mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{ZSC} = \frac{\Sigma M_{compuestos}}{\Sigma V_{compuestos}} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Hidróxido de sodio:

$$\rho_{NaOH} = 2130 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_{NaOH} = \frac{M_{NaOH}}{\rho_{NaOH}} = \frac{2,835[\text{kg}]}{2130 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 1,331[\text{L}]$$

Óxido de zinc:

$$\rho_{ZnO} = 5600 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_{ZnO} = \frac{M_{ZnO}}{\rho_{ZnO}} = \frac{0,378[\text{kg}]}{5600 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 0,068[\text{L}]$$

MakeUp ZSC:

$$\rho_{MakeUp} = 1062 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$M_{MakeUp} = \rho_{MakeUp} * V_{MakeUp} = 1062 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 1,26[\text{L}] = 1,338[\text{kg}]$$

Brillo ZSC:

$$\rho_{Brillo} = 1062 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$M_{Brillo} = \rho_{Brillo} * V_{Brillo} = 1062 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0,252[\text{L}] = 0,259[\text{kg}]$$

Purificador ZSC:

$$\rho_{\text{Purificador}} = 1266 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$M_{\text{Purificador}} = \rho_{\text{Purificador}} * V_{\text{Purificador}} = 1266 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0,126[\text{L}] = 0,16[\text{kg}]$$

El contenido de masa de agua restante en la solución es:

$$V_{2H_2O} = V_{\text{electrolito}} - V_{\text{NaOH}} - V_{\text{ZnO}} - V_{\text{MakeUp}} - V_{\text{Brillo}} - V_{\text{Purificador}} - V_{1H_2O}$$

$$V_{2H_2O} = 31,5 [\text{L}] - 1,331[\text{L}] - 0,068[\text{L}] - 1,26[\text{L}] - 0,252[\text{L}] - 0,126[\text{L}] - 10,5 [\text{L}]$$

$$V_{2H_2O} = 17,964 [\text{L}]$$

$$V_{T_{H_2O}} = V_{1H_2O} + V_{2H_2O} = 28,464 [\text{L}] = 0,0285[\text{m}^3]$$

Con el fin de obtener la masa de agua, como es el componente más influyente de la solución, se analizará su densidad con respecto a una temperatura específica de equilibrio térmico y será tomado el valor de la densidad de temperatura ambiente en Sangolquí de 16 [°C], mediante interpolación y tablas de propiedades en función de la temperatura (ver anexo 9) los valores de las densidades a 15 [°C] y 20 [°C] son:

$$\text{A } 15^\circ\text{C } \rho_{f15} = 999,1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

$$\text{A } 20^\circ\text{C } \rho_{f20} = 998 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

El valor de la densidad a 16°C se obtiene aplicando la ecuación 3.9 de interpolación lineal (Steiner, 2005) p. 512:

$$y = y_o + (x - x_o) * \frac{(y_1 - y_o)}{x_1 - x_o} \quad \text{Ec. 3.9}$$

$$\rho_{f16} = 999,1 + (16 - 15) * \frac{(998 - 999,1)}{20 - 15} = 998,88 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_{H_2O} = 998,88 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

La masa de agua es:

$$M_{H_2O} = \rho_{H_2O} * VT_{H_2O} = 28,5 [kg]$$

La densidad de la solución:

$$\rho_{ZSC} = \frac{M_{H_2O} + M_{NaOH} + M_{ZnO} + M_{MakeUp} + M_{Brillo} + M_{Purificador}}{VT_{H_2O} + V_{NaOH} + V_{ZnO} + V_{MakeUp} + V_{Brillo} + V_{Purificador}} = 1060 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.5.2.5 Espesor del tanque.

El dimensionamiento del espesor de las paredes de tanques rectangulares sometidos a presión hidrostática en (ASME, 2013) se lo realiza por medio de la relación de longitud a la altura del tanque, y una curva de aproximación mostrada en el anexo 10, donde establece el coeficiente de relación de lados del recipiente α :

$$\frac{H_{tanque}}{L_{tanque}} = 0,333$$

$$\alpha_{tanque} = 0,003$$

De acuerdo con (ASME Sección VIII Tablas UCS-23, 2013) para recipientes sometidos a presión interna y externa, de acuerdo con la temperatura de operación de 30 a 40 [°C], el valor de tensión máxima admisible para el material SA-36 es 114 [MPa] (ver anexo 11).

El espesor de placa requerido para el tanque se calcula con la siguiente expresión:

$$t_{tanque} = 2,45 * L_{tanque} * \sqrt{\frac{\alpha_{tanque} * H_{tanque} * 0,036 * G_{ZSC}}{S}} + CA \quad \text{Ec. 3.10}$$

Dónde:

t_{tanque} : Espesor del tanque [in].

L_{tanque} : Largo del tanque [in].

α_{tanque} : Coeficiente de relación de la altura con respecto al largo.

H_{tanque} : Altura del tanque [in].

G_{ZSC} : Gravedad específica del electrolito.

S: Esfuerzo admisible con respecto a la temperatura de operación [lb/in²].

CA: Corrosión admisible $\frac{1}{16}$ [in].

$$t_{tanque} = 2,45 * 23,622 * \sqrt{\frac{0,003 * 7,874 * 0,036 * 1,06}{1,653 \times 10^4}} + \frac{1}{16} [in] = 0,076[in]$$

$$t_{tanque} = \frac{1}{8} [in]$$

En el diseño de tanques galvánicos (Durney & Graham, 1985) p.517, dice que el espesor mínimo de una cuba debe ser de $\frac{3}{16}$ [in] entonces el espesor de diseño final es:

$$t_{tanque} = \frac{3}{16} [in]$$

Se utilizará un espesor final comercial en el mercado ecuatoriano, una plancha de **5 [mm]** de espesor, de la empresa DIPAC (ver anexo 12).

3.5.2.6 Elementos atiesadores.

Como se explicó anteriormente tanques con capacidades menores a 30 [ft³] no requieren elementos atiesadores. Por motivo del montaje de los soportes de las barras anódicas y catódicas es necesario colocar dichos elementos en la

parte superior, por lo cual, dando mayor y mejor aprovechamiento al material se colocará tanto en la parte superior como inferior de la cuba.

$$W_{at} = \frac{0,036 * G_{ZSC} * H^2}{2} \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$W_{at} = \frac{0,036 * (1,06) * (7,874)^2}{2} = 1,183 \left[\frac{lb_f}{in} \right]$$

$$R_1 = 0,3 W_{at}$$

$$R_2 = 0,7 W_{at}$$

La figura 21 muestra las fuerzas distribuidas tanto en la parte superior del tanque (R_1), como en el fondo, (R_2).

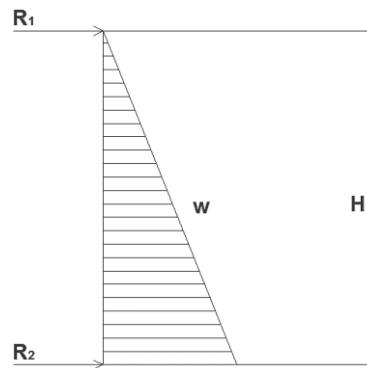


Figura 21 Cargas distribuidas para elementos atiesadores.

Fuente: (ASME, 2013)

El momento de inercia mínimo requerido de la sujeción de acuerdo con (ASME, 2013) se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{min} = 1,25 * \frac{R_1 * L_{tanque}^3}{E} \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$E_{acero} = 3 \times 10^7 [psi]$$

$$R_1 = 0,3 * 1,183 \left[\frac{lb_f}{in} \right] = 0,355 \left[\frac{lb_f}{in} \right]$$

$$I_{min1} = 1,25 * \frac{R_1 * L_{tanque}^3}{E_{acero}} = 8,113 \times 10^{-3} [cm^4]$$

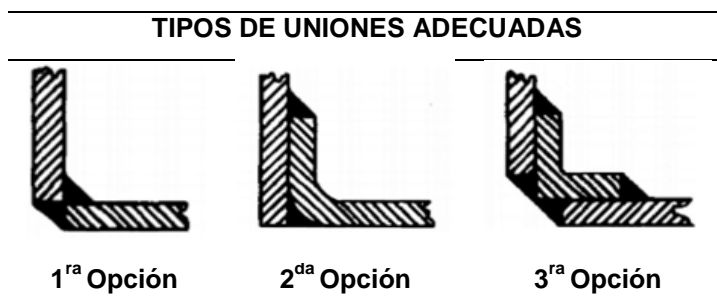
$$R_2 = 0,7 * 1,183 \left[\frac{lbf}{in} \right] = 0,828 \left[\frac{lbf}{in} \right]$$

$$I_{min2} = 1,25 * \frac{R_2 * L_{tanque}^3}{E_{acero}} = 0,019 [cm^4]$$

3.5.2.7 Soldadura en el tanque.

En uniones soldadas para tanques rectangulares sometidos a presión hidrostática, (ASME, 2013) p.182, brinda una figura de los tres tipos de uniones adecuadas para el diseño y construcción de los mismos, las mismas que se muestran en la tabla 13:

Tabla 13
Tipos de uniones soldadas en tanques rectangulares.



Fuente: (ASME, 2013)

3.5.2.7.1 Primera opción.

Como el tanque no requiere de elementos atiesadores para la unión de la placa del fondo, se analizará la primera opción de unión en la base de la soldadura:

$$t_{Placa_{menor}} = \frac{3}{16} [in]$$

$$b_{sold} = t_{Placa_{menor}} - CA = 0,125[in]$$

La inercia de una placa rectangular se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$I_{sold} = \frac{b_{sold} * b_{sold}^3}{12} = 8,468 \times 10^{-4}[cm^4]$$

$$\therefore I_{sold} < I_{min2} \text{ (NO CUMPLE)}$$

Se observa que la unión libre mediante soldadura de las paredes no brinda una adecuada resistencia, debido a que su inercia es menor a la requerida por el elemento atiesador.

3.5.2.7.2 Segunda opción.

La segunda opción viene a ser un dobléz en la placa del fondo y unión de los bordes con soldadura en “t” con las paredes del tanque. Por motivos económicos no se utilizará esta opción ya que es preferible utilizar un perfil L para aumentar la inercia de la unión brindando una mejor resistencia, como lo muestra el tercer tipo de unión.

3.5.2.7.3 Tercera opción.

Se utilizará un perfil L25x25x2 de la empresa DIPAC (ver anexo 13) para las uniones de las placas de las paredes con la del fondo, entonces:

$$I_L > I_{min2} \text{ (CUMPLE)}$$

Se selecciona el mismo perfil para la parte superior.

$$I_L = 0,57[cm^4] = 0,014[in^4]$$

$$\therefore I_L > I_{min1} \text{ (CUMPLE)}$$

3.5.2.8 Aperturas en el tanque.

3.5.2.8.1 Espesor del recipiente base.

De acuerdo con (ASME, 2013) la fórmula de calcular el espesor del recipiente se calcula por la siguiente expresión:

$$t_{rp} = \frac{P_d * R_{int-tanque}}{S_p * E - 0,6 * P_d} + CA \quad \text{Ec. 3.14}$$

Dónde:

S_p : Esfuerzo admisible del material de la placa (psi).

E : % radiografiado del material para líquidos; 0,7 (none).

P_d : Presión de diseño.

CA : Corrosión admisible $\frac{1}{16}$ [in].

3.5.2.8.1.1 Presión de diseño.

Se calcula la presión de diseño en función de la presión hidrostática de operación por medio de la siguiente expresión:

$$P_{op} = \rho_{ZSC} * g * H_{op} \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\rho_{ZSC} = 1060 \frac{kg}{m^3} = 0,038 \frac{lb}{in^3} \quad g = 386,1 \frac{in}{s^2}$$

$$H_{op} = H_{electrolito} - 1[in] = 4,906[in]$$

$$P_{op} = 0,188[psi]$$

De acuerdo con (ASME, 2013) la presión de diseño para presiones de operación menores a 300[psi], se calcula de la siguiente manera:

$$P_d = P_{op} + 30[psi] \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$P_d = 30,188[psi]$$

El material de la placa es SA-36:

$$S_p = S_{SA-36} = 1,653 \times 10^4 [\text{psi}] = 1,14 \times 10^8 [\text{Pa}]$$

$$P_{\text{tanque}} = 2 * \text{largo}_{\text{tanque}} + 2 * \text{ancho}_{\text{tanque}} = 1,9 [\text{m}]$$

$$D_{\text{int-tanque}} = \frac{P_{\text{tanque}}}{\pi} = 23,811 [\text{in}]$$

$$R_{\text{int-tanque}} = \frac{D_{\text{int-tanque}}}{2} = 11,905 [\text{in}]$$

$$E = 0,7$$

$$t_{rp} = \frac{30,188 [\text{psi}] * 11,905 [\text{in}]}{1,653 \times 10^4 [\text{psi}] * 0,7 - 0,6 * 30,188 [\text{psi}]} + \frac{1}{16} [\text{in}] = 0,094 [\text{in}]$$

$$t_p = \frac{1}{8} [\text{in}]$$

3.5.2.8.2 Espesor del tubo base.

Debido a que la aplicación es únicamente drenaje, se utiliza un TUBO NOMINAL NPS 1/2", SCH 40.

$$D_{\text{int}} = 0,622 [\text{in}]; \quad D_{\text{ext}} = 0,840 [\text{in}]; \quad e_{\text{tubo}} = 0,109 [\text{in}]$$

Para material del tubo se debe utilizar acero de tubería SA 106 "B" con una resistencia de:

$$S_t = 118 [\text{MPa}] = 1,711 \times 10^4 [\text{psi}]$$

En el cálculo del espesor del tubo se utiliza la misma expresión mostrada en la ecuación 3.14 para el recipiente base con la diferencia del radio interno, que viene a ser en este caso el del tubo, entonces:

$$R_{\text{int}} = \frac{D_{\text{int}}}{2}$$

$$t_n = \frac{P_d * R_{int}}{S_t * E - 0,6 * P_d} + CA = 0,063[in]$$

$$t_t = \frac{1}{8} [in]$$

Como $t_n < e_{tubo}$ entonces;

$$t_t = e_{tubo}$$

Según (ASME, 2013) si el agujero es menor a 2 [in] de diámetro, no se requiere refuerzo.

3.5.2.9 Recubrimiento del tanque.

Existen diferentes tipos de recubrimientos que pueden ser utilizados en las cubas electrolíticas, se basan en materiales poliméricos orgánicos formados por moléculas orgánicas gigantes que pueden deformarse hasta conseguir, formas deseadas por procesos de extrusión, moldeo o hilado (Alcaraz, 2005).

En el anexo 14 se presentan las opciones más importantes en el mercado ecuatoriano, desde un punto de vista de disponibilidad, costo, daño ambiental, temperatura de operación, de esta manera se determina que el **PVC** es el material adecuado para revestimiento de las paredes del tanque.

El plano y hoja de procesos de construcción de la cuba electrolítica se muestra en el anexo 15 y 16 respectivamente.

3.6 BASTIDORES (RACKS).

Se debe utilizar el mejor soporte que satisfaga los requerimientos de capacidad de corriente, rigidez, limitación de peso, colocación de las probetas, limitación de espacio y facilidad de construcción, un ejemplo de bastidor se muestra en la figura 16.

3.6.1 CARGA DE LAS PROBETAS.

El peso de las probetas a soportar es:

$$V_{probeta} = t_{probeta} * l_{probeta} * w_{probeta} = 2 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$\rho_{acero} = 7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$masa_{probeta} = \rho_{acero} * V_{probeta} = 0,157 [kg]$$

$$g = 9,807 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$peso_{probeta} = g * masa_{probeta} = 1,54 [N]$$

3.6.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COBRE ELECTROLÍTICO.

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas así como los módulos de Young de diferentes materiales utilizados en la industria son expuestas en el anexo 17 y 18 respectivamente, donde las propiedades mecánicas y módulo de elasticidad del cobre electrolítico se presentan a continuación.

$$\sigma_{adm-Cu} = 7 \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = 68,647 [MPa]$$

$$\sigma_{ult-Cu} = 22,5 \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] = 220,65 [MPa]$$

$$E_{Cu} = 110 [GPa]$$

3.6.3 PARÁMETROS DE DISEÑO Y FACTORES DE SEGURIDAD.

Por efectos de vibraciones mecánicas gracias al movimiento del mecanismo de agitación es recomendable diseñar los diferentes elementos del

sistema a diferentes condiciones como se explica en la tabla 14, de acuerdo a criterios de esfuerzo de diseño (ver anexo 19):

Tabla 14
Bastidores y barras conductoras.

ELEMENTO MECÁNICO	CRITERIO DE DISEÑO
Soportes (Bastidores)	Impacto
Barras conductoras	Estático

De acuerdo con el anexo 19, y como el diseño del bastidor se lo debe realizar por impacto, por efecto de las vibraciones y golpeteo que produce el mecanismo de agitación, el factor de seguridad de diseño de 12, es el más adecuado entonces:

$$FS_{soporte} = 12$$

Como el bastidor (rack) es sometido a tensión por las probetas el esfuerzo axial se lo calcula de mediante la ecuación 3.17 de esfuerzo axial:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$\sigma_{sop} = \frac{\text{peso}_{probeta}}{A_{sec-soporte}}$$

Al ingresar el factor de seguridad de impacto, y la resistencia última del cobre, la formula queda modificada de la siguiente forma mostrada en la ecuación 3.18:

$$\frac{\sigma}{FS} = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 3.18}$$

$$\frac{\sigma_{ult-Cu}}{FS_{soporte}} = \frac{\text{peso}_{probeta}}{A_{sec-soporte}}$$

3.6.4 SOPORTE.

Con el objeto de lograr un diseño adecuado y un proceso equilibrado de recubrimiento, es recomendable dejar hasta un máximo de 150 [mm] desde la parte inferior de la probeta hasta el fondo del tanque, y desde la parte superior de la pieza a galvanizar al nivel máximo del electrolito entre 50 [mm] a 75 [mm] de altura (Durney & Graham, 1985). Se realiza un promedio de éste rango e introduce un factor de seguridad en altura del bastidor de 25 [mm], la configuración escogida se muestra en la figura 22:

$$H_{superior} = \frac{5 [cm] + 7,5 [cm]}{2} = 6,25 [cm]$$

$$H_{fondo} = H_{electrolito} - H_{superior} - l_{probeta} = 3,75 [cm]$$

$$f_{soporte-barra} = 2,5 [cm]$$

$$H_{sobregancho} = f_{altura} + f_{soporte-barra} = 7,5 [cm]$$

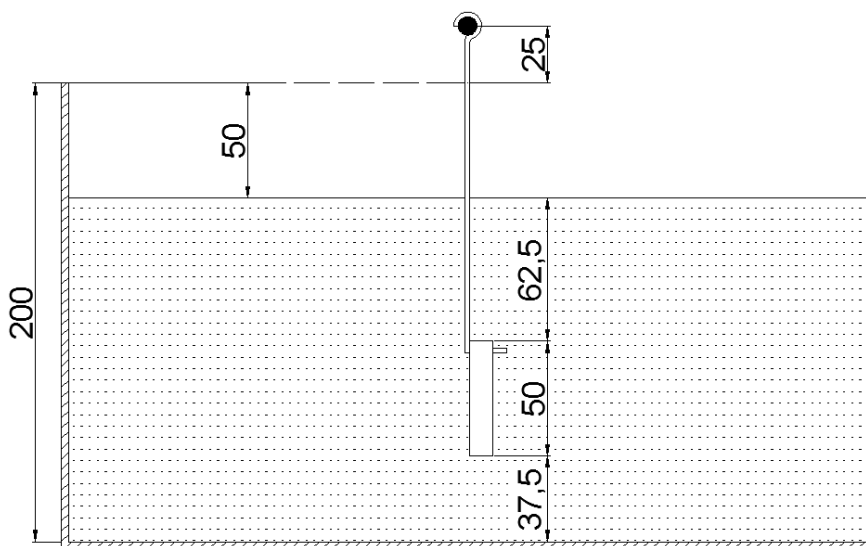


Figura 22 Alturas necesarias en el diseño de bastidores.

3.6.5 DISEÑO MECÁNICO DEL BASTIDOR.

3.6.5.1 Esfuerzo de diseño.

El esfuerzo de diseño del gancho:

$$A_{sec-soporte} = \frac{peso_{probeta} * FS_{soporte}}{\sigma_{ult-Cu}}$$

$$A_{sec-soporte} = \frac{1,54 [N] * 12}{220,65 * 10^6 [Pa]} = 8,375 * 10^{-8} [m^2] = 1,298 * 10^{-4} [in^2]$$

Se empieza el diseño de la sección del soporte con el menor espesor comercial para el cobre en HGB ACEROS INDUSTRIALES de 1/8":

$$t_{gancho} = \frac{1}{8} [in]$$

Como el ancho de la probeta es de 4 [cm], para un diseño estático robusto, el ancho del bastidor será la mitad:

$$w_{gancho} = \frac{w_{probeta}}{2} = 2 [cm] = 0,787 [in]$$

$$A_{sec-gancho} = t_{gancho} * w_{gancho} = 0,098 [in^2]$$

$$\therefore A_{sec-gancho} > A_{sec-soporte} \text{ (CUMPLE)}$$

3.6.6 BARRAS CONDUCTORAS.

3.6.6.1 Diseño eléctrico.

Para mantener una buena conducción eléctrica, (Durney & Graham, 1985) recomienda como densidad de corriente en la barra un valor de $1,5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$, resultando el mejor radio de curvatura al gancho, además se debe

realizar el diseño de la barra mediante análisis de resistencia mecánica para que cumpla los requerimientos mecánicos y eléctricos.

Para conocer el radio de curvatura mínimo que debe poseer la barra, se aplica la siguiente expresión matemática según (Durney & Graham, 1985), que viene dada por la corriente máxima entregada por el transformador entre la densidad de corriente:

$$\frac{I_{max}}{1,5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]} = A_{min} \quad \text{Ec. 3.19}$$

$$\frac{10[A]}{1,5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]} = 6,667 [mm^2] = 0,01 [in^2]$$

El radio de curvatura está dado por la ecuación 3.20:

$$R_{curvaturamin} = \sqrt{\frac{A_{min}}{\pi}} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$R_{curvaturamin} = \sqrt{\frac{A_{min}}{\pi}} = 0,057[in] = 1,45[mm]$$

Se procede a escoger el mayor para el diseño:

$$R_{curvatura} = \frac{1}{16} [in] = 1,587[mm]$$

Considerando que la capacidad de la fuente proporciona una mayor corriente, para evitar inconvenientes y que la barra soporte una mayor electricidad, se proporciona un factor de seguridad de dos (Ayala, Flores, & Mendoza, 2004).

$$R_{curvatura} = 2 * 1,587[mm] = 3,175[mm]$$

El diámetro de la barra es:

$$\phi_{barra} = 2 * 3,175[mm] = 6,35[mm] \rightarrow \frac{1}{4} [in]$$

3.6.6.2 Longitud del bastidor.

La longitud del gancho se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_{gancho} = H_{sobregancho} + H_{superior} + 2 * \pi * R_{curvatura} \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$L_{gancho} = 75[mm] + 62,5[mm] + 2 * \pi * (3,175[mm]) = 158 [mm]$$

Por maniobrabilidad y facilidad en la construcción se le dará una longitud final de **160 [mm]**.

$$L_{gancho} = 160 [mm]$$

3.6.6.3 Volumen y peso del bastidor.

El volumen del bastidor:

$$V_{gancho} = L_{gancho} * A_{sec-gancho} = 1,016 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$\rho_{Cu} = 8950 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Por lo tanto la masa del gancho:

$$masa_{gancho} = V_{gancho} * \rho_{Cu} = 0,091 [kg]$$

El peso del soporte:

$$peso_{gancho} = masa_{gancho} * g = 0,892 [N]$$

La verificación del esfuerzo axial es:

$$\sigma_{gancho} = \frac{peso_{probeta}}{A_{sec-gancho}} = 0,024 [MPa]$$

$$\frac{\sigma_{ult-Cu}}{FS_{soporte}} = 18,387 [MPa]$$

$$\therefore \sigma_{gancho} < \frac{\sigma_{ult-Cu}}{FS_{soporte}} \quad (\text{CUMPLE})$$

El cálculo de las cargas independientes que actúan en la barra de cobre es:

$$peso_{total} = peso_{gancho} + peso_{probeta}$$

$$peso_{total} = 0,892[N] + 1,54[N] = 2,431 [N]$$

3.6.6.4 Ánodo de zinc.

Para calcular el volumen del ánodo necesario para satisfacer las necesidades de producción, se analiza la capacidad de corriente anódica por unidad de producción (Cicek, 2013) p.160, expresado en la ecuación 3.22:

$$capacidad_{ánodo} = \frac{producción_{ánodo}}{masa_{ánodo}} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Dónde:

$$producción_{ánodo} \rightarrow [A * h] .$$

$$masa_{ánodo} \rightarrow [kg]$$

La eficiencia de capacidad de corriente anódica según (Cicek, 2013) p.160 está dada por:

$$\eta_{ánodo} = \frac{capacidad_real_{ánodo}}{capacidad_teórica_{ánodo}} \quad \text{Ec. 3.23}$$

De acuerdo con (Cicek, 2013) p.167 los ánodos de zinc tienen una capacidad de corriente teórica de $820 \left[\frac{A * h}{kg} \right]$ y una eficiencia del 90%, en el anexo 20 se muestran propiedades físicas, químicas y galvánicas de importantes materiales anódicos, entonces:

$$capacidad_teórica_{ánodo} = 820 \left[\frac{A * h}{kg} \right]$$

$$\eta_{ánodo} = 0,9$$

$$capacidad_real_{ánodo} = \eta_{ánodo} * capacidad_teórica_{ánodo} = 738 \left[\frac{A * h}{kg} \right]$$

La masa de ánodo requerida se calcula, para un tiempo estimando de producción y ensayos de 2 semanas laborables, es decir 10 días, 8 horas por cada día.

Siendo la corriente máxima del rectificador de 10 [A], entonces:

$$tiempo_{deposición} = 10 [días] * 8 \left[\frac{h}{día} \right] = 80[h]$$

Como son dos barras anódicas la corriente total de la fuente se divide de manera equivalente, obteniéndose la masa del ánodo necesaria:

$$masa_{ánodo} = \frac{\frac{I_{max}}{2} * tiempo_{deposición}}{capacidad_{ánodo}} = 0,542[kg]$$

$$\rho_{zinc} = 7140 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$V_{ánodonec} = \frac{masa_{ánodo}}{\rho_{zinc}} = 7,951 \times 10^{-5}[m^3]$$

Por comodidad y un rango de operación alto, se le da un espesor al ánodo de zinc de 1 [cm] y un ancho 10 [cm] por comodidad de espacio en el tanque:

$$t_{ánodo} = 1 [cm] ; \quad W_{ánodo} = 10 [cm]$$

$$H_{ánodo} = \frac{V_{ánodo}}{t_{ánodo} * W_{ánodo}} = 8 [cm]$$

3.6.6.4.1 Volumen y peso del ánodo.

$$V_{ánodo} = t_{ánodo} * W_{ánodo} * H_{ánodo} = 8 \times 10^{-5}[m^3]$$

La masa final del ánodo:

$$masa_{ánodo} = \rho_{zinc} * V_{ánodo} = 0,571[kg]$$

El peso del ánodo:

$$peso_{ánodo} = masa_{ánodo} * g = 5,602[N]$$

Para sostener los ánodos de manera equilibrada y no permitir movimientos por el peso de los mismos, se utilizan dos ganchos en cada extremo de la probeta, entonces la fuerza que debe soportar cada gancho es:

$$F_{gancho-ánodo} = \frac{peso_{ánodo}}{2} = 2,801[N]$$

Los ganchos no son sometidos a esfuerzos cíclicos ni de impacto ya que no se genera ningún movimiento dinámico en las barras anódicas, entonces el elemento se diseña de manera estática.

El factor de seguridad de los soportes del ánodo es:

$$FS_{soporte-ánodo} = 2$$

El área de la sección del soporte del ánodo es:

$$A_{soporte-ánodo} = \frac{F_{gancho-ánodo} * FS_{soporte-ánodo}}{\sigma_{adm-Cu}} = 1,265 \times 10^{-4}[in^2]$$

Se puede utilizar el dimensionamiento del gancho para la barra catódica con el objeto de reducir costos de fabricación y solo realizar una manufactura estándar.

$$\therefore A_{sec-gancho} > A_{soporte-ánodo} \text{ (CUMPLE)}$$

El peso del soporte del ánodo es:

$$peso_{soporte-ánodo} = F_{gancho-ánodo} + peso_{gancho} = 3,693[N]$$

3.6.6.5 Barra catódica.

El material para la barra debe ser conductor, entonces se utiliza cobre, evitando la existencia en mayor proporción de resistencias eléctricas en los contactos con los bastidores de las probetas.

La longitud de las orejas del tanque viene a ser el ancho de los perfiles atiesadores L 25x25x2 es:

$$L_{orejas} = 25 \text{ [mm]}$$

La longitud entre los soportes de las barras se muestra en la figura 23 y matemáticamente se expresa en la ecuación 3.24:

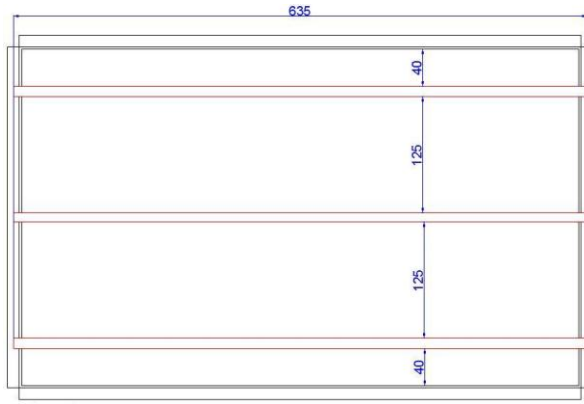


Figura 23 Vista superior del tanque.

$$L_{barra} = L_{tanque} + L_{orejas} + t_{tanque} \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$L_{barra} = 60 \text{ [cm]} + 2,5 \text{ [cm]} + 0,5 \text{ [cm]} = 63,0 \text{ [mm]}$$

La longitud final por motivos de seguridad y operatividad será de **635 [mm]**.

$$L_{barra} = 63,5 \text{ [cm]}$$

El espaciamiento de las probetas a lo largo de la viga está dado por:

$$\frac{L_{barra}}{num_{probetas} + 1} \quad \text{Ec. 3.25}$$

$$\frac{63,5 \text{ [cm]}}{4 + 1} = 12,7 \text{ [cm]}$$

La figura 24 muestra los diagramas de cortante y momento flector en la barra de cobre.

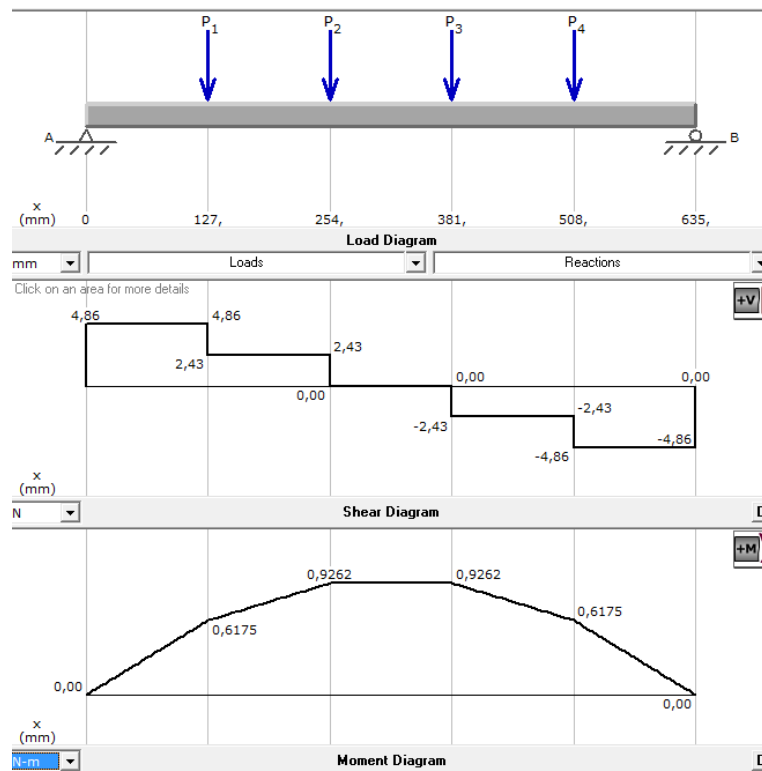


Figura 24 Fuerza cortante y momento flector (sin carga distribuida).

$$V_{maxcat} = 4,86 [N]$$

$$M_{maxcat} = 0,93 [Nm]$$

La ecuación que determina el esfuerzo axial por efectos de flexión se muestra en la ecuación 3.26:

$$\sigma_{viga} = \frac{M_{viga} * c}{I_{viga}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

$$\frac{I_{barra}}{c} = Zx_{barra} \quad \rightarrow \quad \sigma_{barra} = \frac{M_{barra}}{Zx_{barra}}$$

$$Zx_{barra} = \frac{\frac{1}{4} * \pi * (r_{barra})^4}{r_{barra}} = \frac{1}{4} * \pi * (r_{barra})^3$$

Para tener un diseño robusto, se recomienda usar un factor de seguridad a tensión para la barra de dos, para que no existan vibraciones en el sistema de agitación ni excesivas deflexiones.

$$FS_{barracat} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{\sigma_{barracat}} = 2$$

$$\sigma_{barracat} = \frac{68,647 [MPa]}{2} = 34,323 [MPa]$$

El mismo criterio en el factor de seguridad a tensión se aplica en cortante sabiendo que éste esfuerzo es la mitad del esfuerzo normal como lo expresa la ecuación 3.27:

$$S_{sy-Cu} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{2} \quad \text{Ec. 3.27}$$

$$S_{sy-Cu} = \frac{68,647 [MPa]}{2} = 34,323 [MPa]$$

$$FS_{barracat-cortante} = 2$$

$$\sigma_{barracat-cortante} = \frac{S_{sy-Cu}}{FS_{barracat-cortante}}$$

$$\sigma_{barracat-cortante} = \frac{34,323 [MPa]}{2} = 17,162 [MPa]$$

Se selecciona el valor del esfuerzo menor para el diseño de la barra:

$$\sigma_{barracat} = \sigma_{barracat-cortante} = 17,162 [MPa]$$

$$Zx_{barracat} = \frac{M_{maxcat}}{\sigma_{barracat}} = \frac{0,78 [Nm]}{17,162 [MPa]} = 3,307 \times 10^{-3} [in^3]$$

$$Zx_{barra} = \frac{1}{4} * \pi * (r_{barra})^3 \Leftrightarrow r_{barracat} = \sqrt[3]{\frac{4 * Zx_{barracat}}{\pi}} = 0,161 [in]$$

El diámetro de la barra es:

$$\phi_{barracat} = 2 * r_{barracat} = 0,323 [in] \rightarrow \phi_{barracat} = \frac{3}{8} [in]$$

El volumen de la barra catódica es:

$$V_{barracat} = (\phi_{barracat})^2 * \frac{\pi}{4} * L_{barra} = 4,525 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$peso_{barracat} = \rho_{Cu} * V_{barracat} * g = 3,971 [N]$$

Para obtener la carga distribuida se procede de la siguiente manera:

$$cargadist_{barracat} = \frac{peso_{barracat}}{L_{barracat}} = 6,254 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Se realiza un re-cálculo con la carga distribuida del peso de la propia viga, la figura 25 muestra los diagramas de cortante y momento flector en la barra de cobre.

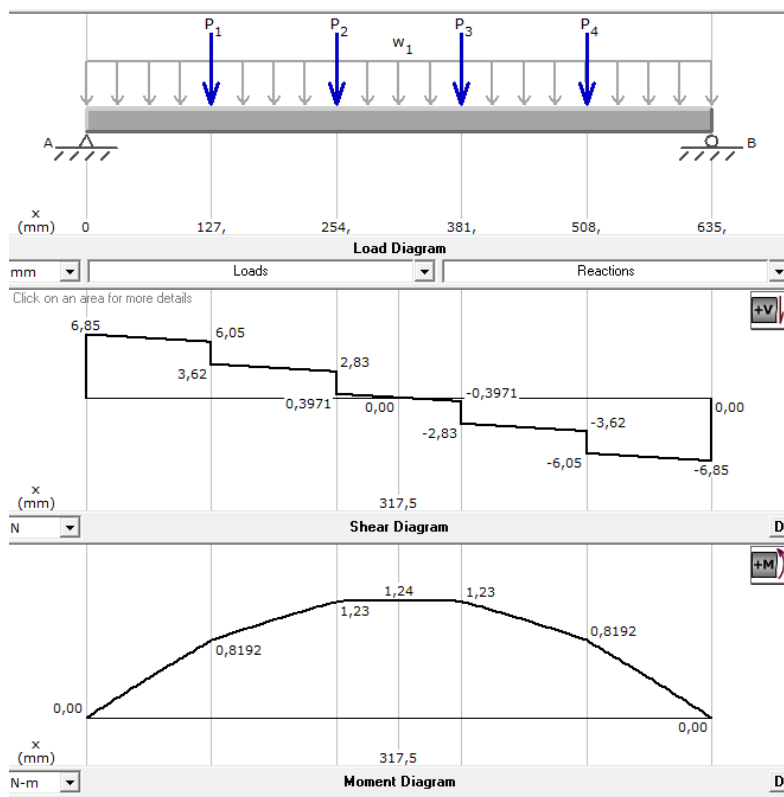


Figura 25 Fuerza cortante y momento flector (con carga distribuida).

La fuerza cortante máxima:

$$V_{maxcat} = 6,85 [N]$$

El momento flector máximo:

$$M_{maxcat} = 1,25 [Nm]$$

Se selecciona el valor del esfuerzo a cortante para el diseño de la barra:

$$Zx_{barracat} = \frac{M_{maxcat}}{\sigma_{barra}} = 4.445 \times 10^{-3} in^3$$

$$r_{barracat} = \sqrt[3]{\frac{4 * Zx_{barracat}}{\pi}} = 0,178 [in]$$

$$\phi_{barracat} = 2 * r_{barracat} = 0,356[in] \quad \rightarrow \quad \phi_{barracat} = \frac{3}{8} [in]$$

El esfuerzo flector final es:

$$\sigma_{barracat-flex} = \frac{M_{maxcat} * \frac{\phi_{barracat}}{2}}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{\phi_{barracat}}{2}\right)^4} = 14,734 [MPa]$$

El esfuerzo cortante máximo en la barra se determina mediante la ecuación 3.28:

$$\tau_{barra} = \frac{4}{3} * \frac{V_{maxviga}}{A_{viga}} \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$A_{barracat} = \frac{\pi * (\phi_{barracat})^2}{4} = 0,11 [in^2] = 7,097 * 10^{-5} [m^2]$$

$$\tau_{barracat} = \frac{4}{3} * \frac{V_{maxcat}}{A_{barracat}} = \frac{4}{3} * \frac{6,85 [N]}{7,097 * 10^{-5} [m^2]} = 0,128 [MPa]$$

$$\sigma_x = \sigma_{barracat-flex}$$

$$\sigma_y = 0 [MPa]$$

$$\tau_{xy} = \tau_{barracat}$$

Se obtienen los esfuerzos principales que se expresan en la ecuación 3.29:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$\sigma_{1cat} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = 14,735 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{2cat} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = -1,115 \times 10^{-3} \text{ [MPa]}$$

Se aplica teoría de fallas de criterio optimista de Von Misses para esfuerzos en el plano, y se muestra en la ecuación 3.30.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} \quad \text{Ec. 3.30}$$

$$\sigma_{VMcat} = 14,735 \text{ [MPa]}$$

$$FS_{finalcat} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{\sigma_{VM}} = 4,659 \text{ (CUMPLE)}$$

3.6.6.5.1 Límite de flexión en barra catódica.

De acuerdo con (Mott, 2009) p. 459, existe un rango de deflexión de acuerdo a la longitud total de una viga, para una parte general de máquina, el que se halla explicado en las ecuaciones 3.31 y 3.32, donde:

$$RANGO = 0,0005 \text{ a } 0,003 \left[\frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ ó } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right]$$

El límite inferior:

$$\delta_{min} = -\frac{0,0005 \text{ [mm]}}{1 \text{ [mm]}} * L_{viga} \quad \text{Ec. 3.31}$$

El límite superior:

$$\delta_{max} = -\frac{0,003 [mm]}{1[mm]} * L_{viga} \quad \text{Ec. 3.32}$$

Entonces:

$$\delta_{mincat} = -\frac{0,0005 [mm]}{1[mm]} * L_{barra} = -0,317 [mm]$$

$$\delta_{maxcat} = -\frac{0,003 [mm]}{1[mm]} * L_{barra} = -1,905 [mm]$$

El cálculo de la deflexión máxima en la barra anódica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$y_{max} = \frac{-P_{max} * (L_{viga})^3}{48 * E * I_{viga}} \quad \text{Ec. 3.33}$$

$$I_{barracat} = \frac{\pi * (\phi_{barracat})^4}{64} = 4,04 \times 10^{-10} [m^4]$$

$$peso_{maxcat} = 4 * peso_{gancho} + 4 * peso_{probeta} + cargadist_{barracat} * L_{barra}$$

$$peso_{maxcat} = 13,697 [N]$$

$$y_{maxcat} = \frac{-peso_{maxcat} * (L_{barra})^3}{48 * E_{Cu} * I_{barracat}} = -1,644 [mm] \quad (\text{CUMPLE})$$

Para la construcción del bastidor se divide el diámetro comercial de la barra entre dos y se obtiene el radio de curvatura:

$$R_{curvatura-gancho} = \frac{\phi_{barracat}}{2} = 4,762 [mm]$$

3.6.6.6 Barras anódicas.

La figura 26 muestra los diagramas de cortante y momento flector en la barra anódica.

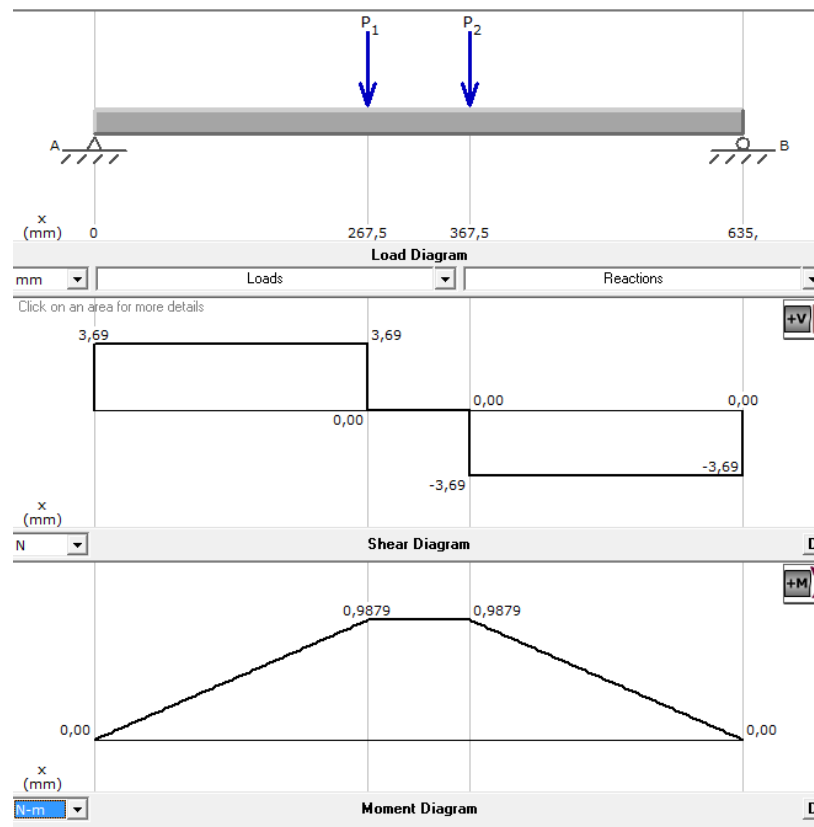


Figura 26 Fuerza cortante y momento flector (sin carga distribuida).

La fuerza cortante máxima:

$$V_{maxan} = 3,7 \text{ [N]}$$

El momento flector máximo:

$$M_{maxan} = 1 \text{ [Nm]}$$

Para obtener el esfuerzo a tensión que debe soportar la barra, se aplica un criterio de seguridad a tensión:

$$\sigma_{barraan} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{FS_{barraan}} = 34,323 \text{ [MPa]}$$

De la misma forma, para conseguir el esfuerzo a cortante que debe soportar la barra, se aplica un criterio de seguridad a cortante:

$$S_{sy-Cu} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{2} = 34,323 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{barraan-cortante} = \frac{S_{sy-Cu}}{FS_{barraan-cortante}} = 17,162 \text{ [MPa]}$$

Se selecciona el valor del esfuerzo a cortante para el diseño de la barra:

$$\sigma_{barraan} = \sigma_{barraan-cortante}$$

$$Zx_{barraan} = \frac{M_{maxan}}{\sigma_{barraan}} = 3,556 \times 10^{-3} \text{ [in}^3\text{]}$$

$$r_{barraan} = \sqrt[3]{\frac{4 * Zx_{barraan}}{\pi}} = 0,165 \text{ [in]}$$

El diámetro de la barra es:

$$\phi_{barraan} = 2 * r_{barraan} = 0,331 \text{ [in]} \quad \rightarrow \quad \phi_{barraan} = \frac{3}{8} \text{ [in]}$$

Como se obtienen los mismos parámetros se determina que la carga distribuida viene a ser la misma del caso de la barra catódica entonces:

$$cargadist_{barraan} = \frac{peso_{barraan}}{L_{barraan}} = 6,254 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Se procede con el re-cálculo con la carga distribuida del peso de la propia barra.

La figura 27 muestra los diagramas de cortante y momento flector en la barra anódica.

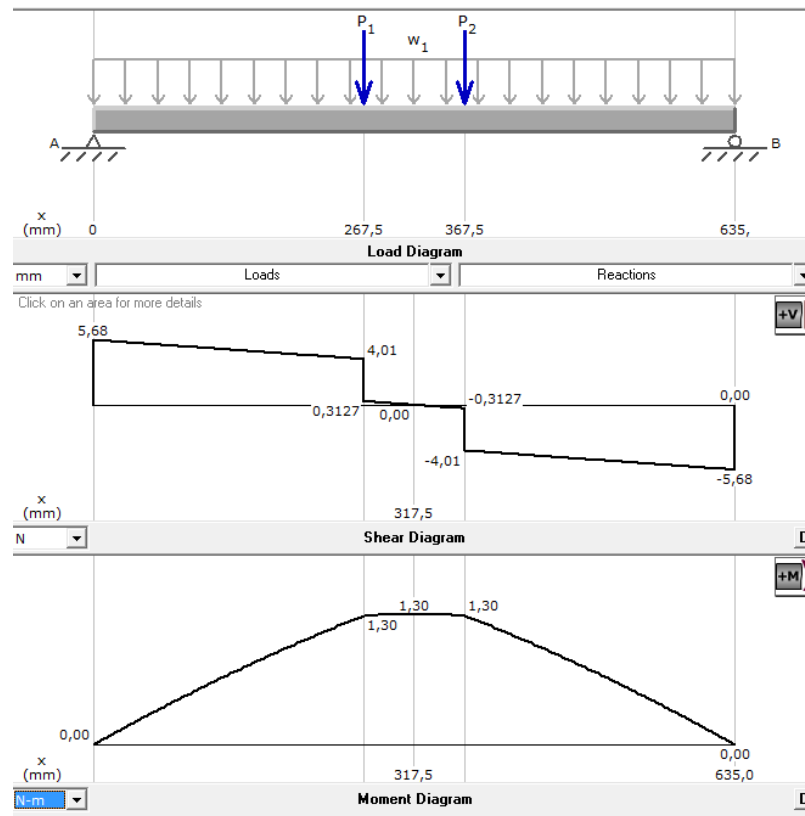


Figura 27 Fuerza cortante y momento flector (con carga distribuida).

La fuerza cortante máxima:

$$V_{maxan} = 5,7 [N]$$

El momento flector máximo:

$$M_{maxan} = 1,3 [Nm]$$

Se selecciona el valor del esfuerzo a cortante para el diseño de la barra:

$$\sigma_{barraan} = \sigma_{barraan-cortante}$$

$$Zx_{barraan} = \frac{M_{maxan}}{\sigma_{barraan}} = 4,623 \times 10^{-3} [in^3]$$

$$r_{barraan} = \sqrt[3]{\frac{4 * Zx_{barraan}}{\pi}} = 0,181 [in]$$

$$\phi_{barraan} = 2 * r_{barraan} = 0,361[in] \rightarrow \phi_{barraan} = \frac{3}{8} [in]$$

El esfuerzo flector final es:

$$\sigma_{barraan-flex} = \frac{M_{maxan} * \frac{\phi_{barraan}}{2}}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{\phi_{barraan}}{2}\right)^4} = 15,323 [MPa]$$

El esfuerzo cortante máximo en la barra:

$$A_{barraan} = 0,11 [in^2]$$

$$\tau_{barraan} = 0,107 [MPa]$$

$$\sigma_x = \sigma_{barraan-flex}$$

$$\sigma_y = 0 [MPa]$$

$$\tau_{xy} = \tau_{barraan}$$

$$\sigma_{1an} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = 15,324 [MPa]$$

$$\sigma_{2an} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = -7,424 \times 10^{-4} [MPa]$$

$$\sigma_{VMa} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} = 15,324 [MPa]$$

$$FS_{final} = \frac{\sigma_{adm-Cu}}{\sigma_{VM}} = 4,48 \quad (\text{CUMPLE})$$

3.6.6.6.1 Límite de flexión en las barras anódicas.

El límite inferior:

$$\delta_{min} = -\frac{0,0005 [mm]}{1[mm]} * L_{barra} = -0,317 [mm]$$

El límite superior:

$$\delta_{max} = -\frac{0,003 [mm]}{1[mm]} * L_{barra} = -1,905 [mm]$$

La deflexión máxima en la barra catódica está dada por:

$$I_{barraan} = \frac{\pi * (\phi_{barraan})^4}{64} = 4,04 \times 10^{-10} [m^4]$$

$$peso_{maxan} = 2 * peso_{gancho} + peso_{anodo} + cargadist_{barraan} * L_{barra} = 11,356 [N]$$

$$y_{maxan} = \frac{-peso_{maxan} * (L_{barra})^3}{48 * E_{Cu} * I_{barraan}} = -1,363 [mm]$$

(CUMPLE)

Para la construcción del gancho se divide este diámetro comercial para dos y se obtiene el radio de curvatura del soporte:

$$R_{curvatura-gancho} = \frac{\phi_{barraan}}{2} = 4,762 [mm]$$

3.6.6.7 Pérdidas eléctricas en elementos conductores.

3.6.6.7.1 Pérdidas de voltaje en las barras conductoras.

De acuerdo con (Durney & Graham, 1985) la fórmula para calcular las pérdidas de voltaje y potencia en los elementos conductores es:

$$E_{voltaje} = 9,03 \times 10^{-6} * \left(\frac{L * I}{A}\right) \quad \text{Ec. 3.34}$$

Dónde:

$$L \rightarrow [ft]$$

$$I \rightarrow [A]$$

$$A \rightarrow [in^2]$$

Entonces:

$$E_{voltaje} = 9,03 \times 10^{-6} * \left(\frac{L_{barra} * I_{max}}{A_{barra}} \right)$$

Sustituyendo los valores:

$$E_{voltaje} = 9,03 \times 10^{-6} * \left(\frac{2,083 * 10}{0,11} \right) = 1,71 \times 10^{-3} [V]$$

3.6.6.7.2 Pérdidas de voltaje en los soportes.

$$E_{voltaje} = 9,03 \times 10^{-6} * \left(\frac{L_{gancho} [ft] * I_{max} [A]}{A_{sec-gancho} [in^2]} \right)$$

Sustituyendo los valores:

$$E_{voltaje} = 9,03 \times 10^{-6} * \left(\frac{0,518 * 10}{0,049} \right) = 4,773 \times 10^{-4} [V]$$

La pérdida total de voltaje es igual a la suma de las pérdidas de voltaje en la barra y en los soportes.

$$E_{total} = 1,71 \times 10^{-3} [V] + 4,773 \times 10^{-4} [V] = 2,187 \times 10^{-3} [V]$$

Como se observa, las pérdidas de voltaje en el circuito son **mínimas**.

3.6.6.7.3 Pérdidas de calor en elementos conductores.

Las pérdidas de potencia de un circuito eléctrico, pueden ocurrir debido al calentamiento propio de los conductores por corrientes parásitas, calor que se libera en forma de calor (Durney & Graham, 1985), y puede ser calculado mediante la ecuación 3.35:

$$W_{perdidas} = (I^2 * \rho_{elec} * l_{conductor}) \quad \text{Ec. 3.35}$$

Como el circuito es en paralelo y se dividen las corrientes;

$$I = \frac{I_{max}}{2} = 5 [A]$$

La resistividad eléctrica del cobre es:

$$\rho_{elec-Cu} = 7 \times 10^{-8} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$$

$$L_{conductor} = \frac{L_{barra}}{2} + L_{gancho} = 0,478 [m]$$

$$W_{perdidas} = 2 * \left((5[A])^2 * 7 \times 10^{-8} \left[\frac{\Omega}{m} \right] * 0,478 [m] \right) = 1,671 \times 10^{-6} [W]$$

Las pérdidas de energía por calor son **despreciables**.

3.7 MECANISMO DE AGITACIÓN.

3.7.1 SÍNTESIS DEL MECANISMO.

El diseño del sistema de agitación se basa en un mecanismo biela-manivela en línea, cuyo objetivo es calcular el torque necesario para desplazar longitudinalmente la barra catódica, y seleccionar el motor que impulsará el mecanismo.

De acuerdo con (Alcaraz, 2005) p. 87, la velocidad de la barra debe tener una rapidez de vaivén en un rango entre $3 \left[\frac{m}{min} \right]$ a $7 \left[\frac{m}{min} \right]$, entonces se calcula el promedio:

$$Vb = \frac{3 \left[\frac{m}{min} \right] + 7 \left[\frac{m}{min} \right]}{2} = 5 \left[\frac{m}{min} \right]$$

A partir del promedio de rapidez del mecanismo, se calcula la aceleración general necesaria para impulsar el sistema en los diferentes puntos para el diseño del mecanismo, de acuerdo con el desplazamiento de la barra.

Se desea obtener un movimiento simétrico de la barra, tanto en avance como retorno, un desplazamiento horizontal de 10 [cm] en vaivén, por limitaciones del tanque, entonces, se realiza una síntesis de mecanismos de las longitudes de los eslabones, (Myszka, 2012), pp. 109 y 110, proporciona las siguientes ecuaciones para diseñar las longitudes adecuadas para un movimiento compensado:

$$d = 10 \text{ cm}$$

$$Vb = \frac{d}{T_{\text{ciclo}}} \quad \text{Ec. 3.36}$$

$$T_{\text{ciclo}} = \frac{d}{Vb} = 1,2 \text{ [s]}$$

$$\Delta T_{\text{ciclo}} = 2 * T_{\text{ciclo}} \quad \text{Ec. 3.37}$$

$$\Delta T_{\text{ciclo}} = 2,4 \text{ [s]}$$

Con este parámetro se procederá a calcular la velocidad angular del mecanismo.

$$\omega_i = (\Delta T_{\text{ciclo}})^{-1} * 60 \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$\omega_i = 25 \text{ [RPM]}$$

Por motivos económicos y de disponibilidad se utilizará un motor con una velocidad constante de 24[RPM]:

$$\omega_2 = 24 \text{ [RPM]}$$

3.7.1.1 Longitudes de los eslabones.

La longitud de la manivela debe ser la mitad de la distancia total recorrida en avance o retorno de la corredera (Myszka, 2012):

$$r_2 = \frac{d}{2} \quad \text{Ec. 3.39}$$

$$r_2 = \frac{10 \text{ [cm]}}{2} = 5 \text{ [cm]}$$

De acuerdo (Myszka, 2012), se recomienda para la biela una longitud equivalente a tres veces la longitud de la manivela:

$$r_3 = 3 * r_2 \quad \text{Ec. 3.40}$$

$$r_3 = 3 * 5[cm] = 15[cm]$$

Las longitudes los eslabones se presentan en la figura 28 (sintetizado final de longitudes del mecanismo).

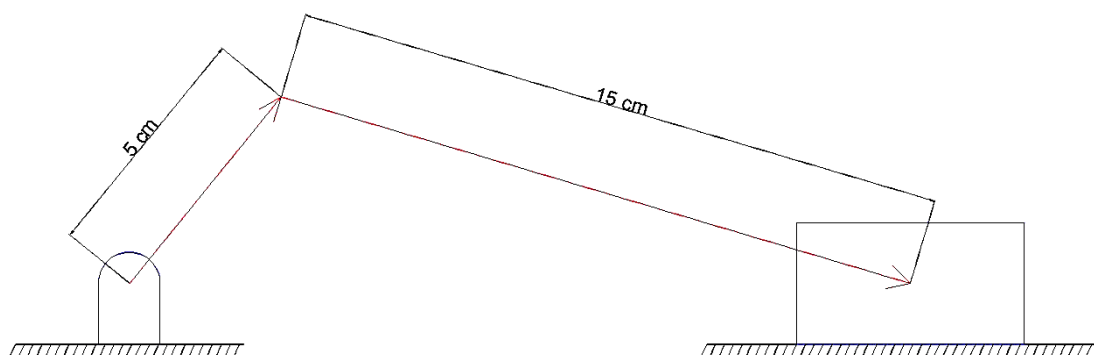


Figura 28 Síntesis de longitudes del mecanismo de agitación.

3.7.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO.

El diseño cinemático se basa en el mecanismo de “cuatro barras”, con la excepción de que un eslabón es fijo (bancada), como muestra la figura 29:

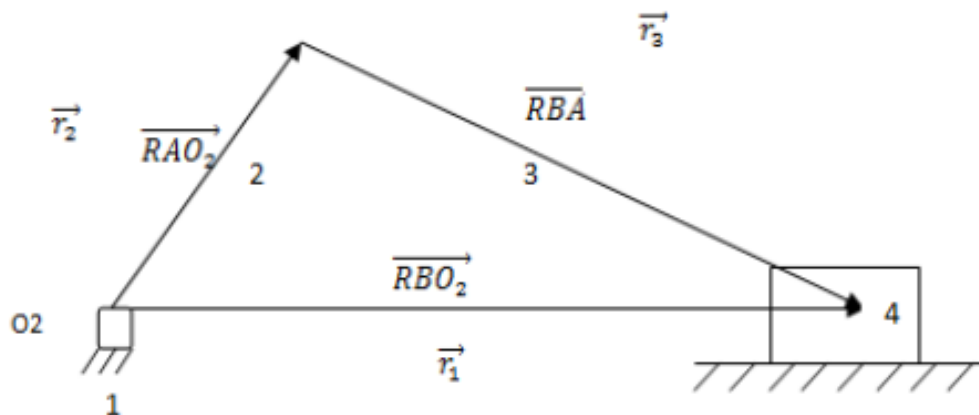


Figura 29 Esquema de análisis de posición del mecanismo.

3.7.2.1 Análisis de posición.

El análisis de posición se basa principalmente en la siguiente ecuación vectorial:

$$\vec{R}_1 = \vec{R}_2 + \vec{R}_3 \quad \text{Ec. 3.41}$$

Aplicando la identidad matemática de Leonhard Euler (1707-1783), con el fin de expresar la ecuación vectorial en su forma compleja se obtiene:

$$\begin{aligned} \vec{R} &= R * e^{j\theta} & \text{Ec. 3.42} \\ r_1 * e^{j\theta_1} &= r_2 * e^{j\theta_2} + r_3 * e^{j\theta_3} \end{aligned}$$

Si la identidad de Euler es:

$$\begin{aligned} e^{j\theta} &= \cos(\theta) + j * \sin(\theta) & \text{Ec. 3.43} \\ e^{j\theta} &= \cos(\theta) + j * \sin(\theta) \\ \theta_1 &= 0^\circ \end{aligned}$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} r_1 * [\cos(\theta_1) + j \sin(\theta_1)] &= r_2 * [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)] + r_3 * [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)] \\ r_1 &= r_2 * [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)] + r_3 * [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)] \end{aligned}$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_2 * \cos(\theta_2) + r_3 * \cos(\theta_3) \\ 0 &= r_2 * \sin(\theta_2) + r_3 * \sin(\theta_3) \end{aligned}$$

Despejando θ_3 :

$$\theta_3(\theta_2) = \text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right) \quad \text{Ec. 3.44}$$

$$r_1(\theta_2) = r_2 * \cos(\theta_2) + r_3 * \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right) \quad \text{Ec. 3.45}$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore \theta_3(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ -9,594^\circ \\ -16,779^\circ \\ -19,471^\circ \\ -16,779^\circ \\ -9,594^\circ \\ 0^\circ \\ 9,594^\circ \\ 16,779^\circ \\ 19,471^\circ \\ 16,779^\circ \\ 9,594^\circ \\ 0^\circ \end{bmatrix} \therefore r_1(\theta_2) = \begin{bmatrix} 20 \\ 19,120 \\ 16,861 \\ 14,142 \\ 11,861 \\ 10,460 \\ 10 \\ 10,460 \\ 11,861 \\ 14,142 \\ 16,861 \\ 19,120 \\ 20 \end{bmatrix} \text{ [cm]}$$

3.7.2.2 Análisis de velocidad.

$$\omega_2 = 24[\text{RPM}] * \left(\frac{2\pi}{60}\right) = 2,513 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}}\right]$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{R}_1) = \frac{d}{dt}(\vec{R}_2 + \vec{R}_3) \quad \text{Ec. 3.46}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{R}_1) = \frac{d}{dt}(\vec{R}_2) + \frac{d}{dt}(\vec{R}_3)$$

$$\frac{d}{dt}(r_1 e^{j\theta_1}) = \frac{d}{dt}(r_2 e^{j\theta_2}) + \frac{d}{dt}(r_3 e^{j\theta_3})$$

$$r_1 * \frac{d}{dt}(e^{j\theta_1}) + e^{j\theta_1} \frac{d}{dt}(r_1) = r_2 * \frac{d}{dt}(e^{j\theta_2}) + r_3 * \frac{d}{dt}(e^{j\theta_3})$$

$$r_1 e^{j\theta_1} * \frac{d}{dt}(j\theta_1) + e^{j\theta_1} V_1 = r_2 e^{j\theta_2} \frac{d}{dt}(j\theta_2) + r_3 e^{j\theta_3} \frac{d}{dt}(j\theta_3)$$

$$jr_1 \omega_1 e^{j\theta_1} + V_1 e^{j\theta_1} = jr_2 \omega_2 e^{j\theta_2} + jr_3 \omega_3 e^{j\theta_3}$$

$$\omega_1 = 0 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}}\right]$$

Entonces:

$$V_1 e^{j\theta_1} = jr_2 \omega_2 e^{j\theta_2} + jr_3 \omega_3 e^{j\theta_3} \quad \text{Ec. 3.47}$$

$$V_1 [\cos(\theta_1) + j \sin(\theta_1)] = jr_2 \omega_2 [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)] + jr_3 \omega_3 [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)]$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$V_1 = -r_2\omega_2 \sin(\theta_2) - r_3\omega_3 \sin(\theta_3)$$

$$0 = r_2\omega_2 \cos(\theta_2) + r_3\omega_3 \cos(\theta_3)$$

Despejando ω_3 :

$$\omega_3 = \frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos(\theta_3)}$$

$$\omega_3(\theta_2) = \frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \quad \text{Ec. 3.48}$$

$$V_1(\theta_2) = -r_2\omega_2 \sin(\theta_2) - r_3 \left[\frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \right] \sin\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right) \quad \text{Ec. 3.49}$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore \omega_3(\theta_2) = \begin{bmatrix} -0,838 \\ -0,736 \\ -0,438 \\ 0 \\ 0,438 \\ 0,736 \\ 0,838 \\ 0,736 \\ 0,438 \\ 0 \\ -0,438 \\ -0,736 \\ -0,838 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right] \therefore V_1(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,874 \\ -7,666 \\ -7,540 \\ -5,393 \\ -2,666 \\ 0 \\ 2,666 \\ 5,393 \\ 7,540 \\ 7,666 \\ 4,874 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]$$

La figura 30 muestra la variación de la velocidad, a medida que cambia el ángulo de rotación de la manivela θ_2 .

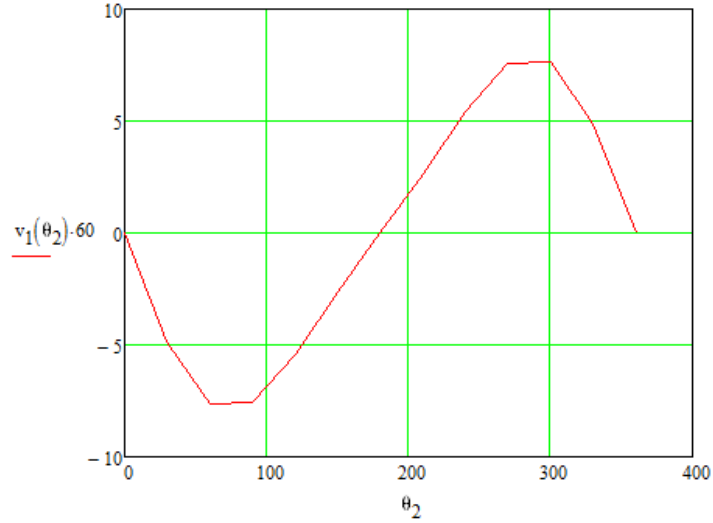


Figura 30 Velocidad en $\left[\frac{m}{min}\right]$ en función del ángulo de giro.

3.7.2.3 Análisis de aceleración.

$$V_1 e^{j\theta_1} = jr_2 \omega_2 e^{j\theta_2} + jr_3 \omega_3 e^{j\theta_3}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{V}_1 e^{j\theta_1}) = \frac{d}{dt}(r_2 \omega_2 e^{j\theta_2}) + \frac{d}{dt}(r_3 \omega_3 e^{j\theta_3}) \quad \text{Ec. 3.50}$$

$$\frac{d}{dt}(\vec{V}_1) * e^{j\theta_1} + j e^{j\theta_1} \vec{V}_1 \frac{d}{dt}(\theta_1) = jr_2 * \frac{d}{dt}(\omega_2) e^{j\theta_2} - r_2 \omega_2 e^{j\theta_2} * \frac{d}{dt}(\theta_2) +$$

$$jr_3 * \frac{d}{dt}(\omega_3) e^{j\theta_3} - r_3 \omega_3 e^{j\theta_3} * \frac{d}{dt}(\theta_3)$$

$$\vec{a}_1 * e^{j\theta_1} + j e^{j\theta_1} \vec{V}_1 * \omega_1 = jr_2 * (\alpha_2) e^{j\theta_2} - r_2 * (\omega_2^2) e^{j\theta_2} + jr_3 * (\alpha_3) e^{j\theta_3} - r_3 * (\omega_3^2) e^{j\theta_3} \quad \text{Ec. 3.51}$$

$$\omega_1 = 0 \left[\frac{rad}{seg} \right] \wedge \alpha_2 = 0 \left[\frac{rad}{seg^2} \right]$$

$$a_1 * [\cos(\theta_1) + j \sin(\theta_1)] = -r_2 (\omega_2^2) * [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)] +$$

$$jr_3 (\alpha_3) * [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)] - r_3 (\omega_3^2) * [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)]$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$a_1 = -r_2(\omega_2^2) \cos(\theta_2) - r_3(\alpha_3) \sin(\theta_3) - r_3(\omega_3^2) \cos(\theta_3)$$

$$0 = -r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3(\alpha_3) \cos(\theta_3) - r_3(\omega_3^2) \sin(\theta_3)$$

Despejando α_3 :

$$\alpha_3 = \frac{r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3(\omega_3^2) \sin(\theta_3)}{r_3 \cos(\theta_3)}$$

$$a_3(\theta_2) = \frac{r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3 \left[\frac{-r_2 \omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \right]^2 \sin\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \quad \text{Ec. 3.52}$$

$a_1(\theta_2)$

$$= -r_2(\omega_2^2) \cos(\theta_2)$$

$$-r_3 \left[\frac{r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3 \left[\frac{-r_2 \omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \right]^2 \sin\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \right] \sin\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right) - \quad \text{Ec. 3.53}$$

$$r_3 \left[\frac{-r_2 \omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)} \right]^2 \cos\left(\text{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore \alpha_3(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,976 \\ 1,847 \\ 2,233 \\ 1,847 \\ 0,976 \\ 0 \\ -0,976 \\ -1,847 \\ -2,233 \\ -1,847 \\ -0,976 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right] \therefore a_1(\theta_2) = \begin{bmatrix} -0,421 \\ -0,329 \\ -0,105 \\ 0,112 \\ 0,210 \\ 0,218 \\ 0,211 \\ 0,218 \\ 0,210 \\ 0,112 \\ -0,105 \\ -0,329 \\ -0,421 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{\text{seg}^2} \right]$$

La figura 31 muestra la variación de la aceleración, a medida que cambia el ángulo de rotación de la manivela θ_2 .

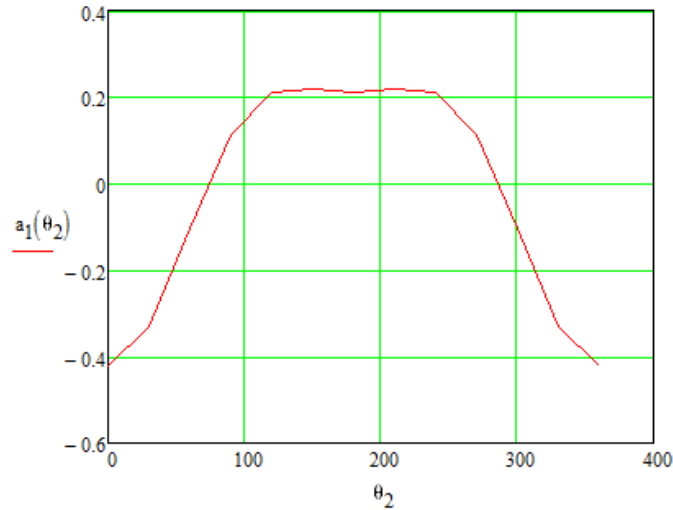


Figura 31 Aceleración en $\left[\frac{m}{seg^2}\right]$ en función del ángulo de giro.

3.7.2.4 Comparación de resultados con software.

Se analiza la rapidez y aceleración del mecanismo, utilizando un motor a 24 [RPM] equivalente a $2,513 \left[\frac{rad}{seg}\right]$ en un tiempo de 40 [seg] de simulación.

$$V_{1max} = 0,128 \left[\frac{m}{seg}\right] * 60 = 7,68 \left[\frac{m}{min}\right]$$

$$V_{1min} = -0,128 \left[\frac{m}{seg}\right] * 60 = -7,68 \left[\frac{m}{min}\right]$$

Tanto la rapidez como aceleración en valores máximos y mínimos, se puede observar mediante la figura mostrada en el anexo 21.

3.7.3 ANÁLISIS DINÁMICO.

3.7.3.1 Análisis de la manivela.

El análisis de un mecanismo con elementos sólidos rígidos, se realiza por medio de un programa CAD 3D con el fin de obtener las respectivas propiedades de acuerdo al diseño en la síntesis de mecanismos, por consiguiente se obtendrán las mismas con material de plástico ABS aplicado en impresión 3D en la biela y material acrílico utilizado en corte láser en la manivela, ya que la manufactura es simple, menos costosa y viable en producción de pocos elementos pequeños.

Las propiedades de la manivela se observan en el anexo 22:

$$m_2 = 0.451 [kg]$$

$$I_{zz2} = 0.002262 [kg * m^2]$$

$$W_{g2} = m_2 * g$$

$$W_{g2} = 0.451 [kg] * 9,81 \left[\frac{m}{seg^2} \right] = 4,43 [N]$$

Los vectores posición con respecto al centro de gravedad (\vec{R}_{12} , \vec{R}_{32}), la rapidez angular (ω_2), las fuerzas que interactúan con la manivela, además del torque mínimo que el motor DC debe suministrar a la misma, se muestran en la figura 32:

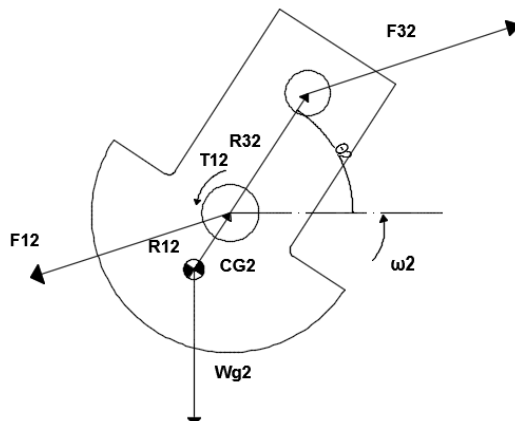


Figura 32 Fuerzas y torques dinámicos en la manivela.

$$|\overrightarrow{R_{12}}| = 0,000141[m]$$

El vector posición está determinado en la ecuación 3.54:

$$\overrightarrow{R_{32}} = \overrightarrow{R_2} + \overrightarrow{R_{12}} \quad \text{Ec. 3.54}$$

Las ecuaciones de análisis aplicando trigonometría son:

$$R_{32x}(\theta_2) = |\overrightarrow{R_{32}}| * \cos(\theta_2) \quad R_{32y}(\theta_2) = |\overrightarrow{R_{32}}| * \sin(\theta_2)$$

$$R_{12x}(\theta_2) = |\overrightarrow{R_{12}}| * \cos(\theta_2) \quad R_{12y}(\theta_2) = |\overrightarrow{R_{12}}| * \sin(\theta_2)$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore R_{12x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 1,41 \times 10^{-4} \\ 1,221 \times 10^{-4} \\ 7,05 \times 10^{-5} \\ 0 \\ -7,05 \times 10^{-5} \\ -1,221 \times 10^{-4} \\ -1,41 \times 10^{-4} \\ -1,221 \times 10^{-4} \\ -7,05 \times 10^{-5} \\ 0 \\ 7,05 \times 10^{-5} \\ 1,221 \times 10^{-4} \\ 1,41 \times 10^{-4} \end{bmatrix} [m] \therefore R_{12y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 7,05 \times 10^{-5} \\ 1,221 \times 10^{-4} \\ 1,41 \times 10^{-4} \\ 1,221 \times 10^{-4} \\ 7,05 \times 10^{-5} \\ 0 \\ -7,05 \times 10^{-5} \\ -1,221 \times 10^{-4} \\ -1,41 \times 10^{-4} \\ -1,221 \times 10^{-4} \\ -7,05 \times 10^{-5} \\ 0 \end{bmatrix} [m]$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore R_{32x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0,05014 \\ 0,04342 \\ 0,02507 \\ 0 \\ -0,02507 \\ -0,04342 \\ -0,05014 \\ -0,04342 \\ -0,02507 \\ 0 \\ 0,02507 \\ 0,04342 \\ 0,05014 \end{bmatrix} [m] \therefore R_{32y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,02507 \\ 0,04342 \\ 0,05014 \\ 0,04342 \\ 0,02507 \\ 0 \\ -0,02507 \\ -0,04342 \\ -0,05014 \\ -0,04342 \\ -0,02507 \\ 0 \end{bmatrix} [m]$$

3.7.3.1.1 Aceleración del centro de gravedad de la manivela.

Aplicando la derivada de segundo orden a la posición del centro de gravedad de la manivela se obtiene la expresión de la aceleración que se muestra en la ecuación 3.55:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{R_{CG2}} &= \overrightarrow{R_{12}} \\ \overrightarrow{R_{CG2}} &= |\overrightarrow{R_{CG2}}| * e^{j\theta_2} \\ \frac{d}{dt}(\overrightarrow{R_{CG2}}) &= \frac{d}{dt}(|\overrightarrow{R_{CG2}}| * e^{j\theta_2}) \\ \overrightarrow{V_{CG2}} &= |\overrightarrow{R_{CG2}}| * \left[\frac{d}{dt}(e^{j\theta_2}) \right] \\ \overrightarrow{V_{CG2}} &= |\overrightarrow{R_{CG2}}| * e^{j\theta_2} * (j\omega_2) \\ \frac{d}{dt}(\overrightarrow{V_{CG2}}) &= \frac{d}{dt}[|\overrightarrow{R_{CG2}}| * e^{j\theta_2} * (j\omega_2)] \\ \overrightarrow{a_{CG2}} &= j * |\overrightarrow{R_{CG2}}| * \left[\omega_2 * \left(\frac{d}{dt}(e^{j\theta_2}) \right) + e^{j\theta_2} * \left(\frac{d}{dt}(\omega_2) \right) \right] \\ \overrightarrow{a_{CG2}} &= j * |\overrightarrow{R_{CG2}}| * j * (\omega_2^2) * e^{j\theta_2} + \alpha_2 * e^{j\theta_2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.55}$$

$$\alpha_2 = 0 \left[\frac{rad}{seg^2} \right]$$

$$\overrightarrow{a_{CG2}} = -|\overrightarrow{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) * e^{j\theta_2}$$

$$\overline{a_{CG2}} = -|\overline{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) * [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)]$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$\overline{a_{CG2x}} = -|\overline{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) \cos(\theta_2)$$

$$a_{CG2x}(\theta_2) = -|\overline{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) \cos(\theta_2) \quad \text{Ec. 3.56}$$

$$\overline{a_{CG2y}} = -|\overline{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) \sin(\theta_2)$$

$$a_{CG2y}(\theta_2) = -|\overline{R_{CG2}}| * (\omega_2^2) \sin(\theta_2) \quad \text{Ec. 3.57}$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore a_{CG2x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} -8,906x10^{-4} \\ -7,713x10^{-4} \\ -4,453x10^{-4} \\ 0 \\ 4,453x10^{-4} \\ 7,713x10^{-4} \\ 8,906x10^{-4} \\ 7,713x10^{-4} \\ 4,453x10^{-4} \\ 0 \\ -4,453x10^{-4} \\ -7,713x10^{-4} \\ -8,906x10^{-4} \end{bmatrix} \left[\frac{m}{seg^2} \right] \therefore a_{CG2y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ -4,453x10^{-4} \\ -7,713x10^{-4} \\ -8,906x10^{-4} \\ -7,713x10^{-4} \\ -4,453x10^{-4} \\ 0 \\ 4,453x10^{-4} \\ 7,713x10^{-4} \\ 8,906x10^{-4} \\ 7,713x10^{-4} \\ 4,453x10^{-4} \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{seg^2} \right]$$

3.7.3.2 Análisis de la biela.

De la misma forma que con la manivela se procede a usar los datos que proporciona el software CAD (ver anexo 23), obteniendo la masa y la inercia respectivas:

$$m_3 = 0.052464 [kg]$$

$$I_{zz3} = 0.000134 [kg * m^2]$$

$$W_{g3} = m_3 * g$$

$$W_{g3} = 0.052464 * 9,81 \left[\frac{m}{seg^2} \right] = 0,515 [N]$$

Los vectores posición con respecto al centro de gravedad (\vec{R}_{23} , \vec{R}_{43}), la aceleración del mismo (\vec{a}_{CG3}), y las fuerzas que interactúan con la biela, se muestran en la figura 33:

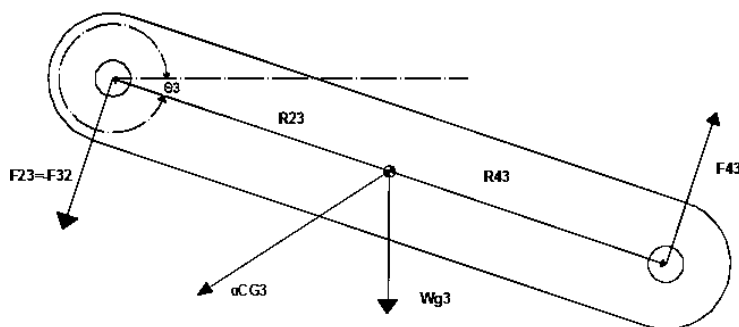


Figura 33 Fuerzas dinámicas en la biela.

$$|\vec{R}_{23}| = 7,5[cm]$$

$$\vec{R}_{43} = \vec{R}_3 - \vec{R}_{23} \quad \text{Ec. 3.58}$$

$$|\vec{R}_{23}| = |\vec{R}_{23}|$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$R_{23x}(\theta_2) = -|\vec{R}_{23}| * \cos \left[a \sin \left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3} \right) \right] \quad R_{23y}(\theta_2) = -|\vec{R}_{23}| * \sin \left[a \sin \left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3} \right) \right]$$

$$R_{43x}(\theta_2) = |\vec{R}_{43}| * \cos \left[a \sin \left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3} \right) \right] \quad R_{43y}(\theta_2) = |\vec{R}_{43}| * \sin \left[a \sin \left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3} \right) \right]$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore R_{23x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} -0,075 \\ -0,074 \\ -0,072 \\ -0,071 \\ -0,072 \\ -0,074 \\ -0,075 \\ -0,074 \\ -0,072 \\ -0,071 \\ -0,072 \\ -0,074 \\ -0,075 \end{bmatrix} [m] \therefore R_{23y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,013 \\ 0,022 \\ 0,025 \\ 0,022 \\ 0,013 \\ 0 \\ -0,013 \\ -0,022 \\ -0,025 \\ -0,022 \\ -0,013 \\ 0 \end{bmatrix} [m]$$

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore R_{43x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0,075 \\ 0,074 \\ 0,072 \\ 0,071 \\ 0,072 \\ 0,074 \\ 0,075 \\ 0,074 \\ 0,072 \\ 0,071 \\ 0,072 \\ 0,074 \\ 0,075 \end{bmatrix} [m] \therefore R_{43y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,013 \\ -0,022 \\ -0,025 \\ -0,022 \\ -0,013 \\ 0 \\ 0,013 \\ 0,022 \\ 0,025 \\ 0,022 \\ 0,013 \\ 0 \end{bmatrix} [m]$$

3.7.3.2.1 Aceleración del centro de gravedad de la biela.

Aplicando la derivada de segundo orden a la posición del de gravedad de la biela se obtiene la expresión de la aceleración que se muestra en la ecuación 3.59:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{R_{CG3}} &= \overrightarrow{R_2} + \overrightarrow{R_{23}} \\ \overrightarrow{R_{CG3}} &= |\overrightarrow{R_2}| * e^{j\theta_2} + |\overrightarrow{R_{23}}| * e^{j\theta_3} \\ \frac{d}{dt}(\overrightarrow{R_{CG3}}) &= \frac{d}{dt}(|\overrightarrow{R_2}| * e^{j\theta_2}) + \frac{d}{dt}(|\overrightarrow{R_{23}}| * e^{j\theta_3}) \\ \overrightarrow{V_{CG3}} &= j|\overrightarrow{R_2}| * \omega_2 * e^{j\theta_2} + j|\overrightarrow{R_{23}}| * \omega_3 * e^{j\theta_3} \\ \frac{d}{dt}(\overrightarrow{V_{CG3}}) &= \frac{d}{dt}(j|\overrightarrow{R_2}| * \omega_2 * e^{j\theta_2}) + \frac{d}{dt}(j|\overrightarrow{R_{23}}| * \omega_3 * e^{j\theta_3}) \\ \overrightarrow{a_{CG3}} &= j * |\overrightarrow{R_2}| * (j\omega_2^2 e^{j\theta_2} + \alpha_2 e^{j\theta_2}) + j * |\overrightarrow{R_{23}}| * (j\omega_3^2 e^{j\theta_3} + \alpha_3 e^{j\theta_3}) \quad \text{Ec. 3.59} \\ \alpha_2 &= 0 \left[\frac{rad}{seg^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{a_{CG3}} &= -|\overrightarrow{R_2}| \omega_2^2 e^{j\theta_2} - |\overrightarrow{R_{23}}| \omega_3^2 e^{j\theta_3} + j|\overrightarrow{R_{23}}| \alpha_3 e^{j\theta_3} \\ \overrightarrow{a_{CG3}} &= -|\overrightarrow{R_2}| \omega_2^2 [\cos(\theta_2) + j \sin(\theta_2)] - |\overrightarrow{R_{23}}| \omega_3^2 [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)] + \\ & \quad j|\overrightarrow{R_{23}}| \alpha_3 [\cos(\theta_3) + j \sin(\theta_3)] \end{aligned}$$

$$\overrightarrow{a_{CG3x}} = -|\overrightarrow{R_2}|\omega_2^2 \cos(\theta_2) - |\overrightarrow{R_{23}}|\omega_3^2 \cos(\theta_3) - |\overrightarrow{R_{23}}|\alpha_3 \sin(\theta_3)$$

$$\overrightarrow{a_{CG3y}} = -|\overrightarrow{R_2}|\omega_2^2 \sin(\theta_2) - |\overrightarrow{R_{23}}|\omega_3^2 \sin(\theta_3) + |\overrightarrow{R_{23}}|\alpha_3 \cos(\theta_3)$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$\overrightarrow{a_{CG3x}} = -|\overrightarrow{R_2}|\omega_2^2 \cos(\theta_2) - |\overrightarrow{R_{23}}|\left[\frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right]^2 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right) -$$

$$|\overrightarrow{R_{23}}|\left[\frac{r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3\left[\frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right]^2 \sin\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right] \sin\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)$$

Ec.3.60

$$\overrightarrow{a_{CG3y}} = -|\overrightarrow{R_2}|\omega_2^2 \sin(\theta_2) - |\overrightarrow{R_{23}}|\left[\frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right]^2 \sin\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right) +$$

$$|\overrightarrow{R_{23}}|\left[\frac{r_2(\omega_2^2) \sin(\theta_2) + r_3\left[\frac{-r_2\omega_2 \cos(\theta_2)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right]^2 \sin\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}{r_3 \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)}\right] \cos\left(\operatorname{asin}\left(\frac{-r_2 * \sin(\theta_2)}{r_3}\right)\right)$$

Ec.3.61

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore a_{CG3x}(\theta_2) = \begin{bmatrix} -0,368 \\ -0,301 \\ -0,132 \\ 0,056 \\ 0,184 \\ 0,246 \\ 0,263 \\ 0,246 \\ 0,184 \\ 0,056 \\ -0,132 \\ -0,301 \\ -0,368 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{seg^2}\right] \therefore a_{CG3y}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,079 \\ -0,137 \\ -0,158 \\ -0,137 \\ -0,079 \\ 0 \\ 0,079 \\ 0,137 \\ 0,158 \\ 0,137 \\ 0,079 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{seg^2}\right]$$

3.7.3.3 Fuerzas dinámicas en los eslabones.

3.7.3.3.1 Fuerzas dinámicas en la manivela.

Se aplica leyes de Newton en la manivela y se obtienen las ecuaciones vectoriales dinámicas de fuerzas y torques:

$$\sum \vec{F}_2 = m_2 * \vec{a}_2$$

$$\sum F_{x2} = m_2 * a_{CG2x} \Leftrightarrow F_{12x} + F_{32x} = m_2 * a_{CG2x}$$

$$\sum F_{y2} = m_2 * a_{CG2y} \Leftrightarrow -W_{g2} + F_{12y} + F_{32y} = m_2 * \overline{a_{CG2y}}$$

$$\sum \vec{M}_2 = I_{zz2} * \vec{\alpha}_2 \Leftrightarrow \vec{T}_{12} + (\vec{R}_{32} \times \vec{F}_{32}) + (\vec{R}_{12} \times \vec{F}_{12}) = I_{zz2} * \vec{\alpha}_2$$

$$\alpha_2 = 0 \left[\frac{rad}{seg^2} \right]$$

De esta manera se obtiene la ecuación general en la manivela:

$$T_{12} + (R_{32x} * F_{32y} - R_{32y} * F_{32x}) + (R_{12x} * F_{12y} - R_{12y} * F_{12x}) = 0 \quad \text{Ec. 3.62}$$

Ecuaciones vectoriales:

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 * a_{CG2x} \quad \text{Ec. 3.63}$$

$$-W_{g2} + F_{12y} + F_{32y} = m_2 * a_{CG2y} \quad \text{Ec. 3.64}$$

$$T_{12} + (R_{32x} * F_{32y} - R_{32y} * F_{32x}) + (R_{12x} * F_{12y} - R_{12y} * F_{12x}) = 0 \quad \text{Ec. 3.65}$$

3.7.3.3.2 Fuerzas dinámicas en la biela.

El mismo procedimiento se presenta en la biela, determinándose las ecuaciones vectoriales dinámicas de fuerzas y torques:

$$\sum \vec{F}_3 = m_3 * \vec{a}_3$$

$$F_{23} = -F_{32}$$

$$\sum \vec{F}_{x3} = m_3 * \vec{a}_{CG3x} \Leftrightarrow F_{43x} - F_{32x} = m_3 * a_{CG3x}$$

$$\sum \vec{F}_{y3} = m_3 * \vec{a}_{CG3y} \Leftrightarrow -W_{g3} + F_{43y} - F_{32y} = m_3 * a_{CG3y}$$

$$\sum \vec{M}_3 = I_{zz3} * \vec{\alpha}_3 \Leftrightarrow (\vec{R}_{23} \times -\vec{F}_{32}) + (\vec{R}_{43} \times \vec{F}_{43}) = I_{zz3} * \vec{\alpha}_3$$

$$-(R_{23x} * F_{32y} - R_{23y} * F_{32x}) + (R_{43x} * F_{43y} - R_{43y} * F_{43x}) = I_{zz3} * \alpha_3$$

$$R_{43x} * F_{43y} - R_{43y} * F_{43x} - R_{23x} * F_{32y} + R_{23y} * F_{32x} = I_{zz3} * \alpha_3 \quad \text{Ec. 3.66}$$

Ecuaciones vectoriales:

$$F_{43x} - F_{32x} = m_3 * a_{CG3x} \quad \text{Ec. 3.67}$$

$$-W_{g3} + F_{43y} - F_{32y} = m_3 * a_{CG3y} \quad \text{Ec. 3.68}$$

$$R_{43x} * F_{43y} - R_{43y} * F_{43x} - R_{23x} * F_{32y} + R_{23y} * F_{32x} = I_{zz3} * \alpha_3 \quad \text{Ec. 3.69}$$

3.7.3.3.3 Fuerzas dinámicas en la corredera (barra catódica).

La aceleración del centro de gravedad (\vec{a}_{CG4}), y las fuerzas que interactúan con la corredera, se muestran en la figura 34:

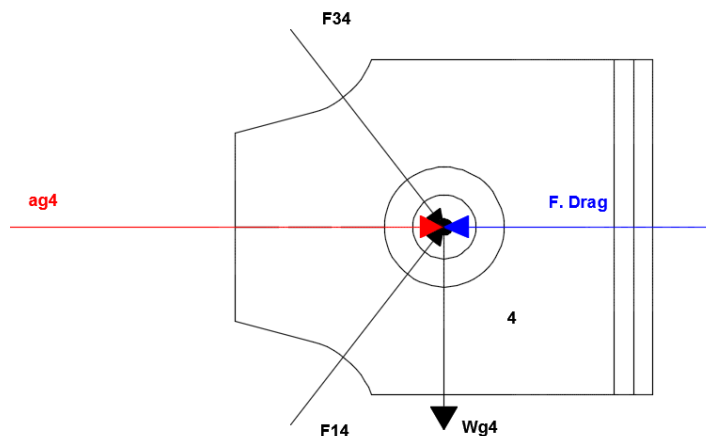


Figura 34 Fuerzas dinámicas en la corredera (barra catódica).

Las propiedades físicas son obtenidas del análisis mecánico del conjunto barra catódica, probeta y bastidores a fin obtener la masa total del sistema, la fuerza necesaria y torque en el motor DC.

$$m_4 = \frac{\text{peso}_{\text{maxcat}}}{g} = \frac{13,697}{9,801} 1,4 \text{ [kg]}$$

$$\sum \vec{F}_4 = m_4 * \vec{a}_4$$

$$F_{34} = -F_{43}$$

$$\sum \vec{F}_{x4} = m_4 * \vec{a}_{CG4x} \Leftrightarrow F_{14x} - F_{43x} - F_{DRAG} = m_4 * a_{CG4x}$$

$$\sum \vec{F}_{y4} = 0 \Leftrightarrow -W_{g4} - F_{43y} + F_{14y} = 0$$

Para el análisis dinámico del mecanismo, el peso de la corredera no debe ser tomado en cuenta en la matriz de fuerzas y torques dinámicas, ya que interviene únicamente en el análisis estático del sistema, entonces desde el punto de vista dinámico se tiene:

$$F_{14y} = F_{43y}$$

La fuerza de rozamiento, donde intervienen los dos soportes de plástico ABS está dada por:

$$F_{14x} = \mu_{ABS} * F_{14y}$$

Entonces:

$$\mu_{ABS} * F_{14y} - F_{43x} - F_{DRAG} = m_4 * a_{CG4x} \quad \text{Ec. 3.70}$$

Las ecuaciones de análisis son:

$$\mu_{ABS} * F_{14y} - F_{43x} = m_4 * a_{CG4x} + F_{DRAG} \quad \text{Ec. 3.71}$$

$$F_{14y} = F_{43y} \quad \text{Ec. 3.72}$$

3.7.3.3.1 Fuerza hidrodinámica de resistencia o arrastre (Drag).

“Cualquier cuerpo, de cualquier forma, cuando se sumerge en una corriente de fluido experimentará fuerzas y momentos” (White, 2004).

Como en el sistema de agitación existe una oposición del fluido, en el interior del tanque llamada Fuerza “Drag”.

Esta fuerza de oposición se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_{DRAG} = C_D * \frac{1}{2} * (\rho * V^2 * A) ; \quad \text{si } Re > 1000 \quad \text{Ec. 3.73}$$

Dónde:

F_{drag} : Fuerza de arrastre.

C_d : Coeficiente geométrico de arrastre.

ρ : Densidad del fluido.

A : Área de incidencia de la fuerza “Drag”.

V : Rapidez de las líneas de corriente del fluido.

Re: Número de Reynolds.

Este fenómeno se basa para números de Reynolds mayor a 1000, caso contrario no existen análisis válidos para regímenes menores a este rango, y se procede a partir de métodos numéricos o software de simulación con elementos finitos (White, 2004) p. 428.

Para el análisis se toma como valor referencial la velocidad máxima del sistema de agitación $7,7 \left[\frac{m}{min} \right]$ ($0,128 \left[\frac{m}{seg} \right]$), y fluido de trabajo al electrolito.

$$V_{barrera} = 0,128 \left[\frac{m}{seg} \right]$$

3.7.3.3.1.1 Número de Reynolds.

Número adimensional, que permite caracterizar el movimiento de un fluido, ya sea en régimen laminar, transición o turbulento. Concepto introducido por George Stokes en 1851 y nombrado por Osborne Reynolds (1842-1912), matemáticamente se define:

$$Re = \frac{V * L_c}{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. 3.74}$$

Dónde:

Re: Número de Reynolds.

V: Rapidez de las líneas de corriente del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

3.7.3.3.1.2 Viscosidad dinámica y densidad del electrolito.

El valor de la viscosidad dinámica se tomará el del agua a 16°C, ya que es el componente más influyente de la solución con una concentración mayor al

85%, entonces interpolando con los valores de la tabla de temperaturas A-9 (Propiedades de agua saturada) mostrada en el anexo 9:

$$\mu_{ZSC} = 0,0011 \left[\frac{kg}{m * s} \right]$$

La densidad de la solución es la calculada previamente a partir de la ecuación 26.

$$\rho_{ZSC} = 1060 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.7.3.3.3.1.3 Longitud característica.

La longitud característica L_c del cuerpo en interacción con el fluido en una placa rectangular es el ancho de cara de ataque, en éste caso el de las probetas de 4[cm] (0,04[m]) entonces el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{0,128 \left[\frac{m}{seg} \right] * 0,04[m]}{\frac{0,0011 \left[\frac{kg}{m * seg} \right]}{1060 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}} = 4934 \quad \text{Laminar}$$

Siendo para todos los ángulos:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore Re(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 3131 \\ 4925 \\ 4844 \\ 3465 \\ 1713 \\ 0 \\ 1713 \\ 3465 \\ 4844 \\ 4925 \\ 3131 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.7.3.3.3.1.4 Coeficiente de arrastre y área de ataque.

Para la obtención del coeficiente de forma, existen tablas y gráficas en función del número de Reynolds, para diferentes tipos de superficies o sólidos,

que puedan ser sometidos en el interior de un fluido, las mismas que simplifican el análisis. De esta forma se obtiene el valor de dicho coeficiente para un valor de Reynolds de 4934 (ver anexo 24), y sabiendo que la forma de las probetas es el de una placa rectangular plana aproximadamente:

$$C_D = 3$$

El área de ataque viene a ser el producto del ancho por la altura de la probeta entonces:

$$Area_{ataque} = l_{probeta} * w_{probeta} = 0,05[cm] * 0,04[cm] = 2 * 10^{-3}[m^2]$$

Entonces:

$$F_{DRAG} = C_D * \frac{1}{2} * (\rho_{ZSC} * V_{barra}^2 * Area_{ataque})$$

$$F_{DRAG} = 3 * \frac{1}{2} * \left(1060 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * \left(0,128 \left[\frac{m}{seg} \right] \right)^2 * 2 * 10^{-3}[m^2] \right) = 0,052 [N]$$

Como son cuatro probetas inmersas en el electrolito:

$$F_{DRAGtotal} = 4 * 0,052[N] = 0,21[N]$$

3.7.3.3.1.5 Simulación por elementos finitos.

Por comprobación se realizó una simulación, en un software de elementos finitos (ver anexo 25), donde se obtuvo las presiones de arrastre sobre las cuatro superficies, notándose dos tipos de niveles de presión, siendo el más influyente en el primer espécimen de acero con un valor de 9,62 [Pa], por otro lado el resto de probetas denotan una presión de 3,6 [Pa] aproximadamente. De esta manera se obtienen las siguientes fuerzas de resistencia:

$$P_{drag1} = 9,62[Pa]$$

$$P_{drag2,3,4} = 3,6[Pa]$$

$$F_{DRAGsim} = P_{DRAG1} * Area_{ataque} + 3 * P_{drag2,3,4} * Area_{ataque}$$

$$F_{DRAGsim} = 9,62[Pa] * 2 * 10^{-3}[m^2] + 3 * 3,6[Pa] * 2 * 10^{-3}[m^2]$$

$$F_{DRAGsim} = 0,041[N]$$

Se selecciona el mayor valor obtenido de la fuerza de arrastre, con un valor de **0,21[N]**.

3.7.3.3.2 Coeficiente de fricción estático.

El plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), por ser el material que compone tanto a la biela y a los aisladores principalmente, y es la superficie de contacto con la que interactúa la barra catódica de cobre en necesario conocer su coeficiente de fricción estático, para obtener las fuerzas de rozamiento en los dos soportes de rollos, la tabla 15 muestra diferentes coeficientes de fricción estáticos de diversos materiales poliméricos.

Tabla 15
Coeficientes de fricción estáticos de polímeros.

Material	Coeficiente de Fricción
PVC	0,6
PMMA	0,53
ABS	0,48
PA 6	0,41
PA 6.6	0,41
PSU	0,39
PC	0,38
PVDF	0,34

Fuente: (Sánchez, 2014)

Como la fuerza de fricción siempre está en contra del movimiento, ya sea en avance o retorno de la barra catódica se puede definir un patrón de función dinámica de la misma.

Si el mecanismo se encuentra en los primeros 180°, la fuerza de fricción es positiva, caso contrario, cuando supera media vuelta de la manivela será negativa:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore \mu_{ABS}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0,48 \\ 0,48 \\ 0,48 \\ 0,48 \\ 0,48 \\ 0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \\ -0,48 \end{bmatrix}$$

3.7.3.3.4 Solución de las ecuaciones vectoriales.

El siguiente paso es efectuar la matriz dinámica del sistema, a fin de obtener todas las fuerzas y torques en cada una de las posiciones del mecanismo con las 8 ecuaciones previamente planteadas, y se muestra en la ecuación 3.75:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{12y} & R_{12x} & -F_{32y} & R_{32x} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{23y} & -R_{23x} & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \pm\mu_{ABS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{14y} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 * a_{cg2x} \\ W_2 + m_2 * a_{cg2y} \\ I_{zz2} * \alpha_2 \\ m_3 * a_{cg3x} \\ W_3 + m_3 * a_{cg3y} \\ I_{zz3} * \alpha_3 \\ m_4 * a_{cg4x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec.3.75}$$

La solución de ésta ecuación matricial se realizó mediante un algoritmo en Mathcad aplicando las propiedades de las matrices, para las diferentes posiciones del mecanismo en el rango de 0° a 360° (ver anexo 26), además se puede observar el diagrama real de torques en el anexo 27.

La propiedad de las matrices se muestra en la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 [M(\theta)] * [F(\theta)] &= [C(\theta)] \\
 [F(\theta)] &= [M(\theta)]^{-1}[C(\theta)]
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.76}$$

Siendo:

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 150^\circ \\ 180^\circ \\ 210^\circ \\ 240^\circ \\ 270^\circ \\ 300^\circ \\ 330^\circ \\ 360^\circ \end{bmatrix} \therefore T_{motor}(\theta_2) = \begin{bmatrix} 0,0124 \\ 0,0222 \\ 9,0569 \times 10^{-3} \\ -0,0105 \\ -0,0183 \\ -0,0172 \\ -0,0124 \\ -6,9561 \times 10^{-3} \\ 5,9507 \times 10^{-4} \\ 3,2399 \times 10^{-3} \\ -4,26541 \times 10^{-3} \\ -5,9014 \times 10^{-3} \\ 0,0124 \end{bmatrix} [Nm]$$

$$T_{mreal} = \frac{0,0222[Nm] - 0,0183[Nm]}{2} = 0,002[Nm]$$

3.7.3.3.5 Potencia útil, arranque y real del motor DC.

3.7.3.3.5.1 Potencia de arranque.

Para calcular la potencia de arranque y real se parte de un valor de aceleración angular de la manivela con un tiempo inicial de arranque de 3 [seg].

$$t_{arranque} = 3[seg]$$

De acuerdo con (Mayacela & Otañez, 2013) p. 158 la potencia de arranque en un motor DC, se determina por la siguiente ecuación:

$$P_{arranque} = I * \alpha * \omega \tag{Ec. 3.77}$$

$$P_{arranque} = I_2 * \alpha_2 * \omega_2$$

$$I_2 = 0.002035[kg * m^2]; \quad \alpha_2 = \frac{\omega_2}{t_{arranque}} = \frac{2,513 \left[\frac{rad}{seg} \right]}{3[seg]} = 0,84 \left[\frac{rad}{seg^2} \right]$$

$$P_{arranque} = 0.002035[kg * m^2] * 0,84 \left[\frac{rad}{seg^2} \right] * 2,513 \left[\frac{rad}{seg} \right] = 0,0043 [W]$$

3.7.3.3.5.2 Potencia útil.

La potencia útil del sistema viene a ser la que se produce por el producto del torque medio en la manivela y la velocidad angular de la misma entonces:

$$P_{\acute{u}til} = T_{mreal} * \omega_2 \quad \text{Ec. 3.78}$$

$$P_{\acute{u}til} = 0,002[N * m] * 2,513 \left[\frac{rad}{seg} \right] = 0,00503 [W]$$

3.7.3.3.5.3 Potencia real.

La potencia real necesaria para permitir el arranque y el movimiento constante del mecanismo es la sumatoria de la potencia de arranque y útil:

$$P_{real} = P_{arranque} + P_{\acute{u}til} \quad \text{Ec. 3.79}$$

$$P_{real} = 0,0043 [W] + 0,00503 [W] = 0,00933 [W] = 0.000013 [ehp]$$

3.7.3.3.5.4 Selección del motor.

Se utilizará un motor con las características mostradas en la tabla 16, y figura 35:

Tabla 16
Características del motor DC.

MOTOR ELÉCTRICO DC	
Marca	PeeiMoger
Modelo	SF 71512
Potencia	160 [W]
Peso	5 [kg]
Velocidad en vacío	3000 [RPM]

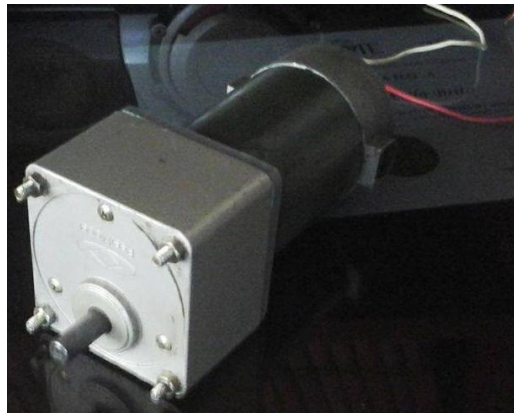


Figura 35 Motor DC PeeiMoger 160 W (3000[RPM]).

Como la velocidad en vacío es de 3000 [RPM] se puede utilizar un dispositivo electrónico de regulador de velocidad, para permitir reducir la misma a lo requerido de 24 [RPM] y evitar el diseño e implementación de un reductor de velocidad.

3.7.3.3.5.5 Volante de inercia.

De acuerdo con (Norton, 2009), no se requiere del dimensionamiento de un volante motor o volante de inercia ya que los pares obtenidos son muy pequeños y no existe una gran variación entre los valores máximos y mínimos con respecto al torque promedio de 0,002 [Nm].

3.8 EQUIPO DE CALENTAMIENTO Y TERMOSTATO.

Los factores importantes para la selección del sistema de calentamiento son:

- Medio para calentamiento: Electricidad o vapor sobrecalentado.
- Tipo de serpentín.
- Materiales de construcción: Resistentes a la corrosión y compatibles con los reactivos.

3.8.1 MATERIAL DEL CALENTADOR ELÉCTRICO.

Existen diferentes tipos de materiales que son utilizados en el calentamiento de líquidos, dependiendo del tipo de baño galvánico se muestran en la tabla 17:

Tabla 17
Materiales metálicos de calefactores eléctricos.

Material	Aplicaciones adecuadas
<i>Acero dulce</i>	Soluciones de cianuro y alcalinas.
<i>Plomo laminado</i>	Soluciones de níquel opaco, zinc ácido y resistencias eléctricas.
<i>Acero inoxidable</i>	Tanques de tinte, soluciones de ácido fosfórico y ácido crómico y resistencias eléctricas.
<i>Titanio</i>	Soluciones de galvanizado de níquel y cromo.

Fuente: (NIIR Board of Consultants & Engineers, 2005)

Como se observa el material correcto para la resistencia eléctrica es **acero dulce**, para baños del tipo alcalino.

3.8.2 CONDICIONES DE CALENTAMIENTO.

La temperatura de funcionamiento u operación de los baños electroquímicos alcalinos sin cianuros oscilan en el rango de 18 [°C] a 35 [°C] (Durney & Graham, 1985).

Para seleccionar la resistencia eléctrica, se toma en cuenta el volumen del líquido a calentar:

$$V_{electrolito} = 31,5 [L] = 0,032[m^3]$$

La rapidez promedio del viento en el año 2015, en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE se obtuvo mediante el software RETSCREEN 4, ver anexo 28:

$$v_{viento} = 4,4 \left[\frac{m}{s} \right] = 14,436 \left[\frac{ft}{s} \right]$$

Se toma una temperatura ambiente promedio en la ciudad de Sangolquí de acuerdo con (Sociedad Civil del cantón Rumiñahui., 2001) de 16 [°C] (ver anexo 29), y se asume que el líquido de mezcla alcalina se encuentra en equilibrio térmico con el medio a esta temperatura (T_o), por tanto, como el agua es el elemento más influyente en la solución, cerca del 90% de concentración, se toman las propiedades físicas de la misma para el análisis de calentamiento y pérdidas de calor, interpolando los respectivos valores de la tabla A-9 que se muestra en el anexo 9.

$$Cp_{H_2O} = 4185,2 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]; \quad \rho_{H_2O} = 998,88 \left[\frac{kg}{m^3} \right]; \quad T_o = 16 [^\circ C]$$

La temperatura máxima del baño alcalino según (Durney & Graham, 1985) es de 95 [°F] (35 [°C]). Con este requisito se seleccionará la potencia del calentador eléctrico requerida para satisfacer los ensayos, tomando en cuenta un respectivo tiempo para el calentamiento y las pérdidas de calor que se generan en el transcurso del mismo.

$$T_f = 35 [^{\circ}\text{C}]$$

Se impone un tiempo de calentamiento de la solución de 20 minutos:

$$t_{\text{calentamiento}} = 20 [\text{min}] = 0,333 [\text{hr}]$$

De acuerdo con (Alcaraz, 2005) para conocer la potencia eléctrica que se debe instalar en una cuba se puede recurrir a la fórmula de la variación de la entalpía en la cual la eficiencia del calentamiento eléctrico es del 100%.

$$P_{\text{calentador}} [W] = \frac{m[\text{kg}] * Cp \left[\frac{J}{\text{kg} * K} \right] * \Delta T [^{\circ}\text{K}]}{t [\text{s}]} * \eta \quad \text{Ec. 3.80}$$

Dónde:

$P_{\text{calentador}}$: Potencia necesaria útil del calentador.

$m[\text{kg}]$: Masa del líquido a calentar.

$Cp \left[\frac{J}{\text{kg} * K} \right]$: Calor específico del líquido.

$\Delta T [^{\circ}\text{K}]$: Diferencial de temperatura para el calentamiento.

t : Tiempo de calentamiento.

η : Eficiencia de calentamiento.

$$P_{\text{calentador}} [W] = \frac{m_{H_2O} [\text{kg}] * Cp_{H_2O} \left[\frac{J}{\text{kg} * K} \right] * \Delta T [^{\circ}\text{K}]}{t_{\text{calentamiento}} [\text{s}]} * \eta_{\text{calentador}}$$

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O} * V_{\text{electrolito}} = 31,465 [\text{kg}]$$

$$\Delta T = (35 - 16) [^{\circ}\text{K}]$$

$$\eta_{\text{calentador}} = 1$$

$$P_{\text{calentador}} [W] = \frac{31,465 [\text{kg}] * 4185,2 \left[\frac{J}{\text{kg} * ^{\circ}\text{K}} \right] * (35 - 16) [^{\circ}\text{K}]}{1200 [\text{s}]} * 1$$

$$P_{calentador} = 2,085[kW]$$

Entonces para el calentamiento se requiere una potencia del calentador de **2,085 [kW]**.

Como en el transcurso del proceso se generan pérdidas de calor tanto en las paredes del tanque como al ambiente por la superficie abierta del líquido, éstas deben compensarse a la potencia de calentamiento útil.

3.8.3 PÉRDIDAS POR TRANSFERENCIA DE CALOR.

Un análisis de pérdidas por transferencia de calor en la cuba electrolítica se muestra en la figura 36, con el objeto de realizar los cálculos respectivos.

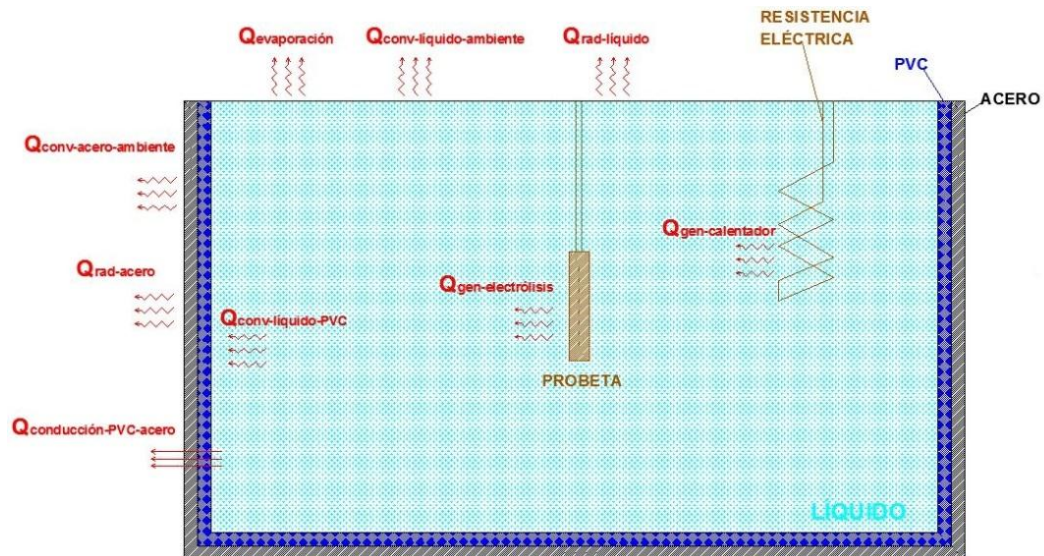


Figura 36 Esquema de pérdidas de transferencia de calor.

3.8.3.1 Pérdidas en la superficie expuesta del líquido.

Existe una gráfica de análisis para las pérdidas tanto en la superficie expuesta a la ambiente como en las paredes, para facilitar el diseño y selección de los componentes, ver anexo 30.

Como se puede observar en este anexo, se toma como un valor de referencia la temperatura ambiente de 60 [°F] (16 [°C]) (temperatura promedio en Sangolquí); observando la curva “E”, para el comportamiento de las pérdidas de la superficie líquida, y sabiendo que la temperatura de operación será la máxima de trabajo en los ensayos de galvanizado que es de 35 [°C] (95 [°F]) (Durney & Graham, 1985).

Las pérdidas de transferencia de calor por evaporación son:

$$q_{per-liq} = 200 \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right]$$

3.8.3.1.1 Coeficiente de amplificación de pérdidas.

Una mayor cantidad de pérdidas por transferencia de calor se produce por la velocidad del viento, cuando se implementa un sistema de ventilación o por la velocidad natural del aire circundante (Durney & Graham, 1985).

Como el equipo es netamente para procesos de investigación y no de producción, no se requiere un sistema de extracción de gases y el factor de amplificación de pérdidas, dependerá únicamente del coeficiente de aumento de la rapidez del viento, en el área de trabajo, ver anexo 31.

$$F_{vi} = 4,4$$

$$q_{per-liqfinal} = F_{vi} * q_{per-liq} = 4,4 * 200 \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right] = 880 \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right]$$

$$A_{liq} = Largo * Ancho = 2,26[ft^2]$$

$$P_{\text{líquido}} = q_{\text{per-líq final}} * A_{\text{liq}} = 0,583[\text{kW}]$$

3.8.3.2 Pérdidas en las paredes.

3.8.3.2.1 Resistencias térmicas en las paredes.

Para las pérdidas de calor en las paredes como es un fenómeno netamente de conducción estacionaria, se requiere calcular la resistencia térmica de cada sección:

$$q_{\text{per-pared}} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R''_{\text{total}}} \quad \text{Ec. 3.81}$$

$$R''_{\text{total}} = R_{\text{conv1}} + R_{\text{pvc}} + R_{\text{acero}} + R_{\text{conv2}}$$

$$R''_{\text{total}} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_{\text{pvc}}}{k_{\text{pvc}}} + \frac{L_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{1}{h_2}$$

3.8.3.2.1.1 Convección natural del electrolito.

La ecuación principal para calcular la convección en general está dada en (Cengel, 2007) p.26.

$$Q_{\text{conv}} = h * A * (T_{\infty} - T_s) \quad \text{Ec. 3.82}$$

Q_{conv} : Pérdidas de calor por convección.

h : Coeficiente de convección.

A : Área de transferencia de calor.

T_{∞} : Temperatura ambiente.

T_s : Temperatura de la superficie.

3.8.3.2.1.1.1 Coeficiente de expansión volumétrica.

La temperatura del agua se asumirá como la mayor del proceso, con un valor de 35 [°C] (308 [°K]), (Cengel, 2007) expone que el coeficiente de expansión térmica se define por la siguiente expresión:

$$\beta_1 = \frac{\rho_1 - \rho_1}{\rho_1 * (T_1 - T_{\infty 1})} \quad \text{Ec. 3.83}$$

$$T_{\infty 1} = 308[\text{°K}]$$

Se asume que la temperatura de la superficie del PVC se halla a un diferencial de 5 [°C] inferior a la del líquido, es decir a 30 [°C] (303 [°K]):

$$T_{pvc1} = 303[\text{°K}]$$

La temperatura de película en la parte interior del tanque es:

$$T_1 = \frac{T_{pvc1} + T_{\infty 1}}{2} = 305,5[\text{°K}]$$

3.8.3.2.1.1.2 Propiedades del agua a temperatura ambiente.

Los análisis se realizaron con las respectivas interpolaciones de la tabla A-9, utilizando la temperatura de 35 [°C], ver anexo 9.

$$\rho_{\infty 1} = 994 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]; \quad C_{p_{\infty 1}} = 4178 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{°K}} \right]; \quad k_{\infty 1} = 0,623 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} * \text{°K}} \right];$$

$$\mu_{\infty 1} = 0,720 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}} \right]; \quad Pr_{\infty 1} = 4,83$$

3.8.3.2.1.1.3 Propiedades del agua a temperatura de película.

La temperatura de película es 32.5 [°C] (305,5 [°K]), para lo cual se interpola y se obtienen las propiedades, ver anexo 9.

$$\rho_1 = 995 \left[\frac{kg}{m^3} \right]; \quad Cp_1 = 4178 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]; \quad k_1 = 0,619 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right];$$

$$\mu_1 = 0,759 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] \quad Pr_1 = 5,125; \quad \beta_1 = \frac{\rho_{inf1} - \rho_1}{\rho_1 (T_1 - T_{inf1})} = 4,02 \times 10^{-4} \left[\frac{1}{^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.1.4 Número de Grashof.

De acuerdo con (Cengel, 2007), en convección natural externa, el número de Grashof se calcula mediante la siguiente expresión, recordando que el diferencial de temperaturas siempre debe ser un valor positivo:

$$G_{rL1} = \frac{g * \beta_1 * (T_{\infty 1} - T_{pvc1}) * L_{c1}^3}{\nu_1^2} \quad \text{Ec. 3.84}$$

$$L_{c1} = 200 [mm]$$

$$\nu_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1} = 7,628 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$G_{rL1} = 2,71 \times 10^8$$

3.8.3.2.1.1.5 Número de Reynolds.

Como el agua se encuentra en reposo (antes de usar el mecanismo de agitación), la rapidez es nula, por tanto el número de Reynolds es cero.

$$Re_1 = 0$$

Para analizar el tipo de convección (Cengel, 2007) p.510 expresa tres condiciones para analizar, cuál rige el análisis, ya sea convección natural, forzada o una combinación de ambas:

Si $\frac{G_{rL}}{Re_L^2} < 1$, dominio de convección forzada.

Si $\frac{G_{rL}}{Re_L^2} > 1$, dominio de convección natural.

Si $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \approx 1$, combinación de ambas convecciones.

$$Re_1 = 0 \rightarrow \frac{Gr_L}{Re_L^2} \rightarrow \infty \text{ Dominio total de convección natural}$$

3.8.3.2.1.1.6 Número de Rayleigh.

De acuerdo con (Cengel, 2007) el número de Rayleigh se determina mediante la expresión que se encuentra en p.510, como lo muestra la siguiente ecuación.

$$Ra_L = Gr * Pr \quad \text{Ec. 3.85}$$

$$Ra_L = Gr_L * Pr_1 = 1,389 \times 10^9$$

3.8.3.2.1.1.7 Número de Nusselt.

Así mismo (Cengel, 2007) p. 511, expresa que el número de Nusselt se determina como lo muestra la ecuación 3.86, para un intervalo de Rayleigh de 10^4 a 10^{13} para una placa plana vertical.

$$Nu_L = \left[0,825 + \frac{0,387 * (Ra_L)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad \text{Ec. 3.86}$$

$$Nu_L = \left[0,825 + \frac{0,387 * (1,389 \times 10^9)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{5,125} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 = 165,756$$

El número de Nusselt asociado al coeficiente de convección interno, longitud de la placa y el coeficiente de conducción, se encuentra en (Cengel, 2007) p.510.

$$Nu_L = \frac{h_1 * L_{c1}}{k_1} \quad \text{Ec. 3.87}$$

$$Nu_L = \frac{h_1 * L_{c1}}{k_1} \Leftrightarrow h_1 = \frac{Nu_L * k_1}{L_{c1}} = 513,016 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.1.8 Recálculo de la temperatura en la pared de PVC.

Para obtener la pérdida de calor a lo largo de las paredes se usará el anexo 30 pero utilizando la curva "A", para acero desnudo (sin aislamiento):

$$A_{pvc} = 2 * (Largo * Alto) + 2 * (Ancho * Alto) + (Largo * Ancho) = 0,59[m^2]$$

$$q_{per-pared} = 50 \left[\frac{BTU}{hr * ft^2} \right]$$

$$Q_{per} = q_{per-pared} * A_{pvc} = 93,06[W]$$

$$Q_{conv1} = h_1 * A_{pvc} * (T_{\infty 1} - T_{pvc2}) \Leftrightarrow T_{pvc2} = T_{\infty 1} - \frac{Q_{conv1}}{(h_1 * A_{pvc})} = 307,693[^\circ K]$$

La temperatura de PVC recalculada se obtiene un valor de 307.693 [°K] (34.693 [°C]).

Coefficiente de expansión volumétrica:

La nueva temperatura de película es:

$$T_{1-2} = \frac{T_{pvc2} + T_{\infty 1}}{2} = 307,846[^\circ K]$$

Las propiedades del agua a temperatura de película 34,846 [°C] se obtienen interpolando los valores de la tabla A-9:

$$\rho_{1-2} = 994,1 \left[\frac{kg}{m^3} \right]; \quad Cp_{1-2} = 4178 \left[\frac{J}{kg * ^\circ K} \right]; \quad k_{1-2} = 0,623 \left[\frac{W}{m * ^\circ K} \right];$$

$$\mu_{1-2} = 0,722 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]; \quad Pr_{1-2} = 4,85$$

$$\beta_{1-2} = \frac{\rho_{\infty 1} - \rho_{1-2}}{\rho_{1-2} * (T_{1-2} - T_{\infty 1})} = 6,544 \times 10^{-4} \left[\frac{1}{^{\circ}K} \right]$$

Número de Grashof:

$$\nu_{1-2} = \frac{\mu_{1-2}}{\rho_{1-2}} = 7,263 \times 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$Gr_{L1-2} = \frac{g * \beta_{1-2} * (T_{\infty 1} - T_{pvc2}) * L_{c1}^3}{\nu_{1-2}^2} = 2,992 \times 10^7$$

Número de Rayleigh:

$$Ra_{L1-2} = Gr_{L1-2} * Pr_{1-2} = 1,451 \times 10^8$$

Número de Nusselt:

$$Nu_{L1-2} = \left[0,825 + \frac{0,387 * (Ra_{L1-2})^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{1-2}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 = 82,417$$

$$h_{1-2} = h_2 = \frac{Nu_{L1-2} * k_{1-2}}{L_{c1}} = 256,729 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}K} \right]$$

La temperatura final en la pared del PVC es:

$$T_{pvc3} = T_{\infty 1} - \frac{Q_{conv1}}{(h_{1-2} * A_{pvc})} = 307,386 [^{\circ}K]$$

La temperatura final de PVC recalculada se obtiene un valor de **307.386 [°K]** (**34.4 [°C]**).

3.8.3.2.1.2 Conducción.

3.8.3.2.1.2.1 Cloruro de polivinilo (PVC).

Las propiedades térmicas del cloruro de polivinilo (PVC) se registran en el anexo 32; para obtener el valor del coeficiente de conducción térmica, se realiza un promedio:

$$k_{pvc} = \frac{0,12 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right] + 0,25 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]}{2} = 0,185 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.2.2 Acero A36.

Las propiedades térmicas del acero A36 se registran en el anexo 33.

Interpolando los valores entre 0 [°C] y 100 [°C] se tiene que la conductividad térmica del acero para una temperatura específica de operación de 35 [°C] (308 [°K]) es:

$$k_{acero} = 53,95 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.2.3 Pared de PVC.

$$L_{pvc} = 3 [mm]$$

$$R_{pvc} = \frac{L_{pvc}}{k_{pvc} * A_{pvc}} = 0,027 \left[\frac{^\circ K}{W} \right]$$

$$R_{conv1} = \frac{1}{h_{1-2} * A_{pvc}} = 6,602 \times 10^{-3} \left[\frac{^\circ K}{W} \right]$$

$$Q_{conv1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{pvc}}{R_{conv1} + R_{pvc}} \Leftrightarrow T_{pvc} = T_{\infty 1} - Q_{conv1} * (R_{conv1} + R_{pvc}) = 304,828 [^{\circ}K]$$

3.8.3.2.1.2.4 Pared de acero.

$$L_{acero} = 5 [mm]$$

$$A_{acero} = A_{pvc}$$

$$R_{acero} = \frac{L_{acero}}{k_{acero} * A_{acero}} = 1,571 \times 10^{-4} \left[\frac{^{\circ}K}{W} \right]$$

$$Q_{conv1} = \frac{T_{\infty 1} - T_{acero}}{R_{conv1} + R_{pvc} + R_{acero}}$$

$$T_{acero} = T_{\infty 1} - Q_{conv1} * (R_{conv1} + R_{pvc} + R_{acero}) = 304,813 [^{\circ}K]$$

3.8.3.2.1.3 Convección natural del aire y radiación de las paredes.

El último tramo comprende la radiación y convección combinadas con la interacción de las paredes y el cuarto o área de ensayos.

Como es un espacio cerrado se asume que la temperatura de los alrededores es la ambiental de 16 [°C], entonces la expresión para determinar la convección externa por el aire se determina por la siguiente ecuación:

$$T_{sup} = 304,813 [^{\circ}K] ; \quad T_{atr} = 289 [^{\circ}K] ; \quad T_{\infty 2} = 289 [^{\circ}K]$$

$$Q_{conv2} = h_{combinado} * A_{total} * (T_{sup} - T_{atr}) \quad \text{Ec. 3.88}$$

Siendo: $h_{combinado} = h_2 + h_r$

Dónde:

h_2 : Coeficiente de convección natural externo del aire.

h_r : Coeficiente de radiación de las paredes.

A_{total} : Área total de transferencia de calor.

T_{sup} : Temperatura de la superficie externa de las paredes de acero.

T_{alr} : Temperatura de los alrededores.

$$A_{acero} = A_{pvc} = A_{total}$$

$$A_{total} = 0,59[m^2]$$

3.8.3.2.1.3.1 Coeficiente de convección natural externo del aire.

De acuerdo con (Tabuada, 2015) p.42, para determinar el coeficiente de convección natural del aire se puede recurrir a la siguiente fórmula:

$$h_{conv} = 2,8 + 3v_{viento} \quad \text{Ec. 3.89}$$

$$h_{conv2} = 2,8 + 3 * \left(4,4 \left[\frac{m}{s}\right]\right) = 16 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right]$$

3.8.3.2.1.3.2 Coeficiente de radiación de las paredes.

La fórmula para calcular el coeficiente de radiación en las paredes según (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011) p.10 es la siguiente:

$$h_r = \epsilon_{acero} * \sigma_{bolt} * (T_{sup} + T_{alr}) * (T_{sup}^2 + T_{alr}^2) \quad \text{Ec. 3.90}$$

Las emisividades de varios materiales, así como la del acero se muestran en el anexo 34.

$$\epsilon_{acero} = 0,16 ; \quad \sigma_{bolt} = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K^4}\right]$$

$$h_r = 0,16 * 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K^4}\right] * (304,813 [^\circ K] + 289 [^\circ K]) * (304,813 [^\circ K]^2 + 289 [^\circ K]^2)$$

$$h_r = 0,94 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right]$$

Entonces:

$$h_{combinado} = h_2 + h_r$$

$$h_{combinado} = 16,94 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.4 Coeficiente global de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia de calor del sistema se puede determinar mediante la ecuación 3.91:

$$U_{paredes} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{L_{pvc}}{k_{pvc}} + \frac{L_{acero}}{k_{acero}} + \frac{1}{h_{combinado}} \right)} \quad \text{Ec. 3.91}$$

$$U_{paredes} = \frac{1}{\left(\frac{1}{256,729 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]} + \frac{0,003[m]}{0,185 \left[\frac{W}{m * ^\circ K} \right]} + \frac{0,005[m]}{53,95 \left[\frac{W}{m * ^\circ K} \right]} + \frac{1}{16,94 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]} \right)}$$

$$U_{paredes} = 12,62 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

3.8.3.2.1.5 Pérdidas de transferencia de calor total en las paredes.

$$P_{paredes} = U_{paredes} * A_{total} * (T_{\infty 1} - T_{\infty 2})$$

$$P_{paredes} = 12,62 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] * 0,59[m^2] * (308[^\circ K] - 289[^\circ K])$$

$$P_{paredes} = 0,141 [kW]$$

3.8.3.3 Pérdidas de calor por la inmersión de las probetas.

Se asume que se galvanizan cuatro probetas por hora:

$$m_{probeta} = 0,157[kg] = 0,346[lb]$$

$$m_{total} = 4 * m_{probeta} = 1,385[lb]$$

La expresión matemática para calcular las pérdidas de calor por la inmersión de las probetas de acuerdo con (Durney & Graham, 1985) p.539 es:

$$\frac{BTU}{hr} = \frac{lb_{metal}}{hr} * C_{p_{metal}} * \Delta T \quad \text{Ec. 3.92}$$

$\frac{BTU}{hr}$: Pérdidas de calor por inmersión de las probetas de metal.

lb_{metal} : Libras masa de metal ingresado.

$C_{p_{metal}}$: Calor específico del metal $[\frac{BTU}{lb * ^\circ R}]$.

ΔT : Diferencial de temperatura del calentamiento en $[^\circ R]$.

El calor específico del acero se puede verificar en el anexo 35.

$$P_{probetas} = 1,385 \left[\frac{lb}{hr} \right] * 0,11 \left[\frac{BTU}{lb * ^\circ R} \right] * (35 - 16)[^\circ R] = 0,848[W]$$

3.8.3.4 Potencia real requerida en la resistencia.

$$P_{REAL} = P_{calentador} + P_{paredes} + P_{líquido} + P_{probetas} \quad \text{Ec. 3.93}$$

$$P_{REAL} = 2,085[kW] + 0,141 [kW] + 0,583[kW] + 0,00085[kW]$$

$$P_{REAL} = 2,81[kW]$$

3.8.3.5 Potencia de electrolisis.

En el proceso de calentamiento se va generar una potencia por el fenómeno de la electrólisis dada en su máximo valor:

$$P_{ELECTRÓLISIS} = V * I \quad \text{Ec. 3.94}$$

$$P_{ELECTRÓLISIS} = 12[V] * 10[A] = 120[W]$$

Entonces la potencia real neta es:

$$P_{REAL-NETA} = P_{REAL} - P_{ELECTRÓLISIS} = 2810[W] - 120 [W] = 2690[W]$$

Por lo tanto se escoge una resistencia eléctrica de **2,5 [kW]**.

3.9 MESAS SOPORTE.

3.9.1 MESA SOPORTE DEL SISTEMA DE AGITACIÓN.

Como la principal función de esta estructura es soportar el peso de estos dos componentes, se considera el peso de cada uno para el análisis, el peso del motor DC 5 Kg (50 [N]), se muestra en la tabla 16 y peso del rectificador ZHAOXIN de 3 [kg] (30[N]), se muestra en la tabla 12.

Ésta estructura se basa en dos niveles de soporte a flexión mediante perfiles angulares L 25 x 25 x 3 [mm] y cuatro columnas de tubos cuadrados estructurales de 30 x 30 x 2 [mm].

Para el soporte de los componentes se colocaron dos planchas de madera triplex de 18 [mm] de espesor con medidas de 370 x 370 [mm] como lo muestra la figura 37:



Figura 37 Mesa soporte de la agitación y del rectificador.

3.9.2 MESA SOPORTE DE LA CUBA ELECTROLÍTICA.

De la misma manera se diseña una mesa que deba soportar el peso del tanque completamente lleno de la solución electrolito, el peso de las barras conductoras, bastidores, equipo de calentamiento, soportes de las barras conductoras, rodillos y elementos de sujeción del equipo, entonces se recurre al elemento CAD 3D del tanque y se obtiene su peso sin solución.

Sus propiedades físicas se pueden verificar en el anexo 38, donde se observa que su masa sin electrolito es de 26,87 [Kg] entonces:

Ésta estructura de la misma manera se basa en dos niveles de soporte a flexión mediante perfiles angulares L 40 x 40 x 4 [mm] y cuatro columnas de tubos cuadrados estructurales de 30 x 30 x 2 [mm]. En la mesa se colocó una plancha de acero A 36 de 6 [mm] de espesor con medidas de 670 x 420 [mm] en el nivel superior como lo muestra la figura 38:



Figura 38 Mesa soporte de la cuba electrolítica.

3.10 SISTEMA DE AISLAMIENTO.

“La resistencia eléctrica es la oposición que ofrece un material a la circulación de la corriente eléctrica a través de él, transformándola en efecto Joule”, (González & Cesari, 2009).

La resistividad específica se denota con la letra griega “ ρ ” y denotada por las unidades [$\Omega \cdot \text{cm}$], y la escala para determinar qué tipo de material es se verifica en la siguiente escala mostrada en la figura 39:

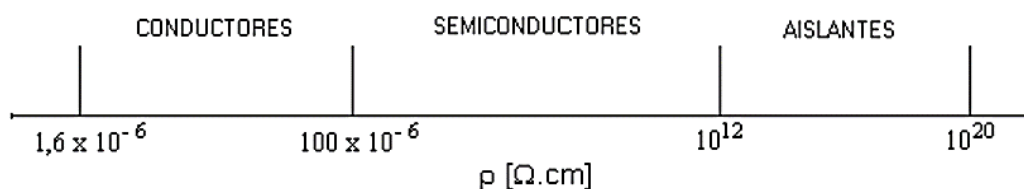


Figura 39 Escala de resistividad específica volumétrica.

Fuente: (González & Cesari, 2009)

Es necesario aislar las barras conductoras (cátodo y ánodo) en el sistema de agitación con respecto del tanque galvánico, por motivos de seguridad.

3.10.1 AISLAMIENTO DE LA BARRA CATÓDICA.

Según (Mayacela & Otañez, 2013) p. 70 existen diferentes tipos de aisladores tipo carrete o rollo de la clase ANSI como lo muestra la tabla 18:

Tabla 18
Dimensiones de aisladores tipo carrete.

		Aisladores tipo carrete				
<i>Clases ANSI</i>		53-1	53-2	53-3	53-4	53-5
<i>Dimensiones en [mm].</i>	H	54	76	81	76	105
	h	27	38	40,5	38	52,5
	D	57	79	76	105	102
	d	45	45	45	73	73
	d₁	18	18	16	18	18
	d₂	22	24	24	24	24
	R	11	18	11	16	11

Fuente: (Mayacela & Otañez, 2013)

Sabiendo que el diámetro de la barra catódica es de $\frac{3}{8}$ [in] se selecciona el aislador tipo carrete clase ANSI 53-1. Las dimensiones del aislador se pueden verificar tanto en la tabla 18 como en la figura 40:

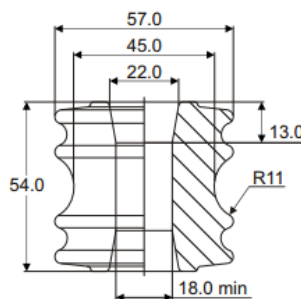


Figura 40 Dimensiones aislador tipo carrete ANSI 53-1.

Fuente: (Electroporcelana GAMMA S.A., 2014)

Según la norma ANSI para aisladores tipo carrete el material de los mismos debe ser de **porcelana**, pero por disponibilidad en el mercado se utilizará un material polimérico, como lo es el **plástico ABS** con un valor de resistividad volumétrica específica mayor a 10^{13} [$\Omega \cdot \text{cm}$] denotada en la ficha técnica mostrada en el anexo 41.

De acuerdo con la figura 46 se puede verificar que cumple como material aislante de la corriente al ser mayor su resistividad a 10^{12} [$\Omega \cdot \text{cm}$], la manufactura de los aisladores se realizó mediante impresión 3D como se observa en la figura 41:

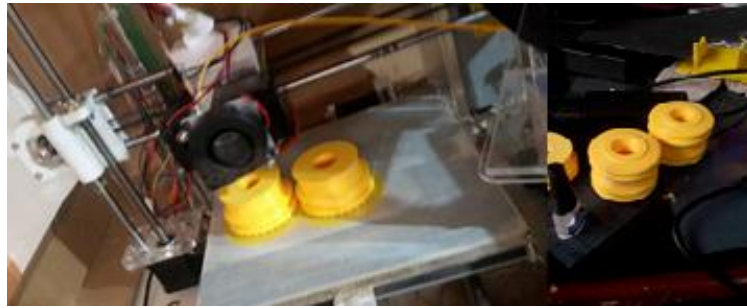


Figura 41 Aisladores ANSI 53-1, manufacturados por impresión 3D.

3.10.2 AISLAMIENTO BARRAS ANÓDICAS.

Se recurre a un diseño convencional de modelo de chumacera, con el diámetro nominal de $\frac{3}{8}$ [in], mientras que la manufactura una vez más se optó por la impresión 3D como muestra la figura 42:



Figura 42 Aisladores fijos de barras anódicas.

3.11 SISTEMA ELÉCTRICO Y CONTROL DE TEMPERATURA.

Para el diseño del sistema eléctrico se parte de la cantidad de voltaje que se debe suministrar para el rectificador de corriente de 10 [A] y se deben seleccionar los elementos eléctricos de seguridad correspondientes para cada elemento como el motor DC, resistencia eléctrica, control de temperatura digital y rectificador de corriente, los elementos utilizados son mostrados en la tabla 19 y en la figura 43 respectivamente:

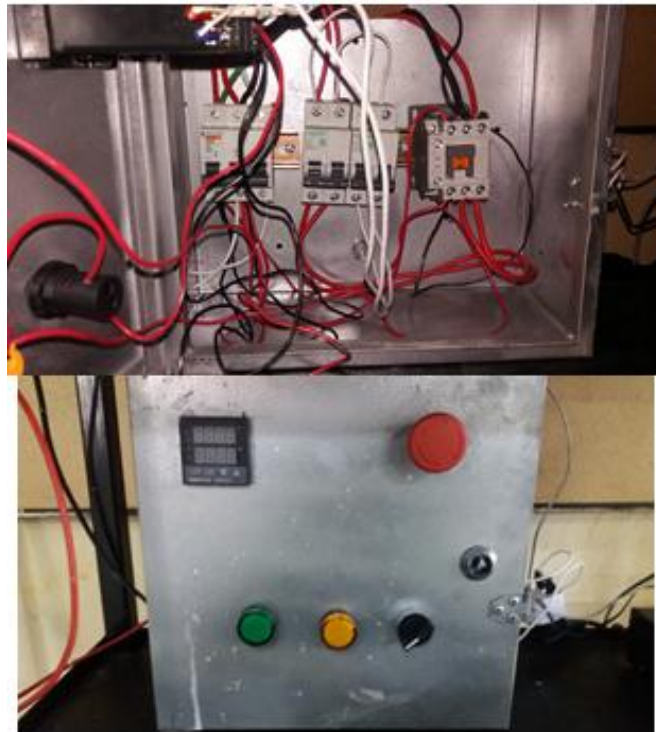


Figura 43 Gabinete eléctrico y de control industrial.

Tabla 19
Elementos eléctricos y de control del sistema.

Elementos eléctricos
Rectificador de corriente ZHAOXIN 10 [A]
Braker GERIN 2P 16[A]
Braker GERIN 3P 10[A]
Braker GERIN 2P 16 [A]
Cable flexible GPT #16 AWG
Cable flexible GPT #18 AWG
Contactores GMC 18-5HP 4,5 [KW] 220 [V]
Luz piloto verde 220 [V]
Enchufe industrial 3P 30[A]
Selector 2 posiciones
Controlador digital temperatura 110/220 [V]
Termocupla J tipo Bulbo
Terminal OJO ZAUL ¼ 16-14
Luz piloto amarilla 220[V]
Pulsador hongo retenido rojo (Paro de emergencia).

El esquema de conexión eléctrico se halla mostrado en el anexo 42 de éste proyecto de investigación.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LA METODOLOGÍA TAGUCHI

4.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

En este capítulo, la metodología Taguchi se usa para la optimización del zincado electrolítico, cuyo propósito es mantener un rango de espesores de electrodeposición acorde a la norma ASTM B633.

Se seguirán los pasos descritos en el capítulo 2 para un mejor uso de la metodología, como se indica a continuación:

- 1. Lluvia de ideas sobre las características de calidad y selección de parámetros importantes para el producto/proceso bajo estudio.*
- 2. Diseñar el experimento.*
- 3. Analizar los resultados que determinan las condiciones óptimas, que será desarrollado en el siguiente capítulo.*

Con relación al paso uno, la característica a optimizar es el espesor, en este caso de acuerdo a la metodología Taguchi, el criterio de calidad a usar es **nominal es mejor**, porque se requiere bajar la variabilidad del espesor a través de estos experimentos.

Existen varios factores que influyen en el galvanizado en frío de los que ya se habló en el capítulo 2, como son:

- Tiempo.
- Intensidad de corriente.
- Temperatura.

- Posición de la cada probeta en la cuba electrolítica.
- Voltaje.
- pH de la solución.
- Agitación catódica.

La **intensidad de corriente**, que determina la cantidad de iones que pasan en la solución electrolítica.

El **tiempo de electrodeposición**, que determina la cantidad de masa depositada en el área catódica.

Debido a la estrecha relación entre el tiempo de proceso con la intensidad de corriente mostrada en la ecuación 2.6, donde se observa que son parámetros directos que influyen en la electrodeposición, y con el fin de cumplir los objetivos de este proyecto, que se enfocan en la optimización del espesor de recubrimiento, y evitar desperdicios sin enfocarse en el tiempo de productividad se descarta éste último como parámetro de influencia para la aplicación de la metodología.

$$t = \frac{S \cdot \rho_{zn} \cdot 10}{E_{q-q} \cdot \rho_I \cdot \eta_c}$$

La **temperatura**, que permite facilitar la difusión de los iones en la solución electrolítica con el fin de obtener una mejor electrodeposición.

Este parámetro no tiene una relación analítica pero se usa en base a una recomendación de galvanización, entre un rango de 18°C y 35°C.

Con respecto a la **posición** de cada probeta en la cuba electrolítica, este factor se toma como ruido del proceso, por lo tanto se va a realizar un análisis de señal ruido con respecto a la característica de calidad.

El **voltaje** es un parámetro que se halla inmerso en el proceso, pero está delimitado por la variación de la corriente, de acuerdo con la ley de Ohm, por lo que se transforma en un parámetro de verificación y no de control.

El **potencial hidrógeno (pH)** de la solución influye directamente en la calidad final del producto, pero por temas de costos de producción en las industrias se lo suele mantener como un valor estándar, cabe recalcar que el alcance de este proyecto de investigación se delimita a controlar parámetros físicos del proceso y no químicos, razón por la que se lo excluye como variable de análisis para la metodología.

La **agitación catódica** se halla delimitada en el diseño del mecanismo biela-manivela para el rango de 3 a 7 $\left[\frac{m}{min}\right]$, como se mencionó es una recomendación de la industria de galvanoplastia en capítulos anteriores, pero como no es un parámetro de valor fijo ya que la velocidad es variable a diferentes posiciones de la barra, es excluida del análisis de la metodología Taguchi.

Los factores de control son dos, y cada uno de estos tendrá cuatro niveles, porque es más factible verificar si la variación del espesor es significativa o no, en cada experimento.

En resumen se concluye que existen dos parámetros que pueden ser controlados y son:

- Intensidad de corriente (parámetro A).
- Temperatura de la solución (parámetro B).

Conforme el paso dos, la intensidad de corriente se obtiene a través de la densidad de corriente catódica, porque la superficie es constante. De acuerdo al rango de electrodeposición para baños alcalinos sin cianuros, estos se delimitan a los siguientes valores de 1 $[A/dm^2]$ a 2,5 $[A/dm^2]$, produciendo unas intensidades de corriente de 2,3 $[A]$ a 5,8 $[A]$ como límites de análisis en este proyecto de investigación.

Se debe seleccionar un arreglo ortogonal para el experimento que no sea tan extenso para el análisis, por lo que tratándose de dos factores de control se

utilizarán cuatro niveles de variación dentro del rango delimitado por el mismo y el proceso, la matriz ortogonal escogida es una $L_{16}(4)^2$.

En resumen las tablas 20 y 21 establecen los rangos y niveles de análisis, además del análisis conjunto de la matriz ortogonal de la metodología Taguchi.

Tabla 20
Factores de control y niveles de análisis.

Factores de control	Características	Niveles			
		1	2	3	4
A	Intensidad de corriente [A]	2,3	3,5	4,6	5,8
B	Temperatura [°C]	18	24	30	35

Tabla 21
Arreglo ortogonal final metodología Taguchi $L_{16}(4)^2$.

Exp.	Factores		Factor de ruido				\bar{Y}	Desviación Estándar (σ)	S/R
	A	B	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄			
1	1	1							
2	1	2							
3	1	3							
4	1	4							
5	2	1							
6	2	2							
7	2	3							
8	2	4							
9	3	1							
10	3	2							
11	3	3							
12	3	4							
13	4	1							
14	4	2							
15	4	3							
16	4	4							

Para el análisis de la relación señal ruido (S/R) se aplica la ecuación 2.12:

$$\frac{S}{R} = 10 * \log_{10} \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right)$$

Dos ejemplos de los experimentos se muestran de la siguiente manera:

Experimento 1:

Intensidad de corriente a 2,3 [A], que es, A₁.

Temperatura a 18 [°C], que es, B₁.

Experimento 6:

Intensidad de corriente a 3,5 [A], que es, A₂.

Temperatura a 24 [°C], que es, B₂.

De esta manera se procede a completar los 16 experimentos descritos en el arreglo ortogonal.

Se toma como referencia un espesor mínimo de acuerdo a la condición de servicio, que la norma B633 rige, por efectos de medición y manejar rangos más permisivos se utiliza el valor para condiciones extremas y severas de corrosión donde el mínimo espesor requerido es de 25 micras como se muestra en la tabla 9, valores mayores a este son permitidos de acuerdo a la norma.

4.1.1 ELECTRODEPOSICIÓN DE ZINC PARA 25 [µm].

A continuación se ilustra mediante un ejemplo de cálculo como se obtienen los parámetros para cada experimento.

4.1.1.1 Cálculo del área catódica.

La figura 44 muestra las dimensiones de las probetas a galvanizar en los ensayos, mismas que cumplen con las dimensiones exigidas por la norma ASTM B633 para ensayos de medición de recubrimientos.

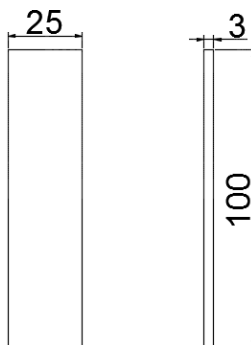


Figura 44 Probetas regidas por la norma ASTM B633.

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

$$A_c = 23000 [mm^2] = 2,3[dm^2]$$

4.1.1.2 Cálculo del equivalente electroquímico del zinc.

$$E_{q-q[Zn]} = \frac{E_{q[Zn]} [gr/mol]}{F [A * hr]}$$

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

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

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

4.1.2 EFICIENCIA CATÓDICA.

Para la determinación de la eficiencia catódica se toma cada dato de la gráfica de eficiencia para diferentes baños galvanicos y se utilizó la curva de zincados no cianurados mostrada en la figura 4.

Este análisis es una contribución propia, donde se aplicó un método de regresión lineal para una curva polinómica de tercer grado, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,991, tal como se muestra en la figura 45:

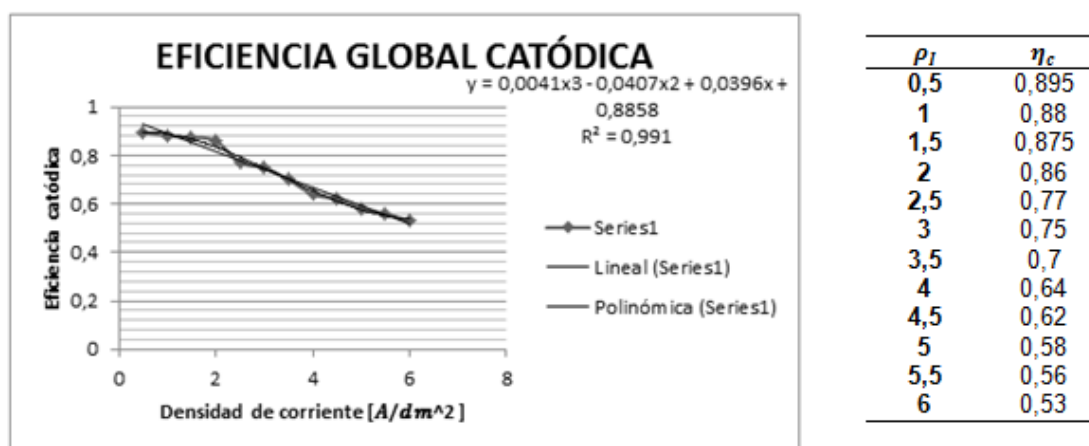


Figura 45 Curva de ajuste de la eficiencia catódica.

$$\eta_c = 0,0041x^3 - 0,0407x^2 + 0,0396x + 0,8858$$

Aplicando el valor de densidad de corriente de $1 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ se tiene entonces:

$$\eta_c = 0,0041 * (1)^3 - 0,0407 * (1)^2 + 0,0396 * (1) + 0,8858 = 0,89$$

Con el valor de densidad de corriente de $1 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ se tiene que:

$$\eta_c = 0,89$$

4.1.3 CÁLCULO DEL TIEMPO DE ELECTRODEPOSICIÓN.

El cálculo del tiempo total del proceso de zincado para una densidad de corriente catódica de $1 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ se obtiene despejando el tiempo en la ecuación 2.7:

$$t = \frac{s * \rho_{zn} * 10}{E_{q-q[Zn]} * \rho_l * \eta_c}$$

$$t = \frac{25 * 10^{-3}[mm] * 7,14 \left[\frac{g}{cm^3} \right] * 10}{1,22 \left[\frac{gr}{A * hr} \right] * 1 \left[\frac{A}{dm^2} \right] * 0,89} = 1,643[hr]$$

$$t = 1[hr] 38[min] 35[seg] = 1,65[hr]$$

La corriente necesaria para el zincado es:

$$I = 2,3 [dm^2] * 1 \left[\frac{A}{dm^2} \right] = 2,3 [A]$$

4.1.4 DETERMINACIÓN DE LA MASA DEPOSITADA.

Para obtener dicha cantidad se aplica la primera ley de Faraday explicada en la ecuación 2.3:

$$w_{te} = E_q * \frac{t * 3600 * I}{F} * \eta_g$$

$$w_{te} = 32,695[gr] * \frac{1,65[hr] * 3600 * 2,3[A]}{96500[A * seg]} * 0,89$$

$$w_{te} = 4,12[gr]$$

4.1.5 DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO.

Adicionalmente se realizarán cuatro ensayos con el objeto de constatar la influencia del tiempo en el proceso, de acuerdo a la ecuación 2.7 y aplicando variaciones tanto de este parámetro como la corriente, para verificar si existe un cambio significativo del recubrimiento como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22
Comprobación de la influencia del tiempo.

Ensayo	Parámetros			Masa esperada de depósito [gr]
	Intensidad de corriente [A]	Tiempo [hr]	Espesor Esperado [μm]	
1	2,3	0,74	11,3	1,85
2	2,3	1,65	25,0	4,12
3	5,8	0,74	25,0	4,14
4	5,8	1,65	55,7	9,22

4.2 EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO.

4.2.1 EJECUCIÓN DE PRETRATAMIENTOS.

Previo al proceso de recubrimiento de zinc son necesarios varios pretratamientos a la superficie del metal base, como este proyecto de investigación se basa en un zincado alcalino sin cianuros, son requeridos dos pretratamientos esenciales como son el decapado ácido y el desengrase, tal y como se muestra en la figura 6.

Siendo el decapado con ácido clorhídrico (HCl) como primer paso a seguir, donde se inmersa las probetas de ASTM A36 por un tiempo de 15 minutos, y posteriormente al desengrase por tres minutos (Álvarez & Chango, 2012), esto se observa en la figura 46.

Es importante mencionar que existen enjuagues de las piezas entre cada tratamiento.

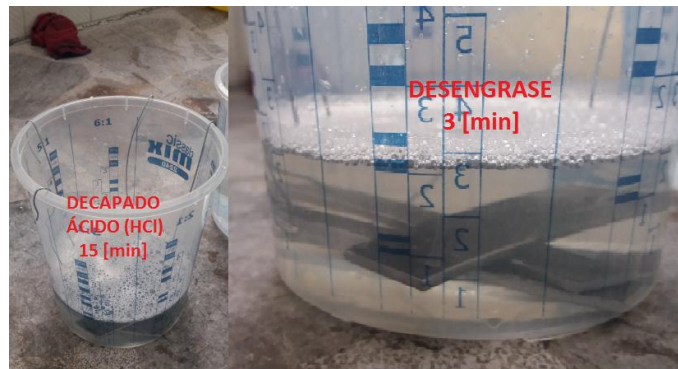


Figura 46 Decapado ácido y desengrase de las piezas de ASTM A36.

4.2.2 EJECUCIÓN DE LAS MEDICIONES DE REVESTIMIENTOS.

Se realizan diez mediciones del espesor por cada probeta, con cuatro probetas por cada experimento, por ende cuatro respuestas (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) en la matriz ortogonal.

A esto se calcula la media aritmética (\bar{Y}) y la desviación estándar (S) a cada fila de la matriz ortogonal (por cada ensayo de los 16 posibles).

Para realizar las mediciones de los espesores se utilizó un medidor de espesor electrónico digital marca *Elcometer* y de modelo 456 como lo muestra la figura 47.



Figura 47 Medidor de recubrimientos electrónico (elcometer-456).

Fuente: (elcometer, 2016)

Es un equipo muy preciso y fácil de utilizar, tiene la capacidad de almacenamiento de datos y realizar cálculos por lotes con diferentes escalas de medición, teniendo como las principales las milésimas de pulgada (mils) y micras.

Está diseñado para realizar mediciones de espesor de revestimientos de manera precisa y fiable en cualquier sustrato, ya sea ferroso o no.

Para realizar las mediciones se siguió el método de la diagonal de cara y se realizaron cinco mediciones de ambos lados de las probetas, con un total de diez mediciones, el esquema de medición se puede mostrar en la figura 48.

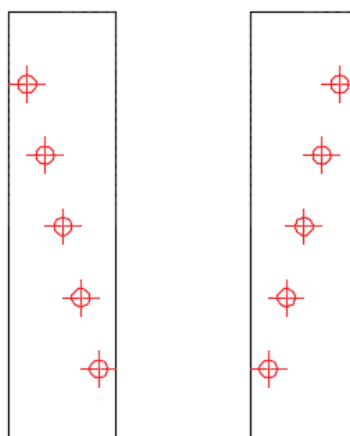


Figura 48 Esquema de medición método de la diagonal.

4.2.3 MEDICIONES DE MASAS DEPOSITADAS.

Para la medición el aporte de masa se midieron los pesos tanto iniciales (previo al zincado) y finales (post zincado) mediante una balanza de alta precisión marca **TRANSCCELL** modelo **PBSL** de capacidad de 6000 [gr] y una apreciación mínima de 0,01 [Kg] como se muestra en la figura 49.



Figura 49 Balanza electrónica TRANSCCELL PBSL.

Fuente: (BASCULAS Y SOLUCIONES, 2015)

4.3 RESULTADOS.

Siguiendo esta premisa se obtuvo la siguiente tabla con el objeto de aplicar la metodología Taguchi, cabe mencionar que la tabla 23 que se muestra a continuación es simplificada, ya que trata los valores promedio de las diez mediciones que se realizaron por cada espécimen de acero ASTM A36.

Para verificar la tabla de experimentación completa verificar el anexo 43.

Tabla 23
Revestimientos y pesos de aporte.

A	B	t	η_c	$\frac{\rho_l}{dm^2}$	Y1	Y2	Y3	Y4	\bar{Y}	s	w_i	w_f	Δw	Δw_{te}
[Amp]	[°C]	[hr]		$\left[\frac{A}{dm^2}\right]$	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]
2,3	18	1,65	0,89	1	22,8	15,6	16,0	15,2	17,4	3,6	45	48	3	4,12
2,3	24	1,65	0,89	1	17,2	12,4	15,4	23,8	17,2	4,8	47	49	2	4,12
2,3	30	1,65	0,89	1	15,4	35,2	19,8	17,3	21,9	9,0	50	52	2	4,12
2,3	35	1,65	0,89	1	16,7	25,0	14,5	16,9	18,3	4,6	47	50	3	4,12
3,5	18	1,13	0,88	1,5	19,4	17,0	13,2	23,4	18,2	4,3	46	48	2	4,16
3,5	24	1,13	0,88	1,5	22,7	14,7	28,4	23,7	22,4	5,7	46	48	2	4,16
3,5	30	1,13	0,88	1,5	26,1	22,6	13,3	20,4	20,6	5,4	47	50	3	4,16
3,5	35	1,13	0,88	1,5	17,3	10,4	23,3	21,8	18,2	5,8	47	50	3	4,16
4,6	18	0,88	0,86	2	29,4	23,7	18,4	17,2	22,2	5,6	47	50	3	4,14
4,6	24	0,88	0,86	2	26,7	24,9	22,5	19,6	23,4	3,0	46	50	4	4,14
4,6	30	0,88	0,86	2	33,1	46,5	43,5	29,6	38,2	8,1	45	50	5	4,14
4,6	35	0,88	0,86	2	22,9	15,6	32,8	23,6	23,7	7,0	46	50	4	4,14
5,8	18	0,74	0,77	2,5	31,4	14,7	19,9	27,9	23,4	7,6	47	50	3	4,14
5,8	24	0,74	0,77	2,5	21,3	18,1	12,2	22,1	18,4	4,5	48	50	2	4,14
5,8	30	0,74	0,77	2,5	31,9	23,3	16,1	34,0	26,3	8,2	46	50	4	4,14
5,8	35	0,74	0,77	2,5	52,7	51,2	41,6	46,2	47,9	5,0	46	53	7	4,14

En la tabla 24 se presentan los resultados de los ensayos que tienen el objetivo de demostrar la influencia del tiempo en el proceso, y verificar la estrecha relación que guarda este parámetro con la densidad de corriente aplicada.

Tabla 24
Resultados de la variación del parámetro tiempo.

I	t	Y1	Y2	Y3	Y4	\bar{Y}	s	w_i	w_f	Δw	Δw_{te}
[Amp]	[hr]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]
2,3	1,65	20,5	19,1	19,34	24,4	20,8	4,3	47	50	3	4,12
2,3	0,74	11,4	11,0	12,6	15,4	12,6	2	45	47	2	1,85
5,8	0,74	29	19,7	20,9	28,5	24,5	4,9	46	49	3	4,14
5,8	1,65	47,8	55,2	51,7	50,5	51,3	8,8	46	55	9	9,22

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS POR METODOLOGÍA TAGUCHI

Hay dos formas de hacer un análisis estadístico con la metodología Taguchi, la una con la relación señal ruido (S/R) y la otra con ANOVA.

La relación S/R predice qué niveles y de qué factores son los más apropiados para obtener la mejor característica de calidad (nominal es mejor), esto se da porque en cada ensayo se obtiene un valor numérico y el mayor de todos logrado, contribuye a la mejora de la característica de la calidad.

ANOVA, predice qué factores contribuyen en mayor medida a la característica de calidad (nominal es mejor), para que a través de esto se maximicen los que más contribuyen y se minimicen los que contribuyen en menor medida.

5.1 Análisis por ANOVA.

El análisis de varianza (ANOVA) calcula cantidades conocidas como grados de libertad, sumas de cuadrados, media cuadrática, y así sucesivamente, y los organiza en un formato tabular estándar. Estas cantidades y sus interrelaciones se definen como se muestra a continuación utilizando la siguiente notación:

V: media cuadrática (varianza).

P: porcentaje de influencia.

S: suma de cuadrados.

T: Total (de resultados).

R: Número de repeticiones (de resultados).

N: Número de experimentos.

f: Grados de libertad.

C.F.: Factor de corrección.

F: Razón de varianza.

Y_{opt}: Rendimiento óptimo en condiciones óptimas.

Previamente se calcula la media aritmética de cada experimento, abajo se muestra un ejemplo del experimento 1 y se muestra en la tabla 23:

$$\bar{Y}_1 = \frac{22,8 + 15,6 + 16,0 + 15,2}{4} = 17,37$$

El total de cada factor es:

Para A:

$$\sum A_1 = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4 = 17,37 + 17,22 + 21,93 + 18,28 = 74,8$$

$$\sum A_2 = \bar{Y}_5 + \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8 = 18,23 + 22,36 + 20,59 + 18,59 = 79,37$$

$$\sum A_3 = \bar{Y}_9 + \bar{Y}_{10} + \bar{Y}_{11} + \bar{Y}_{12} = 22,17 + 23,42 + 38,18 + 23,74 = 107,5$$

$$\sum A_4 = \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{14} + \bar{Y}_{15} + \bar{Y}_{16} = 23,45 + 18,45 + 26,32 + 47,92 = 116,13$$

Para B:

$$\sum B_1 = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_5 + \bar{Y}_9 + \bar{Y}_{13} = 17,37 + 18,23 + 22,17 + 23,45 = 81,22$$

$$\sum B_2 = \bar{Y}_2 + \bar{Y}_6 + \bar{Y}_{10} + \bar{Y}_{14} = 17,22 + 22,36 + 23,42 + 18,45 = 81,44$$

$$\sum B_3 = \bar{Y}_3 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_{11} + \bar{Y}_{15} = 21,93 + 20,59 + 38,18 + 26,32 = 107,02$$

$$\sum B_4 = \bar{Y}_4 + \bar{Y}_8 + \bar{Y}_{12} + \bar{Y}_{16} = 18,28 + 18,19 + 23,74 + 47,92 = 108,13$$

Número de experimentos:

$$N = 16$$

$$N_{A1} = N_{A2} = N_{A3} = N_{A4} = N_{B1} = N_{B2} = N_{B3} = N_{B4} = 4$$

Resultados totales:

$$T = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4 + \bar{Y}_5 + \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8 + \bar{Y}_9 + \bar{Y}_{10} + \bar{Y}_{11} + \bar{Y}_{12} + \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{14} + \bar{Y}_{15} \\ + \bar{Y}_{16}$$

$$T = 17,37 + 17,22 + 21,93 + 18,28 + 18,23 + 22,36 + 20,59 + 18,59 + 22,17 \\ + 23,42 + 38,18 + 23,74 + 23,45 + 18,45 + 26,32 + 47,92 = 377,8$$

Factor de corrección:

$$C.F. = \frac{T^2}{N} = \frac{377,8^2}{16} = 8921$$

Suma de cuadrados:

$$S_T = (\bar{Y}_1^2 + \bar{Y}_2^2 + \bar{Y}_3^2 + \bar{Y}_4^2 + \bar{Y}_5^2 + \bar{Y}_6^2 + \bar{Y}_7^2 + \bar{Y}_8^2 + \bar{Y}_9^2 + \bar{Y}_{10}^2 + \bar{Y}_{11}^2 + \bar{Y}_{12}^2 \\ + \bar{Y}_{13}^2 + \bar{Y}_{14}^2 + \bar{Y}_{15}^2 + \bar{Y}_{16}^2) - C.F.$$

$$S_T = (17,37^2 + 17,22^2 + 21,93^2 + 18,28^2 + 18,23^2 + 22,36^2 + 20,59^2 + 18,59^2 \\ + 22,17^2 + 23,42^2 + 38,18^2 + 23,74^2 + 23,45^2 + 18,45^2 + 26,32^2 \\ + 47,92^2) - 8921 = 1019,58$$

$$S_A = \frac{(\sum A_1)^2}{N_{A1}} + \frac{(\sum A_2)^2}{N_{A2}} + \frac{(\sum A_3)^2}{N_{A3}} + \frac{(\sum A_4)^2}{N_{A4}} - C.F.$$

$$S_A = \frac{(74,8)^2}{4} + \frac{(79,37)^2}{4} + \frac{(107,5)^2}{4} + \frac{(116,13)^2}{4} - 8921 = 313,47$$

$$S_B = \frac{(\sum B_1)^2}{N_{B1}} + \frac{(\sum B_2)^2}{N_{B2}} + \frac{(\sum B_3)^2}{N_{B3}} + \frac{(\sum B_4)^2}{N_{B4}} - C.F.$$

$$S_B = \frac{(81,22)^2}{4} + \frac{(81,44)^2}{4} + \frac{(107,02)^2}{4} + \frac{(108,13)^2}{4} - 8921 = 172,34$$

$$S_e = S_T - (S_A + S_B) = 1019,58 - (313,47 + 172,34) = 533,76$$

Grados de libertad:

$$f_T = N \times R - 1 = 16 \times 1 - 1 = 15$$

$$f_A = \text{número de niveles de A} - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$f_B = \text{número de niveles de B} - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$f_C = \text{número de niveles de C} - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$f_D = \text{número de niveles de D} - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$f_e = f_T - f_A - f_B = 15 - 3 - 3 = 9$$

Varianza:

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = \frac{313,47}{3} = 104,49$$

$$V_B = \frac{S_B}{f_B} = \frac{172,34}{3} = 57,45$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{533,76}{9} = 59,31$$

Razón de varianza:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} = \frac{104,49}{59,31} = 1,7619$$

$$F_B = \frac{V_B}{V_e} = \frac{57,45}{59,31} = 0,9686$$

$$F_e = \frac{V_e}{V_e} = \frac{59,31}{59,31} = 1$$

Porcentaje de influencia:

$$P_A = S_A \times \frac{100}{S_T} = 313,47 \times \frac{100}{1019,58} = 30,75$$

$$P_B = S_B \times \frac{100}{S_T} = 172,34 \times \frac{100}{1019,58} = 16,9$$

La tabla 25 indica qué factores contribuyen en mayor medida a la electrodeposición, que en este caso es la intensidad de corriente con un 31%, seguida de la temperatura con un 17%, por lo tanto se maximizará la corriente a un nivel adecuado para obtener por lo menos 25 [μm] de espesor en la electrodeposición.

Tabla 25
Análisis de Varianza (ANOVA).

Factor	f	S	V	F	P (%)
A	3	313,47	104,49	1,7619	30,75
B	3	172,34	57,45	0,9687	16,9
Error	9	533,76	59,31		
Total	15	1019,58			

5.1.1 Análisis de Medias.

Para completar el análisis de varianza (ANOVA), una de las formas de predecir el valor óptimo esperado en un experimento de confirmación es usar las medias de acuerdo a la característica de calidad que se desee (nominal es mejor).

Para A:

$$\bar{A}_1 = \frac{\sum A_1}{N_{A1}} = \frac{74,8}{4} = 18,7$$

$$\bar{A}_2 = \frac{\sum A_2}{N_{A2}} = \frac{79,37}{4} = 19,84$$

$$\bar{A}_3 = \frac{\sum A_3}{N_{A3}} = \frac{107,5}{4} = 26,88$$

$$\bar{A}_4 = \frac{\sum A_4}{N_{A4}} = \frac{116,13}{4} = 29,03$$

Para B:

$$\bar{B}_1 = \frac{\sum B_1}{N_{B1}} = \frac{81,22}{4} = 20,3$$

$$\bar{B}_2 = \frac{\sum B_1}{N_{B2}} = \frac{81,44}{4} = 20,36$$

$$\bar{B}_3 = \frac{\sum B_1}{N_{B3}} = \frac{107,02}{4} = 26,75$$

$$\bar{B}_4 = \frac{\sum B_1}{N_{B4}} = \frac{108,13}{4} = 27,03$$

La tabla 26 muestra la media (en micras) de cada nivel y factor como resultado de los 16 ensayos.

Tabla 26
Medias de cada factor y nivel.

Factores	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4
\bar{A}	18.7	19.84	26.88	29.03
\bar{B}	20.30	20.36	26.75	27.03

Las figuras 50 y 51 muestran que niveles son los más adecuados para obtener el mejor espesor de electrodeposición, que en este caso debe ser de al menos 25 micras.

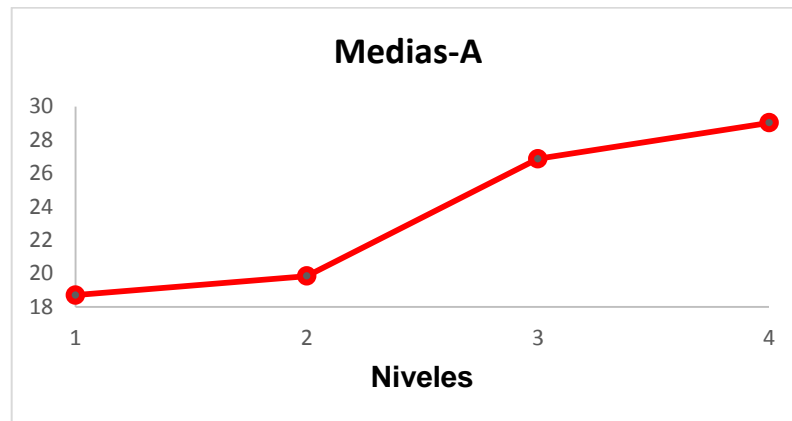


Figura 50 Efecto del factor A (intensidad de corriente).

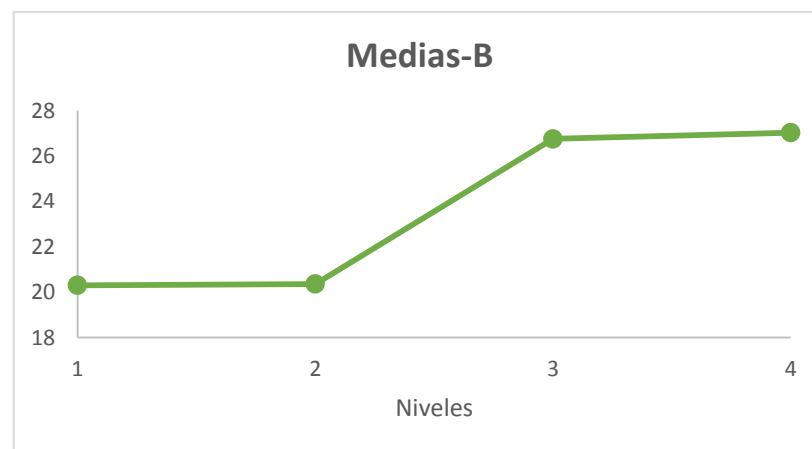


Figura 51 Efecto del factor B (temperatura de solución).

Después de esto se realiza una prueba o pruebas confirmatorias usando las condiciones óptimas.

Usando ANOVA y el análisis de medias, se toman para el factor A, el tercero con 26,88 [μm] y para el factor B, el tercero con 26,75 [μm].

Para terminar, se usa la ecuación 2.13, concerniente al espesor óptimo (Y_{opt}), en donde se muestran todos los datos de ésta en la tabla 29; se nota que a partir del experimento 11 hasta el 16 cumplen con lo mínimo de 25 [μm], pero no se toman en cuenta en los ensayos confirmatorios, los experimentos 12, 13,

14 y 15, debido a que al menos una de sus probetas en cada experimento no cumple con el espesor de 25 [μm].

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left(\frac{\Sigma A_3}{4} - \frac{T}{N} \right) + \left(\frac{\Sigma B_3}{4} - \frac{T}{N} \right)$$

$$Y_{opt} = \frac{377,8}{16} + \left(\frac{107,5}{4} - \frac{377,8}{16} \right) + \left(\frac{107,02}{4} - \frac{377,8}{16} \right) = 30,02 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Se realiza un ensayo de optimización con los parámetros seleccionados y la comprobación se muestra en la tabla 27, en donde el valor de 29,3 [μm] se acerca al valor de optimización que es de 30,02 [μm] y está sobre 25 [μm] tal como indica la norma ASTM B633 como requisito de cumplimiento de espesor para una condición de servicio severa.

Tabla 27
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

5.2 Análisis de la relación señal-ruido (S/R).

Para conocer si la mejor relación señal-ruido (S/R) de entre las posibles combinaciones de factores y niveles que se darían en un experimento, se realizan los siguientes cálculos de acuerdo a la ecuación 2.17.

Abajo se muestra un ejemplo, el del experimento 1:

$$\frac{S}{R} = 10 * \log_{10} \left[\frac{(\bar{Y}_1)^2}{(s_1)^2} \right] = 10 * \log_{10} \left[\frac{(17,37)^2}{(3,6)^2} \right] = 13,65$$

Así para cada experimento los resultados se muestran en la tabla 29.

De esta manera se entiende que el mejor nivel para el factor A y factor B es del experimento 16 con el valor de 19,58, porque su relación (S/R) es la más alta.

Esto se observa también en la figura 52 en donde se muestra que el pico más pronunciado corresponde al experimento 16.

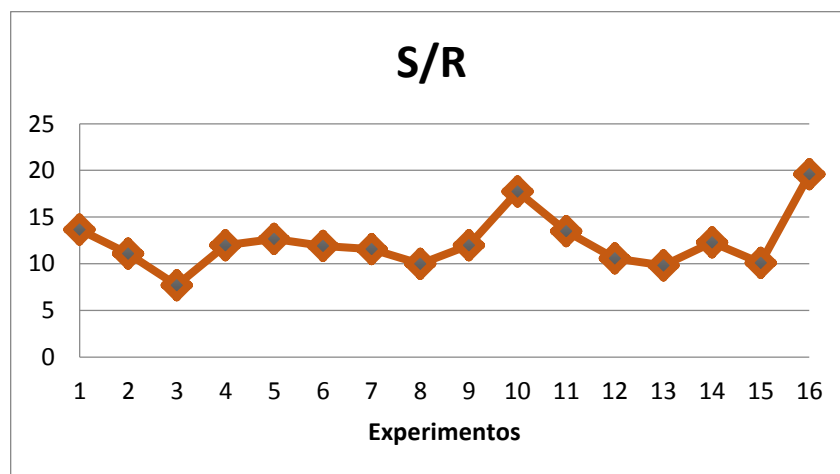


Figura 52 Relaciones S/R de cada experimento.

Después de esto se realiza una prueba confirmatoria usando las condiciones óptimas nuevamente aplicando la ecuación 2.13, pero con los resultados del experimento 16.

En esta etapa se comprueban las conclusiones del experimento y se planean las acciones futuras.

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left(\frac{\Sigma A_4}{4} - \frac{T}{N} \right) + \left(\frac{\Sigma B_4}{4} - \frac{T}{N} \right)$$

$$Y_{opt} = \frac{377,8}{16} + \left(\frac{116,13}{4} - \frac{377,8}{16} \right) + \left(\frac{108,13}{4} - \frac{377,8}{16} \right) = 32,45 [\mu m]$$

La tabla 28 muestra que el espesor del ensayo de optimización en función de la variable de señal ruido es 38,6 [μm], valor por encima del obtenido por el cálculo de optimización que es de 32,45 [μm].

Tabla 28
Ensayo confirmatorio de la relación S/R.

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]
5,8	35	0,74	39,2	40,9	37,0	37,2	38,6	45	51	6	4,14

Al realizar la comparación del cálculo de optimización y el ensayo, entre el primero cuya diferencia es **(30,02[μm]-29,3[μm]=0,72 [μm])** y el segundo **(32,45 [μm]- 38,6 [μm] = 6,15 [μm])** respectivamente, se nota que en el primero se acerca más al cálculo inicial y también al valor nominal propuesto a optimizar de 25 [μm] de zinc.

En la tabla 29 se observan los resultados de señal ruido y espesor de respuesta óptimo para los 16 experimentos realizados, donde se puede verificar que a partir de un amperaje de 4,6 [A] y una temperatura de 30[°C] se obtienen resultados acorde con lo que la norma ASTM B633 rige como espesor mínimo de 25 [μm], además es aquí donde se puede seleccionar cuál de las combinaciones de parámetros es la correcta, con el objeto de mejorar el proceso de producción del galvanizado.

Tabla 29
Resultados S/R y espesor óptimo.

Experimento	A [Amp]	B [°C]	S/R	Y_{opt} [μm]
1	2,3	18	13,65	15,39
2	2,3	24	11,07	15,45
3	2,3	30	7,69	21,84
4	2,3	35	11,98	22,12
5	3,5	18	12,64	16,53
6	3,5	24	11,9	16,59
7	3,5	30	11,57	22,98
8	3,5	35	9,97	23,26
9	4,6	18	11,98	23,57
10	4,6	24	17,72	23,62
11	4,6	30	13,47	30,02
12	4,6	35	10,57	30,29
13	5,8	18	9,81	25,72
14	5,8	24	12,27	25,78
15	5,8	30	10,1	32,17
16	5,8	35	19,58	32,45

5.3 ANÁLISIS RESULTADOS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO.

Para verificar si existe una relación directa del parámetro tiempo, con respecto a la densidad de corriente catódica se realizaron ensayos manteniendo constante la temperatura a 18 [°C], y se intercambiaron los valores de corriente y tiempo de electrodeposición, con el objeto de verificar el aumento del espesor del zincado como se muestra en la tabla 30:

Tabla 30
Resultados de la variación del tiempo.

I	t	Y1	Y2	Y3	Y4	\bar{Y}	w_i	w_f	Δw	Δw_{te}
[Amp]	[hr]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]
2,3	1,65	20,5	19,14	19,34	24,4	20,8	47	50	3	4,14
2,3	0,74	11,42	11,04	12,63	15,41	12,6	45	47	2	1,85
5,8	0,74	29,03	19,66	20,88	28,53	24,5	46	49	3	4,14
5,8	1,65	47,8	55,2	51,7	50,5	51,3	46	54	8	9,22

A continuación en la tabla 31 se muestra el análisis de los resultados de la tabla 30, en función de errores porcentuales.

Tabla 31
Análisis de la variación del tiempo.

\bar{Y}	Y_{esp}	<i>Error%</i>	Δw	Δw_{te}	<i>Error%</i>
[μm]	[μm]		[gr]	[gr]	
20,8	25,0	16,8	3	4,12	27,2
12,6	11,3	11,5	2	1,85	8,1
24,5	25,0	2,0	4	4,14	3,4
51,3	55,7	7,9	8	9,22	13,2

Como se puede observar en la tabla 30 existe una relación directa entre la corriente y el tiempo de electrodeposición, ya que si se incrementa éste último aumenta directamente el espesor de zinc y/o viceversa, en función de la ecuación 2.7.

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

Es decir que la corriente y el tiempo son directamente proporcionales al espesor de deposición, si se desea obtener un espesor nominal existe un tiempo específico para cada corriente seleccionada de galvanizado.

5.4 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA GLOBAL DEL SISTEMA.

Se realiza un análisis de las masas de electrodeposición aplicando las leyes de Faraday, y de esta manera obtener el rendimiento global del sistema de galvanizado alcalino no cianurado.

El error global porcentual del sistema se obtiene calculando el promedio de los errores de electrodeposición entre la diferencia de masas depositadas reales y calculadas mediante la segunda ley de Faraday mostrada en la ecuación 2.3.

Para obtener la efectividad o eficiencia del sistema y equipo diseñado en este proyecto de investigación se obtiene mediante la diferencia del error porcentual global y el 100% de efectividad del mismo, como lo muestra la ecuación 4.1:

$$\eta_g = 100\% - Error_{\%} \quad \text{Ec. 5. 1}$$

La tabla 32 muestra los resultados de las masas electrodepositadas y los valores del error porcentual y rendimiento global del sistema de galvanizado de los 16 ensayos realizados a lo largo de este proyecto.

Tabla 32
Eficiencia global del sistema de electrodeposición.

I [Amp]	T [°C]	w_i [gr]	w_f [gr]	Δw [gr]	Δw_{te} [gr]	Error %
2,3	18	45	48	3	4,12	33,3
2,3	24	47	49	2	4,12	33,3
2,3	30	50	52	2	4,12	39,3
2,3	35	47	50	3	4,12	33,3
3,5	18	46	48	2	4,16	45,9
3,5	24	46	48	2	4,16	33,9
3,5	30	47	50	3	4,16	39,9
3,5	35	47	50	3	4,16	33,9
4,6	18	47	50	3	4,14	27,5
4,6	24	46	50	4	4,14	8,7
4,6	30	45	50	5	4,14	26,8
4,6	35	46	50	4	4,14	3,4
5,8	18	47	50	3	4,14	21,5
5,8	24	48	50	2	4,14	39,6
5,8	30	46	50	4	4,14	9,4
5,8	35	46	53	7	4,14	81,2
ERROR PROMEDIO DEL SISTEMA DE ELECTRODEPOSICIÓN						31,9
RENDIMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA DE ELECTRODEPOSICIÓN						68,1%

Como se puede observar la efectividad o eficiencia global del equipo y tipo de baño realizado es del 68,1%, valor cercano al que corresponde a un baño alcalino no cianurado que se mostró en el capítulo dos, donde el rango de eficiencia es del 50 al 70%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- Se construyó un tanque con una capacidad de 42 [L]; se implementó un sistema de agitación catódica mecánico biela-manivela con velocidades dentro del rango de 3 a 7 $\left[\frac{m}{min}\right]$; se seleccionó el sistema de baño “RACK” o de bastidor, una resistencia eléctrica de 2500 [W], un sistema de control digital de temperatura, un rectificador de 10 [Amp] y 30 [V].
- La eficiencia global del equipo de electrodeposición y sistema de baño seleccionado fue del 68,1%, valor esperado para este tipo de proceso de recubrimiento alcalino no cianurado.
- Los parámetros del proceso son tiempo, (densidad de corriente) intensidad de corriente, estos dos son dependientes el uno del otro, los otros son voltaje, temperatura, posición de la cada probeta en la cuba electrolítica (factor de ruido), pH de la solución, agitación catódica.
- La metodología estadística más conveniente es Taguchi, resultando una matriz ortogonal de $L_{16}(4)^2$, con 16 experimentos, de dos factores y cuatro niveles por factor.
- Los parámetros seleccionados para el análisis son la densidad de corriente (intensidad de corriente) con $1\left[\frac{A}{dm^2}\right](2,3 [A])$, $1,5\left[\frac{A}{dm^2}\right](3,5 [A])$, $2\left[\frac{A}{dm^2}\right](4,6 [A])$, y $2,5\left[\frac{A}{dm^2}\right](5,8 [A])$ y temperatura con 18[°C], 24[°C], 30[°C], 35[°C]; con ANOVA se encontró que el parámetro de más influencia en el zincado es la densidad de corriente (intensidad de corriente) con un porcentaje del 31%, y mediante el análisis de medias

los niveles óptimos son $2 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ (4,6 [A]) y 30 [°C]; por el contrario el análisis de la razón señal-ruido indica que los niveles óptimos son 2,5 $\left[\frac{A}{dm^2} \right]$ (5,8 [A]) y 35 [°C].

- El análisis de medias brinda el mejor resultado, cumpliendo con el espesor para condición de servicio severo cinco, que rige un espesor mínimo de capa de 25 [µm] son $2 \left[\frac{A}{dm^2} \right]$ (4,6 [A]) y 30 [°C], con un espesor promedio óptimo teórico de 30,02 [µm] y experimental de 29,3 [µm], valor que cumple con lo estipulado en la norma B633.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Se deben realizar enjuagues con agua a las probetas entre cada pre-tratamiento para maximizar los efectos del decapado y desengrase; y también antes de la puesta en marcha del zincado.
- Utilizar las medidas de seguridad pertinentes antes, durante y después del zincado; es decir usando guantes dieléctricos y resistentes a soluciones químicas ácidas, mascarillas, protecciones visuales y también mandil; no manipular el circuito de la electrólisis, con especial énfasis en las barras catódicas y anódicas debido al riesgo de electrocución.
- Usar el equipo de zincado en frío con una campana extractora de gases para evitar la contaminación al ambiente de vapores tóxicos.
- Realizar el mantenimiento de la solución electrolítica completando el nivel con brillo ZSC, Make-up ZSC y purificador ZSC de acuerdo a lo establecido en las hojas de seguridad mostradas en los anexos.
- Es recomendable utilizar la metodología Taguchi en casos donde la cantidad de parámetros y niveles a combinar en un diseño de experimentos sea alta, ya que por medio de la matriz ortogonal simplificar el número de combinaciones posibles se vuelve considerable.

- Es recomendable realizar un correcto análisis de la mezcla química del electrolito con las cantidades justas y necesarias de cada químico de interés, ya que ingresar las cantidades incorrectas puede ocasionar en futuras malas electrodeposiciones y lograr que la eficiencia del sistema baje considerablemente.
- Tener precaución todas las normas de seguridad, ya que el equipo utiliza altos amperajes, que pueden ocasionar graves accidentes, sobre todo en el área de las barras de cobre electrolítico.
- Usar todos los implementos de seguridad como mascarillas y guantes anticorrosivos de preferencia plástico para evitar las altas corrientes como también daños en la piel por los químicos altamente cáusticos y ácidos que se manejan.

BIBLIOGRAFÍA

- Marshal Laboratories. (s.f.). Obtenido de <http://www.marshallab.com/microfiltration-filter-units.html>*
- Alcaraz, T. (2005). Metodos Galvánicos en la industria.*
- AliExpress. (2016). Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/FREE-SHIPPING-ZHAOXIN-KXN-3010D-DC-power-supply-0-30V-0-10A-Electroplating-power-constant-current/32323007308.html>*
- Álvarez, A., & Chango, G. (2012). Diseño y construcción de una planta piloto para recubrimientos metálicos . Riobamba.*
- APR PLASTIC FABRICATING, INC. (s.f.). Obtenido de http://www.aprtanks.com/binary/org/APRTANKS/APRTANKS_1/Plating/Large/Plating_8.jpg*
- ASME. (2013). Tanques rectangulares sometidos a presión hidrostática. En Código ASME Sección XVIII Div 1. Diseño, construcción e inspección de tanques y recipientes a presión (págs. 182-185). United States.*
- ASME Sección VIII Tablas UCS-23. (2013). Características de materiales ferrosos Aceros al carbono y de baja aleación. United States.*
- ASTM INTERNATIONAL. (2013). Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel. EE.UU.*
- ASTM INTERNATIONAL. (2013). Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel. B633. West Conshohocken, United States: ASTM INTERNATIONAL.*
- Ayala, O., Flores, J., & Mendoza, W. (2004). Diseño y construcción de una celda para pulido y ataque electrolítico en muestras metalográficas. El Salvador.*
- BASCULAS Y SOLUCIONES. (2015). Recuperado el 2016, de <http://tiendas.seccionamarilla.com.mx/tiendabasculasysoluciones/esp/item/15/balanza-portatil>*
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). Introduction to heat transfer (Sixth ed., Vol. I). Jefferson, United States: JOHN WILEY & SONS, INC.*
- Biddulph, C. (2011). Zinc Electroplating. Zinc Electroplating (CHOOSING THE BEST PROCESS FOR YOUR OPERATION).*

- Campbell, S., & Walsh, F. (1992). *pH Measurements*. Portsmouth, UK.
- Cengel, Y. (2007). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Cevallos, M., & Defaz, A. (2008). *Rediseño del proceso de cincado de la empresa metalquímica galvano*. Quito.
- Chang, R. (2002). *Química General*.
- Cicek, V. (2013). *Cathodic Protection Industrial Solutions for Protecting Against Corrosion*. New Jersey: WILEY.
- DIRECT INDUSTRY. (2016). Obtenido de <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/termostato-61161.html>
- Durney, L. J., & Graham, K. (1985). *Graham's Electroplating Engineering Handbook (Vol. 4)*.
- elcometer. (2016).
- Electroporcelana GAMMA S.A. (19 de Junio de 2014). *Catálogo de productos. Aisladores tipo carrete*. Sabaneta, Antioquia, Colombia: CIDET.
- Epec. (s.f.). *Relaciones Públicas*. Obtenido de <http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichafaraday.pdf>
- ERMALO TECHNICAL SUPPLY. (2014). Obtenido de <http://www.ermalo.eu/process-technology.html>
- Fields, W., Duncan Ronald, Z. J., & Electroless, A. C. (s.f.). *Plating and Electropolishing*.
- FUJIAN SHAN S.A. (20 de Agosto de 2009). *Hoja de Seguridad SODA CÁUSTICA ESCAMAS-CRISTAL*.
- GALVANO. (2012). *Hoja de seguridad ZINCADO ALCALINO SIN CIANURO*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Geduld, H., & Plating, A. C. (s.f.). *Plating and Electropolishing*.
- Gómez, D. (2014). Obtenido de m.taringa.net/comunidades/acuario/8762350/APORTE-Enfermedades-por-la-Baja-en-el-nivel-de-PH.html
- González, A., & Cesari, R. (2009). *MATERIALES ELÉCTRICOS*. Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

- Grases, F., Costa, A., & Söhnel, O. (2000). *Cristalización en disolución: conceptos básicos*.
- Kanani, N. (2004). *Electroplating Basic Principles, Processes and Practice (Vol. 1)*. Berlín, Alemania: ATOTECH (ELSEVIER).
- Martínez, E. C. (Dirección). (2011). *Densidad de una mezcla*. [Película].
- Martínez, Y., Juárez, H., Raymundo, R., Alvarado, S., Valverde, F., Piedra, J., y otros. (27 de Junio de 2012). (INIAP) Recuperado el 8 de Septiembre de 2016, de http://192.156.137.121:8080/cipotato/region-quito/congresos/v-congreso-ecuatoriano-de-la-papa/resumen_jmartineza.pdf
- Mayacela, C., & Otañez, N. (2013). *Diseño, construcción e implementación de un sistema de pulido electrolítico de materiales ferrosos para el proceso de cromado en la empresa "INGENIEROS LARA NUÑEZ CIA LTDA"*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales (Vol. v)*. PEARSON.
- Myszka, D. (2012). *Máquinas y Mecanismos (Cuarta ed., Vol. I)*. (M. Contreras, L. Cruz, F. Hernández, & T. Enrique, Trads.) Juárez: PEARSON.
- NACE INTERNATIONAL. (2004). *CURSO BÁSICO DE CORROSIÓN, MANUAL DEL ESTUDIANTE*. Houston.
- NIIR Board of Consultants & Engineers. (2005). *The Complete Technology Book on Electroplating, Phosphating, Powder Coating and Metal Finishing*. New Dehli: Asia Pacific Business Press Inc.
- Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. (Cuarta ed., Vol. 1)*. Worcester, Massachusetts, United States: McGraw-Hill.
- Petrucci, R., & Harwood, W. (2003). *Química General (Vol. 8)*. Pearson Educación, S.A.
- PHILIP MACHINE. (2014). Obtenido de <http://www.philipmachine.com/racks.html>
- PRODUCTS FINISHING (PF). (17 de Abril de 2013). Obtenido de <http://www.pfonline.com/products/titanium-coils-for-heatingcooling-baths>
- Ranjit, R. (2010). *A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD (Segunda ed.)*. Dearborn Michigan, United States: Society of Manufacturing Engineers (SME).

- Reyes, P. (2008). *www.icicm.com*. Obtenido de http://www.icicm.com/files/EJEMPLO_DISE_O_TAGUCHI.doc
- Ruiz, J. (2006). *Recubrimientos electrolíticos aplicados a prácticas del laboratorio de tratamientos superficiales de procesos de producción mecánica*. Ecuador.
- Sánchez, Á. (3 de Julio de 2014). *Coeficiente de fricción*. Obtenido de Prezi: <https://prezi.com/t3e9eeebw4ck/coeficiente-de-friccion/>
- SENPLADES. (2013). Obtenido de <http://www.buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional;jsessionid=AE354D2BC91F1D8FEE8C88F1628DB3DB>
- Sierka, C. (2015). *Industrial zinc plating processes*. Indiana, EE.UU.
- Sociedad Civil del cantón Rumiñahui. (7 de Abril de 2001). *Atlas de Rumiñahui*. Atlas de Rumiñahui. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Steiner, E. (2005). *Matemáticas para las ciencias aplicadas*. New York, United States: REVERTÉ.
- Tabuada, B. (2015). *Diseño y construcción de un destilador solar para agua de una capacidad de 200 ml/día para los laboratorios del CIVABI*. Quito, Pichincha, Ecuador: UPS.
- TECHNIC INC. (s.f.). *Agitation Systems and Accesories*. Rhode Island, EE.UU.
- Terrádez, M., & Ángel, J. (s.f.). *ÁNALISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)*. ANOVA. Catalonia.
- White, F. M. (2004). *Fluid Mechanics (Quinta ed., Vol. I)*. Rhode Island, United States: McGraw-Hill.
- witt lining systems. (s.f.). *witt lining systems*. Obtenido de http://wittliners.com/tank_liners_tank_liner.asp
- Yessica, M. (s.f.). *Mapeo de Zinc y Hierro en suelos ecuatorianos para la focalización de. (INIAP) Obtenido de áreas potenciales para la biofortificacion agronómica del cultivo de la papa:* http://192.156.137.121:8080/cipotato/region-quito/congresos/v-congreso-ecuatoriano-de-la-papa/jessica_martinez.pdf
- http://192.156.137.121:8080/cipotato/region-quito/congresos/v-congreso-ecuatoriano-de-la-papa/resumen_jmartineza.pdf
- http://www.aprtanks.com/binary/org/APRTANKS/APRTANKS_1/Plating/Large/Plating_8.jpg

http://wittliners.com/tank_liners_tank_liner.asp

<http://www.ermalo.eu/process-technology.html>

<http://www.pfonline.com/products/titanium-coils-for-heatingcooling-baths>

<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/termostato-61161.html>

<http://www.philipmachine.com/racks.html>

<http://www.marshallab.com/microfiltration-filter-units.html>

<https://es.aliexpress.com/item/FREE-SHIPPING-ZHAOXIN-KXN-3010D-DC-power-supply-0-30V-0-10A-Electroplating-power-constant-current/32323007308.html>

ANEXOS