



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DEL PROCESO QUÍMICO DE GALVANIZADO POR
INMERSIÓN EN CALIENTE DE PIEZAS INDUSTRIALES PARA
LA EMPRESA PCA COMPANY S.A**

Trabajo de Titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: EDUARDO POLO GARCÍA CEPEDA

Riobamba – Ecuador

2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DEL PROCESO QUÍMICO DE GALVANIZADO POR
INMERSIÓN EN CALIENTE DE PIEZAS INDUSTRIALES PARA
LA EMPRESA PCA COMPANY S.A**

Trabajo de Titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: EDUARDO POLO GARCÍA CEPEDA

TUTORA: Ing. MAYRA PAOLA ZAMBRANO VINUEZA Msc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Eduardo Polo García Cepeda

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Polo Eduardo García Cepeda, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 8 de diciembre de 2021

EDUARDO
POLO GARCIA
CEPEDA



Digitally signed by
EDUARDO POLO
GARCIA CEPEDA
Date: 2021.12.08
11:58:34 -05'00'

Eduardo P.. García Cepeda

CI. 0603379678

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo Propuesta Tecnológica “**DISEÑO DEL PROCESO QUÍMICO DE GALVANIZADO EN POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE PIEZAS INDUSTRIALES PARA LA EMPRESA PCA COMPANY S.A**”, realizado por el señor: **EDUARDO POLO GARCÍA CEPEDA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Segundo Hugo Calderón PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: SEGUNDO HUGO CALDERON .	07-09-2021
Ing. Mayra Paola Zambrano Vinueza Msc DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: MAYRA PAOLA ZAMBRANO VINUEZA	07-09-2021
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera Msc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: MABEL MARIELA PARADA RIVERA	07-09-2021

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico Dios y a mi familia, por ser quienes me apoyaron ante las dificultades que se presentaron durante el largo camino recorrido, hasta culminar mis estudios.

Eduardo P. García Cepeda

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fuerza para superar este reto, a mi familia por apoyarme en cada decisión que he tomado. Agradezco a la Ing. Mayra Zambrano e Ing. Mabel Parada, quienes me ayudaron a poder completar este trabajo, por su paciencia y capacidad.

Eduardo P. García Cepeda

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
1.1.	Bases Teóricas.....	5
1.1.1.	<i>Historia del proceso de galvanizado</i>	5
1.1.2.	<i>Proceso de Galvanizado Industrial</i>	9
1.1.2.1.	<i>Pretratamiento químico</i>	9
1.1.2.2.	<i>Recubrimiento metálico con Zinc</i>	15
1.1.2.3.	Postratamiento y control de calidad.....	16
1.2.	Marco Legal.....	20
1.2.1.	<i>Internacional</i>	20
1.2.2.	<i>Nacional</i>	20

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO.....	21
2.1.	Recopilación de información.....	22
2.2.	Necesidades de la empresa.....	22
2.3.	Planteamiento de alternativas.....	22
2.4.	Estudio experimental.....	22
2.4.1.	<i>Desengrasado básico</i>	23
2.4.2.	<i>Decapado</i>	23
2.4.3.	<i>Fluxado</i>	24
2.4.4.	<i>Enjuagado</i>	24
2.4.5.	<i>Recubrimiento</i>	24
2.5.	Diseño del proceso.....	26
2.5.1.	<i>Variables del proceso</i>	26
2.5.2.	<i>Diagrama de bloques del proceso (DBP)</i>	27

2.5.3.	Diagrama de flujo del proceso (DFP)	30
2.5.4.	Balance de masa y energía	33
2.5.4.1.	<i>Modelo de tanque térmico</i>	33
2.5.4.2.	<i>Modelo tanque no térmico</i>	37
2.5.4.3.	<i>Cálculo de los flujos de arrastre (F)</i>	38
2.5.4.4.	<i>Cálculo de la cantidad de solución evaporada (E)</i>	39
2.5.4.5.	<i>Sección 1 – Proceso de desengrasado</i>	40
2.5.4.6.	<i>Sección 2 – Proceso de decapado y fluxado</i>	43
2.5.4.7.	<i>Sección 3 – Recubrimiento</i>	45
2.5.5.	Dimensionamiento de equipos principales	51
2.5.5.1.	<i>Tanques de tratamiento químico</i>	51
2.5.5.2.	<i>Horno de fundición de Zinc</i>	52
2.5.5.3.	<i>Recuperador de calor</i>	55
2.6.	Cálculos de diseño	56
2.6.1.	Balances de masa y energía del proceso	56
2.6.1.1.	<i>Cálculo de los flujos de araste (F)</i>	56
2.6.1.2.	<i>Cálculo de la cantidad de solución evaporada (E)</i>	57
2.6.1.3.	<i>Cálculo de balances de masa y energía sección 1</i>	59
2.6.1.4.	<i>Cálculo de balances de masa y energía sección 2</i>	63
2.6.2.	Dimensionamiento de equipos	65
2.6.2.1.	<i>Tanques de tratamiento químico</i>	65
2.6.2.2.	<i>Horno de fundición de Zinc</i>	66
2.6.2.3.	<i>Intercambiadores de calor</i>	71
2.6.2.4.	<i>Secador</i>	73
2.6.3.	Estimación de costos	75
2.6.3.1.	<i>Consumo de reactivos químicos</i>	75
2.6.3.2.	<i>Costo de equipamiento</i>	76
2.6.4.	Diagrama de planta	79

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS	80
3.1.	Estudio experimental	80
3.1.1.	<i>Desengrasado</i>	80
3.1.2.	<i>Decapado</i>	80
3.1.3.	<i>Fluxado</i>	81
3.1.4.	<i>Enjuagado</i>	81

3.1.5.	<i>Recubrimiento con zinc</i>	81
3.2.	<i>Balance de masa</i>	82
3.3.	<i>Dimensionamiento de equipos</i>	84
3.3.1.	<i>Tanques de tratamiento químico</i>	84
3.3.2.	<i>Horno de fundición de zinc</i>	84
3.3.3.	<i>Intercambiador de calor</i>	85
3.3.4.	<i>Secador</i>	85
3.4.	<i>Control de calidad</i>	87
CONCLUSIONES.....		88
RECOMENDACIONES.....		89
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Composición de soluciones desengrasantes alcalinas	11
Tabla 2-1: Parámetros para soluciones desengrasantes alcalinas.....	11
Tabla 3-1: Composición de solución de desengrase acida.....	12
Tabla 4-1: Parámetros para el proceso de decapado.....	12
Tabla 5-1: Concentraciones de componentes de soluciones de desecho.....	13
Tabla 6-1: Propiedades de la solución de fluxado.....	13
Tabla 7-1: Condiciones del proceso de galvanizado.....	15
Tabla 8-1: Tamaño de muestra ISO 1461.....	17
Tabla 9-1: Masas mínimas de recubrimiento según ISO 1461.....	18
Tabla 11-1: Legislación o normativa internacional sobre galvanización en caliente.....	20
Tabla 10-1: Legislación y normativa nacional sobre galvanizado en caliente.....	20
Tabla 1-2: Cantidades de reactivos de la prueba del desengrase básico.....	23
Tabla 2-2: Condiciones de la prueba de desengrase básico.....	23
Tabla 3-2: Condiciones de la prueba de decapado.....	23
Tabla 4-2: Parámetros para el proceso de fluxado.....	24
Tabla 5-2: Condiciones de la prueba de galvanizado.....	24
Tabla 6-2: Tabla de variables de proceso para el proceso de galvanización en caliente.....	26
Tabla 7-2: Coeficientes de arrastre para distintos materiales.....	38
Tabla 8-2: Factores de conversión entre tonelaje y superficie.....	38
Tabla 9-2: Parámetros para el cálculo del arrastre de solución (F).....	56
Tabla 10-2: Temperaturas del proceso de galvanización.....	57
Tabla 11-2: Factores de evaporación de los tanques de tratamiento.....	58
Tabla 12-2: Dimensiones mínimas para los tanques de tratamiento.....	58
Tabla 13-2: Volumen específico del agua y vapor de agua.....	59
Tabla 14-2: Caudales de evaporación de los tanques de pretratamiento.....	59
Tabla 15-2: Flujos masicos de evaporación de los tanques de pretratamiento.....	59
Tabla 16-2: Propiedades térmicas del vapor y agua líquida.....	61
Tabla 17-2: Entalpias específicas de las corrientes del pretratamiento.....	61
Tabla 18-2: Entalpias de las corrientes de evaporados del pretratamiento.....	62
Tabla 19-2: Dimensiones mínimas de los tanques de pretratamiento.....	65
Tabla 20-2: Propiedades termodinámicas del zinc.....	66
Tabla 21-2: Parámetros para el cálculo del coeficiente de convección natural.....	67
Tabla 22-2: Parámetros para el cálculo del coeficiente de convección.....	69
Tabla 23-2: Temperaturas de las corrientes del recuperador de calor.....	71
Tabla 24-2: Parámetros del proceso de secado.....	73

Tabla 25-2: Costo de reactivos químicos	75
Tabla 26-2: Costos estimados de los principales equipos.	78
Tabla 1-3: Resultados de balance de masa y energías, sección 1.....	82
Tabla 2-3: Resultados de balance de masa y energía, sección 2.	83
Tabla 3-3: Resultados de las dimensiones de los tanques de tratamiento.	84
Tabla 4-3: Resultados del dimensionamiento del horno de fundición.	85
Tabla 5-3: Resultados del dimensionamiento del recuperador de calor.....	85
Tabla 6-3: Resultados de dimensionamiento del secador	86
Tabla 7-3: Resultados de dimensionamiento del secador	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Dagas de hierro de la tumba del Faraón Tutankhamun, 1350 B.C.....	5
Figura 2-1.	Principales eventos en el desarrollo del proceso de galvanización.	7
Figura 3-1.	Proceso de galvanizado en el siglo XIX.....	7
Figura 4-1.	Diagrama del proceso de galvanizado moderno.....	9
Figura 5-1.	Planta de galvanizado moderna.	9
Figura 6-1.	Conjunto de piezas sometidas al pretratamiento químico.	10
Figura 7-2.	Reacciones químicas que tienen lugar en el proceso de fluxado.....	14
Figura 8-1.	Enfriamiento de piezas.	16
Figura 9-1.	Enfriamiento de piezas.	16
Figura 1-2.	Diagrama del proceso de diseño.....	21
Figura 2-2.	Horno de fundición para metales.....	25
Figura 3-2.	Diagrama de bloques del proceso.....	27
Figura 4-2.	Diagrama de flujo del proceso.....	30
Figura 5-2.	Modelos de tanques: termino y no térmico.	33
Figura 6-2.	Factor de conversión para hojas de acero por su espesor	39
Figura 7-2.	Evaporación de solvente en función de temperatura y extracción.....	40
Figura 8-2.	Diagrama de flujo de la sección 1.	41
Figura 9-2.	Diagrama de flujo de la sección 2.	43
Figura 10-2.	Diagrama de flujo de la sección 3.	46
Figura 11-2.	Diagrama de flujo de horno de fundición de zinc.....	46
Figura 12-2.	Diagrama de flujo del proceso de secado.	50
Figura 13-2.	Diagrama de flujo del recuperador	55
Figura 14-3.	Factores de evaporación en función de la temperatura.....	57
Figura 15-2:	Estructura de los tanques de tratamiento químico.	65
Figura 16-2:	Diagrama de flujo resuelto del horno de fundición de zinc.....	66
Figura 17-2.	Estructura del horno de fundición de zinc	70
Figura 18-2.	Diagrama de flujo resuelto del recuperador.....	71
Figura 19-2.	Estructura de un intercambiador aire-gases de combustión (Recuperador).....	72
Figura 20-2.	Diagrama de flujo resuelto del secador	73
Figura 21-2.	Secador tipo cubierta, sobre el horno de fundición de zinc.	74
Figura 22-2.	Diagrama de estimación de costo para intercambiadores de placas	77
Figura 23-2.	Diagrama de la planta de galvanizado en caliente.....	79

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A** Fotografías de los resultados del pretratamiento químico.
- ANEXO B** Fotografías de preparación de soluciones de tratamiento químico.
- ANEXO C** Fotografías de pruebas de fundición de zinc.
- ANEXO D** Fotografías de pruebas de recubrimiento de piezas con zinc.
- ANEXO E** Tabla con factores para el cálculo de costos de adquisición de equipamiento.
- ANEXO F** Diagrama con factores para el cálculo de costos de adquisición de equipamiento.

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo, realizar el diseño preliminar del proceso químico del galvanizado en caliente, de piezas metálicas para la Empresa PCA Company S.A., consta de un estudio experimental para obtener las variables de las operaciones de pretratamiento químico y recubrimiento de las piezas con zinc fundido. Se emplearon piezas rectangulares de dimensiones 20x50mm y espesor de 3mm de acero al carbón. Se seleccionaron 18 piezas que fueron sometidas a dos métodos diferentes de pretratamiento químico. La secuencia del proceso de pretratamiento químico es: desengrase, primer enjuague, decapado, segundo enjuague y fluxado; cada etapa tiene una temperatura de trabajo para la solución de tratamiento y un tiempo de inmersión. El proceso de recubrimiento con zinc fundido consta de las siguientes etapas: secado, recubrimiento y enfriado; el horno trabaja a una temperatura de 450 grados Celsius. Los resultados para el pretratamiento muestran que las características de la superficie de los metales tratados por el método básico y ácido difieren considerablemente. Las placas tratadas con el método básico mantuvieron su brillo metálico y las piezas tratadas con el método ácido tenían una superficie oscura. En la prueba de recubrimiento se realizaron tres repeticiones, solo las placas de la última prueba mostraban conformidad con la norma INEN ISO 1641, con una masa promedio de recubrimiento para las placas tratadas con el método básico de 530.54 g/m² (74.31 micrómetros) y el método ácido de 532.43 g/m² (74.57 μm). En conclusión, se diseñó el proceso químico de una planta de galvanizado en caliente y se recomienda realizar estudios más profundos del proceso de recubrimiento de zinc con mezcla con cromo, estaño y otros metales.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>; <DISEÑO DE PROCESO>; <GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE>; <DESENGRASADO ÁCIDO>; <DECAPADO (PICKLING)>; <FLUXADO>; <RECUBRIMIENTOS METÁLICOS>.

ABSTRACT

The objective of this curricular integration work is to carry out the preliminary design of the chemical process of hot galvanizing, of metal parts for the Enterprise PCA Company SA. It consists of an experimental study to obtain the variables of the chemical pretreatment operations and coating of the parts with molten zinc. Rectangular pieces of dimensions 20x50mm and thickness of 3mm of carbon steel were used. Eighteen pieces were selected that were subjected to two different methods of chemical pretreatment. The sequence of the chemical pretreatment process is: degreasing, first rinse, pickling, second rinse and fluxing; each stage has a working temperature for the treatment solution and an immersion time. The molten zinc coating process consists of the following stages: drying, coating and cooling; the oven works at a temperature of 450 degrees Celsius. The results for the pretreatment show that the surface characteristics of the metals treated by the basic and acid method differ considerably. The plates treated with the basic method maintained their metallic luster and the parts treated with the acid method had a dark surface. In the coating test, three replications were performed, only the plates from the last test showed compliance with the INEN ISO 1641 norm, with an average coating mass for the plates treated with the basic method of 530.54 g / m² (74.31 micrometers) and the acid method of 532.43 g / m² (74.57 µm). In conclusion, the chemical process of a hot dip galvanizing plant was designed and it is recommended to carry out more in-depth studies of the zinc coating process mixed with chromium, tin and other metals.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>; < PROCESS DESIGN>; <GALVANIZED BY HOT IMMERSION>; < ACID DEGREASING >; <PICKLING>; <FLUXING>; < METALLIC COATING>.

ANA GABRIELA
REINOSO
ESPINOSA

Firmado digitalmente
por ANA GABRIELA
REINOSO ESPINOSA
Fecha: 2021.11.26
16:56:23 -05'00'

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El proceso de galvanizado es una de las técnicas de protección contra la corrosión, como resultado existe numerosos trabajos relacionados, y específicamente con el método por inmersión en caliente. Como los subprocesos que conforman este método no han cambiado significativamente, los estudios se han centrado en mejorar la calidad del recubrimiento y la optimización del consumo energético.

En su trabajo Chavan y Virginia (2006), realizó un análisis de los consumos de energía para líneas de proceso de galvanización continua. Con el objetivo de detectar las fuentes y las pérdidas de energía relevantes, y construir a partir de datos de tres procesos diferentes modelos de simulación. Como resultado obtuvo un modelo que tenían una precisión de $\pm 10\%$ en relación al consumo de energía; siendo suficiente para los cálculos iniciales en los procesos de diseño.

En relación al diseño de soluciones novedosas para el proceso de galvanización, Nemtinov et al., (2020) en su trabajo presenta el proceso de diseño de una planta pequeña de recubrimiento con zinc por método electrolítico para el tratamiento de piezas pequeñas con relieves complejos. El equipo usa un tambor rotatorio, que es levantado mecánicamente en el momento de carga y descarga. Al final probaron la planta con piezas pequeñas (tuercas), demostrando una alta efectividad en el recubrimiento, incluso en el relieve.

Otro tema importante para el proceso de galvanización, sobre todo para el método de inmersión en caliente es la sostenibilidad, en relación a los efectos sobre el ambiente que tiene los residuos generados de este proceso. Por ejemplo, Hernández-Betancur, Hernández y Ocampo-Carmona, (2019), desarrollaron un framework holístico que utilizaba: 17 indicadores tomados de la metodología GREENSCOPE y un indicador de calidad relacionado con la norma ISO 1461, con el objetivo de obtener el mejor desarrollo del proceso. Los resultados de su estudio mostraron que las etapas de decapado y fluxado son críticas y no se puede obtener mejoras significativas sin modificaciones del proceso. Este trabajo aportó criterios de gran importancia para el proceso de diseño de procesos de galvanizado por inmersión en caliente.

Con el objetivo de reducir los costos del proceso, estudios sobre optimización como el trabajo de Ben nasr et al.(2008), dan pautas para generar grandes mejoras. En este trabajo se buscaba encontrar una forma de optimizar el uso de zinc para obtener mayores espesores de recubrimiento, desperdiciando menos zinc. Con esto en mente, un modelo matemático fue desarrollado usando el diseño experimental de Doehlert, que relacionaba el espesor del recubrimiento con la temperatura baño de zinc, el tiempo de inmersión y el tiempo de retiro de las piezas. El resultado

mostro que los parámetros antes mencionados tiene un efecto considerable sobre el espesor de zinc.

Planteamiento del problema

Uno de los principales costos a tomar en cuenta en la industria, son los costos de mantenimiento de instalaciones y equipamiento. Siendo mayor, el costo de mantenimiento de las superficies metálicas para evitar la corrosión, que amenaza con reducir drásticamente el tiempo de vida útil de máquinas y estructuras metálicas.

Durante el transcurso del pasado siglo, muchos avances se han realizado en el desarrollo de métodos que reduzcan el efecto destructivo de la corrosión en las superficies metálicas; muchos de ellos son recubrimientos orgánicos e inorgánicos como: pinturas y esmaltes. El problema de estos recubrimientos es la necesidad de aplicarlos continuamente, debido a que son poco resistentes a las condiciones ambientales (Sørensen et al., 2009, p.141).

Un tipo de recubrimiento que tiene un mayor tiempo de vida útil es el recubrimiento metálico. Amalgamar el hierro de la superficie del acero con zinc, cromo o aluminio es una solución más duradera. La tecnología del proceso de galvanización ha cambiado poco desde su adopción en el siglo XIX, siendo el método por metal fundido el más usado a nivel industrial (Shibli, Meena y Remya, 2015). Esto se debe a su alta tasa de productividad a comparación del método electroquímico.

En Ecuador existe un interés prioritario sobre el mantenimiento anticorrosivo; ya que posee varias regiones con diferentes condiciones climáticas. Por ejemplo, la mayor parte de las empresas industriales productoras se encuentran asentadas en las regiones Costa y Sierra. Ambas regiones tienen condiciones que aceleran la corrosión. En la Costa las altas temperaturas y la alta concentración de sales en el suelo y agua aceleran considerablemente el proceso degradativo de los metales. En la región Sierra las bajas temperaturas y el viento son causantes de erosión en la superficie de los metales. En la región Amazónica se concentran la mayor cantidad de empresas del sector petrolero extractivo. Esta región tiene condiciones de alta humedad en el aire, cambios abruptos de temperatura entre el día y la noche, abundante precipitación, entre otros; convirtiéndola en poco amigable para los metales. La región insular no concentra empresas industriales de gran tamaño, dada la legislación ambiental que protege a las islas que la conforman (PUCE, 2020, p. 52).

La provincia de Francisco de Orellana es la “provincia petrolera” del Ecuador. En ella se encuentran la mayor cantidad de operadoras y compañías de servicios petroleros. (Gobierno Nacional, 2015) Es en este ámbito, alrededor de las grandes compañías nacionales e internacionales se han creado empresas que prestan servicios de mantenimiento mecánico. La alta competencia en el ámbito empresarial, hace necesario que las empresas de mantenimiento, estén buscando prestar nuevos y mejores servicios. Uno de los servicios más solicitados por las operadoras petroleras es

el de mantenimiento contra la corrosión: pintura, esmaltes y galvanización; en el periodo comprendido entre el año 2000 y 2010, el 28% de los derrames de crudo fueron causados por corrosión en los oleoductos (Gil, 2013, p. 2). Pinturas y esmaltes se pueden aplicar mediante procedimientos sencillos y no es difícil llevarla a cabo. Por el contrario, la galvanización de piezas industriales requiere mayor conocimiento, sobre todo de la química del proceso. Además, se requieren instalaciones y equipos, que permitan la producción de recubrimientos de calidad a nivel industrial. Sobre todo, si se opta por una galvanización por inmersión en caliente.

Por lo antes expuesto, en este contexto, es que es necesario analizar el proceso de galvanización por inmersión en caliente y los distintos factores que afectan la calidad de los recubrimientos producidos por este método. De esta forma se pretende presentar una propuesta de diseño para el proceso de galvanizado en caliente a la compañía PCA Company S.A. En concordancia con la normativa nacional e internacional relacionada a este proceso.

Justificación

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en estudiar: el proceso de galvanización por inmersión en caliente; los factores que inciden en la calidad de los recubrimientos con zinc y las variables a tomar en cuenta en la propuesta de diseño, para un proceso industrial de este tratamiento químico metalúrgico. Así, el presente trabajo permitirá mostrar las etapas del proceso, las condiciones y composiciones químicas de los distintos tratamientos, y el pre diseño de ingeniería del proceso industrial de galvanizado por inmersión en caliente. Profundizando en los conocimientos teóricos sobre: el galvanizado, tratamientos químicos para metales y diseño de procesos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar el proceso químico de galvanizado por inmersión en caliente de piezas industriales para la empresa PCA Company S.A.

Objetivos Específicos

- Definir el esquema de operaciones de la propuesta de diseño del proceso de galvanizado por inmersión en caliente.
- Determinar las variables del diseño para el proceso de galvanización por inmersión en caliente.
- Realizar los cálculos de: sustancias químicas, energía, utilitarios y dimensionamiento de los principales equipos, para el proceso de galvanizado por inmersión en caliente.
- Verificar el cumplimiento de la Norma Técnica NTE INEN-ISO 14713-2 RECUBRIMIENTOS DE ZINC – DIRECTRICES Y RECOMENDACIONES PARA LA PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HIERRO Y ACERO – PARTE 2: GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE (ISO 14713-2:2009, IDT), en la propuesta de diseño del proceso de galvanización por inmersión en caliente realizada.

Alcance

El presente trabajo de integración curricular presenta el diseño preliminar del proceso de galvanización por inmersión en caliente. El diseño es una propuesta y no representa un diseño final o detallado. Para obtener los parámetros de diseño se aplica un estudio experimental del pretratamiento químico y el recubrimiento con zinc, con estos parámetros se procede a dimensionar los equipos principales.

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Bases Teóricas

1.1.1. Historia del proceso de galvanizado

La historia del proceso de galvanizado está estrechamente ligada a la industria del hierro y el acero. El hierro se ha utilizado desde hace 5000 años, según hallazgos arqueológicos del antiguo Egipto predinástico (Wainwright, 1932, p. 17). Un ejemplo son las dagas de hierro encontradas en la tumba del Faraón Tutankhamun (ver figura 1-1), hechas en plena era de bronce. Nuevas investigaciones revelan que están fabricadas, a partir de hierro proveniente de un meteorito. Mientras que el acero por su parte tardó algunos milenios en ser usado. El uso más temprano se registra hace 3400 años en el este africano (Alpern, 2005). Al otro lado del mundo, en China se registra los primeros objetos de acero en el periodo Han (206 BCE – 220 CE) (Liu et al., 2014, p. 5)



Figura 1-1. Dagas de hierro de la tumba del Faraón Tutankhamun, 1350 B.C.

Fuente: (Metcalf, 2017).

Durante la mayor parte de este tiempo se tuvo que contrarrestar el problema de la corrosión de los artefactos de hierro y acero usando medios mecánicos (pulido, bruñido).

El uso del zinc otro metal usado en la galvanización, se remonta a miles de años atrás, principalmente como latón. En India y China se procesaba este metal con la técnica de destilación del metal fundido, usando carbón natural como reductor y combustible. El estudio de Luo et al., (2016) analizó la física y química de reliquias de Linjiangerdui de la provincia de Zhongxian al

sureste de China. El resultado indicaba que diferentes tipos de carbón fueron usados, para fundir el zinc y que la temperatura de trabajo podría ser tan alta como 1300°C. Se ha discutido mucho si China aprendió la técnica de separación del Zinc de la India, pero estudios recientes confirman que las técnicas son completamente diferentes, tanto en componentes usados, dosis y procedimientos, por tanto es posible que se desarrollaran de forma paralela (Weirong, 2020, p. 11). La causa del tardío uso como metal puro, fue la incapacidad de poder aplicar el método de destilación metálica, debido al bajo punto de ebullición del zinc. El zinc siempre está combinado con otros metales de alto punto de ebullición, al fundirse estos metales de alto punto de fusión, el zinc se evapora, perdiéndolo junto con los gases de combustión. Con la adopción de los alambiques cerrados para la fundición, se pudo separar el zinc y su uso se generalizó por India y China medieval (Alam, 2020, p. 17) (Craddock, 1987, p. 74).

El término corrosión proviene del latín *corrodere*, que está compuesto por el sufijo *cor-* que significa completamente y *rodere* que significa roído. La primera vez que se usa el término corrosión, se remonta al año 1667, en una bitácora marítima (Merriam webster, 2010).

El primer lote de acero fundido se produce en 1740, pero no fue hasta 1885 que se usaría el método de Bessemer que permitía producirlo a escala industrial. Este método eliminaba las impurezas del acero por oxidación con aire inyectado, a través del metal fundido.

En el año de 1741, el médico y químico francés Paul J. Malouin presentó ante la académica Real de Ciencias de París, la primera versión de un método de recubrimiento de metales, en el cual una barra de hierro se sumergía en zinc fundido. En 1746 el químico alemán Andreas S. Marggraf (1709 - 1782) desarrolló un método para purificar (aislar) zinc metálico (Britannica, 1998).

Luego en 1799, el físico y químico italiano Alessandro Volta (1745-1827), desarrolla la celda galvánica y con esta los principios de la protección catódica del hierro contra la corrosión (Britannica, 2021). Aun hubo que esperar hasta 1829, para que el físico Británico Michael Faraday (1791-1867), logre presentar una explicación del principio de protección catódica (Williams, 2021). Hasta este punto el proceso de galvanizado se realizaba de forma casi artesanal, y con una calidad de recubrimiento muy baja. Fue después del desarrollo del pretratamiento químico del acero, cuando se presentó la primera patente relacionada al proceso de galvanización. Esta patente fue solicitada por el Ingeniero Civil Frances Stanislas Sorel (1803-1871), luego de haber desarrollado y probado los procesos de desengrasado y decapado. En la figura 6-1, se observa en un diagrama las etapas iniciales del desarrollo del proceso de galvanizado industrial.

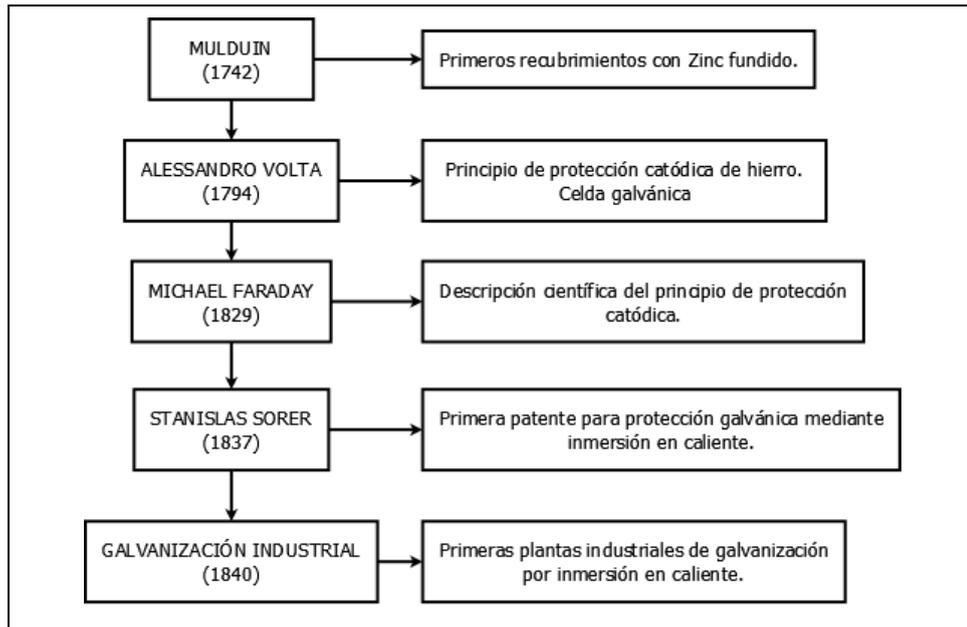


Figura 2-1. Principales eventos en el desarrollo del proceso de galvanización.

Fuente: (Tribotechnika, 2013).

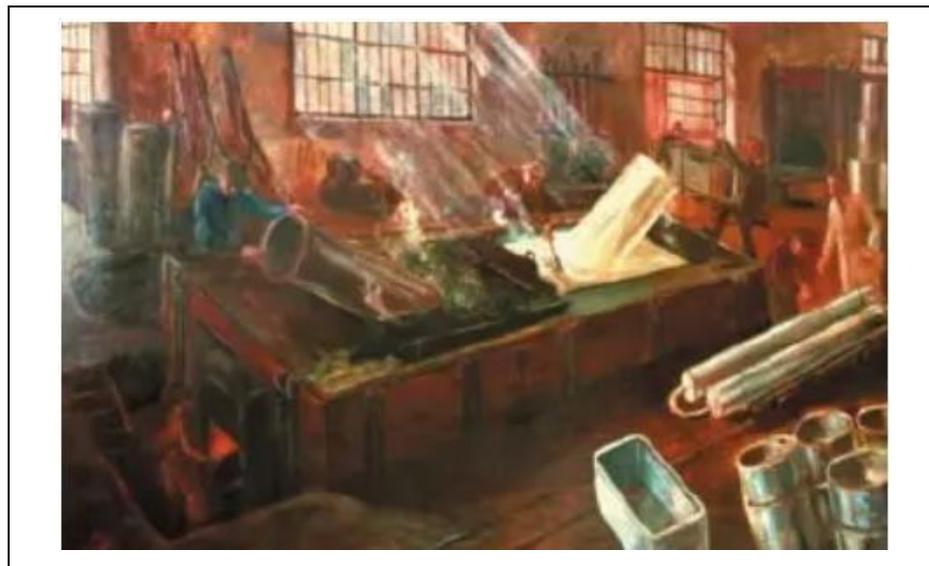


Figura 3-1. Proceso de galvanizado en el siglo XIX.

Fuente: (Tribotechnika, 2013, p.48).

Para 1840 la industria del recubrimiento galvánico estaba presente en todas las potencias industriales de la época: Gran Bretaña, Francia y Alemania. En la figura 2-1, se observa una representación pictográfica del proceso de galvanizado de utensilios del hogar (cacerolas, calentadores, etc.) del siglo XIX.

En la época moderna el desarrollo del galvanizado creció a pasos agigantados. En la década de 1820 el mercado internacional se inundó con Zinc, por eso 1826 se ofreció un premio para los que desarrollen nuevas aplicaciones para el Zinc. Uno de los sucesos que catalizo el uso de acero

galvanizado, fue la construcción de la primera línea de ferrocarril entre Nurenberg y Fürth en 1835.

Los primeros reportes usando terminología de corrosión fueron redactados por la Marina Francesa en 1843. Hasta 1920, aun con los avances científicos que explicaban los principios del proceso de galvanizado, este se llevaba a cabo bajo empirismo supersticioso, y no en base conocimientos técnicos y científicos. No fue hasta 1940. que todo el proceso se tecnifico y se empleó un enfoque más apegado a los principios científicos, así como a la normativa que se estaba desarrollando paralelamente.

Desde 1950 hasta 1990, la industria siderúrgica experimento un proceso de tecnificación, todo esto catalizado por algunos eventos:

- La producción mundial de acero sufrió un incremento considerable de 200 millones de toneladas a casi 800 millones de toneladas métricas al año.
- El uso de acero en la construcción de grandes edificios, incentivo a la mejora en tanto calidad como cantidad el acero producido.
- El incremento del interés por parte del público, por la protección contra la corrosión.
- Incremento considerable de los estudios sobre el proceso de galvanizado en caliente.
- Desarrollo de tecnología que permitía crear crisoles de fundición de zinc, mucho más grandes, con dimensiones superiores a los 18 metros de largo.
- El cambio del combustible para los quemadores de los hornos de fundición de zinc, de combustibles líquidos como el keroseno o diésel al gas natural.
- El desarrollo de equipamiento auxiliar (recuperadores de calor, tanque de tratamiento de regeneración continua, encajonado del horno de fundición, etc.).

Las plantas modernas tienen un esquema o secuencia de operaciones parecidas, con ligeras variaciones que pueden depender de factores como: capacidad de procesamiento, tamaño de las piezas, métodos de secado, disposición espacial de las operaciones, combustible utilizado, entre otras. En la figura 4-1, se muestra un diagrama del proceso de galvanizado por inmersión en zinc fundido común, para una planta moderna. Estas etapas son: eliminación de grasa por solución caustica, enjuagues, decapado (eliminación de óxido), fluxado, secado, recubrimiento con zinc, enfriamiento e inspección o control de calidad.

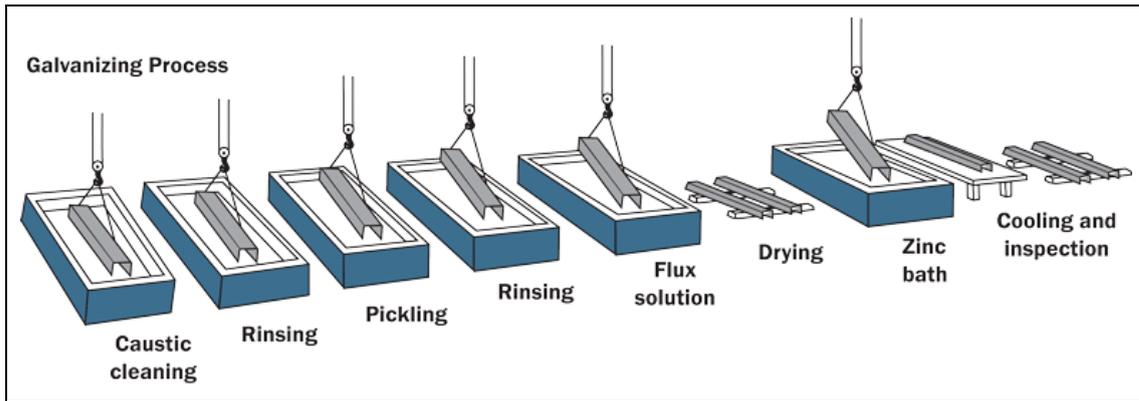


Figura 4-1. Diagrama del proceso de galvanizado moderno.

Fuente: (Galvanizers Co, 1999).

En la figura 5-1, se observa una planta de galvanizado de mediana capacidad, que permite tratar piezas de hasta tres metros de longitud. En ella se observa como el proceso de tecnificación ha permitido optimizar el espacio requerido, así como la implementación de normas de seguridad y calidad.



Figura 5-1. Planta de galvanizado moderna.

Fuente: (Corrotech S.A., 2020).

1.1.2. Proceso de Galvanizado Industrial

1.1.2.1. Pretratamiento químico

El primer paso para el galvanizado del acero, es preparar la superficie de metal retirando todo obstáculo que puede interferir en el proceso de amalgamación entre hierro en la superficie del acero y la capa de zinc que conforma el recubrimiento. Como se presentó anteriormente, el desarrollo de los pretratamientos químicos fue tardía, en comparación con el recubrimiento con zinc fundido. En la figura 6-1, se observa un conjunto de piezas que están siendo extraídas de un tanque que contiene solución de tratamiento químico, probablemente del proceso de decapado,

por la calidad y el brillo de las superficies del metal. Las etapas del pretratamiento químico son: Desengrasado, enjuagado, decapado, fluxado y secado. A continuación, se describe cada etapa con parámetros comunes de operación.

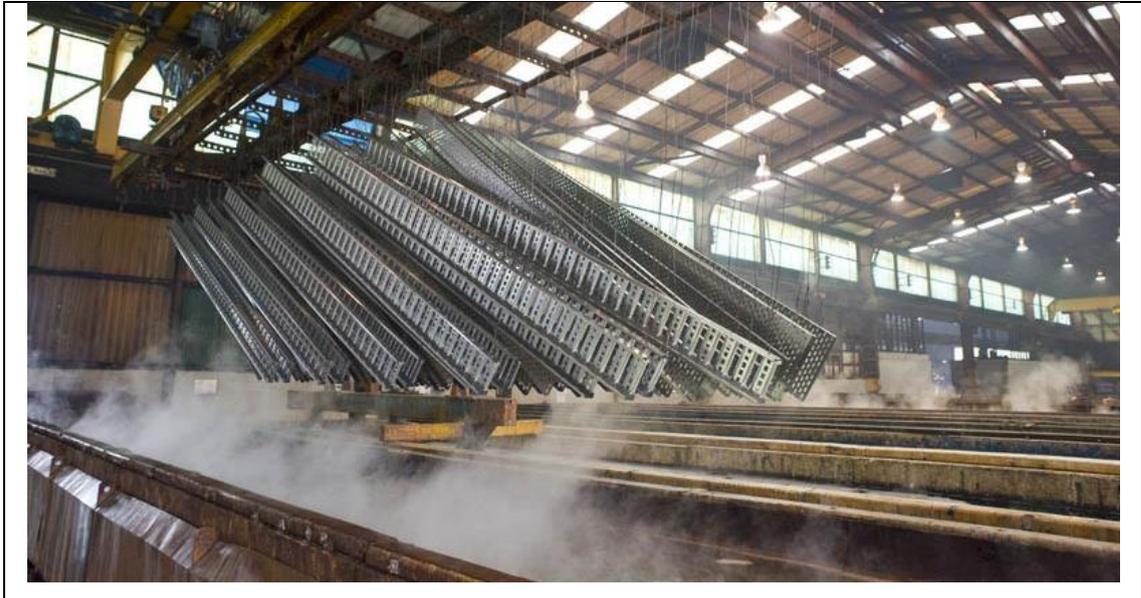


Figura 6-1. Conjunto de piezas sometidas al pretratamiento químico.

Fuente: (TJSV STEEL Ltda, 2020).

Desengrasado

La grasa puede perjudicar la calidad de los recubrimientos, al alterar la capacidad de adherencia de las capas del recubrimiento. Pudiendo interferir en las reacciones metalúrgicas en el momento del recubrimiento o formando burbujas o vacíos, que se traducen en pérdida de la elasticidad del recubrimiento. El origen de la grasa puede ser de fuentes: naturales-ambientales como artificiales (lubricantes), en ambos casos primero es necesario retirar la mayor cantidad de grasa posible con medio mecánicos o manuales, para luego emplear el método químico. Caso contrario reduciríamos el tiempo de vida útil de las soluciones de tratamiento. Para retirar las grasas se usan soluciones alcalinas que por medio de saponificación solidifican las grasas, estas se precipitan o permanecen en la superficie, permitiendo retirarlas por medios mecánicos o por flotación del tanque de tratamiento.

Las soluciones alcalinas de tratamiento tienen como principales componentes al: hidróxido de sodio, carbonato de sodio, silicatos y fosfatos de sodio. Las composiciones de las soluciones desengrasantes a ser empleadas comúnmente se muestran en la tabla 1-1. Habiendo tres tipos de soluciones que permiten tratar diferentes superficies, dependiendo del contenido de grasa que las cubre. Por ejemplo, si la superficie del metal contiene poca presencia de grasa se puede emplear

la solución 1, si la cantidad de grasa es media (poca adherencia a la superficie) se usa la solución 2 y si existe grasa adherida difícil de extraer de la superficie se puede emplear la solución 3.

Tabla 1-1: Composición de soluciones desengrasantes alcalinas.

Componentes	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Na ₂ CO ₂ (g/L)	10-20	10-15	20-30
Na ₂ PO ₄ (g/L)	20-30	20-25	10-20
NaOH (g/L)	30-40	10-20	-
Na ₄ P ₂ O ₇ (g/L)	-	-	5-15
Na ₄ SiO ₃ (g/L)	10-20	-	-
Agentes complejantes (g/L)	-	-	2-4 (EDTA)
Surfactantes	Lauril sulfato	-	0.2 (no iónico)

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011).

Los rangos de los parámetros del proceso de desengrasado alcalino se muestra en la tabla 2-1. De estos el parámetro de mayor importancia es la temperatura, porque mediante análisis experimentales se determinó que influye en la remoción de: Aluminio, Cadmio y grasa, causante de pérdida de calidad en el recubrimiento.

Tabla 2-1: Parámetros para soluciones desengrasantes alcalinas.

Condiciones	Solución 1	Solución 2	Solución 3
pH	13-14	12	10-11
Temperatura	80-90	80-90	70-85
Tiempo de exposición (min)	10-15	10-20	5-15

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011).

El proceso de desengrasado alcalino ha mostrado ser necesario para la eliminación de restos de aluminio en la superficie. Cuanto mayor es la temperatura del baño de desengrase y el tiempo de inmersión, mayor el porcentaje de remoción de aluminio (Berger et al., 2006, p. 17)(Berger et al., 2006). Otra característica importante del proceso de desengrasado alcalino es la completa independencia de su capacidad de remoción, en relación a la concentración de hierro disuelto, esto hace que su tiempo de vida útil sea mayor.

Desengrasado ácido

Una alternativa al desengrasado alcalino, es el uso de soluciones acidas que eliminan en un solo paso la grasa y el óxido. El único problema que tiene este tratamiento, es su dependencia de la concentración de Hierro disuelto, eso genera una reducción considerable del tiempo de vida útil de la solución, esto significa que se debe monitorizar las concentraciones de ácido y hierro con mayor detenimiento y reemplazar un número mayor de veces las soluciones de tratamiento.

El proceso ácido de desengrasado, usa una solución acida cuyos componentes son: ácido clorhídrico y agua. Las condiciones de operación del desengrasado ácido se muestran en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Composición de solución de desengrase acida.

Componente o condición	Valor	Unidad
Ácido Clorhídrico	60 – 100	g/L
Densidad	1.03 – 1.05	g/mL
Surfactantes	1 - 2	g/L
Calidad del agua	Fresca, sin hierro	-
pH	<1	-
Temperatura de trabajo	30 - 45	°C
Movimiento de solución	Inyección aire 2-4 Nm ³ /m ²	
Tiempo de exposición	5 - 20	min
Concentración mínima HCl	80	g/L

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011).

Para mejorar la remoción de los contaminantes, se emplea inyección de aire. El parámetro recomendado es 4 Nm³/m² de aire. La concentración mínima recomendada de ácido clorhídrico es de 8 g/L, si esta cae por debajo de esta cantidad es necesario un remplazo total de la solución. El agua que se usa para reponer o preparar la solución de recambio, debe ser preparada con agua fresca, con bajo contenido de sales y sobre todo hierro.

Decapado – Eliminación de óxido.

Cuando se emplea el desengrasado alcalino, se requiere de una segunda etapa donde se remueve únicamente óxidos. De igual manera esta solución es dependiente de la concentración de Hierro disuelto, y debe ser sometida a controles de concentración de ácido clorhídrico y hierro regulares. El decapado permite eliminar óxidos e incrustaciones en la superficie. Para ello, se usan las condiciones mostradas en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Parámetros para el proceso de decapado.

Condición	Valor	Unidad
Concentración HCL	30 – 32 USA 15 – 17 UE	% pp
Densidad	1.15 – 1.16	g/mL
Temperatura	45-50	°C
Concentración máxima Fe	130	g/L

Fuente: (Kerney, 1994).

Otro punto a tomar en cuenta en el proceso de decapado (pickling) son los desechos generados. Las soluciones "gastadas", que superan el límite en concentración de hierro marcado en la norma,

deben ser remplazadas por nueva solución acida. El resultado es que miles de litros de solución acida de desecho, tiene que ser almacenados y enviados para su tratamiento final. En la tabla 5-1, se muestra las composiciones comunes de las soluciones acidas de desechos, tomadas del trabajo de Kerney (1994).

Tabla 5-1: Concentraciones de componentes de soluciones de desecho.

Constituyente	Valor	Unidad
Fe (FeCl ₂)	80 - 150	g/L
Zn (ZnCl ₂)	5 - 150	g/L
HCl	10 - 80	g/L
Metales pesados (Cu, Ni, Cr, Mn, Pb, otros)	1-1000	ppm
Comp. Orgánicos (Aceites, grasas, inhibidores)	<0.1	g/L

Fuente: (Kerney, 1994).

Como las concentraciones de zinc en las soluciones de desechos, provenientes del proceso de galvanizado en caliente, son muy altas para reutilizarlas, para su tratamiento es necesario primero eliminar el Zn. Los métodos más comunes para eliminar el zinc son: electrolisis o extracción por solventes.

Enjuagado

Los enjuagues se realizan con agua potable o si es el caso con agua des ionizada. El enjuague se puede realizar en caliente o frio. Para enjuagues en caliente se puede emplear temperaturas menores a 46°C.

Fluxado

En el proceso de fluxado se sumerge la pieza en una solución que contiene Cloruro de Zinc y Cloruro de Amonio, con el objetivo de cortar el proceso oxidativo, accionado por el ácido clorhídrico remanente de los procesos previos. Las condiciones del proceso de fluxado se muestran en la tabla 6-1.

Tabla 6-1: Propiedades de la solución de fluxado.

Condición	Valor	Unidad
Grados Baume	12.5 – 13.5 (1.0943 g/mL – 1.1027 g/mL)	% pp
ACN (%NH ₄ Cl/%ZnCl ₂)	1.6	-
Hierro (Fe ²⁺) (Proveniente del decapado)	< 0.5%	% pp
Sulfato (SO ₄ ²⁻) (Proveniente del decapado con Ácido sulfúrico)	< 1.0%	% pp
Temperatura	71°C	°C

pH	4.2	-
Surfactante	0.03% - 0.06%	% pp
Impurezas no volátiles (NaCl o KCl)	< 1.0%	% pp

Fuente: (Cook, 2003).

La patente presentada por Matthijs et al. (2003), sugiere una composición para la solución de fluxado que contenga: 60 a 80% peso de Cloruro de Zinc; 7 a 20% de Cloruro de Amonio; 2% de agentes modificadores de la fluidez; 0.1 a 5% en peso de uno de los siguientes compuestos: Cloruro de Níquel II, Cloruro de Cobalto II o Cloruro de Manganeso II; y 1.5% de alguno de los siguientes componentes: Cloruro de Plomo II, Cloruro de Estaño II, Cloruro de Bismuto III o Cloruro de Antimonio III.

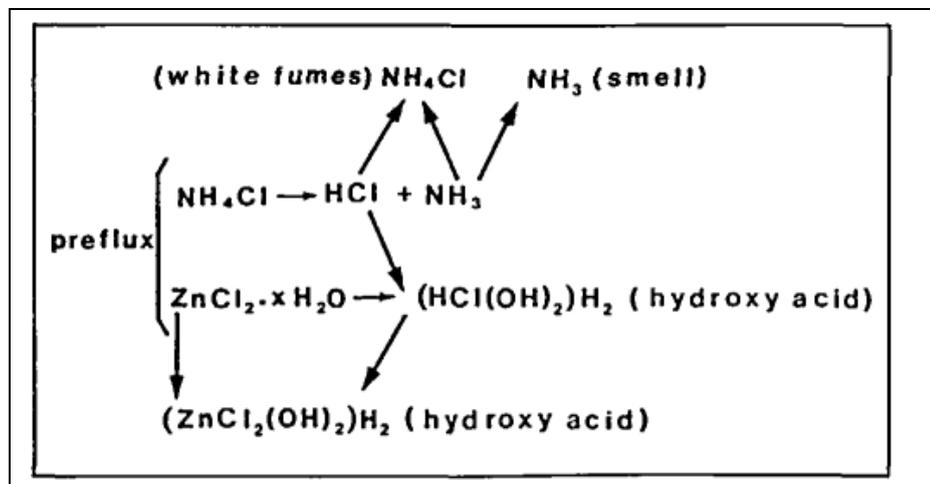


Figura 7-2. Reacciones químicas que tienen lugar en el proceso de fluxado.

Fuente: (Sjoukes, 1990, p. 13).

Las reacciones químicas que se dan en el proceso de fluxado se exponen en a la figura 7-1. Este diagrama de secuencias de reacción muestra como en el momento de la inmersión del metal en la solución, el remanente de la solución, impregnada en la superficie reacciona al entrar en contacto con el metal fundido a 450°C. Primero el Cloruro de amonio (NH_4Cl) se disocia en ácido clorhídrico (HCl) y Amoniaco, el amoniaco es liberado como gas, pero da un efecto de efervescencia al momento de escapar de la superficie del metal. El ácido clorhídrico se mantiene en la superficie; fracción del cloruro de amonio se volatilizan y forman una especie de niebla. El cloruro de Zinc por otra parte forma hidroxiácidos como: $([\text{HCl}(\text{OH})_2]_2\text{H}_2$ y $[\text{ZnCl}_2(\text{OH})_2]_2\text{H}_2$), que son estables a alta temperatura. Estos hidroxiácidos protegen contra la interferencia que pueden ejercer la formación de óxidos de Zinc, Aluminio y Hierro.

Secado

El proceso de secado se lleva a cabo con la circulación de aire caliente a 120 a 140°C, que regularmente se calienta dentro de un recuperador de calor, que extrae calor de los gases de combustión provenientes del horno de fundición de zinc.

1.1.2.2. Recubrimiento metálico con Zinc

Durante el proceso de galvanizado las piezas a tratar se sumergen en un baño que consiste en un mínimo de 98% de zinc fundido puro. Las condiciones químicas del proceso de inmersión se encuentran definidas por la ASTM en la especificación B6; donde detalla que la temperatura del zinc fundido debe ser mantenida entre 450 a 460 °C.

Durante el contacto entre el hierro y el zinc se forman capas con aleaciones intermedias entre Fe y Zinc. Con el objetivo de mejorar la adherencia de estas capas las piezas deben ser extraídas lentamente y el exceso de zinc removido mediante: drenado, vibración o centrifugado. En la tabla 7-1, se manifiestan las condiciones usadas en el proceso de recubrimiento con zinc. Existen tres alternativas de composición del baño de zinc, que son: Hierro galvanizado, Galvalume y Galfan, sus composiciones están descritas en la misma tabla.

Tabla 7-1: Condiciones del proceso de galvanizado.

Condición	Valor	Unidad
Temperatura	440-460	°C
Tiempo de tratamiento	4-5	min
Velocidad de remoción	1.5	m/min
Composición Hierro galvanizado	99.8% Zn y 0.2% Al	% pp
Composición Galvalume	43.5% Zn, 55% Al y 1.5% Si	% pp
Composición Galfan	95% Zn y 5% Al	% pp
Aditivos (Pn, Sb) No comercial	0.004% Pb y 0.2% Sb	% pp

Fuente: (Shibli, Meena y Remya, 2015).

En el proceso de formación de las capas de zinc, el recubrimiento está conformado por 4 fases, como se puede observar en la figura 8-1. La primera es la fase Γ correspondiente a la fracción de zinc amalgamado con el hierro del acero. La segunda es la fase δ_1 , que es una de las más amplias en la capa de recubrimiento. La tercera es la fase ξ , que está conformada por cristales de zinc. La fase final es la fase μ , que está conformada por zinc fundido.

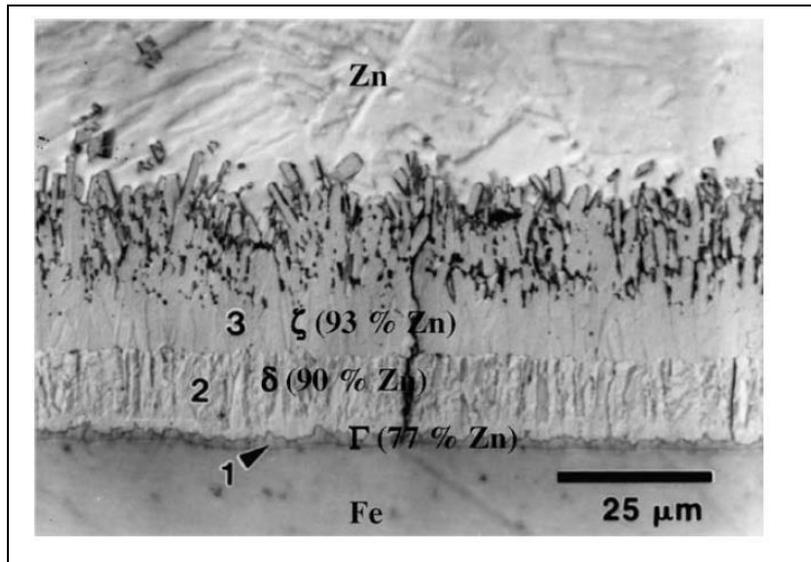


Figura 8-1. Enfriamiento de piezas.

Fuente: (Carpio et al., 2009).

1.1.2.3. *Posttratamiento y control de calidad*

Posterior al recubrimiento con zinc se debe enfriar las piezas galvanizadas, para ello se puede emplear corrientes de aire o agua (figura 8-1). Las piezas terminadas luego se envían a control de calidad, para revisar la superficie del recubrimiento.



Figura 9-1. Enfriamiento de piezas.

Fuente: (Philgalv Industrial, 2016).

Posterior al tratamiento de enfriado, se realiza el control de calidad; que según la norma aplicada para la inspección exhibe algunos puntos a revisar. La que se tomara en cuenta para este trabajo

es la norma NTE INEN-ISO 1461 la cual es un extracto de estándar internacional ISO 1461. Para el control de calidad se debe tomar en cuenta los siguientes puntos presentes en la norma:

Toma de muestras

La normativa exige que de cada lote de productos galvanizados se separe al azar una muestra de control, con el objetivo de verificar el espesor del recubrimiento. En la tabla 8-1, se muestra la sugerencia de la normativa ISO, para el tamaño de muestra dependiendo del tamaño del lote a inspeccionar. La norma también dispone que los resultados de los análisis, deben realizarse previa salida del lote.

Tabla 8-1: Tamaño de muestra ISO 1461.

Número de piezas por lote	Número de piezas por muestra
1 a 3	Todas
4 a 500	3
501 a 1200	5
1201 a 3200	8
3201 a 10000	13
>10000	20

Fuente: (ATEG, 2020).

Aspecto del recubrimiento de Zinc

Como parte de las pruebas de calidad se debe realizar una inspección visual de la superficie galvanizada. Los recubrimientos no deberán tener: nudos o nódulos, ampollas o burbujas, áreas rugosas y puntos o manchas, ni ningún defecto que pueda producir falla mecánica del material. No debe existir residuos de sales, grumos y cenizas de zinc; ni ninguna falla que produzca una reducción de la capacidad protectora del recubrimiento.

Definiciones como rugosidad son relativos y depende del tipo de material galvanizado y el tipo de escurrimiento o drenaje, por tanto, se debe tomar en cuenta estos criterios en el momento de la inspección. Las manchas blancas o manchas de almacenaje húmedo no son causal para descarte del material recubierto, siempre y cuando la zona circundante cumpla con el espesor mínimo exigido.

NOTA: Las piezas o material galvanizado que no pase esta inspección visual, o no cumpla con los parámetros técnicos mínimos, debe ser galvanizada nuevamente o se debe reparar la imperfección, para ser sometida de nuevo a control de calidad.

Espesor del recubrimiento con zinc

En el proceso de galvanización en caliente, los espesores del recubrimiento dependen del espesor del material sobre el que se aplica el recubrimiento. Por ello, la norma ISO 1461 detalla los espesores y masas promedio de zinc por unidad de superficie mínimos, mismos que se muestran en la tabla 9-1. Estos criterios mínimos son válidos, siempre que los demás parámetros del proceso sean los indicados en la norma.

Tabla 9-1: Masas mínimas de recubrimiento según ISO 1461.

Artículo/espesor	Valor local (mínimo)		Valor medio (mínimo)	
	(g/m ²)	(mg/dm ²)	(g/m ²)	(mg/dm ²)
Acero >6mm	505	70	610	85
Acero >3mm a ≤ 6mm	395	55	505	70
Acero ≥ 1.5mm a ≤ 3mm	325	45	395	55
Acero < 1.5mm	250	35	325	45
Piezas moldeadas ≥ 6mm	505	70	575	80
Piezas moldeadas < 6mm	430	60	505	70
Piezas roscadas > 6 mm diámetro	285	40	360	50
Piezas roscadas ≤ 6 mm diámetro	145	20	180	25
Otras piezas (incluyendo piezas moldeadas) espesor ≥ 3mm.	325	45	395	55
Otras piezas (incluyendo piezas moldeadas) espesor < 3mm.	250	35	325	45

Fuente: (Galvanizer Aso., 2020).

NOTA: La capacidad de protección contra la corrosión de un recubrimiento es directamente proporcional a su espesor. La norma técnica ISO 1461 solo reconoce como único método de medición de espesores de recubrimiento al método magnético ISO 2178, siendo el método de confirmación el gravimétrico ISO 1460.

Existen algunos requerimientos para la selección de las áreas donde se tomarán las medidas de espesor:

- Las áreas de medida deben estar a una distancia mínima de 100mm de los bordes de las piezas o preferiblemente en el centro.
- Se deben realizar como mínimo 5 medidas en cada área seleccionada, la media aritmética de los valores de espesor obtenidos será el valor local del espesor.
- Ningún valor de espesor local debe ser menor de los indicados en la tabla 9-1.
- No se deben realizar medidas sobre superficies de corte (marcas de corte).
- Las zonas de medida deben estar a mínimo 2mm de bordes o esquinas.

Reacondicionamiento de áreas no recubiertas

Cuando las piezas presenten áreas sin recubrir, estas pueden ser recubiertas sin necesidad de sumergirlas en el baño de zinc fundido, si su tamaño es menor a los 10 centímetros cuadrados. Los métodos que se pueden emplear para recubrir estas áreas son: Proyección térmica de zinc; pinturas con zinc de alta calidad; aleaciones con zinc de bajo punto de fusión o pastas con zinc metálico.

Luego de recubiertas las zonas con zinc, se debe realizar una inspección del espesor del galvanizado, el cual debe cumplir como mínimo con un espesor de 100 micrómetros, como valor local y medio.

Adherencia del recubrimiento de zinc

Por las características químicas y mecánicas de las aleaciones que se forman en las capas del recubrimiento con zinc sobre hierro, la norma ISO 1461 no especifica como necesario alguna prueba de adherencia de las capas del recubrimiento; salvo que el contratante de los servicios de recubrimiento lo requiera.

Criterios de aceptación

Los criterios que impone la norma como necesarios para la aceptación de un lote de material galvanizado son: que este pase la inspección del espesor del recubrimiento y la inspección visual. Siendo de mayor importancia los resultados de las pruebas de espesor usando el método no invasivo magnético.

NOTA: En el caso de que la muestra de un lote no superase las pruebas de espesor, se deberá tomar una nueva muestra del doble del tamaño. Si esta nueva muestra pasa las pruebas, todo el lote no será descartado.

Certificado de conformidad

Si el galvanizador tiene implementado un sistema certificado de gestión de calidad ISO 9001, puede extender un certificado, donde declara que las piezas se han galvanizado siguiendo los parámetros, procedimientos y cumpliendo las exigencias de la norma UNE-EN ISO 1461.

1.2. Marco Legal

1.2.1. Internacional

Tabla 10-1: Legislación o normativa internacional sobre galvanización en caliente.

NORMATIVA	OBSERVACIÓN
ISO 1461:2009	Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles — Specifications and test methods (ISO, 2017).
ASTM A123 / A123M - 17	Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products (Standard ASTM, 20017).

Fuente: Varios

Realizador por: García P., 2021.

1.2.2. Nacional

Tabla 11-1: Legislación y normativa nacional sobre galvanizado en caliente.

NORMATIVA	OBSERVACIÓN
CÓDIGO ORGÁNICO DE LA PRODUCCIÓN, COMERCIO E INVERSIONES	Art. 2.- Actividad Productiva. Literal t. Fomentar y apoyar la investigación científica e industrial, así como la innovación y transferencia tecnológica. (Econ y Correa, 2010).
NTE INEN-ISO 14713-1 Primera revisión	Recubrimientos de zinc – Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero: Parte 1 Principios Generales de diseño y resistencia a la corrosión (INEN, 2016a).
NTE INEN-ISO 14713-2 Primera revisión	Recubrimientos de zinc – Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero: Parte 2 Galvanizado en caliente (INEN, 2016b).
NTE INEN 672:2009 Primera revisión	Recubrimientos de zinc por inmersión en caliente sobre elementos de sujeción. Requisitos generales (INEN, 2016c).

Fuente: Varios

Realizador por: García P., 2021.

CAPÍTULO III

2. MARCO METODOLÓGICO

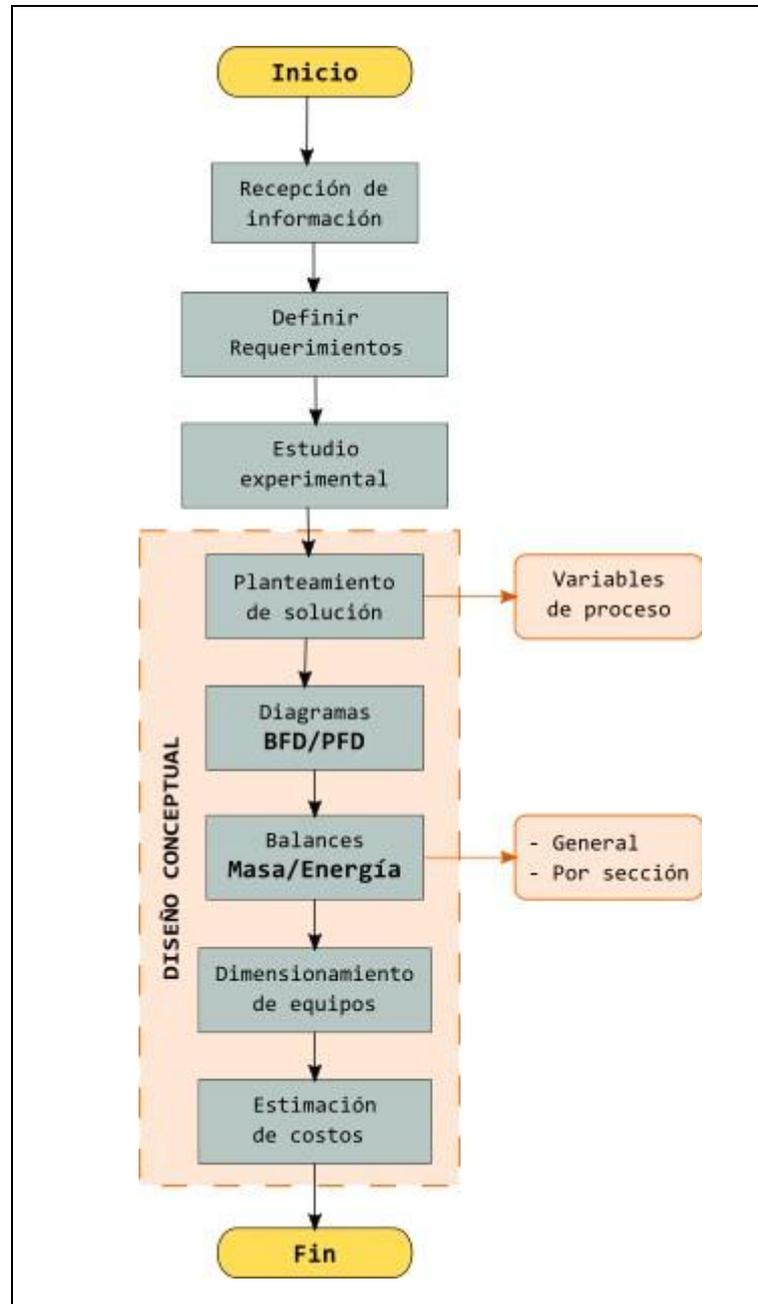


Figura 1-2. Diagrama del proceso de diseño.

Realizador por: García P., 2021.

2.1. Recopilación de información

La información se recopilará de fuentes bibliográficas, de los requerimientos planteados por el solicitante del diseño.

2.2. Necesidades de la empresa

Durante una reunión con los delegados del área técnica de la compañía PCA Company S.A, se presentaron los siguientes requisitos para el diseño.

- Las dimensiones de las piezas en largo son de 6 metros como máximo. En el caso de los tubos cilíndricos los diámetros estarán en el rango de 1 a 6 pulgadas.
- Para el tratamiento con piezas pequeñas, se debe tener la capacidad de tratar en serie varias piezas a la vez.
- El proceso debe respetar la normativa ambiental vigente, sobre todo en lo que concierne a emisiones y efluentes residuales.
- Los costos operativos y de inversión inicial deben ser bajos, sin arriesgar calidad y seguridad.
- El espacio físico destinado al proceso debe cubrir la menor área posible, sin sacrificar ergonomía, accesibilidad para mantenimiento y seguridad.

Sumados a los requerimientos previos, se encuentran las imposiciones de las normativas tanto nacionales como internacionales en el contexto del proceso de galvanización.

2.3. Planteamiento de alternativas

Con la información reunida y analizada, se plantea alternativas que cumplan en mayor porcentaje con los requerimientos y las normativas vigentes. De estas alternativas debe seleccionarse uno como el más idóneo para su aplicación.

- **Alternativa 1:** Galvanizado con desengrasado ácido y distribución Lineal del proceso.
- **Alternativa 2:** Galvanizado con desengrasado básico y distribución en U del proceso.

2.4. Estudio experimental

Para determinar cuales es la alternativa idónea se aplica un estudio de laboratorio donde se comparará las dos alternativas. Las etapas del pretratamiento químico y el recubrimiento con zinc se pondrán a prueba, variando los pretratamientos según corresponda a la secuencia de cada alternativa. A continuación, se presenta las composiciones de las soluciones para cada proceso.

2.4.1. Desengrasado básico

Para el ensayo experimental del proceso de desengrasado se prepara a nivel de laboratorio las soluciones de tratamiento con las cantidades indicadas en la tabla 1-2. Las cantidades mostradas en esta tabla se deben diluir en agua destilada o des ionizada.

Tabla 1-2: Cantidades de reactivos de la prueba del desengrase básico.

Componentes	Formula	Cantidad (g)
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₂	20
Fosfato de sodio	Na ₂ PO ₄	30
Hidróxido de sodio	NaOH	40
Pirofosfato de sodio	Na ₄ P ₂ O ₇	10
Meta silicato de sodio	Na ₄ SiO ₃	20
EDTA	[CH ₂ N(CH ₂ CO ₂ H) ₂] ₂	2
Lauril sulfato	C ₁₂ H ₂₅ NaO ₃ S	0.2

Nota: Todas las cantidades indicadas, se deben disolver en 1 L de agua destilada.

Realizado por: García P., 2021.

Las condiciones de trabajos del tratamiento de desengrasado se muestran en la tabla 2-2. Siendo de gran importancia el mantener la temperatura bajo los 90°C. El tiempo de retención o inmersión puede cambiar dependiendo del comportamiento del proceso.

Tabla 2-2: Condiciones de la prueba de desengrase básico.

Condiciones	Valor
pH	13
Temperatura (°C)	90
Tiempo de exposición (min)	15

Realizado por: García P., 2021.

2.4.2. Decapado

La solución acida que desprende el óxido de la superficie, debe prepararse siguiendo las cantidades y condiciones de trabajo expuestas en la tabla 3-2. Se debe tomar en cuenta que la temperatura de trabajo debe ser menor a 50°C, para evitar la emisión de gases nocivos, en el caso de que no se utilice un método de extracción de vapores.

Tabla 3-2: Condiciones de la prueba de decapado.

Condiciones	Valor	Unidad
Ácido clorhídrico (37%) *	227.2	mL
Temperatura	50	°C
Tiempo de exposición	15	min

* La cantidad de ácido debe ser disuelta en 1L de agua destilada.

Realizado por: García P., 2021.

2.4.3. Fluxado

La solución de fluxado se prepara en un litro de agua, siguiendo las indicaciones de la tabla 4-2. La solución de fluxado puede también llevar una cantidad pequeña de surfactante, para este experimento no se aplica dichos de compuestos químicos.

Tabla 4-2: Parámetros para el proceso de fluxado.

Condición	Valor	Unidad
Cantidad de Cloruro de zinc (ZnCl)	40.65	g
Cantidad de Cloruro de Amonio	65.05	g
Temperatura	50	°C

Nota: Todas las cantidades indicadas, se deben disolver en 1L de agua destilada.

Realizado por: García P., 2021.

2.4.4. Enjuagado

El enjuague se realiza en agua destilada o des ionizada, puede ser en agua a temperatura ambiente, tibia (40°C) o caliente (>60°C). Para la prueba en laboratorio se emplea agua a temperatura ambiente.

2.4.5. Recubrimiento

El recubrimiento se realiza en un horno de fundición para metalurgia del laboratorio de Operaciones Unitaria de la Facultad de Ciencias. El horno tiene un crisol de grafito, específico para fundir el metal. El zinc empleado es grado industrial y se emplean 25 kilogramos de este metal. El proceso de fundir el metal y sumergir las piezas se realiza siguiendo las indicaciones de la tabla 5-2.

Tabla 5-2: Condiciones de la prueba de galvanizado.

Condición	Valor	Unidad
Temperatura	455	°C
Tiempo de tratamiento	5	min
Velocidad de remoción	1.5	m/min
Composición Hierro galvanizado	99.8% Zn y 0.2% Al	% pp
Aditivos (Pn, Sb) No comercial	Ninguno	% pp

Realizado por: García P., 2021.



Figura 2-2. Horno de fundición para metales.

Realizado por: García P., 2021.

Método gravimétrico para determina espesor de recubrimiento

En este método se requiere pesar la pieza antes y después de recubrirla, y se debe determinar la superficie recubierta. La ecuación que permite calcular el espesor, a partir de estos datos, es la siguiente:

$$e = \frac{m_2 - m_1}{A \times \rho} \times 10^4 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- e Espesor de recubrimiento de zinc. (mm)
- m_2 Masa de la pieza luego del recubrimiento. (g)
- m_1 Masa de la pieza antes del recubrimiento. (g)
- A Superficie recubierta con zinc. (cm²)
- ρ Densidad del zinc metálico. ($\frac{g}{cm^3}$)

2.5. Diseño del proceso

2.5.1. Variables del proceso

Tabla 6-2: Tabla de variables de proceso para el proceso de galvanización en caliente.

Variable	Tipo	Concepto	Medición	Efecto sobre el proceso	Parámetro
Capacidad	Independiente	Cantidad de piezas metálicas tratadas por día.	Conteo	Define el tamaño de las operaciones de pretratamiento químico y recubrimiento.	Rango: 100-150 ton/día 150 ton/día
Temperatura de desengrasado	Independiente	Temperatura de la solución de desengrasado básico.	Termómetro o sensor.	Define el requerimiento térmico para el tratamiento de desengrasado básico.	Rango: 70 – 90 °C 90°C
Temperatura de enjuague caliente	Independiente	Temperatura del agua de enjuague caliente.	Termómetro o sensor.	Define el requerimiento térmico para el proceso de enjuague.	Rango: 30 – 45°C 30°C
Temperatura de decapado (pickling)	Independiente	Temperatura de la solución de decapado (HCl)	Termómetro o sensor.	Define el requerimiento térmico para el proceso de decapado.	Rango: 30 - 45°C 45°C
Temperatura de secado	Independiente	Temperatura del aire de secado	Termómetro o sensor	Define el requerimiento de aire, y las dimensiones del intercambiador de calor.	Rango: 100 – 150°C 120°C
Temperatura de horno de fundición de zinc	Independiente	Temperatura de zinc fundido.	Termocupla	Define el requerimiento de combustible y aire, para el horno, así como el tamaño de los recuperadores de calor.	Rango: 450 - 460°C 455 °C
Concentración de Hierro	Dependiente	Concentración de hierro en los tanques de tratamiento químico.	Método de laboratorio	Genera efectos adversos en la calidad del recubrimiento, y reduce el tiempo de vida útil de la solución de decapado y fluxado.	Rango: 100 – 120 g/L 100 g/L

Realizado por: García P., 2021.

2.5.2. Diagrama de bloques del proceso (DBP)

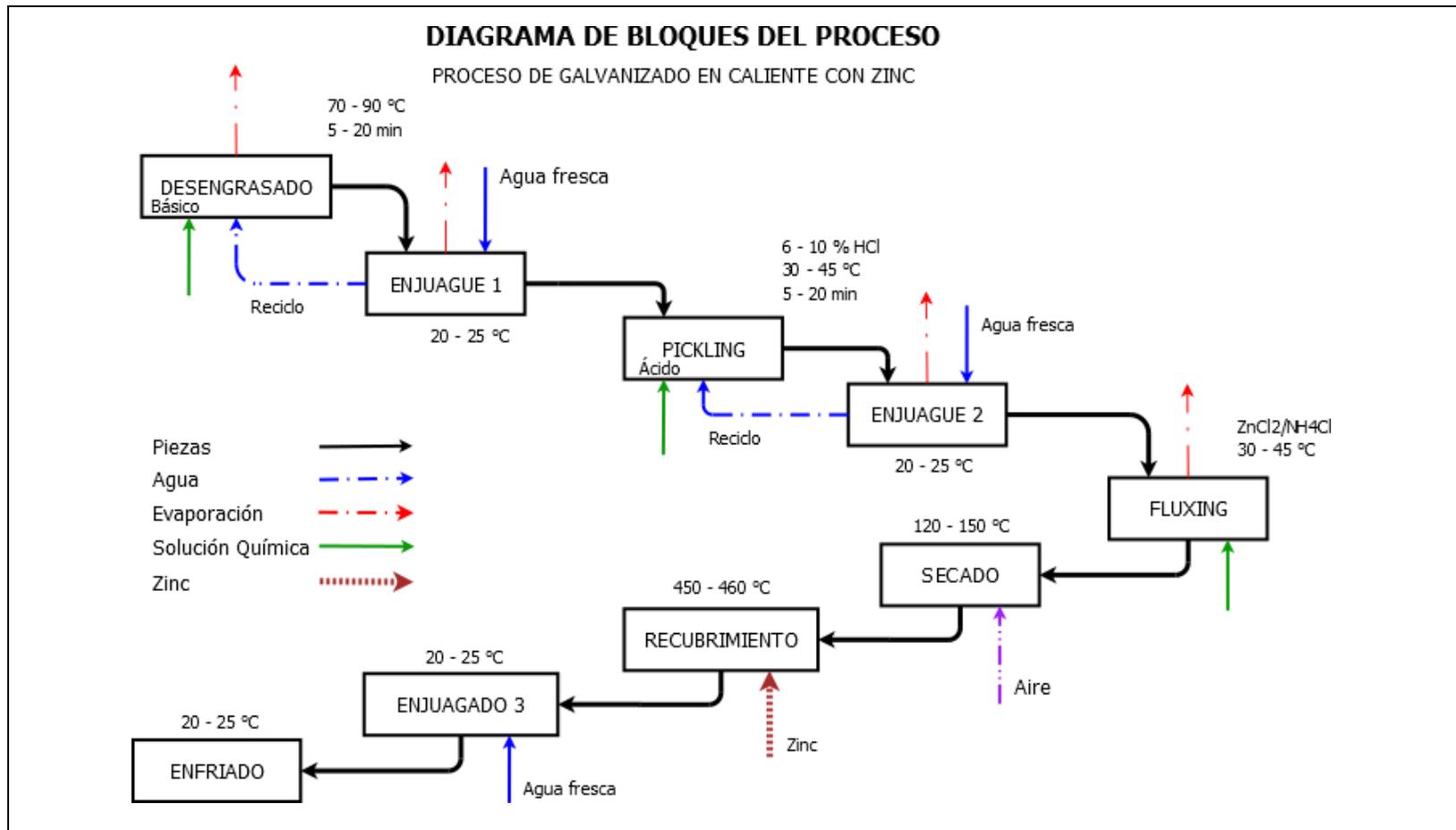


Figura 3-2. Diagrama de bloques del proceso.

Realizado por: García P., 2021.

El proceso de galvanizado en caliente consta de tres etapas: pretratamiento químico, recubrimiento y postratamiento. El pretratamiento químico tiene las siguientes etapas: desengrasado, varios enjuagues, decapado (pickling) y fluxado (fluxing). La etapa de recubrimiento tiene las sub etapas de secado e inmersión en zinc fundido. El postratamiento incluye el enfriamiento por inmersión en agua, el enfriamiento con aire a temperatura ambiental y el control de calidad.

El pretratamiento químico se puede describir de la siguiente manera:

1. Las piezas entran al proceso de desengrasado, en este caso desengrase básico, con un rango de temperatura de 70 a 90 °C, por un tiempo de inmersión de 5 a 20 minutos.
2. Después las piezas pasan a un proceso de enjuague con agua a temperatura ambiente o ligeramente caliente (20-30°C), el tiempo de inmersión puede variar entre 5 a 10 minutos.
3. Las piezas, previa eliminación de la mayor parte del agua de enjuague, pasan al decapado (pickling) donde se extrae todo el óxido de la superficie. El decapado se lleva a cabo a una temperatura entre 30 a 45 °C, para evitar la degradación de la superficie del acero o hierro. Las concentraciones recomendadas de ácido clorhídrico están entre 6 a 10% en peso. Dependiendo de la cantidad de óxido en la superficie, el tiempo de inmersión puede ir desde 5 a 20 minutos o más.
4. Después con el objetivo de eliminar el exceso de solución de ácido clorhídrico en la superficie, se lleva las piezas a otro enjuague, las condiciones del enjuague son las mismas que en el enjuague anterior.
5. Previo al recubrimiento se necesita sumergir las piezas en una solución de $ZnCl/NH_4Cl$ con el objetivo de mejorar el proceso de amalgamación entre el acero y el recubrimiento con zinc. La temperatura del proceso debe estar entre 30 a 50°C.

Posterior al pretratamiento químico las piezas pasan a un secador donde el exceso el agua de la solución de fluxado es retirada (Método de galvanizado en seco). Para el secado se usa aire caliente con una temperatura entre 120 a 150°C. El calor que calienta el aire es recuperado de los gases provenientes del horno de fundición de zinc. El proceso de secado, dependiendo de las condiciones de secado, puede llevar entre 5 a 30 minutos.

Una vez secas las piezas, se recubren con zinc fundido, sumergiéndolas de forma individual o en una matriz (piezas pequeñas), con la ayuda de un sistema montacargas. El proceso de recubrimiento lleva entre 5 a 15 minutos, dependiendo de la complejidad de la estructura de las piezas tratadas.

Las piezas deben ser diseñadas de tal manera que permitan el ingreso del zinc fundido a las cavidades interiores, y el drenaje al momento de retirar las piezas del zinc líquido. Para el drenaje dependiendo de la estructura y tamaño de las piezas, se puede facilitar usando: agitación, vibración o centrifugación.

El postratamiento consiste en enfriar las piezas, por inmersión en agua o circulación de aire ambiental.

Como se observa en la figura 3-2, de las etapas de enjuague (Enjuague 1 y enjuague 2) en el pretratamiento químico existe recirculación hacia las operaciones previas (Desengrasado y pickling), esto es muy común en las plantas de tamaño mediano y grande. El objetivo de esta medida es el aumentar el tiempo de vida media de las soluciones de tratamiento, y reducir el consumo de agua y desechos producidos.

Otro aspecto importante a resaltar, es la existencia de flujos de alimentación de las soluciones de tratamiento químico (flechas verdes), las cuales agregar químicos a los tanques de tratamiento. Se usa dosificadores automáticos, que suelen emplear sondas electroquímicas para medir la conductividad y de esta forma indirectamente conocer la concentración de NaOH, HCl., entre otros.

2.5.3. Diagrama de flujo del proceso (DFP)

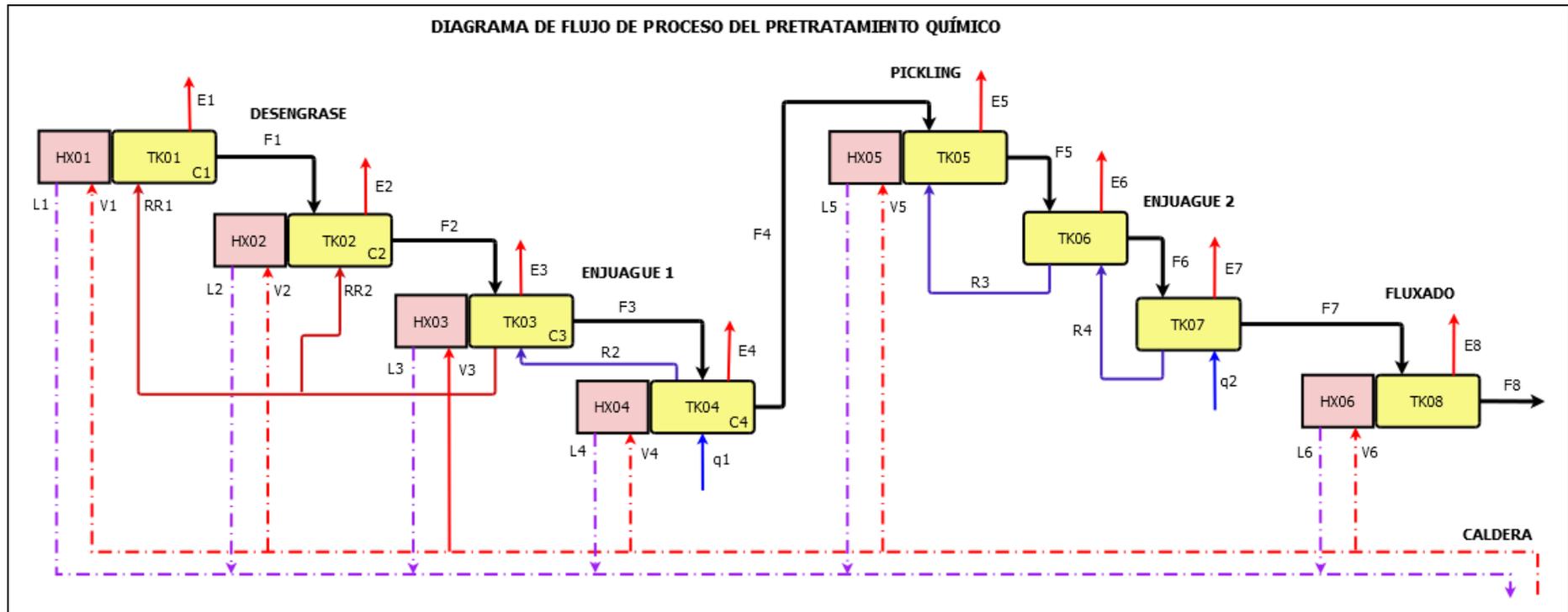


Figura 4-2. Diagrama de flujo del proceso.

Realizado por: García P., 2021.

En la figura 4-2, se muestra el diagrama de flujo del proceso del pretratamiento químico, mismo que muestra las corrientes principales incluyendo: los flujos de arrastre de solución por las piezas tratadas en cada tanque de tratamiento (corrientes F); recirculaciones de agua desde los tanques de enjuague (corrientes R); el ingreso de agua fresca para mantener los niveles de solución en todos los tanques (corrientes q), el agua evaporada de los tanques (corrientes E), y el flujo de entrante vapor (corrientes V) y condensado saliente (corrientes L), de cada uno de los intercambiadores de calor (equipos HX). Para los tanques de tratamiento se utiliza la nomenclatura TK y se le agrega un número secuencial para diferenciarlos.

Para simplificar el análisis, se divide el proceso de pretratamiento químico en dos secciones: sección 1, correspondiente al desengrase básico de las piezas; y sección 2, correspondiente a los procesos de decapado y fluxado. Con el objetivo de facilitar el desarrollo de las ecuaciones de balance de masa y energía, se realiza esta división.

En la primera sección, correspondiente al desengrase de las piezas se encuentran cuatro tanques de tratamiento: TK01 correspondiente al primer desengrasado básico, TK02 que es el segundo tanque de desengrasado, TK03 es el primer tanque de enjuague y TK04 es el enjuague previo al decapado. Este sistema de 4 tanques para el proceso de desengrase es uno de los más usados para plantas de tamaño medio, porque permite tener siempre un tanque de respaldo tanto para el desengrasado como para el enjuague.

El flujo de las piezas sigue la siguiente secuencia:

1. Las piezas ingresan al proceso con la ayuda de un montacargas, mismo que las sumerge en el tanque TK01 de desengrase, por el tiempo correspondiente. Luego se retiran y como consecuencia las piezas arrastran una cantidad de la solución de desengrase, hacia el tanque TK02, que corresponde el segundo desengrase.
2. Luego de estar sumergidas las piezas por el tiempo adecuado, para el tipo de material y la cantidad de grasa que estas tienen, se retira las piezas y pasan al primer enjuague (TK03). Este enjuague puede estar al ambiente o ligeramente caliente (30°C). Pasando luego al segundo enjuague (TK04). En todo este proceso las piezas arrastran partes de la solución de cada tanque (F3 y F4).

Como la temperatura de trabajo para los tanques de desengrase esta alrededor de los 90°C, se pierde agua de las soluciones por evaporación (E1 y E2). Estas pérdidas de agua como vapor, se determinan mediante un diagrama de evaporación figura 14-2.

Existen flujos de recirculación que vienen desde el tanque TK03, hacia los tanques de desengrase TK01 y TK02. La recirculación tiene como objetivo: reponer el agua que se pierde por arrastre (corrientes F) y por evaporación (corrientes E), también ayudan a el control de la concentración de hierro disuelto en las soluciones de tratamiento (C).

Desde el tanque TK04 se recircula agua hacia el tanque de enjuague TK03, y a la vez ingresa agua fresca (q1) para mantener los niveles en todos los tanques.

La siguiente sección corresponde al decapado, que elimina las capas de óxido que existen sobre las piezas metálicas. Como se explica anteriormente, se realiza con soluciones al 10% de ácido clorhídrico, a una temperatura de 45°C. La secuencia del proceso se describe de la siguiente manera:

1. Las piezas enjuagadas provenientes del tanque TK04, previamente se someten a agitación o vibración para retirar el exceso de agua y pasan al tanque de decapado TK05. Se mantienen ahí por el tiempo recomendado.
2. Las piezas se llevan al tanque de enjuague TK06 para limpiar el exceso de HCl, y evitar degradar la superficie del metal. Para pasar al proceso de fluxado se debe eliminar por completo la presencia de HCl en la superficie, por eso, es necesario realizar un segundo enjuague en el tanque TK07.
3. Una vez limpia la superficie de grasa y óxido, se sumerge en una solución fundente, cuyo objetivo es mejorar el proceso de amalgamación del zinc con las capas externas del metal. En el tanque TK08, se sumergen las piezas en una solución de $ZnCl/NH_4Cl$, en este punto se puede escoger entre; secar las piezas (galvanización en seco) o pasar directo a sumergirlas en el zinc fundido (galvanización húmeda). En el proceso a diseñar se emplea el método de galvanización en seco.

En esta sección igual que en la anterior, existen flujos de arrastre por las piezas (corrientes F), evaporación (corrientes E). En consecuencia, se requiere reponer agua y químicos con el objetivo de mantener las concentraciones óptimas para la operación en los tanques de tratamiento. Por ello, existe recirculación desde el tanque TK06 hacia el tanque TK05 (pickling), y a su vez, el tanque TK06 recibe agua por recirculación del tanque TK07. El tanque TK07 recibe agua fresca (q_2), para compensar las pérdidas antes mencionadas (evaporación y arrastre).

Cada tanque de tratamiento con la excepción de los tanques TK06 y TK07, tienen intercambiadores de calor (HX), que permiten controlar las temperaturas de las soluciones de tratamiento. En el diagrama de flujo de proceso se observan como líneas de flujo entrecortadas de color rojo (vapor) y violeta (condensado), que corresponden a los utilitarios.

2.5.4. Balance de masa y energía

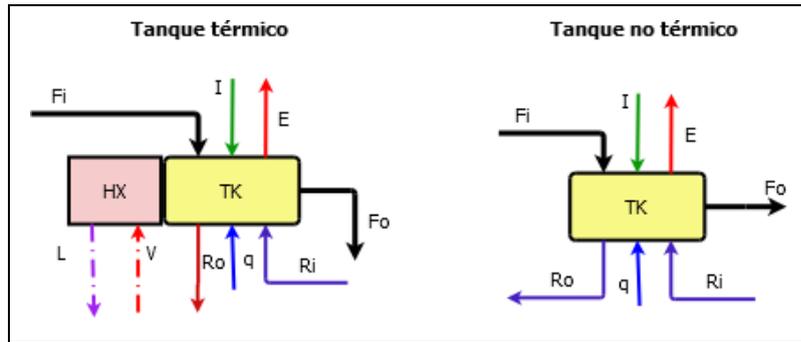


Figura 5-2. Modelos de tanques: término y no térmico.

Realizado por: García P., 2021.

2.5.4.1. Modelo de tanque térmico

Como se observa en la figura 5-2, el modelo de tanque térmico tiene un intercambiador de calor integrado, cuya función es mantener la temperatura de la solución de tratamiento en el rango determinado. Con los acrónimos HX se etiquetan los intercambiadores y con TK los tanques que contiene las soluciones de tratamiento químico. Existen múltiples entradas y salidas para el modelo, su utilidad depende de qué proceso se esté llevando a cabo, por ejemplo: en un tanque de enjuague caliente, no existe en teoría flujo de químicos (I) para el control de la concentración.

2.5.4.1.1. Balance de masa en el tanque (TK)

Con el objetivo de representar el modelo del tanque térmico en forma de ecuaciones, el primer paso es determinar el balance de masa en el tanque, tanto general como por componentes.

2.5.4.1.2. Balance de masa general en el tanque (TK)

El balance de masa general toma en cuenta todas las entradas y salidas, que se observan en el modelo del tanque térmico. En este se muestran solo las entradas y salidas útiles, para el proceso de tratamiento químico. La ecuación resultante, que sigue el principio de conservación de la materia, sería la siguiente:

$$\dot{m}_L + \dot{m}_V + \dot{m}_R + \dot{m}_I = \dot{m}_O + \dot{m}_q + \dot{m}_R \tag{Ec 2}$$

Donde:

\dot{m}_L, \dot{m}_V Arrastre de solución por piezas tratadas. $(\dot{m}_I \neq \dot{m}_R)$

- Flujo de reactivos químicos (control de concentración) (~~h~~)
- Flujo de recirculación de entrada y salida. (~~h~~)
- Flujo de agua fresca. (~~h~~)
- Evaporado (Agua evaporada) (~~h~~)

2.5.4.1.3. Balance por componente

En este caso solo se plantea la ecuación para un componente, el número de ecuaciones depende del número componentes. Por ejemplo, para el proceso de galvanizado, un componente importante en el proceso de diseño es el hierro. Concentraciones que superen lo recomendado por la normativa, afectan directamente la calidad del recubrimiento. Otros componentes son importantes en el diseño de subprocesos específicos, como es el caso del ácido clorhídrico en el proceso de decapado (Pickling). Concentraciones bajo las especificaciones indican que se debe reponer el ácido o reemplazar por completo la solución de trabajo. Cantidades muy altas de este ácido generan vapores tóxicos, que ponen en riesgo la salud. Al final, la ecuación para un componente C, quedaría de la siguiente forma:

$$C_{in}Q_{in} + C_{rec}Q_{rec} + C_{fresh}Q_{fresh} = C_{out}Q_{out} + C_{evap}Q_{evap} \quad \text{Ec 3}$$

Donde:

- C_{in} Concentración del componente C en la solución arrastrada en Q_{in} . (~~h~~)
- C_{rec} Concentración del componente C en el flujo de reactivos Q_{rec} . (~~h~~)
- C_{fresh}, C_{evap} Concentración del componente C en los flujos de recirculación de entrada y salida. (~~h~~)
- C_{out} Concentración del componente C dentro de tanque de tratamiento. (~~h~~)

Si para el diseño, más de un componente se toman en cuenta, es necesario realizar un análisis de grados de libertad. Recordando brevemente que, para dos componentes en una corriente, solo es necesario determinar una de las concentraciones, siendo la otra calculada de forma implícita.

2.5.4.1.4. Balance de masa en el intercambiador de calor (HX)

Observando la figura 5-3, se comprende que el fluido de intercambio de calor, no tiene contacto con la solución de tratamiento químico del tanque. Otras simplificaciones también se toman en cuenta en este punto como: el intercambiador es adiabático y existe una condensación completa del vapor.

- Balance de masa General

Como no existe contacto entre el fluido de transferencia de calor y la solución del tanque, el balance de masa es:

$$\dot{m} = \dot{m} \quad \text{Ec 4}$$

Donde:

- Flujo de vapor a condiciones de caldera. (\dot{m})
- Flujo de condensado. (\dot{m})

- Por componente

El único componente a tomar en cuenta es el agua, como vapor o líquido.

2.5.4.1.5. Balance de energía en el tanque (TK)

La ecuación del balance de energía para el tanque, usa las entalpías de cada flujo de entrada más el calor cedido por el fluido de intercambio de calor (vapor). La ecuación que describe el comportamiento térmico de un tanque de tratamiento es la siguiente:

$$\dot{m}h_{\text{liq}} + \dot{m}h_{\text{v}} + \dot{m}h_{\text{rec}} + \dot{m}h_{\text{f}} + \dot{Q}_{\text{cal}} = \dot{m}h_{\text{v}} + \dot{m}h_{\text{liq}} + \dot{m}h_{\text{rec}} \quad \text{Ec 5}$$

Donde:

- $h_{\text{liq}}, h_{\text{v}}$ Entalpia de líquido arrastrado por las piezas tratadas (entrada y salida) ($\dot{m}h$)
- h_{v} Entalpia del flujo de reactivos químicos (control de concentración) ($\dot{m}h$)
- $h_{\text{liq}}, h_{\text{v}}$ Entalpia de flujo de recirculación de entrada y salida. ($\dot{m}h$)
- h_{f} Entalpia de flujo de agua fresca. ($\dot{m}h$)
- \dot{Q}_{cal} Entalpia del evaporado. ($\dot{m}h$)
- \dot{Q}_{cal} Calor transferido por el intercambiador de calor. ($\dot{m}h$)

Para calcular las entalpías de las corrientes o flujos, es necesario conocer las condiciones y la composición de los mismo. En condiciones normales de presión (1 atm), las ecuaciones que permiten calcular la entalpia de una corriente de proceso son:

$$h_i = \Delta h_i^0 + \int_{T_0}^T c_{p,i} \, dT \quad \text{Ec 6}$$

$$h_i = \Delta h_i^0 + \int_{T_0}^{T_b} c_{p,i} \, dT + \Delta h_{i,v}^0 + \int_{T_b}^T c_{p,i} \, dT \quad \text{Ec 7}$$

Donde:

- h_i Entalpia específica para componente i, estado líquido.
- \dot{h}_i Entalpia específica para componente i, estado gaseoso.
- Δh_i^0 Entalpía específica de fusión del componente i.
- $\Delta h_{i,v}^0$ Entalpía específica de vaporización del componente i.
- $c_{p,i}$ Calor específico de componente i, estado líquido.
- $c_{p,i}$ Calor específico de componente i, estado gaseoso.
- T_0 Temperatura de referencia termodinámica (normalmente 0°C)
- T_b Temperatura de ebullición del componente i.
- T Temperatura de la corriente que forma parte el componente i.

Si, la corriente tiene más de un componente, pues se emplea la regla básica de mezcla para la entalpia. Existen dependiendo de la propiedad a determinar, para una mezcla, distintas reglas. Las ecuaciones para calcular la entalpia de una mezcla, en condiciones normales de presión son las siguientes:

$$h_k = \sum_{i=1}^n x_i h_i \quad \text{Ec 8}$$

$$\dot{h}_k = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i h_i \quad \text{Ec 9}$$

Donde:

- h_k Entalpia específica para la corriente k, estado líquido.
- \dot{h}_k Entalpia específica para la corriente k, estado gaseoso.
- x_i Fracción másica del componente i en el flujo k, estado líquido.
- \dot{m}_i Fracción másica del componente i en el flujo k, estado gaseoso.

La condición normal de presión (presión atmosférica), es una simplificación aceptable en procesos que se llevan a cabo “a cielo abierto” o en un depósito abierto, como es el caso de los tanques usados para el pretratamiento químico.

Otra forma de simplificar el cálculo es asumir que: una corriente tiene un único componente, esto se puede hacer solo cuando la concentración de unos componentes, es varias veces más grande que la concentración de los demás. En conclusión, para poder simplificar el cálculo, dado que las soluciones de tratamiento son en su mayoría son agua; es factible asumir que sus propiedades térmicas, en este caso la entalpia de la corriente, tiene un aporte mayor por parte del agua, que del resto de componentes. Esta aproximación si genera un margen de error que puede ser ajustada con un factor de seguridad, el cual depende del aporte de los componentes. Usar un factor de entre 5 a 15% de ajuste puede ayudar a reducir la propagación del error.

2.5.4.1.6. Balance de energía en el intercambiador de calor (HX)

El balance de energía en el intercambiador de calor, se realiza por el lado del vapor. Siendo la ecuación resultante la siguiente:

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{\text{HX}} \quad \text{Ec 10}$$

Donde:

\dot{Q}_v Entalpia específica del flujo de vapor a condiciones de caldera. (\dot{Q}_v)

\dot{Q}_c Entalpia específica del flujo de condensado. (\dot{Q}_c)

La entalpia del vapor proveniente de la caldera depende de las condiciones de presión y temperatura a la que esta trabaje. Pudiendo proporcionar vapor saturado o sobrecalentado. Para obtener la entalpia del vapor, lo más sencillo es usar tablas de vapor.

2.5.4.2. Modelo tanque no térmico

El modelo del tanque de tratamiento, sin intercambiador de calor (figura 5-2, derecha), solo requiere el balance de masa y energía del tanque (TK) con una diferencia: no existe flujo de calor como entrada. La ecuación del balance de masa son las mismas ecuaciones Ec.3 y Ec.4. El balance de energía varia en un término (\dot{Q}_{TK}), siendo el resultado:

$$\dot{Q}_v h_{v1} + \dot{Q}_c h_{c1} + \dot{Q}_f h_{f1} + \dot{Q}_a h_{a1} = \dot{Q}_v h_{v2} + \dot{Q}_c h_{c2} + \dot{Q}_f h_{f2} + \dot{Q}_a h_{a2} + \dot{Q}_{\text{TK}} \quad \text{Ec 11}$$

2.5.4.3. Cálculo de los flujos de arrastre (F)

En el libro de Maaß y Peißker (2011), se describe un método de cálculo para la cantidad de solución arrastrada por las piezas tratadas. Este método emplea una ecuación (Ec 12), que relaciona la superficie de las piezas y la cantidad de líquido arrastrada por las piezas.

$$Q = K \cdot S \quad \text{Ec 12}$$

Donde:

- Q Flujo másico de solución arrastrada. ($\frac{kg}{h}$)
- K Coeficiente de arrastre del material tratado. ($\frac{kg}{m^2}$)
- S Metros cuadrados de superficie tratada por hora. ($\frac{m^2}{h}$)

Los coeficientes de arrastre por tipo de material se encuentran expresados en rangos en la tabla 7-2. Para calcular la superficie tratada por unidad de tiempo, usamos los factores de conversión, que permiten convertir capacidad o tonelaje a cantidad de superficie tratada, estos valores se encuentran en la tabla 8-2.

Tabla 7-2: Coeficientes de arrastre para distintos materiales.

Material	Coeficiente de arrastre (D) ($\frac{kg}{m^2}$)
Superficie amplia y lisa, perfiladas o ligeramente rugosas.	0.040 – 0.080
Superficies perfiladas rugosas.	0.080 – 0.120
Piezas pequeñas.	0.120 – 0.200

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011, p. 53).

Tabla 8-2: Factores de conversión entre tonelaje y superficie

Material	Factor de conversión ($\frac{kg}{m^2}$)
Estructuras de acero pesado	20-30
Acero forjado	80-90
Mallas y estructuras de acero ligero.	90
Intercambiadores de calor	100-150

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011, p. 53).

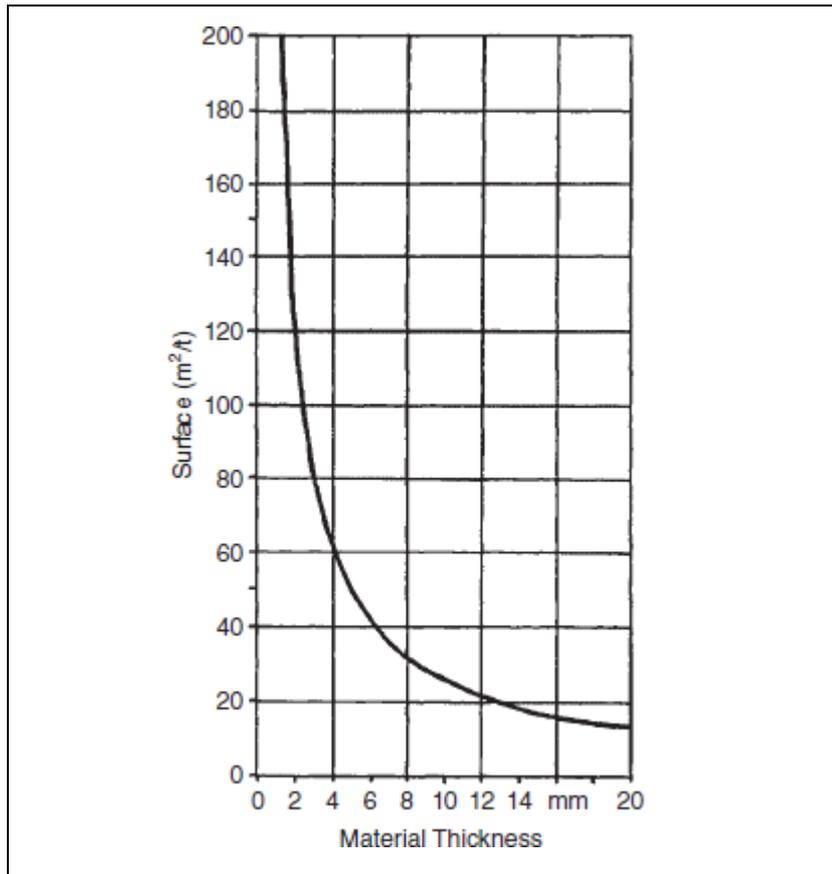


Figura 6-2. Factor de conversión para hojas de acero por su espesor.

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011, p. 53).

Para determinar el coeficiente de conversión de masa a superficie, para el caso de láminas de acero, se utiliza el diagrama de la figura 6-2.

2.5.4.4. Cálculo de la cantidad de solución evaporada (E)

Para estimar la cantidad de agua evaporada por unidad de superficie de líquido de los tanques de tratamiento, se emplea la figura 7-2. Para usar el diagrama definimos en el eje de las Y, la temperatura de trabajo de las soluciones. Desde este punto se lanza una recta que corta la curva correspondiente. Si el proceso tiene sistema de extracción de vapores, la recta trazada debe cortar la curva con succión (with suction). El punto generado por la recta y la curva, sirve como referencia para trazar una vertical hasta el eje de las X, donde determinamos la evaporación específica de la solución. En el gráfico existe un pequeño error en las unidades de la evaporación, las unidades correctas son (L/m^2h).

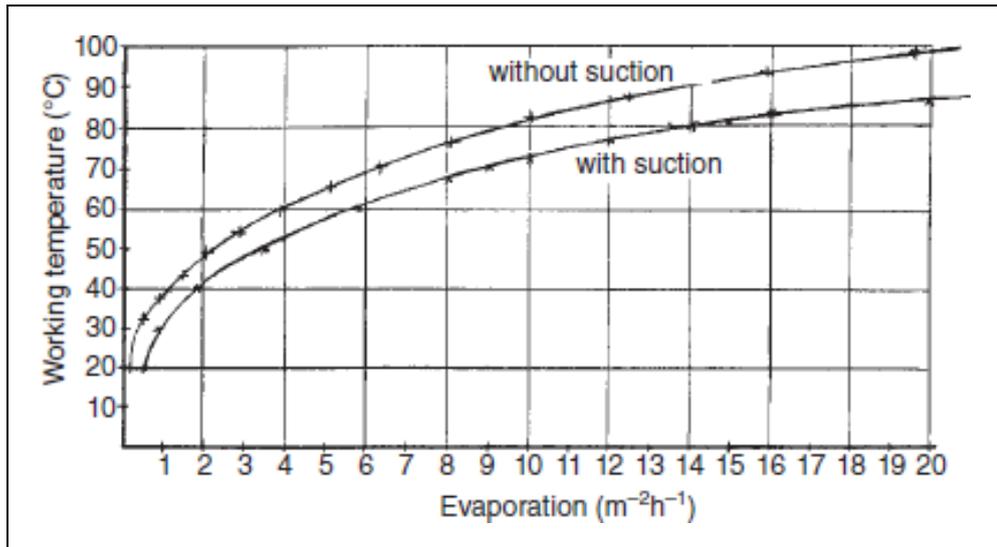


Figura 7-2. Evaporación de solvente en función de temperatura y extracción.

Fuente: (Maaß y Peißker, 2011, p. 56).

La ecuación 13, permite calcular la cantidad de solvente (agua) evaporada de un tanque de tratamiento. Es necesario primero definir la superficie libre del líquido, independientemente de la forma que tenga el tanque; aunque los tanques rectangulares suelen ser los más usados.

$$E = \frac{A \cdot Z}{h} \tag{Ec 13}$$

Donde:

- E Flujo masico de evaporado. ($\frac{kg}{h}$)
- A Superficie del líquido del tanque de tratamiento. (m^2)
- Z Factor de evaporación. Figura Z. ($\frac{kg}{m^2 h}$)

2.5.4.5. Sección 1 – Proceso de desengrasado

Una vez definidos los modelos de las operaciones individuales, se puede realizar los balances por sección. La primera sección corresponde a las operaciones de desengrasado, esta comprende dos tanques de desengrase (TK01 y TK02) y dos tanques de enjuague (TK03 y TK04), ver figura 8-2. Todos los tanques tienen un intercambiador, ya que, necesitan calentar sus soluciones a las temperaturas recomendadas para su operación.

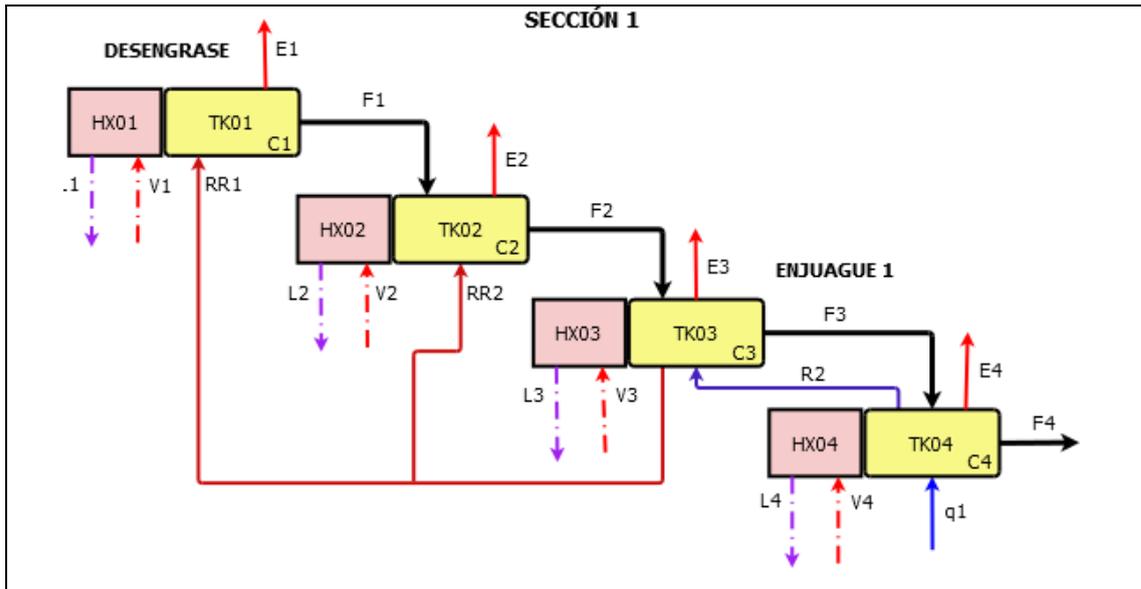


Figura 8-2. Diagrama de flujo de la sección 1.

Realizado: GARCÍA P, 2021.

Balace de masa y energía general

Para la sección de desengrasado el balance de masa Ec.14, muestra que la evaporación en cada tanque de tratamiento, es la principal fuente de pérdida de material. Por otra parte, el flujo de arrastre de solución hacia la siguiente sección, es muy pequeño en comparación. Esto será más notorio al momento de calcular la cantidad de solvente (agua) evaporada de cada tanque. Para contrarrestar la pérdida de masa por evaporación, una cantidad igual de agua fresca y limpia debe ingresar (\dot{m}_1) al proceso. En el balance de energía Ec.15, se observa que las principales pérdidas de calor, se deben a la evaporación. Por tanto, el total de calor usado en la evaporación del solvente, es el sumatorio del producto del flujo másico de evaporación de cada tanque por su entalpia específica. En contra parte, el calor aportado proviene del intercambiador de calor y se obtiene de la suma de las diferencias de entalpias entre el flujo de vapor y condensado, de cada uno de los intercambiadores. Las ecuaciones de balance de masa y energía general son las siguientes:

$$\dot{m}_1 = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i + \dot{m}_4 \quad \text{Ec 14}$$

$$\dot{m}_1 h_{01} + \sum_{i=1}^4 (\dot{m}_i \dot{h}_{i0} - \dot{m}_i \dot{h}_{i1}) = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i \dot{h}_{i0} + \dot{m}_4 h_{04} \quad \text{Ec 15}$$

Donde:

\dot{m}_i Flujo masico de evaporado i. ($\dot{m}_i \dot{h}$)

\dot{m}_4	Flujo masico de solución por arrastre en pieza tratada.	(\dot{m})
\dot{m}_1	Flujo de agua fresca de la sección 1.	(\dot{m})
$\dot{m}_{\square 1}$	Entalpia específica del flujo de agua fresca.	(\dot{m})
$\dot{m}_{\square\square}$	Entalpia específica del flujo de vapor i, estado gaseoso.	(\dot{m})
$h_{\square\square}$	Entalpia específica del flujo de condensado i, estado líquido.	(\dot{m})
$\dot{m}_{\square\square}$	Entalpia específica del flujo de evaporado i, estado gaseoso.	(\dot{m})

Balance por unidades

Cada tanque tiene un sistema de ecuaciones que describen: su balance de masa, balance de concentración de hierro y el balance de energía. A continuación, se muestra por cada unidad, dicho conjunto de ecuaciones.

- Unidad I – TK01

Masa general	$\dot{m}_{\square 1} = \dot{m}_1 + \dot{m}_1$	Ec 16
Masa componente	$\dot{m}_{\square 1} \square_3 = \dot{m}_1 \square_1$	Ec 17
Energía - tanque	$\dot{m}_{\square 1} \dot{m}_{\square\square 1} + \dot{m}_{\square\square 1} = \dot{m}_1 \dot{m}_{\square\square 1} + \dot{m}_{\square 1} \dot{m}_{\square 1}$	Ec 18
Energía - intercambiador	$\dot{m}_1 \dot{m}_{\square 1} = \dot{m}_1 \dot{m}_{\square 1} + \dot{m}_{\square\square 1}$	Ec 19

- Unidad II – TK02

Masa general	$\dot{m}_{\square 2} + \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_2$	Ec 20
Masa componente	$\dot{m}_{\square 2} \square_3 + \dot{m}_1 \square_1 = \dot{m}_2 \square_2$	Ec 21
Energía - tanque	$\dot{m}_{\square 2} \dot{m}_{\square\square 2} + \dot{m}_{\square\square 2} = \dot{m}_2 \dot{m}_{\square\square 2} + \dot{m}_{\square 2} \dot{m}_{\square 2}$	Ec 22
Energía - intercambiador	$\dot{m}_2 \dot{m}_{\square 2} = \dot{m}_2 \dot{m}_{\square 2} + \dot{m}_{\square\square 2}$	Ec 23

- Unidad III – TK03

Masa general	$\dot{m}_2 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_3 + \dot{m}_1$	Ec 24
Masa componente	$\dot{m}_2 \square_4 + \dot{m}_2 \square_2 = \dot{m}_3 \square_3 + \dot{m}_1 \square_3$	Ec 25
Energía - tanque	$\dot{m}_2 \dot{m}_{\square 2} + \dot{m}_2 \dot{m}_{\square 2} + \dot{m}_{\square\square 3} = \dot{m}_3 \dot{m}_{\square 3} + \dot{m}_3 \dot{m}_{\square 3} + \dot{m}_1 \dot{m}_{\square 1}$	Ec 26
Energía - intercambiador	$\dot{m}_3 \dot{m}_{\square 3} = \dot{m}_3 \dot{m}_{\square 3} + \dot{m}_{\square\square 3}$	Ec 27

- Unidad IV – TK04

Masa general	$\dot{m}_1 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_4 + \dot{m}_2$	Ec 28
Masa componente	$\dot{m}_3 \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \dot{m}_4 + \dot{m}_2 \dot{m}_4$	Ec 29
Energía - tanque	$\dot{m}_1 \dot{m}_1 + \dot{m}_3 \dot{m}_3 + \dot{m}_4 \dot{m}_4 = \dot{m}_4 \dot{m}_4 + \dot{m}_4 \dot{m}_4 + \dot{m}_2 h_{\dot{m}_2}$	Ec 30
Energía - intercambiador	$\dot{m}_4 \dot{m}_4 = \dot{m}_4 h_{\dot{m}_4} + \dot{m}_4 \dot{m}_4$	Ec 31

2.5.4.6. Sección 2 – Proceso de decapado y fluxado

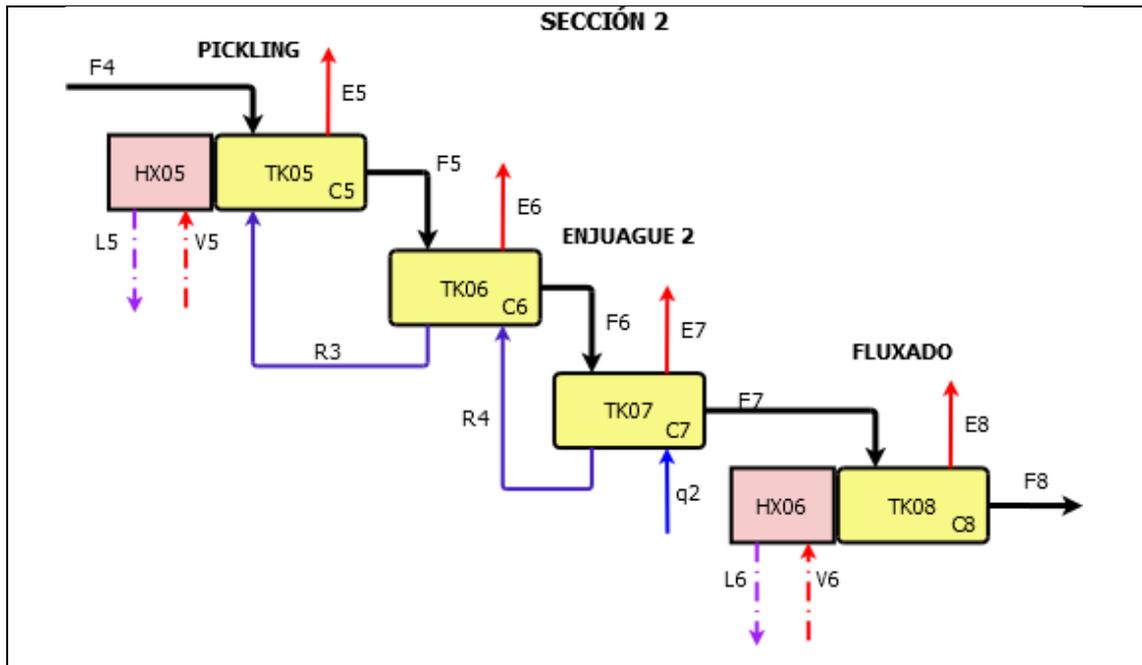


Figura 9-2. Diagrama de flujo de la sección 2.

Realizado por: García P., 2021.

La sección dos (figura 9-2), continua el proceso químico desde el segundo enjuague de la sección 1. La ecuación 32, muestra el balance de masa de toda la sección 2, en ella se puede observar que la mayor parte de la masa que sale, corresponde a la evaporación del agua de las soluciones de tratamiento (E). Si observamos la ecuación, si los términos F_4 y F_8 son iguales, como efectivamente se determinará luego, podemos cancelar estos términos de la expresión dando como resultado la igualdad entre: la cantidad de agua fresca ingresada (q_2) y la suma de las cantidades de agua evaporada de cada tanque.

El balance de energía representado por la ecuación 33, muestra que el calor latente proporcionado por el vapor (V), calienta y evapora el agua de cada tanque (E); este proceso convierte el vapor en condensado (L).

Balance de masa y energía general

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_4 = \sum_{i=5}^8 \dot{m}_i + \dot{m}_8 \quad \text{Ec 32}$$

$$\dot{m}_2 h_{f,2} + \sum_{i=5}^6 (\dot{m}_i \dot{h}_{g,i} - \dot{m}_i h_{f,i}) + \dot{m}_4 h_{f,4} = \sum_{i=5}^8 \dot{m}_i \dot{h}_{g,i} + \dot{m}_8 h_{f,8} \quad \text{Ec 33}$$

Donde:

- \dot{m}_i Flujo masico de evaporado i. (~~kg/h~~)
- \dot{m}_4, \dot{m}_8 Flujo masico de solución por arrastre en piezas tratadas. (~~kg/h~~)
- $\dot{h}_{f,4}, \dot{h}_{f,8}$ Entalpia específica del flujo de arrastre en piezas tratadas. (~~kJ/kg~~)
- \dot{m}_2 Flujo de agua fresca de la sección 1. (~~kg/h~~)
- $\dot{h}_{f,2}$ Entalpia específica del flujo de agua fresca. (~~kJ/kg~~)
- $\dot{h}_{g,i}$ Entalpia específica del flujo de vapor i, estado gaseoso. (~~kJ/kg~~)
- $h_{f,i}$ Entalpia específica del flujo de condensado i, estado líquido. (~~kJ/kg~~)
- $\dot{h}_{g,i}$ Entalpia específica del flujo de evaporado i, estado gaseoso. (~~kJ/kg~~)

Balance por unidades

Las ecuaciones de balance de cada unidad de proceso de la sección 2, tanto de balance de masa como balance de energía se presentan a continuación:

- Unidad I – TK05

Masa general $\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_1$ Ec 34

Masa componente $\dot{m}_3 \dot{m}_6 + \dot{m}_4 \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \dot{m}_5$ Ec 35

Energía - tanque $\dot{m}_3 \dot{h}_{f,3} + \dot{m}_4 \dot{h}_{f,4} + \dot{m}_5 \dot{h}_{f,5} = \dot{m}_5 \dot{h}_{f,5} + \dot{m}_5 \dot{h}_{g,5}$ Ec 36

Energía - intercambiador $\dot{m}_5 \dot{h}_{f,5} = \dot{m}_5 \dot{h}_{f,5} + \dot{m}_6 \dot{h}_{f,6}$ Ec 37

- Unidad II – TK06

Masa general $\dot{m}_4 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_6 + \dot{m}_3$ Ec 38

Masa componente $\dot{m}_4 \dot{m}_7 + \dot{m}_5 \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \dot{m}_6 + \dot{m}_6 \dot{m}_6 + \dot{m}_3 \dot{m}_6$ Ec 39

Energía - tanque $\dot{m}_4 \dot{h}_{f,4} + \dot{m}_5 \dot{h}_{f,5} = \dot{m}_6 \dot{h}_{f,6} + \dot{m}_6 \dot{h}_{f,6} + \dot{m}_3 \dot{h}_{f,3}$ Ec 40

- Unidad III – TK07

Masa general	$\dot{m}_2 + \dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_7 + \dot{m}_4$	Ec 41
Masa componente	$\dot{m}_6 \dot{m}_6 = \dot{m}_7 \dot{m}_7 + \dot{m}_4 \dot{m}_7$	Ec 42
Energía - tanque	$\dot{Q}_2 \dot{m}_2 + \dot{Q}_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_7 \dot{m}_7 + \dot{Q}_7 \dot{m}_7 + \dot{Q}_4 \dot{m}_4$	Ec 43

- Unidad IV – TK08

Masa general	$\dot{m}_3 + \dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_8$	Ec 44
Masa componente	$\dot{m}_7 \dot{m}_7 = \dot{m}_8 \dot{m}_8$	Ec 45
Energía - tanque	$\dot{Q}_7 \dot{m}_7 + \dot{Q}_{66} \dot{m}_6 = \dot{Q}_8 \dot{m}_8 + \dot{Q}_8 \dot{m}_8$	Ec 46
Energía - intercambiador	$\dot{Q}_6 \dot{m}_6 = \dot{Q}_6^h \dot{m}_6 + \dot{Q}_{66} \dot{m}_6$	Ec 47

Con las ecuaciones planteadas para esta sección, el siguiente paso es definir algunos parámetros con el objetivo de reducir el número de grados de libertad del sistema.

2.5.4.7. Sección 3 – Recubrimiento

Para la etapa de recubrimiento o galvanizado (figura 10-2), se emplea otro enfoque para el balance de masa y energía, en comparación con las secciones anteriores. Se aborda el problema desde una perspectiva individual, es decir, cada operación se tratará por separado; empezando por: el horno de fundición de zinc (F01); luego pasando al secador (S01); luego al recuperador de calor (HX06) y finalmente el tanque de enfriamiento (TK10). La razón por la que no se usa el método de resolución secuencial, es porque, la operación central en esta área es el horno (F01); de los resultados de su balance de masa y energía dependen muchas de las corrientes de entrada de otros equipos.

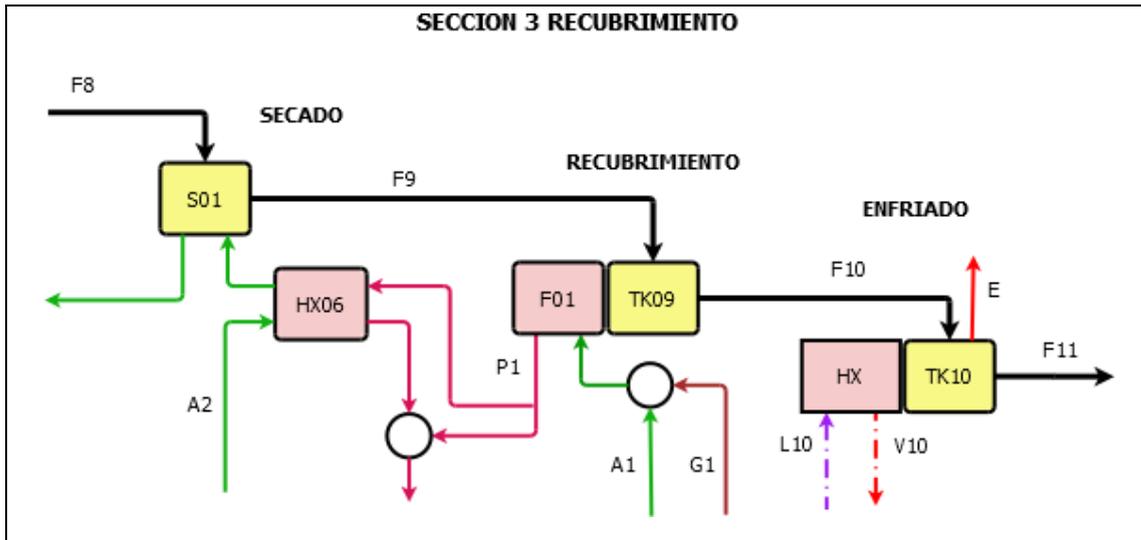


Figura 10-2. Diagrama de flujo de la sección 3.

Realizado por: García P., 2021.

Horno de fundición F01

El horno de fundición de zinc tiene la capacidad de proporcionar el flujo de calor necesario, para mantener de forma continua el zinc en estado líquido y compensar las pérdidas de calor hacia el ambiente. Existen muchos tipos de horno que se pueden usar: eléctricos, de gas, combustible líquido y combustible sólido. Los más comunes son los hornos de gas, seguidos de los hornos de combustible líquido, aunque en las últimas décadas se observa un mayor uso de los hornos eléctricos, por su alta eficiencia térmica a comparación de los hornos a combustible.

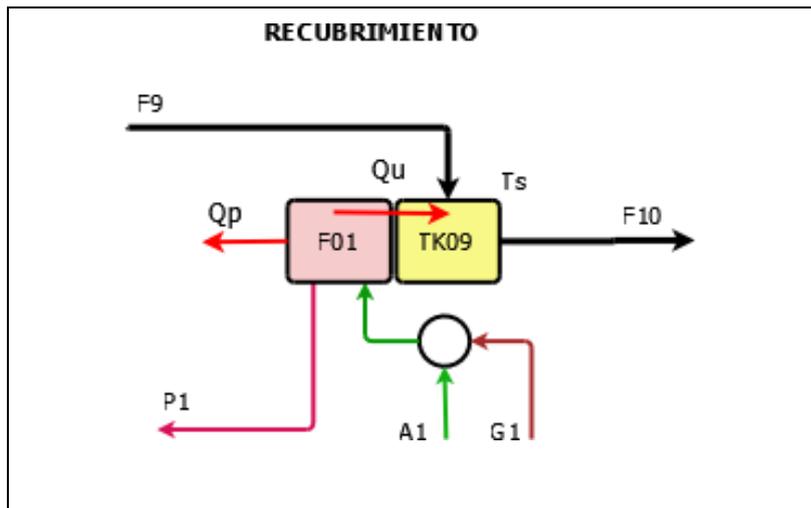


Figura 11-2. Diagrama de flujo de horno de fundición de zinc.

Realizado por: García P., 2021.

En la figura 11-2, se observa un diagrama de flujo del horno fundidor de zinc. En el observamos: las corrientes de aire (A_1), combustible (G_1), gases de combustión (P_1), metal o piezas sin recubrimiento (F_9), piezas recubiertas (F_{10}), flujo de energía útil (Q_u) y flujo de energía perdido al ambiente (Q_p). Las ecuaciones de balance de materia y energía, se presentan a continuación:

Balance de masa

En el balance de masa general del horno fundidor, se realiza para la sección del proceso de combustión (F01) y para el tanque con zinc fundido (TK09).

Horno F01	$\dot{m}_1 + \dot{m}_1 = \dot{m}_1$	Ec 48
Tanque TK09	$\dot{m}_9 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	Ec 49

Balance de energía

Los balances de energía se pueden resolver como: un balance de entalpía (Ec.50) o un balance basado en los flujos de calor (ecuación 51). Ambas ecuaciones permiten el dimensionamiento del horno.

$$\dot{m}_1 h_{\dot{m}_1} + \dot{m}_1 h_{\dot{m}_1} + \dot{m}_9 = \dot{m}_1 h_{\dot{m}_1} + \dot{m}_9 + \dot{m}_9 \quad \text{Ec 50}$$

$$\dot{Q}_9 = \dot{Q}_9 + \dot{Q}_9 + \dot{Q}_9 \quad \text{Ec 51}$$

Donde:

- \dot{m}_1 Flujo másico de combustible para el horno. (\dot{m})
- \dot{m}_1 Flujo másico de aire para combustión. (\dot{m}^2)
- \dot{m}_1 Flujo másico de gases producto de combustión. ($\dot{m}^2 h$)
- \dot{m}_9 Flujo de energía del combustible. ($\dot{m} h$)
- \dot{m}_9 Flujo de energía perdido en los gases de combustión. ($\dot{m} h$)
- \dot{m}_9 Flujo de energía perdido por las estructuras. ($\dot{m} h$)
- \dot{m}_9 Flujo de energía utilizado en la fundición del zinc. ($\dot{m} h$)

Energía proporcionada por el combustible

Se define como la energía liberada por kilogramo de combustible quemado en una reacción de combustión. En el caso de hornos para fundición se puede emplear: gas natural, GLP, diésel o kerosene. En el Ecuador el combustible más accesible es el diésel, por lo que el diseño toma en cuenta este combustible como fuente de energía.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot P_c \quad \text{Ec 52}$$

Donde:

- \dot{m}_c Flujo másico de combustible para el horno. (kg/h)
- P_c Poder de combustión. (kJ/kg)

Energía utilizada para la fundición de zinc

Para cambiar el estado físico del zinc, de sólido a líquido es necesario proporcionar una ingente cantidad de calor. Luego para mantenerlo en estado líquido, se requiere menos calor que el utilizado en el proceso de fundición. Al final, el horno debe ser capaz de fundir el metal en un cierto espacio de tiempo, y mantenerlo en estado líquido. La ecuación 53, permite calcular la cantidad de calor que se requiere para fundir el zinc (420°C) y llevarlo a la temperatura de trabajo del horno fundidor (450°C).

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_z [\dot{Q}_{fz}(T_f - T_a) + L_f] + \dot{Q}_{pz} \quad \text{Ec 53}$$

Donde:

- \dot{Q}_f Flujo de energía usado en la fundición de zinc. (kJ/h)
- \dot{Q}_{pz} Flujo de energía perdido por convección natural por la superficie del líquido. (kJ/h)
- \dot{m}_z Masa de zinc a fundir. (kg)
- T_f Temperatura de trabajo del horno. ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a Temperatura ambiente. ($^{\circ}\text{C}$)
- L_f Calor de fusión del zinc. (kJ/kg)
- \dot{Q}_{pz} Calor específico medio del zinc. (kJ/h)

Energía perdida por la estructura del horno

Todos los equipos de transferencia de calor pierden energía que se disipa hacia el ambiente, a través de su estructura (paredes, pisos y techos). La ecuación que permite calcular la energía perdida al ambiente tomando en cuenta la conductividad térmica de la estructura es la ecuación 54a. Una variante simplificada de esta ecuación solo requiere definir la eficiencia térmica del proceso (ϵ), ecuación 54b.

$$Q_p = U_p A (T_c - T_f) \quad \text{Ec 54a}$$

$$Q_p = (1 - \epsilon) Q \quad \text{Ec.54b}$$

Donde:

- Q_p Flujo de energía perdido por las estructuras. (\cancel{W})
- A Superficie interna de las paredes del horno. (m^2)
- U_p Conductividad térmica de las paredes. (W/m^2h)
- T_c Temperatura de la pared caliente. ($^\circ C$)
- T_f Temperatura de la pared fría. ($^\circ C$)
- ϵ Eficiencia térmica del equipo de intercambio de calor. (%) o fracción

Energía perdida en los gases producto de la combustión

Gran parte de la energía generada por el proceso de combustión, se pierde en los gases de combustión. Para poder determinar la cantidad de calor, expresado como entalpia, que tiene la corriente de gases de desecho, se debe conocer o al menos estimar su composición. La ecuación que permite calcular el calor perdido por la emisión de gases de combustión, es la siguiente:

$$Q_p = \dot{m}_1 c_{p,g} (T_{g1} - T_g) \quad \text{Ec 55}$$

Donde:

- Q_p Flujo de energía perdido por las estructuras. (\cancel{W})
- \dot{m}_1 Flujo masico de los gases producto de la combustión. ($\cancel{kg/h}$)
- $c_{p,g}$ Calor especifico medio de los gases de combustión. ($\cancel{kJ/kg}$)
- T_{g1} Temperatura de los gases de combustión. ($^\circ C$)

Secador S01

El proceso de secado debe eliminar el agua de la solución de fluxado, que es arrastrada por las piezas. El objetivo es dejar las sales de ZnCl/NH₄Cl libres de humedad, para procurar se lleven a cabo las reacciones que se muestran en la figura 12-2. El secador usa un flujo de aire caliente, el cual retira la humedad de la superficie de las piezas metálicas. El metal se calienta hasta la temperatura de evaporación del agua, en este caso se asume 100°C.

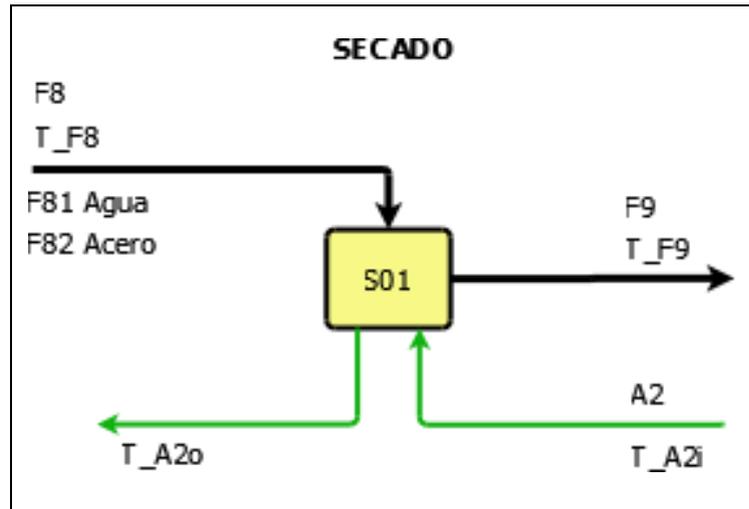


Figura 12-2. Diagrama de flujo del proceso de secado.

Realizado por: García P., 2021.

Balance de masa

Como todas las corrientes tienen contacto dentro del secador, durante el proceso la masa de humedad que viene en el flujo F8, se evapora y sale en la corriente de aire de secado. La salida F9 se estima como solo conformada por acero. El flujo de F8, se subdivide en F81 que representa la humedad y F82 para el acero.

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_2^{H_2O} = \dot{m}_9 + \dot{m}_2^{Acero} \quad \text{Ec 56}$$

Balance de energía

Para el balance de energía se estima que el proceso es adiabático, es decir, no existen pérdidas al ambiente. Como resultado, el calor que debe aportar el aire para el proceso es igual a la suma del calor necesario para evaporar la humedad y el calor necesario para calentar la pieza hasta la temperatura de evaporación.

$$Q_0 = Q_{\text{evaporación}} + Q_{\text{calentamiento}} \quad \text{Ec 57}$$

Donde:

- Q_0 Calor transferido por el aire caliente. (kJ/h)
- $Q_{\text{evaporación}}$ Calor necesario para evaporar la humedad en la superficie de las piezas metálicas. (kJ/h)
- $Q_{\text{calentamiento}}$ Calor necesario para elevar la temperatura a la temperatura de salida, de las piezas secadas. (kJ/h)

El calor de evaporación de la humedad y el calentamiento del metal, se calculan con las siguientes expresiones:

$$Q_{\text{evaporación}} = \dot{m}_{81} [C_{p8} (T_{9} - T_{8}) + H_{\text{evap}}] \quad \text{Ec 58}$$

$$Q_{\text{calentamiento}} = \dot{m}_{82} [C_{p9} (T_{9} - T_{8})] \quad \text{Ec 59}$$

Donde:

- \dot{m}_{81} Flujo de agua de la corriente F8. (kg/h)
- C_{p8} Capacidad calorífica del agua. (kJ/kg °C)
- T_{9} Temperatura de la corriente F9. (°C)
- T_{8} Temperatura de la corriente F8. (°C)
- H_{evap} Entalpia de evaporación del agua. (kJ/kg)
- \dot{m}_{82} Flujo de metal de la corriente F8. (kg/h)
- C_{p9} Capacidad calorífica del metal de las corrientes F8 y F9. (kJ/kg °C)

2.5.5. Dimensionamiento de equipos principales

2.5.5.1. Tanques de tratamiento químico

Para el dimensionamiento de los tanques de tratamiento químico y postratamiento, emplean ecuaciones sencillas para determinar el volumen interno, y sus dimensiones: longitud, ancho y profundidad.

$$V_0 = C_{\text{volumen}} C_{\text{profundidad}} C_{\text{ancho}} (1 + C_{\text{longitud}})^3 \quad \text{Ec 60}$$

Donde:

- V Volumen interno del tanque de tratamiento. (m^3)
- L Longitud mínima del tanque de tratamiento. (m)
- B Ancho mínimo del tanque de tratamiento (m)
- H Profundidad mínima del tanque de tratamiento (m)
- F Factor de seguridad de diseño. (%)

Otra propiedad importante es la superficie libre del líquido que corresponde a la siguiente expresión:

$$A = B \cdot L (1 + F)^2 \quad \text{Ec 61}$$

Donde:

- A Superficie libre del líquido del tanque de tratamiento. (m^2)

2.5.5.2. Horno de fundición de Zinc

Para calcular la cantidad de zinc que se necesita para llenar un crisol de fundición de 20 metros cúbicos (similar a los tanques de tratamiento químico), usamos la siguiente ecuación:

$$M = V \times 10^3 \rho_{@420^\circ C} \quad \text{Ec 62}$$

Donde:

- M Masa de zinc fundido a 455 °C. (kg)
- V Volumen de Zinc fundido a 455 °C. (m^3)
- $\rho_{@420^\circ C}$ Densidad del zinc fundido a temperatura de fusión 420 °C. (kg/m^3)

Se estima que la densidad del metal líquido cambia poco entre la temperatura de fusión de 420 °C y la temperatura de trabajo 455 °C.

Para realizar los cálculos térmicos se requiere calcular los coeficientes de película de convección natural, para estimar las pérdidas de calor desde la superficie del metal líquido. Las expresiones requeridas para el cálculo son las siguientes:

Temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad \text{Ec 63}$$

Donde:

- T_f Temperatura de película. (°C)
- T_s Temperatura de la superficie del metal líquido. (°C)
- T_a Temperatura del aire ambiental. (°C)

Longitud característica:

$$L_c = \frac{A_s}{P} \quad \text{Ec 64}$$

Donde:

- L_c Longitud característica de la superficie de intercambio de calor. (m)
- A_s Superficie de intercambio de calor. (m²)
- P Perímetro de la superficie de transferencia de calor. (m)

Numero de Prandtl:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{Ec 65}$$

Donde:

- Pr Numero de Prandtl
- μ Viscosidad del aire a temperatura de película. (Pa·s)
- c_p Capacidad calorífica aire a temperatura de película. (J/kg·K)
- k Conductividad térmica aire a temperatura de película. (W/m·K)

Numero de Garshoft:

$$Gr = \frac{\rho \beta \Delta T L_c^3}{\mu} \quad \text{Ec 66}$$

Donde:

- Gr Numero de Garshoft.
- ρ Densidad del aire a temperatura de película. (kg/m³)
- β Constante de la gravedad. (1/K)

- ΔT Diferencia de temperatura entre la superficie y el aire ambiental. (K)
- β Coeficiente de expansión térmica aire. (K^{-1})

Numero de Rayleigh:

$$Ra_{\text{ff}} = \beta \Delta T \rho g L^3 \quad \text{Ec 67}$$

Donde:

Ra_{ff} Numero de Rayleigh.

Numero de Nusselt:

$$Nu_{\text{ff}} = 0.59 Ra_{\text{ff}}^{1/4} \quad \text{Ec 68}$$

Donde:

Nu_{ff} Numero de Nusselt.

Coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \frac{Nu_{\text{ff}} k_{\text{ff}}}{L} \quad \text{Ec 69}$$

Donde:

h Coeficiente de convección ($W/m^2 K$)

Calor transferido por la superficie por convección natural:

$$Q_{\text{ff}2} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ec 70}$$

Donde:

$Q_{\text{ff}2}$ Flujo de calor por convección natural. (W)

2.5.5.3. Recuperador de calor

Como la mayor parte del calor producido por la quema del combustible en el horno de fundición, se pierde en los gases de combustión. Una forma de recuperar una parte de ese calor, es utilizar los gases en un intercambiador y calentar otra corriente del proceso. En el caso del proceso de galvanizado, esto se puede hacer con un recuperados gas-aire. En la figura 13-2, se muestra el diagrama de flujo del intercambiador de calor HX06, que recupera calor de los gases de combustión del horno F01.

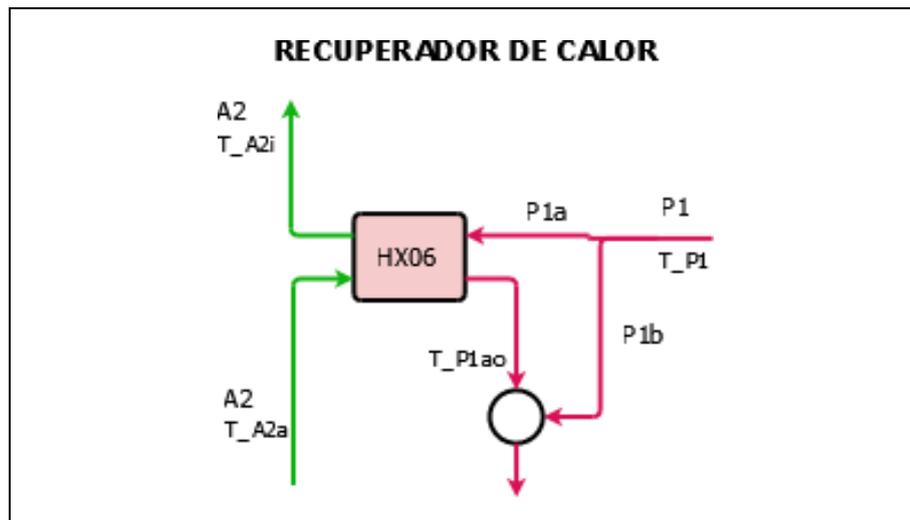


Figura 13-2. Diagrama de flujo del recuperador.

Realizado por: García P., 2021.

La cantidad de calor que los gases de combustión deben ceder, para que la corriente de aire A2 incremente su temperatura de T_{A2a} a T_{A2i} , se calcula con la ecuación 71.

$$Q_{02} = \dot{m}_{02} c_{p02} (T_{02i} - T_{02a}) \quad \text{Ec 71}$$

Donde:

- Q_{02} Flujo de calor cedido por los gases de combustión. (W)
- \dot{m}_{02} Flujo masico de aire a calentar. (kg/h)
- T_{02i} Temperatura de la corriente de aire a la entrada. (°C)
- T_{02a} Temperatura de la corriente de aire a la salida. (°C)

Como se observa en la figura 13-2, no toda la corriente de gases de combustión pasa a través de intercambiador HX06, solo una parte es usada en el recuperador de calor. El flujo de gases de combustión P1, se divide en P1a (utilizado para recuperación) y P1b que se envía directamente para eliminación (chimenea).

$$\dot{m}_{g1} = \frac{Q_{g2}}{C_{p,g} (T_{g2} - T_{g1})}$$

Ec 72

Donde:

- \dot{m}_{g1} Flujo de masa de gases de combustión usado para recuperación de calor. (kg/h)
- $C_{p,g}$ Capacidad calorífica media de los gases de combustión, ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- T_{g2} Temperatura de salida de la fracción de gases de combustión usada en recuperación. ($^\circ\text{C}$)
- T_{g1} Temperatura de entrada de la fracción de gases de combustión usada en recuperación. ($^\circ\text{C}$)

2.6. Cálculos de diseño

2.6.1. Balances de masa y energía del proceso

2.6.1.1. Cálculo de los flujos de araste (F)

Tabla 9-2: Parámetros para el cálculo del arrastre de solución (F).

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Material base a tratar		Piezas de acero semi rugoso (estructural)	
Capacidad de procesamiento	Q_0	150	($\text{kg}/\text{día}$)
Coefficiente de arrastre material	α	0.08	(kg/m^2)
Factor de conversión del material	β	25	(m^2/kg)
Horas fe trabajo por día.	h_{tr}	24	($h / \text{día}$)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Para calcular el flujo de arrastre empleamos la ecuación 46, y usando los datos de la tabla 9-2. Primero se calcula la cantidad de superficie metálica a tratar y luego el flujo de arrastre por hora, la resolución sería la siguiente:

$$A = \left(\frac{150}{24} \times 25 \right) = 156.25 \frac{\text{m}^2}{h}$$

$$F = \alpha A = (0.08) \left(\frac{128}{24} \times 25 \right) = 12.5 \frac{\text{kg}}{h} \approx 12.46 \frac{\text{kg}}{h}$$

La cantidad de superficie tratada por hora es de 156.25 m², y el arrastre de solución por esta superficie es de 12.46 kg por cada hora. Una buena aproximación es emplear este valor para cada corriente F del proceso.

2.6.1.2. *Cálculo de la cantidad de solución evaporada (E)*

A diferencia del flujo de arrastre (F), la cantidad evaporada de solución es diferente en cada tanque de tratamiento, porque las temperaturas de trabajo de cada uno varía. Empleando el diagrama de la figura 8-2 y usando las temperaturas de la tabla 10-2, se obtiene como resultado el diagrama de la figura 14-2 y los coeficientes de evaporación de la tabla 11-2.

Tabla 10-2: Temperaturas del proceso de galvanización.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de desengrasado	□ ₁	90	(°□)
Temperatura enjuague 1	□ ₂	30	(°□)
Temperatura pickling	□ ₃	45	(°□)
Temperatura enjuague 2	□ ₄	30	(°□)
Temperatura fluxing	□ ₅	50	(°□)
Temperatura de secado	□ ₆	120	(°□)
Temperatura de horno	□ ₇	455	(°□)
Temperatura de enjuagado	□ ₈	25	(°□)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

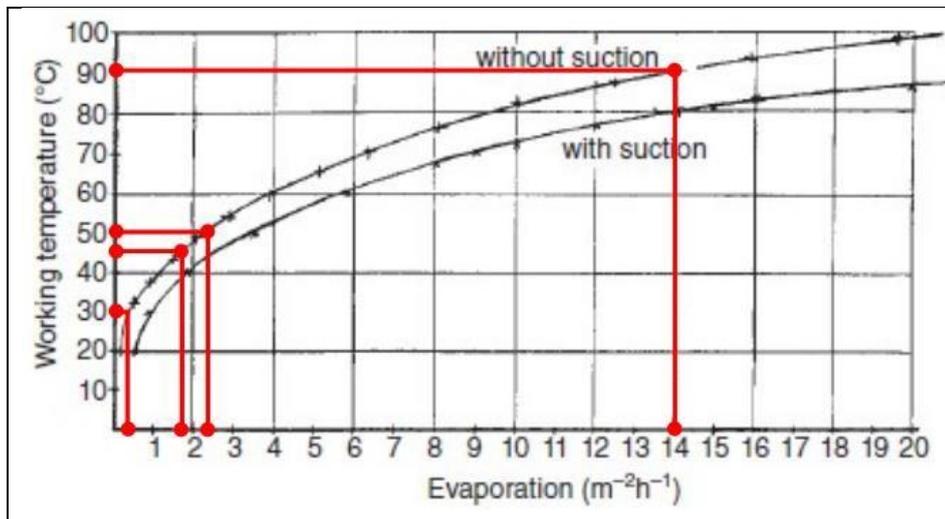


Figura 14-3. Factores de evaporación en función de la temperatura.

Realizado por: García P., 2021.

Tabla 11-2: Factores de evaporación de los tanques de tratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Factor de evaporación TK01	$\alpha_1 90(^{\circ}\text{C})$	14	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK02	$\alpha_2 90(^{\circ}\text{C})$	14	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK03	$\alpha_3 30(^{\circ}\text{C})$	0.4	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK04	$\alpha_4 30(^{\circ}\text{C})$	0.4	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK05	$\alpha_5 45(^{\circ}\text{C})$	1.85	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK06	$\alpha_6 30(^{\circ}\text{C})$	0.4	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK07	$\alpha_7 30(^{\circ}\text{C})$	0.4	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$
Factor de evaporación TK08	$\alpha_8 50(^{\circ}\text{C})$	2.3	$(\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h})$

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Con los factores de evaporación de la tabla 9-2 y las dimensiones mínimas de los tanques de tratamiento (tabla 12-2), se calcula la superficie libre del líquido y el flujo volumétrico de agua evaporada.

Tabla 12-2: Dimensiones mínimas para los tanques de tratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud mínima	$L_{\text{mín}}$	6	(m)
Ancho mínimo	$B_{\text{mín}}$	1	(m)
Profundidad mínima	$d_{\text{mín}}$	1.5	(m)
Factor de seguridad	α	30.5	(%)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Con las dimensiones de los tanques de tratamiento se calcula, el volumen de solución y la superficie de la solución (libre al aire).

$$L_{\text{t}} = L_{\text{mín}} (1 + \alpha)$$

$$L_{\text{t}} = 6(1 + 0.305) = 7.83 \text{ m}$$

$$B_{\text{t}} = B_{\text{mín}} (1 + \alpha)$$

$$B_{\text{t}} = 1.0(1 + 0.305) = 1.30 \text{ m}$$

$$d_{\text{t}} = d_{\text{mín}} (1 + \alpha)$$

$$d_{\text{t}} = 1.50 (1 + 0.305) = 1.96 \text{ m}$$

$$S_{\text{t}} = W_{\text{t}} \times L_{\text{t}} = 7.83 \times 1.30 = 10.22 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{t}} = W_{\text{t}} \times L_{\text{t}} \times d_{\text{t}} = 7.83 \times 1.30 \times 1.96 \approx 20.00 \text{ m}^3$$

A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo del flujo volumétrico de agua evaporada cuando la temperatura de trabajo es 90°C y la superficie libre del líquido es 10.22 m². El resto de caudales se encuentran en la tabla 14-2.

$$V_1 = V \times v_1 = (10.22 \times 14) = 143.05 \frac{m^3}{h}$$

Tabla 13-2: Volumen específico del agua y vapor de agua.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen específico del vapor @ 90 °C	$v_{v@90}$	143.05	(m^3/kg)
Volumen específico del agua @ 90 °C	$v_{a@90}$	143.05	(m^3/kg)
Volumen específico del agua @ 50 °C	$v_{a@50}$	4.09	(m^3/kg)
Volumen específico del agua @ 45 °C	$v_{a@45}$	4.09	(m^3/kg)
Volumen específico del agua @ 30 °C	$v_{a@30}$	18.90	(m^3/kg)
Volumen específico del agua @ 20 °C	$v_{a@20}$	4.09	(m^3/kg)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Tabla 14-2: Caudales de evaporación de los tanques de pretratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Evaporación TK01	E_{TK01}	143.05	(m^3/h)
Evaporación TK02	E_{TK02}	143.05	(m^3/h)
Evaporación TK03	E_{TK03}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK04	E_{TK04}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK05	E_{TK05}	18.90	(m^3/h)
Evaporación TK06	E_{TK06}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK07	E_{TK07}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK08	E_{TK08}	23.50	(m^3/h)

Realizado por: García. P. 2021.

Con los valores del volumen específico del agua, para cada temperatura de trabajo del proceso (tabla 10-3), se obtiene el flujo masico de agua evaporada de cada tanque (tabla 15-3).

Tabla 15-2: Flujos masicos de evaporación de los tanques de pretratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Evaporación TK01	E_{TK01}	142.63	(m^3/h)
Evaporación TK02	E_{TK02}	142.63	(m^3/h)
Evaporación TK03	E_{TK03}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK04	E_{TK04}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK05	E_{TK05}	18.85	(m^3/h)
Evaporación TK06	E_{TK06}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK07	E_{TK07}	4.08	(m^3/h)
Evaporación TK08	E_{TK08}	23.43	(m^3/h)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

2.6.1.3. Cálculo de balances de masa y energía sección 1

En base al diagrama de la figura 6-2, se procede a resolver las ecuaciones con el objetivo de completar las incógnitas del proceso.

Balance de masa general

Usando la ecuación 12, los valores de las tablas 15-2 y el flujo de arrastre de solución de tratamiento químico, se resuelve el balance de masa general.

$$\dot{m}_1 = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i + \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_1 = (142.63 + 142.63 + 4.08 + 4.08) + 12.46 = 305.87 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Balance por unidades

Estimando una concentración de 200 g/L de hierro, en el primer tanque TK01 se obtiene.

$$\dot{m}_{\text{Fe}_1} = \dot{m}_1 + \dot{m}_1 = 142.63 + 12.46 = 155.09 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_3 = \frac{\dot{m}_{\text{Fe}_1}}{\dot{m}_1} \dot{m}_1 = \frac{12.46}{155.09} 200 = 16.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Con el sistema de ecuaciones del tanque TK02, se obtiene:

$$\dot{m}_{\text{Fe}_2} = \dot{m}_2 + \dot{m}_2 - \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 142.63 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_{\text{Fe}_2} \dot{m}_3 + \dot{m}_1 \dot{m}_1}{\dot{m}_2}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{(142.63 \times 16.65) + (12.46 \times 200)}{12.46} = 389.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Con las ecuaciones del tanque TK03:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 155.09 + 142.63 = 297.72 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_1 = 4.08 + 292.63 = 301.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_4 = \frac{\dot{m}_3 \dot{m}_3 + \dot{m}_1 \dot{m}_3 - \dot{m}_2 \dot{m}_2}{\dot{m}_2}$$

$$\dot{m}_4 = \frac{(12.46 \times 16.65) + (297.72 \times 16.65) - (12.46 \times 389.79)}{301.79}$$

$$= 0.71 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Al final con las ecuaciones de balance de masa del tanque TK04, se obtiene:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_2 = 4.08 + 301.79 = 305.87 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Con este último resultado de comprueba que el balance de masa es correcto, ya que el valor para \dot{m}_1 del balance general coincide con el obtenido por el balance del tanque TK04.

Balance de energía

Para el completar el balance de energía se requiere de ciertas propiedades térmicas del agua y vapor, estas propiedades se presentan en la tabla 16-2.

Tabla 16-2: Propiedades térmicas del vapor y agua líquida.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Entalpia de evaporación Agua (100°C)	h_{fg}	2257	(kJ/kg)
Entalpia de fusión del Agua (0°C)	h_{if}	333.55	(kJ/kg)
Capacidad calorífica del Agua	$c_{p,a}$	4.181	(kJ/kg °C)
Capacidad calorífica del Vapor	$c_{p,v}$	2.08	(kJ/kg °C)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Usando las ecuaciones 6 y 7, calculamos la entalpia de las corrientes líquidas y de vapor. A continuación, se presenta un ejemplo para el flujo de arrastre F del tanque TK01, y el evaporado del mismo tanque.

$$\dot{Q}_{01} = \Delta \dot{Q}_{01}^0 + \int_{00}^{\dot{m}_{01}} c_{p,a} \dot{m}_{01} \quad \text{Ec.5}$$

$$\dot{Q}_{01} = 0 + 4.181 \times (90 - 0) = 376.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{01} = \Delta \dot{Q}_{01}^0 + \int_{00}^{\dot{m}_{01}} c_{p,a} \dot{m}_{01} + \Delta \dot{Q}_{01}^0 + \int_{00}^{\dot{m}_{01}} c_{p,v} \dot{m}_{01} \quad \text{Ec.6}$$

$$\dot{Q}_{01} = 0 + 4.181 \times (90 - 0) + 333.55 = 2633.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tabla 17-2: Entalpias específicas de las corrientes del pretratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Entalpia esp. Corriente F1	h_{01}	376.29	(kJ/kg)
Entalpia esp. Corriente F2	h_{02}	376.29	(kJ/kg)
Entalpia esp. Corriente F3	$h_{03} = h_{01} = h_{001} = h_{002}$	125.43	(kJ/kg)

Entalpia esp. Corriente F4	$h_{\square 4} = h_{\square 2}$	125.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Corriente F5	$h_{\square 5}$	188.15	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Corriente F6	$h_{\square 6} = h_{\square 3}$	125.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Corriente F7	$h_{\square 7} = h_{\square 4}$	125.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Corriente F8	$h_{\square 8}$	209.05	($\square\square/\square\square$)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Tabla 18-2: Entalpias de las corrientes de evaporados del pretratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Entalpia esp. Evaporado TK01	$\square_{\square 1}$	2633.29	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK02	$\square_{\square 2}$	2633.29	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK03	$\square_{\square 3}$	2382.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK04	$\square_{\square 4}$	2382.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK05	$\square_{\square 5}$	2445.15	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK06	$\square_{\square 6}$	2382.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK07	$\square_{\square 7}$	2382.43	($\square\square/\square\square$)
Entalpia esp. Evaporado TK08	$\square_{\square 8}$	2466.05	($\square\square/\square\square$)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Luego usando la ecuación del balance de energía para el intercambiador de calor HX01, se determina el flujo de calor requerido, para mantener la solución de trabajo en la temperatura solicitada (90°C). Se estima las condiciones del vapor proveniente de la caldera, una presión de 1 MPa y temperatura de 179.88°C.

$$\begin{aligned} \square_{\square\square 1} &= \square_1 \dot{\square}_{\square 1} + \square_1 \dot{\square}_{\square 1} - \square_{\square 1} \dot{\square}_{\square\square 1} \\ \square_{\square\square 1} &= \frac{(143.05 \times 2633.29) + (12.46 \times 376.29) - (155.09 \times 125.43)}{3.6 \cdot 10^3} \\ &= 100.23 \frac{\square\square}{\square} \\ \square_1 \dot{\square}_{\square 1} &= \square_1 \dot{\square}_{\square 1} + \square_{\square\square 1} \\ \square_1 &= \frac{3600 \square_{\square\square 1}}{\dot{\square}_{\square 1} - \dot{\square}_{\square 1}} \\ \square_1 &= \frac{3600 \times 100.23}{2777.1 - 763.05} = 179.15 \frac{\square\square}{h} \end{aligned}$$

Para el intercambio de calor HX02, se realiza lo mismo que con el intercambiador HX01.

Calculando el calor Q_{HX2} requerido para mantener la solución a 90°C, al igual que el vapor V_2 .

$$\begin{aligned} \square_{\square\square 2} &= \square_2 \dot{\square}_{\square 2} + \square_2 \dot{\square}_{\square 2} - \square_{\square 2} \dot{\square}_{\square\square 2} = 100.97 \frac{\square\square}{\square} \\ \square_2 &= \frac{3600 \square_{\square\square 2}}{\dot{\square}_{\square 2} - \dot{\square}_{\square 2}} = 180.48 \frac{\square\square}{h} \end{aligned}$$

El cálculo es igual para el intercambiador de calor HX03.

$$\dot{Q}_{33} = \dot{Q}_3 \dot{Q}_3 + \dot{Q}_3 \dot{Q}_3 + \dot{Q}_1 \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 \dot{Q}_2 - \dot{Q}_2 \dot{Q}_2 = 2.56 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_3 = \frac{3600 \dot{Q}_{33}}{\dot{Q}_{33} - \dot{Q}_{33}} = 4.58 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Al final calculamos el calor requerido para mantener el agua de enjuague del tanque TK04 a 30°C.

$$\dot{Q}_{44} = \dot{Q}_4 \dot{Q}_4 + \dot{Q}_4 \dot{Q}_4 + \dot{Q}_2 h_{22} - \dot{Q}_1 \dot{Q}_1 - \dot{Q}_3 \dot{Q}_3 = 4.33 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_4 = \frac{3600 \dot{Q}_{44}}{\dot{Q}_{44} - \dot{Q}_{44}} = 7.74 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

2.6.1.4. Cálculo de balances de masa y energía sección 2

Para resolver el balance de masa y energía de la sección 2, seguimos las indicaciones del diagrama de flujo de la figura 7-2.

Balance general

Usando la ecuación 30, las cantidades de evaporado de la tabla 13-2 y el flujo de arrastre de solución por las piezas tratadas, se resuelve el balance general de masa de la sección 2.

$$\dot{Q}_2 + \dot{Q}_4 = \sum_{i=5}^8 \dot{Q}_i + \dot{Q}_8$$

$$\dot{Q}_2 = (18.85 + 4.08 + 4.08) = 27.00 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Balance por unidades

Estimamos la concentración C_5 para el tanque de pinckling ácido en 68g/L, valor recomendado para evitar defecto en el recubrimiento de zinc. Usando las ecuaciones de la 32 a 45, resolvemos de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_5 = 18.85 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Q_6 = \frac{Q_5 Q_5 - Q_4 Q_4}{Q_3}$$

$$Q_6 = \frac{(12.46 \times 68) - (12.46 \times 0.71)}{18.85} = 44.94 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_4 = Q_6 + Q_3 = 4.08 + 18.85 = 22.92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_2 = Q_7 + Q_4 = 4.08 + 22.92 = 27.00 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_7 = \frac{Q_6 Q_6}{Q_7 + Q_4}$$

$$Q_7 = \frac{12.46 \times 44.94}{12.46 + 22.92} = 15.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Balance de energía

Para el balance de energía usamos las ecuaciones 35 y 45, para determinar los requerimientos de calor y vapor, de los tanques TK05 y TK08.

$$Q_{005} = Q_5 \dot{Q}_{05} + Q_5 \dot{Q}_{05} - Q_3 \dot{Q}_{03} - Q_4 \dot{Q}_{04}$$

$$Q_{005} = \frac{(18.85 \times 2445.15) + (12.46 \times 188.15) - (18.85 \times 125.43) - (12.46 \times 125.43)}{3600}$$

$$= 12.41 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_5 = \frac{3600 Q_{005}}{Q_{05} - Q_{05}} = 22.17 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{006} = Q_8 \dot{Q}_{08} + Q_8 \dot{Q}_{08} - Q_7 \dot{Q}_{07}$$

$$Q_{006} = \frac{(23.5 \times 2466.05) + (12.46 \times 209.05) - (12.46 \times 125.43)}{3600} = 16.39 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_6 = \frac{3600 Q_{006}}{Q_{05} - Q_{05}} = 29.29 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2.6.2. Dimensionamiento de equipos

2.6.2.1. Tanques de tratamiento químico

Tabla 19-2: Dimensiones mínimas de los tanques de pretratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud mínima	L_{\min}	6	(m)
Ancho mínimo	B_{\min}	1	(m)
Profundidad mínima	H_{\min}	1.5	(m)
Factor de seguridad	F_s	30.5	(%)

Realizado por: GARCÍA, P. 2021.

En la tabla 19-2, se define las dimensiones mínimas y el factor de seguridad de los tanques de tratamiento químico. Con estos datos y la ecuación 61, se determina el volumen interno del tanque.

$$V_{\min} = 6.0 \times 1.0 \times 1.5 \times (1 + 0.305)^3 \approx 20 \text{ m}^3$$

Con la ecuación 61, se determina la superficie libre del tanque:

$$A_{\min} = 6.0 \times 1.0(1 + 0.305)^2 \approx 10.22 \text{ m}^2$$

Los tanques para tratamiento químico en procesos de galvanizado, suelen tener forma rectangular y están fabricados de polímeros plásticos.; en su mayoría polipropileno. En la figura 15-2, se observa unos tanques de tratamiento fabricados con polímetro plástico y refuerzos de estructura metálica, las imágenes fueron tomadas del fabricante Arvinanticor Ltda.



Figura 15-2: Estructura de los tanques de tratamiento químico.

Fuente: (Arvinanticor Ltda, 2020)

2.6.2.2. Horno de fundición de Zinc

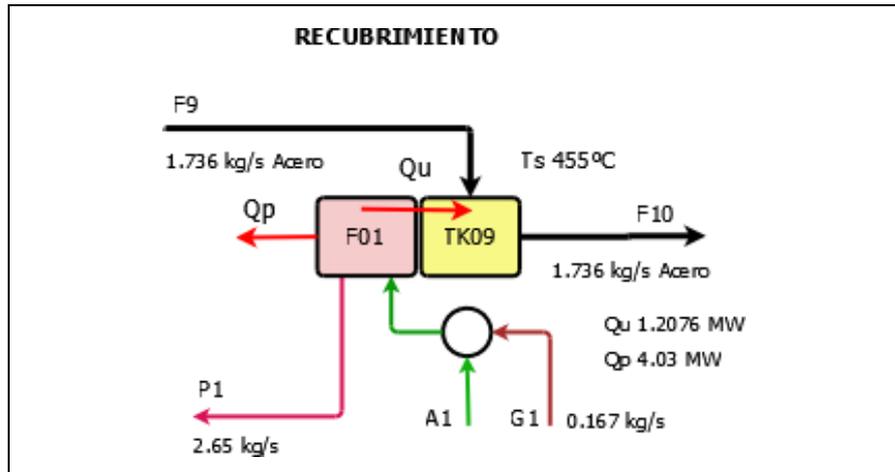


Figura 16-2: Diagrama de flujo resuelto del horno de fundición de zinc.

Realizado: García P., 2021.

En la figura 16-2, se presenta el diagrama de flujo del horno de fundición de zinc (figura 11-2), con los resultados obtenidos en el dimensionamiento. Para conocer la cantidad de energía que requiere el incinerador del horno para fundir y mantener el zinc en estado líquido, compensado las pérdidas por la estructura del incinerador y el crisol (TK09), se debe determinar la cantidad de calor necesario para fundir el zinc, el calor que se pierde al ambiente por convección desde la superficie del metal líquido y la cantidad de calor que se pierde a través de la estructura.

Cálculo de calor usado para fundir el zinc

En la tabla 20-2, se muestra los datos termodinámicos del zinc necesarios para realizar los cálculos térmicos del diseño del horno.

Tabla 20-2: Propiedades termodinámicas del zinc.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen de zinc	V_z	15	(m^3)
Densidad zinc fundido @ 420°C	ρ_z	6570	(kg/m^3)
Capacidad calórica media zinc	$C_{p,z}$	0.4	($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
Calor de fusión del zinc	L_f	0.112	(kJ/kg)
Tiempo de fundición	t_f	4	(h)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Primero calculamos la masa de zinc, que ingresa al crisol de fundición. Para este bosquejo la capacidad volumétrica total del crisol es 20 m³, pero solo 15m³ serán usados por cuestiones de seguridad. La ecuación 62, permite calcular esta masa que se requiere para cubrir los 15 m³.

$$Q_1 = \rho_1 Q_1$$

$$Q_1 = (15 \times 6570) = 98550 \text{ kg} = 98.55 \text{ toneladas}$$

La energía necesaria para fundir el zinc se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{01} = Q_1 [\rho_{00} (T - T_0) + \rho_{00}]$$

$$Q_{01} = 98550 [0.4(455 - 25) + 0.112] = 1.3696 \cdot 10^7 \text{ kJ} = 1696.16 \text{ MWh}$$

Si definimos un tiempo de 4 horas para fundir la masa de zinc, el flujo de energía necesario es el siguiente:

$$Q_{01} = \frac{Q_{01}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{01} = \frac{1.3696 \cdot 10^7}{3600 \times 4} = 1177.89 \text{ kW} = 1.1779 \text{ MW}$$

Cálculo de calor perdido por convección

Tabla 21-2: Parámetros para el cálculo del coeficiente de convección natural.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Superficie líquida	A_1	10.22	(m^2)
Perímetro del líquido	P_1	18.27	(m)
Temperatura de la superficie	T_1	455.00	($^{\circ}\text{C}$)
Temperatura ambiente	T_a	30.00	($^{\circ}\text{C}$)
Densidad del aire	ρ_a	0.6852	(kg/m^3)
Viscosidad del aire	μ_a	2.73E-05	($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)
Capacidad calorífica aire	c_{pa}	1033.51	($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
Conductividad térmica aire	k_a	0.04	($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)
Coefficiente de expansión térmica aire	β_a	1.94E-03	($1/\text{K}$)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Para calcular el calor perdido por convección natural entre la superficie del líquido y el aire, calculamos primero la temperatura de película y la diferencia de temperatura. Se estima una temperatura ambiente de 30°C, en las proximidades del horno de fundición por el calor emitido por el metal fundido Usando los parámetros definidos en la tabla 21-2, se obtiene:

$$T_f = \frac{T_1 + T_a}{2}$$

$$T_{\text{avg}} = \frac{455 + 30}{2} = 242.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}} = 455 - 30 = 425 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A continuación, se calcula la longitud equivalente de la superficie del metal fundido:

$$L_{\text{eq}} = \frac{A}{P} = \frac{10.22}{18.27} = 0.5593 \text{ m}$$

Luego se calcula los números adimensionales, que permiten determinar el coeficiente de transferencia de convección natural.

$$Gr_{\text{eq}} = \frac{\rho \beta \Delta T L_{\text{eq}}^3}{\mu} = \frac{2.73 \times 10^{-5} \cdot 1033.51}{0.04} = 0.6819$$

$$Ra_{\text{eq}} = \frac{\rho^3 \beta^2 \Delta T L_{\text{eq}}^3}{\mu^2} = \frac{2.73 \times 10^{-5} \cdot 1033.51}{0.04} = 8.8994 \times 10^8$$

$$Pr_{\text{air}} = \frac{c_p \mu}{k} = 6.07 \times 10^8$$

$$Nu_{\text{eq}} = 0.59 Ra_{\text{eq}}^{1/4} = 92.60$$

$$h = \frac{Nu_{\text{eq}} k}{L_{\text{eq}}} = \frac{92.60 \cdot 0.04}{0.5593} = 6.8515 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Al final, se calcula el flujo de calor perdido desde la superficie del metal fundido y el aire circundante.

$$Q_{\text{loss}} = h A (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) = \frac{10.22 \times 6.8515 \times 425}{1000} = 29.75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0.0298 \text{ kW/m}^2$$

Cálculo de calor perdido por los gases de combustión

Tabla 22-2: Parámetros para el cálculo del coeficiente de convección.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura P1	T_{p1}	600.00	(°C)
Factor A/F para el Diesel	A/F	14.60	(kg aire/kg combustible)
Calor específico de los gases de combustión	c_{pg}	1.39	(kJ/kg °C)
Poder calorífica del Diesel	PC	43.20	(kJ/kg)
Densidad del Diesel @ 35°C	ρ	850.00	(kg/m ³)
Eficiencia térmica del horno de fundición	η	55	(%)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

Como se carece de datos de composición de gases de combustión, se toma un calor específico promedio presente en el libro de Mullinger y Jenkins (2013). Como no se tiene todos los datos del proceso, se usa un método de aproximación para determinar la cantidad de combustible, calor perdido al ambiente, flujo de aire, etc.

$$Q_{\text{total}} = Q_{p1} + Q_{\text{amb}} + Q_{\text{p2}}$$

Expresamos las pérdidas estructurales en función de una eficiencia térmica “e”, para el horno y el calor útil es la suma del calor necesario para fundir el zinc, más el calor perdido al ambiente. Este término es una constante en la expresión.

$$Q_{\text{amb}} = Q_{\text{amb}} \\ Q_{\text{total}} = Q_{p1} + Q_{\text{amb}} = 1.2076 Q_{\text{amb}}$$

Expresamos el balance de energía en el horno, en función del flujo de combustible m_c :

$$m_c \cdot PC = (1 + \frac{A}{F}) \cdot c_{pg} \cdot (T_{p1} - T_{amb}) + Q_{\text{amb}} + (1 - \eta) \cdot m_c \cdot PC$$

Reordenando los factores se obtiene el término R, que representa el valor residual. Para resolver esta expresión se emplea métodos numéricos (simplex), variando el término m_c con el objetivo $R = 0$.

$$R = (1 + \frac{A}{F}) \cdot c_{pg} \cdot (T_{p1} - T_{amb}) + Q_{\text{amb}} + (1 - \eta) \cdot m_c \cdot PC - m_c \cdot PC$$

Aplicando el solver de Excel se obtienen los siguientes resultados:

$$\rho_{\text{a}} = 0.1696 \frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}$$

$$\rho_{\text{a}1} = 2.089 \rho_{\text{a}};$$

$$\rho_{\text{a}} = 4.03 \rho_{\text{a}};$$

$$\rho_{\text{a}} = 7.3 \rho_{\text{a}}$$

La cantidad de aire necesario para llevar a cabo la combustión se obtiene con el factor A/F, que para el diésel es 14.6:

$$\rho_{\text{a}} = 0.1696 \times 14.60 = 2.48 \frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}$$

Para calcular las cantidades de gases de combustión se suma la cantidad de aire y combustible que ingresan al horno.

$$\rho_{\text{a}1} = \rho_{\text{a}} + \rho_{\text{a}} = 2.65 \frac{\rho_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}}}$$



Figura 17-2. Estructura del horno de fundición de zinc.

Fuente: (C.H. EVENSEN INDUSTRIOVNER AS, 2020b)

En la figura 17-2, se muestra un horno de fundición de zinc rectangular del fabricante CHEVENSEN INDUSTRIOVNER de Noruega, que usa combustible gas o líquido. El equipo consta de un crisol de acero, titanio o cerámica; y espacio para los quemadores del combustible.

2.6.2.3. Intercambiadores de calor

Intercambiador de calor HX06

Tabla 23-2: Temperaturas de las corrientes del recuperador de calor.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de entrada del aire ambiente	\varnothing_{2i}	25	($^{\circ}\varnothing$)
Temperatura de salida del aire	\varnothing_{2o}	120	($^{\circ}\varnothing$)
Temperatura de los gases de combustión	\varnothing_{1i}	600	($^{\circ}\varnothing$)
Temperatura de salida de los gases de combustión	\varnothing_{1o}	500	($^{\circ}\varnothing$)
Calor específico de los gases de combustión	$\varnothing_{\varnothing 1}$	1.38	($\varnothing\varnothing/\varnothing\varnothing \varnothing$)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

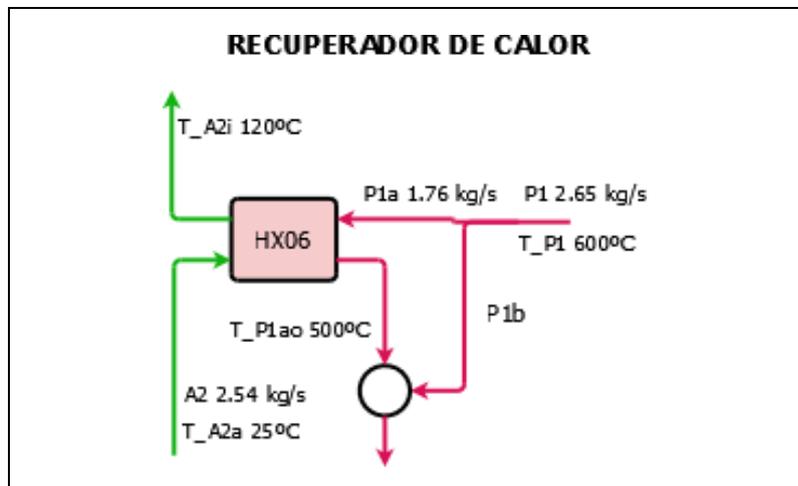


Figura 18-2. Diagrama de flujo resuelto del recuperador.

Realizado por: García P., 2021.

En la figura 18-2, se muestra el diagrama de flujo del recuperador de calor resuelto. Los cálculos para obtener estos resultados son los siguientes:

Calor necesario para requerido para calentar el aire de 25° a 120°C:

$$\varnothing_{\varnothing 2} = \varnothing_{\varnothing 2} \varnothing_{\varnothing \varnothing} (\varnothing_{\varnothing 2i} - \varnothing_{\varnothing 2o})$$

$$\varnothing_{\varnothing 2} = 2.54 \times 1.01(120 - 25) = 242.56 \varnothing \varnothing$$

La cantidad de gases de combustión necesario, para calentar el aire es:

$$\varnothing_{\varnothing 1o} = \frac{\varnothing_{\varnothing 2}}{\varnothing_{\varnothing 1} (\varnothing_{\varnothing 1i} - \varnothing_{\varnothing 1o})}$$

$$\varnothing_{\varnothing 1o} = \frac{242.56}{1.38(600 - 500)} = 1.76 \frac{\varnothing \varnothing}{\varnothing}$$

Al final, la relación de separación de los gases de combustión entre la cantidad de gases que pasa a través del recuperador y el total de gases emitidos por el horno de fundiciones es la siguiente:

$$\eta = \frac{Q_{g1}}{Q_{g1}}$$
$$\eta = \frac{1.76}{2.65} \approx 0.66$$



Figura 19-2. Estructura de un intercambiador aire-gases de combustión (Recuperador).

Fuente: (Sehstar Energy Technology, 2020)

En la figura 19-2, se muestra un intercambiador de calor para aire y gases de combustión que funciona como un recuperador. Una de las corrientes ingresa por una de las entradas laterales y zigzaguea en el interior, por la presencia de láminas deflectoras que aumentan el tiempo de retención. La otra corriente de gas ingresa por alguna de las entradas superior o inferior y pasa a través de un sistema de paneles que funcionan como superficie de intercambio de calor. El fabricante de este modelo de intercambiador es Sehstar Energy.

2.6.2.4. Secador

Tabla 24-2: Parámetros del proceso de secado.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Capacidad calorífica del Agua	$c_{p,a}$	4.181	(kJ/kg °C)
Calor específico del aire @120°C	$c_{p,a}$	1.01	(kJ/kg °C)
Capacidad calorífica del Acero al carbón	$c_{p,m}$	0.49	(kJ/kg °C)
Temperatura de entrada del aire	T_{a2i}	120	(°C)
Temperatura de salida del aire	T_{a2o}	100	(°C)
Temperatura de entrada metal húmedo	T_{m9}	50	(°C)
Temperatura de salida del metal	T_{m8}	100	(°C)
Entalpia de evaporación Agua (100°C)	h_{fg}	2257	(kJ/kg)
Flujo masico de agua como humedad	\dot{m}_{81}	3.46E-03	(kg/s)
Flujo masico de metal a tratar	\dot{m}_{82}	1.736	(kg/s)
Densidad del aire@120°C	ρ_a	0.98	(kg/m³)

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

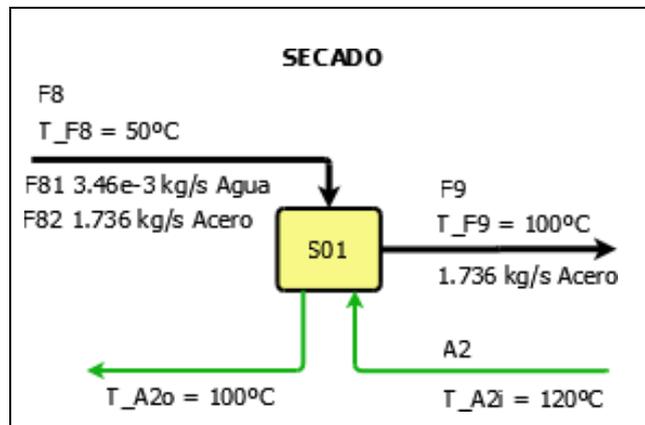


Figura 20-2. Diagrama de flujo resuelto del secador.

Realizado por: García P., 2021.

Para resolver las incógnitas del diagrama de flujo del secador (figura 20-2), empleamos los datos de la tabla 24-2 y las ecuaciones correspondientes. Primero se calcula la cantidad de calor necesario para evaporar la humedad arrastrada por las piezas, luego de aplicar el tratamiento de fluxado.

$$Q_{evaporacion} = \dot{m}_{81} [c_{p,a} (T_{a2o} - T_{a2i}) + h_{fg}]$$

$$Q_{evaporacion} = 3.46 \times 10^{-3} \times [4.181(100 - 120) + 2257] = 8.533 \text{ kJ/s}$$

El calor necesario para calentar el metal hasta la temperatura de evaporación de la humedad es:

$$Q_{calentamiento} = \dot{m}_{82} [c_{p,m} (T_{m8} - T_{m9})]$$

$$Q_{calentamiento} = (1.736)[0.49(100 - 50)] = 42.53 \text{ kJ/s}$$

El calor total que el aire debe transferir el aire caliente al metal húmedo es:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{calentamiento}} + Q_{\text{evaporación}}$$

$$Q_{\text{total}} = 51.06 \text{ kW}$$

Con el calor total de calor requerido, se calcula el flujo masico de aire para el proceso de secado. Este valor se usa para seleccionar el ventilador o compresor, que moverá el aire hacia el secador.

$$Q_{\text{aire}} = \frac{Q_{\text{total}}}{\rho_{\text{aire}} (T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}})}$$

$$Q_{\text{aire}} = \frac{51.06}{1.01(120 - 100)} = 2.54 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \Rightarrow 2.6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Figura 21-2. Secador tipo cubierta, sobre el horno de fundición de zinc.

Fuente: (C.H. EVENSEN INDUSTRIOVNER AS, 2020a).

En la figura 21-2, se observa un horno de fundición de zinc cubierto que se utiliza como secador a la vez. Esta solución reduce el espacio necesario para instala un horno; el principio de funcionamiento es el mismo.

2.6.3. Estimación de costos

2.6.3.1. Consumo de reactivos químicos

Tabla 25-2: Costo de reactivos químicos.

Componente	Formula	Peso requerido (kg)	Precio Internacional Aproximado (USD/ton)	Total (USD/ton)
DESENGRASADO ALCALINO				
Formulación 1	Varios	No def	1654.70	1654.70
Subtotal				\$ 1654.70
FUNDICIÓN DE ZINC (HIERRO GALVANIZADO)				
Zinc metálico puro	Zn	39.92	\$ 2636.50	\$ 105249.08
Aluminio metálico puro	Al	0.08	\$ 2007.50	\$ 160.60
Subtotal				105409.68
DECAPADO				
Ácido clorhídrico	HCl	4096.80	\$ 29.00	\$ 118.81
FLUXADO				
Cloruro de Zinc	ZnCl ₂	473.68	\$ 600.00	\$ 284.21
Cloruro de Amonio	NH ₄ Cl	782.61	\$ 170.00	\$ 133.04
Subtotal				417.25
TOTAL				\$ 109254.24

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

El costo por reactivos para preparar las soluciones de desengrasado, para los dos tanques de tratamiento (TK01 y TK02), es de 2909.4 USD. Para la solución decapado (TK05) se gastaría 118.81 USD por concepto de compra de ácido clorhídrico. El costo por reactivos para la solución de decapado es de 417.25 USD aproximadamente. Las cantidades monetarias expresadas en la tabla 25-2, estiman el costo de reponer las soluciones una vez terminada su vida útil. El tiempo de vida útil promedio de estas soluciones de tratamiento es de 3 años. Pero se debe reponer el reactivo perdido por concepto de reacción química o arrastres a otros tanques de tratamiento. Este costo depende de la cantidad de material tratado, el óxido que las cubre y otras sustancias que bajan las concentraciones de los reactivos. Es preferible ajustar los caudales de reposición de reactivos en el momento de la operación de la planta, por ello no se realiza ningún cálculo del requerimiento de reactivos relacionado. El costo total estimado para preparar o reponer las soluciones de pretratamiento químico es 3445 USD. Este valor se obtiene de sumar los costos de reactivos químicos de cada tratamiento químico, multiplicado por el número de tanques que tendrá la planta. Como no se tiene datos que permitan estimar la velocidad de degradación de las

sustancias químicas, que permitirán planificar los recambios anuales. Se aconseja tener al menos los químicos necesarios para un recambio al año, costos definidos anteriormente.

Por otra parte, se incluyó también el costo de adquisición, a precios internacionales, de los metales que usaran para recubrir las piezas, en este caso son zinc (105249.08 USD) y aluminio (160.60 USD). El costo total por concepto de compra de material químico para arrancar el proceso es de 109254.24 USD. Se debe tomar en cuenta que los precios de los materiales o reactivos químicos cambian y dependiendo del mercado, pueden ser mayores o menores. Para terminar, se insiste que esta es una estimación no comprende de ninguna manera en un valor final, debe ser evaluado y actualizado, si se quiere hacer referencia al mismo en posteriores trabajos.

2.6.3.2. Costo de equipamiento

Usando la expresión de la ecuación 73, y los factores de cálculo de la tabla en el anexo 6. Podemos estimar costos aproximados de los principales equipos del proceso de galvanización.

$$C_{eq} = C_{base} \cdot K \cdot n \quad \text{Ec 73}$$

Donde:

- C_{eq} Costos de adquisición del equipo. (USD)
- C_{base} Costo base de adquisición del equipo, factor pre-exponencial. (USD)
- K Variable de diseño específica del equipo. (Potencia térmica, superficie, altura o volumen, etc.) (USD/kW)
- n Factor exponencial dependiente del material o características del equipo.

El costo estimado para el horno de fundición de zinc se calcula tomando como factor pre-exponencial 560, según la tabla del anexo 6, la potencia térmica del horno 7.33 MW, que debe ser expresada en las unidades indicadas (7330 kW), y el material de fabricación de acero al carbono ($n=0.77$).

$$C_{eq} = (560)(7330)^{0.77} = 530218.56 \text{ USD}$$

Para un secador con ventilador calentado por gases, el precio base es 7700 USD, con una superficie estimada de 10 metros cuadrados de intercambio de calor y un factor exponencial de 0.35.

$$C = (7700)(10)^{0.35} \times 2 = 17238.15 \text{ USD}$$

Para los tanques de tratamiento químico, se toma esto como un precio base, ya que la tabla del anexo 6 solo contempla tanques de almacenamiento de hacer, y en el caso de los tanques de tratamiento de químico para el galvanizado, estos están contruidos en plástico; por tanto, el costo debe ser menor por el material. El costo base de un tanque horizontal es 2900 USD, con un volumen de 20 metros cúbicos y un factor exponencial de 0.6, el costo serio:

$$C = (2900)(20)^{0.6} = 17499.12 \text{ USD}$$

En el caso del recuperador de calor emplearemos el diagrama del anexo 7, estimando un área de transferencia de calor de 10 metros cuadrados, material de fabricación de acero inoxidable, da como aproximado 2700 USD, como se observa en la figura 22-3.

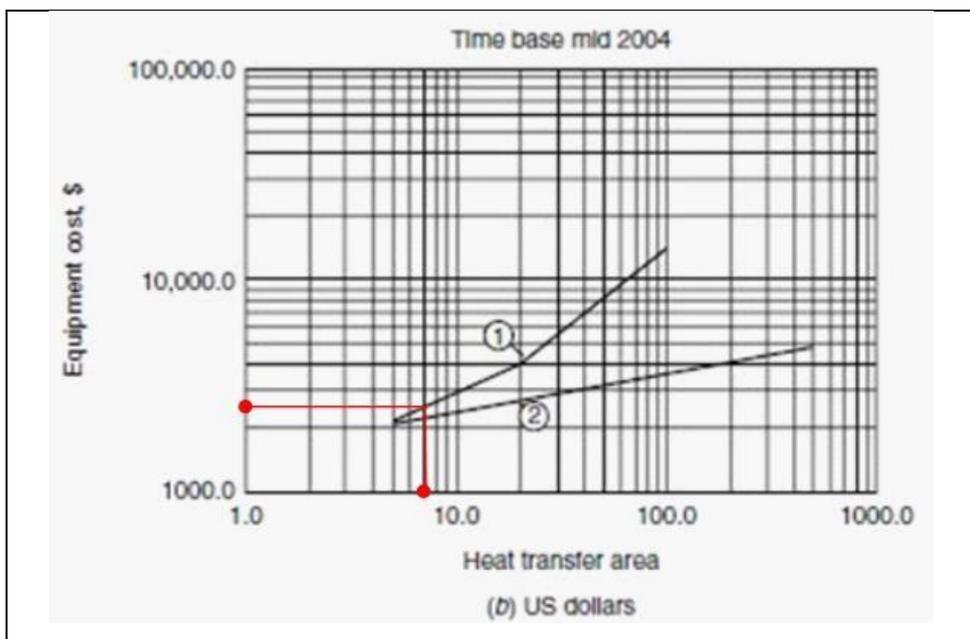


Figura 22-2. Diagrama de estimación de costo para intercambiadores de placas.

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

En la tabla 26-3, se observa el costo total de los principales equipos, tomando en cuenta el número que se necesitan de ellos. Cabe repetir que en estos equipos no se encuentra: el sistema de montacargas, infraestructura, sistema eléctrico y otros elementos necesarios, pero que se salen del área relacionada a la Ingeniería Química.

Tabla 26-2: Costos estimados de los principales equipos.

Equipo	Cantidad (unidad)	Precio unitario estimado (USD/unidad)	Total (USD)
Tanques de tratamiento químico.	9.00	17499.12	\$ 157492.08
Horno de fundición de zinc	1.00	\$ 530218.56	\$ 530218.56
Secador horizontal	1.00	\$ 17238.15	\$ 17238.15
Recuperador de calor	1.00	\$ 2700.00	\$ 2700.00
TOTAL			\$ 707648.79

Realizado por: GARCÍA. P. 2021.

El valor estimado en costos de adquisiciones presentado en este trabajo no es un valor final, tampoco debe ser tomado como un cálculo riguroso de costos, debido a que está basado en un diseño preliminar con un enfoque químico; muchos aspectos relevantes en la estimación de costos quedan fuera de este cálculo.

2.6.4. Diagrama de planta

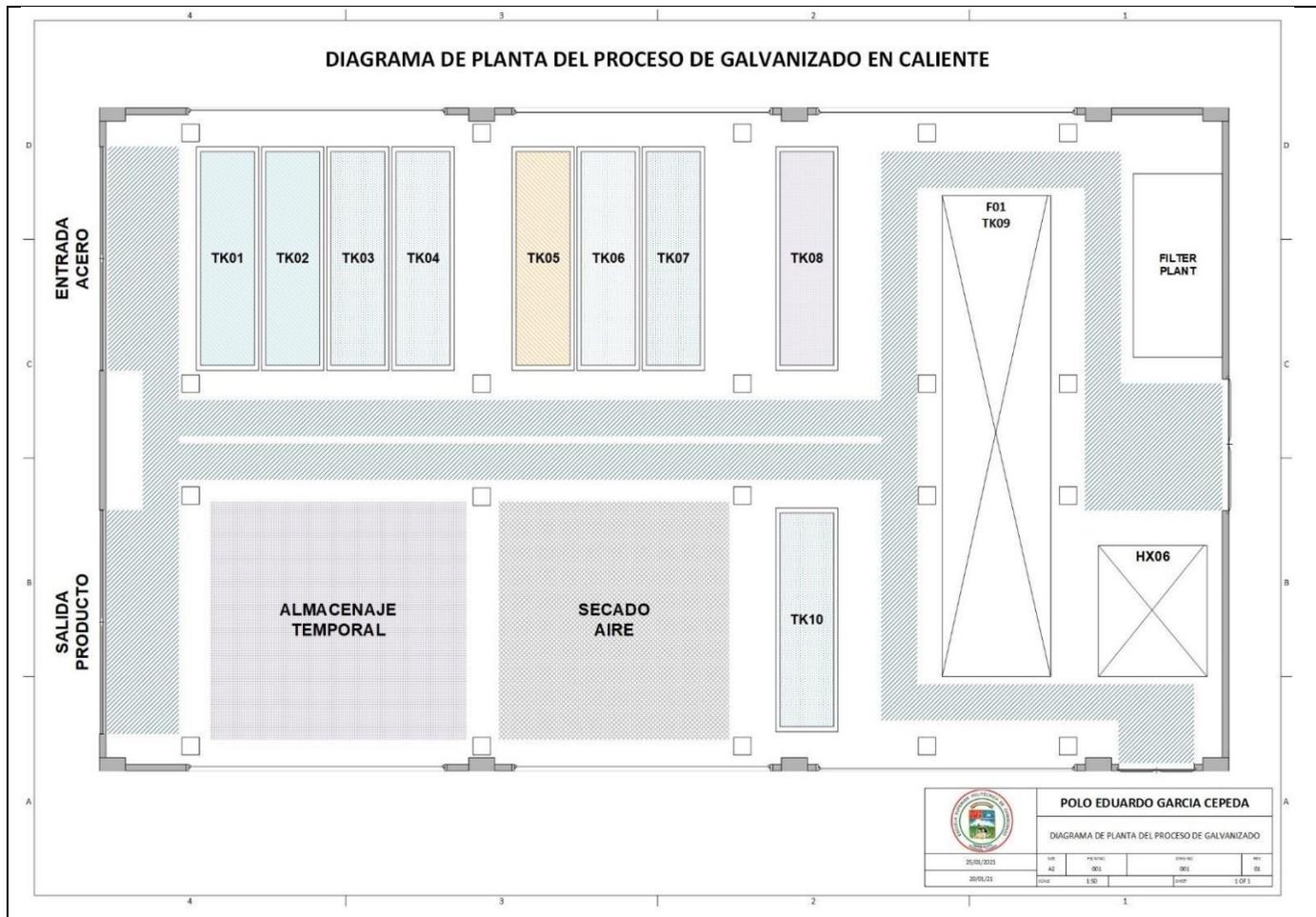


Figura 23-2. Diagrama de la planta de galvanizado en caliente.

Realizado por: García P., 2021.

CAPÍTULO IV

3. RESULTADOS

3.1. Estudio experimental

3.1.1. *Desengrasado*

Las soluciones para el tratamiento de desengrasado básico, se prepararon siguiendo las indicaciones y las concentraciones indicada en la tabla 1-2. El resultado del tratamiento se observa en las fotografías del anexo 2. Se aplico el tratamiento de desengrase básico a 3 láminas, de 50x20 mm, con un espesor de 2mm. Para comparar el resultado se mantuvo una pieza sin aplicar tratamiento y a otras 3 piezas se les aplico el método desengrasado/decapado ácido. Se realizaron en total 3 pruebas, todas mostraron que existe una diferencia notable en el terminado. La diferencia entre el desengrase básico y desengrase/decapado ácido fue: las características de la superficie de las láminas, mientras el desengrase básico casi no retiro oxido; el decapado ácido lo retiro por completo. El desengrase/decapado ácido le dio un tono oscuro a la superficie del metal, mientras que el desengrasado básico mantuvo el brillo metálico. Esto se debe a que el ataque del ácido sobre la superficie elimina toda presencia de oxido, y oxida el metal a su vez. Esta apariencia oscura se redujo luego del enjuago, el color se tornó en un gris oscuro previo a la aplicación de la solución fluxante. En relación a la adherencia del recubrimiento no hubo defenecía entre los dos métodos, siendo la apariencia del recubrimiento de las piezas tratadas por los dos métodos, casi iguales.

3.1.2. *Decapado*

Con la solución de decapado solo se trataron las piezas, previamente tratadas con el desengrasado básico, porque las otras se sometieron al proceso de desengrasado/decapado ácido el cual incluye el proceso de decapado. La solución fue preparada mezclado 227.2 mL de ácido clorhídrico al 37% (grado analítico) y 1 litro de agua desionizada. El resultado mostro que las piezas tratadas con una solución a esta concentración, perdía todas las capas de oxido que no fueron retiradas en el proceso de desengrase.

En cierto momento, durante una de las pruebas la temperatura del proceso supero los 50°C y como resultado se obtuvo picaduras minúsculas en la superficie del metal. De ahí que es necesario controlar la temperatura, para evitar daños en las piezas tratadas. Se llego a la conclusión de que otros factores que influyeron en este resultado fueron: la forma de la pieza y el tiempo de retención o inmersión (15 min). Es decir que, aunque es recomendable mantener las piezas por 15 min, inmersas en la solución de ácido, si la temperatura aumenta el tiempo debe ser acortado. Las

piezas que salieron del proceso de decapado ácido mantuvieron su brillo metálico a comparación del método desengrasado/decapado ácido.

3.1.3. Fluxado

El proceso de fluxado es un paso de preparación que mejora el proceso de amalgamado entre las capas del recubrimiento de zinc y la superficie férrea de las piezas tratadas. Por ello, ninguna diferencia visual significativa se observó antes o después de la aplicación de este proceso a las piezas.

3.1.4. Enjuagado

Se aplicaron un total de 3 enjuagues a las piezas con agua desionizada, durante su pretratamiento químico. Las temperaturas de trabajo fueron 45°C, 30°C y 25°C (ambiente). Como las soluciones de enjuague estaban conformadas únicamente con agua no se observó, cambio alguno en la apariencia de las piezas.

3.1.5. Recubrimiento con zinc

El recubrimiento con zinc fue la parte más complicada de efectuar, por distintos factores, por ejemplo: el horno de fundición usado tenía un crisol vertical que no permitía el recogimiento de los residuos de ceniza del zinc, de igual manera ingresar las piezas era difícil. El horno no tenía control de temperatura, solo una termocupla que medía la temperatura de los gases de combustión. El control de temperatura se lo realizó de forma manual, con el uso de un termómetro infrarrojo y la manipulación de la válvula de gas. La cantidad de zinc que se tenía para la prueba no permitía la inmersión total de la pieza. Los resultados de la primera prueba de recubrimiento, mostraron el efecto directo de estos factores sobre el acabado de los recubrimientos. Las primeras piezas presentaban recubrimientos con una distribución no uniforme; presencia de grumos y burbujas; poca adherencia cuando la temperatura estaba bajo los 450°C; presencia de ceniza y dado que las piezas tocaban el fondo del crisol se obtuvo en esa zona, un engrosamiento considerable del recubrimiento.

Para la segunda prueba de recubrimiento se consiguió mayor cantidad de zinc, se desarrolló un mejor mecanismo para retirar las cenizas y se armó un gancho con alambre que permitía suspender la pieza cubriéndola por completo con el zinc fundido. El resultado fue: una mejora considerable en las características del recubrimiento; menor presencia de grupos y variación del espesor del recubrimiento; recubrimiento de la superficie total de la prueba. Pero siguió siendo un problema

la variación de la temperatura del baño de zinc fundido. Existía en el recubrimiento zonas con menor adherencia del recubrimiento.

La tercera prueba mejoró el control de la temperatura intentando, previo a sumergir las placas, mantener la temperatura en un rango de 450 a 460°C. Para ello, se manipuló la válvula de gas hasta llegar a un estado estacionario de temperatura (medida con termómetro IR). Este procedimiento llevo al menos tres horas, luego de mantener la temperatura entre 452 y 458°C. Se procedió a realizar el recubrimiento. Los resultados fueron mucho mejores en esta ocasión, la superficie mostraba mayor uniformidad, sin presencia de grumos, burbujas o ceniza.

3.2. Balance de masa

Con los resultados de la parte experimental se procedió a realizar los cálculos básicos de dimensionamiento del proceso, dividiéndolo en tres secciones. En la tabla 1-3, se observan los resultados de los balances de masa y energía de la sección 1 (Desengrasado). Como resultado se obtiene que se requiere alimentar a la sección, a través del tanque TK04 305.87 kg/h de agua fresca libre de sales y hierro, para compensar las pérdidas por arrastre y evaporación en cada tanque. Las cantidades de calor requerido para calentar los tanques de esta sección son: 100.23 kW para el tanque TK01, 100.97 kW para el tanque TK02, 2.56 kW para el tanque TK03 y 4.33 kW para el tanque TK04. El total de energía requerida para toda la sección es 208.09 kW, que se traducen en 371.95 kg/h de vapor saturado a 1MP de presión.

Tabla 1-3: Resultados de balance de masa y energías, sección 1.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Recirculación desde tanque TK03 >TK01	\dot{m}_{11}	155.09	(kg/h)
Recirculación desde tanque TK03 >TK02	\dot{m}_{12}	142.63	(kg/h)
Recirculación desde tanque TK03	\dot{m}_1	297.72	(kg/h)
Recirculación desde tanque TK04 > TK03	\dot{m}_2	301.79	(kg/h)
Flujo de agua fresca sección 1	\dot{m}_1	305.87	(kg/h)
Concentración de hierro en TK03	\dot{m}_3	16.65	(g/L)
Concentración de hierro en TK02	\dot{m}_2	389.79	(g/L)
Concentración de hierro en TK04	\dot{m}_4	0.71	(g/L)
Flujo de calor intercambiador HX01	\dot{Q}_{11}	100.23	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX01	$\dot{m}_1 = \dot{m}_1$	179.15	(kg/h)
Flujo de calor intercambiador HX02	\dot{Q}_{12}	100.97	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX02	$\dot{m}_2 = \dot{m}_2$	180.48	(kg/h)
Flujo de calor intercambiador HX02	\dot{Q}_{13}	2.56	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX02	$\dot{m}_3 = \dot{m}_3$	4.58	(kg/h)
Flujo de calor intercambiador HX02	\dot{Q}_{14}	4.33	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX02	$\dot{m}_4 = \dot{m}_4$	7.74	(kg/h)
Flujo masico de vapor total sección 1	\dot{m}_0	371.95	(kg/h)

Realizador por: García P., 2020.

Para la sección 2, los resultados de los balances de masa y energía se encuentran en la tabla 2-3, donde se muestra que la cantidad de agua ingresada al proceso (q_2) es igual a 27 kg/h, cantidad que permite recuperar las pérdidas por arrastre y evaporación. Así también se obtiene los siguientes resultados para la cantidad de calor requerida para el decapado 12.4 kW y para el fluxado 29.3 kW. El total de energía requerida para toda la sección es 41.7 kW de potencia térmica, el cual equivale a 51.47 kg/h de vapor a 1MPa.

Tabla 2-3: Resultados de balance de masa y energía, sección 2.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Recirculación desde tanque TK06 >TK05	q_3	18.85	(kg/h)
Recirculación desde tanque TK07 >TK06	q_4	22.92	(kg/h)
Flujo de agua fresca sección 2	q_2	27.00	(kg/h)
Concentración de hierro en TK06	q_6	44.94	(g/L)
Concentración de hierro en TK07	q_7	15.89	(g/L)
Flujo de calor intercambiador HX05	q_{q5}	12.41	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX05	$q_5 = q_5$	22.17	(kg/h)
Flujo de calor intercambiador HX05	q_{q6}	16.39	(kJ/s)
Flujo masico de vapor i. HX05	$q_6 = q_6$	29.29	(kg/h)
Flujo masico de vapor total sección 1	q_q	51.47	(kg/h)

Realizador por: García P., 2020.

El total de vapor requerido por las dos secciones es de 423.7 kg/h, por tanto, se requiere una caldera con capacidad de al menos el doble de capacidad. Cabe recalcar que las cantidades obtenidas del balance de masa son pequeñas, pero se requiere un sistema para reponer el agua evaporada y arrastrada con el objeto de mantener las concentraciones.

Otro punto importante es la concentración de hierro, específicamente, lo importante es mantenerla bajo los 120 g/L; puesto que superar este nivel reduce la vida útil de las soluciones de tratamiento, concretamente la vida útil de la solución de decapado. Como la solución de desengrasado básico no se ve afectada por la presencia de hierro, se estimó una concentración de 200 g/L en el tanque TK01, producto de la disolución parcial de las capas de óxido. Por las recirculaciones del proceso, en el tanque TK02 se observa un incremento de la cantidad de hierro a 389.8 g/L, cabe recordar que el tanque TK02 tiene solución de desengrasado básico, que no se ve afectada por la presencia de hierro. En el tanque TK03, dado que recibe agua fresca del tanque TK04.

3.3. Dimensionamiento de equipos

3.3.1. Tanques de tratamiento químico

Las dimensiones del volumen interior de los tanques de tratamiento químico se muestran en la tabla 3-3. El volumen total del tanque total es de 20 metros cúbicos, con un lardo de 7.83 m, que puede redondearse para obtener 8 metros. El ancho sugerido es de 1.31 pero se puede aproximar a 1.50 metros. La profundidad es de 1.96 metros aproximable a 2m. Si es necesario la profundidad puede aumentar hasta los 2.50 metros por razones de seguridad, o para poder tratar piezas que requieran mayor profundidad. Como se dijo anteriormente estas medidas son sugerencias, y de ser necesario se puede ajustar a los productos de algún fabricante.

Tabla 3-3: Resultados de las dimensiones de los tanques de tratamiento.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud tanque	Lt	7.83	(m)
Ancho tanque	Wt	1.31	(m)
Profundidad	dt	1.96	(m)
Superficie líquida	S	10.22	(m ²)
Volumen líquido	vt	20.00	(m ³)

Realizador por: García P., 2020.

3.3.2. Horno de fundición de zinc

Los resultados del dimensionamiento del horno de zinc se muestran en la tabla 4-3, de la que se puede observar que: La capacidad masa del crisol de horno debe permitir fundir 99 toneladas de zinc puro o en aleaciones. El calor necesario para fundir esa cantidad de zinc en 4 horas es de 1.18 MW que deberán ser obtenidos por combustión de Diesel, en quemadores que rodearán el crisol de fundición. La temperatura a la que debe llegar el zinc fundido es 450°C, superior a la temperatura de fundición del zinc (420°C). El calor total que los quemadores de Diesel deben proporcionar tomando en cuenta una eficiencia térmica para el horno de 55%, estaño dentro del rango típico de trabajo de este tipo de equipos (40-60%), 7.33 MW de potencia térmica. La cantidad de diésel necesario para proporcionar tal cantidad de energías es 0.169 kg/s o 610.56 kg/h. El aire estequiométrico necesario para combustionar esta cantidad de Diesel es 2.48 kg/s o 8928 kg/h de aire a condiciones normales de temperatura, presión y humedad. La cantidad de gases de combustión emitidos por el horno es 2.65 kg/s de una mezcla promedio producto de combustión incompleta, con una temperatura de salida estimada en 600°C, muy próxima a la obtenida por combustión de GLP, en la parte experimental.

Tabla 4-3: Resultados del dimensionamiento del horno de fundición.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de zinc a fundir	M1	98.55	(kg)
Heat needed for melting zinc	Eu	1696.16	(MJ)
Flujo de calor para fundición	Qu2	1.1779	(MW)
Temperatura de película	Tf	242.50	(°C)
Diferencia de temperatura	dT	425.00	(°C)
Longitud característica	Lc	0.5593	(m)
Número de Prandtl	Npr	0.6819	
Número de Garshoft	Ngr	8.90E+08	
Número de Rayleigh	Nra	6.07E+08	
Número de Nusselt	Nnu	92.60	
Coeficiente de convección	h	6.8515	(W/m ² K)
Calor perdido por convección natural	Qu1	29.75	(kJ/s)
Energía perdida por la estructura	Qs	4.03	(MW)
Flujo de aire	A1	2.48	(kg/s)
Flujo de gases producto de combustión	P1	2.65	(kg/s)
Flujo másico de combustible (Diesel)	□□	0.169	(kg/s)
Energía requerida para proceso	Qf	7.33	(MW)

Realizador por: García P., 2020.

3.3.3. Intercambiador de calor

Las características del recuperador de calor se presentan en la tabla 5-3, de este se obtiene que el intercambiador debe tener la capacidad de transferir 242.56 kW de potencia térmica para calentar un flujo de 2.48 kg/s de aire a condiciones normales de temperatura, presión y humedad. Para ello debe ser capaz de permitir el paso en contracorriente, a través de un sistema de placas 1.76 kg/s de gases subproducto de la combustión a 600°C, estimando una caída de temperatura de 100°C. Un divisor de corriente debe dividir el flujo de gases de combustión provenientes del horno, en un 66% en dirección hacia el recuperador de calor.

Tabla 5-3: Resultados del dimensionamiento del recuperador de calor.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Calor necesario para calentar el aire	QA2	242.56	(kW)
Flujo de gases de combustión necesarios	mP1a	1.76	(kg/s)
Factor de división de corriente de gases de combustión	alpha	0.66	

Realizador por: García P., 2020.

3.3.4. Secador

El secador debe tener la capacidad de proporcionar 51.06 kW de potencia térmica, suficiente para evaporar la humedad de las piezas y calentar el metal hasta los 100°C. El flujo de aire necesario para el secado es de 2.60 metros cúbicos.

Tabla 6-3: Resultados de dimensionamiento del secador.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Calor requerido para evaporar humedad	Q _{evap}	8.533	(kW)
Calor requerido para calentar el metal	Q _{metal}	42.53	(kW)
Calor total transferido desde el aire caliente	Q _{ct}	51.06	(kW)
Flujo de aire caliente requerido	m _{A2}	2.54	(kg/s)
Flujo volumétrico de aire caliente	v _{A2}	2.59	(m ³ /s)

Realizador por: García P., 2020.

3.4. Control de calidad

Tabla 7-3: Resultados de dimensionamiento del secador.

Método	Test	Peso placa (g)	Ancho placa (mm)	Longitud placa (mm)	Espesor placa (mm)	Superficie placa (m ²)	Peso placa Recubierta (g)	Peso Recubrimiento (g)	Masa local Recubrimiento (g/m ²)	Espesor (μm)
DESENGRASADO BÁSICO	1.00	5.1700	19.94	49.55	3.08	0.002404	6.3910	1.2210	507.82	71.12
	2.00	4.9730	19.93	50.01	2.94	0.002405	6.3530	1.3800	573.76	80.36
	3.00	5.1440	20.35	50.01	3.11	0.002472	6.4050	1.2610	510.04	71.43
DESENGRASADO DECAPADO ÁCIDO	1.00	5.2060	20.05	50.05	2.98	0.002424	6.3520	1.1460	472.70	66.20
	2.00	4.9890	20.48	49.65	3.03	0.002458	6.3870	1.3980	568.70	79.65
	3.00	5.0500	20.17	49.17	3.11	0.002414	6.3920	1.3420	555.90	77.86
Promedio método básico									530.54	74.31
Promedio método ácido									532.43	74.57

Realizador por: García P., 2020.

Las piezas de la última prueba de recubrimiento se sometieron a análisis de masa de recubrimiento por método gravimétrico. Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 7-3, de la que se obtiene que el promedio de masa de recubrimiento de las placas tratadas con método de básico es de 530.54 g/m² (74.31 μm), mientras que las placas tratadas con método ácido es 532.43 g/m² (74.57 μm). Ambos valores cumplen con el límite mínimo de masa indicado en la tabla 9-1, donde se especifica que para acero con espesores entre 3 a 6 mm, se debe tener un mínimo de 505 g/m² y un espesor de 70 μm.

CONCLUSIONES

Se diseñó el proceso químico de galvanizado por inmersión en caliente de piezas industriales. El prediseño incluye: resultados de un estudio experimental del proceso de galvanizado y el cálculo de balances de masa y energía, y dimensionamiento de los principales equipos. Además de una estimación inicial de los costos de implementación del proceso. El proceso diseñado tiene una capacidad de 150 toneladas diarias de piezas con hasta 6 metros de longitud.

Las operaciones que intervienen en el proceso se dividen en tres secciones: pretratamiento químico, recubrimiento y post tratamiento. El esquema de operaciones seleccionado es un proceso de galvanizado en "U", con la entrada del metal a tratar, y el metal galvanizado por el mismo lado de la planta. Se escogió esta disposición porque disminuye la cantidad de superficie requerida, para su implementación. La secuencia de procesos seleccionada es la siguiente: Pretratamiento: desengrase básico (2 tanques), enjuague caliente (2 tanques), decapado (1 tanque), enjuague frío (2 tanques), fluxado (1 tanque); el recubrimiento incluye: secado, recubrimiento (Horno con secador); y el postratamiento incluye: enfriado y secado con aire a temperatura ambiente.

Las variables de diseño escogidas son: capacidad de tratamiento (150 ton/día); perfil de temperaturas para soluciones de tratamiento (90°C, 50°C, 45°C y 30°C); y la concentración de hierro, que para evitar deterioro acelerado de las soluciones de decapado y fluxado, debe permanecer bajo los 120 g/L.

Se realizó cálculos para determinar la cantidad de químicos necesario en las pruebas experimentales, y la dosificación a cada tanque del pretratamiento químico (Formulación 1). La cantidad de vapor requerida para calentar los tanques de tratamiento químico es 423,41 kg/s. Los equipos dimensionados son: tanques de tratamiento químico, secador, horno de fundición de zinc y un recuperador de calor gas-aire.

Mediante el método gravimétrico se comprobó que los recubrimientos cumplimiento de los requerimientos mínimos para la masa de zinc por superficie recubierta. Siendo la masa promedio del recubrimiento para las placas tratadas con desengrase básico 530.54 g/m² y para las placas tratadas con el método de desengrasado/decapado ácido 532.43 g/m², con espesores aparentes calculados a partir de los pesos de 74.31 μm y 74.57 μm, respectivamente. Cumpliendo de esta manera con la norma NTE INEN-ISO 14713-2, la cual hace referencia también a la norma ISO 1461.

También se estimaron costos en función de métodos de cálculo obtenidos de varias fuentes bibliográficas. Los resultados de las estimaciones muestran que el costo por adquisición de reactivos se aproximaría a 109254.24 USD y el costo por adquisición de los principales equipos 707648.79 USD. Tomando en cuenta que es una estimación estos valores están sujetos a actualizaciones o invalidación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que planteen la necesidad de adquirir, adecuar o construir, equipamiento que permita realizar estudios experimentales del proceso de recubrimientos metálicos, como el galvanizado o cromado. Así también existe la necesidad de equipos de medición de espesor de materiales, como el medidor de espesor de recubrimiento por método magnético.

Las temperaturas de trabajo de la solución de decapado ácido no deben superar los 50°C, debido al incremento del hierro disuelto que reduce el tiempo de vida útil de la solución, y porque emite gases tóxicos que pueden perjudicar la salud de los operarios.

Se recomienda controla de forma continua la cantidad de hierro disuelto en las soluciones acidas valores superiores a los 120 g/L, reducen significativamente su vida útil.

Los operarios o trabajadores que se encuentren en contacto con las soluciones de pretratamiento deben contar con el equipo de seguridad adecuado: máscaras antigases con filtros resistentes a químicos corrosivos, guantes de protección contra sustancias corrosivas, ropa y zapatos de seguridad con materiales aislantes y resistente a sustancias corrosivas.

Los operarios y trabajadores que se encuentren en contacto o trabajen en el área de recubrimiento deben contar con el equipo de protección adecuado: máscaras de protección contra salpicaduras resistente a materiales calientes, ropa de seguridad con protección térmica, guantes de seguridad y equipo para manipulación de objetos calientes a distancia (tenazas, brazos mecánicos, barras, palancas, etc.).

BIBLIOGRAFÍA

- ALAM, I.**, "The history of zinc and its use in pre-modern India". *Studies in People's History* [en línea], 2020. (S.l.) vol. 7, (1), pp. 23-29. [Consulta: 28 enero 2021]. ISSN 2348-4489. DOI 10.1177/2348448920908237. Disponible en: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2348448920908237>.
- ALPERN, S.B.**, "Did They or Didn't They Invent It? Iron in Sub-Saharan Africa". *History in Africa* [en línea], 2005. (S.l.) vol. 32, pp. 41-94. [Consulta: 10 diciembre 2020]. ISSN 0361-5413. DOI 10.1353/hia.2005.0003. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/history-in-africa/article/abs/did-they-or-didnt-they-invent-it-iron-in-subsaharan-africa/DB40377A90535C7041DC10159B43C50F>.
- ARVINANTICOR LTDA**, 2020. "Polypropylene Pickling Tanks in India | Pickling Tanks Manufacturer". [en línea]. [Consulta: 25 enero 2021]. Disponible en: <https://arvindanticor.com/polypropylene-pickling-tanks/>.
- ATEG**, 2020. "Guía sobre la norma UNE-EN ISO 1461". *Fichas técnicas* [en línea]. [Consulta: 31 enero 2021]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14600329/31-guia-sobre-la-norma-une-en-iso-1461>.
- BEN NASR, J., SNOUSSI, A., BRADAI, C. & HALOUANI, F.**, "Optimization of hot-dip galvanizing process of reactive steels: Minimizing zinc consumption without alloy additions". *Materials Letters*, 2008. (S.l.) vol. 62, (19), pp. 3328-3330. ISSN 0167577X. DOI 10.1016/j.matlet.2008.02.067.
- BERGER, R., BEXELL, U., STAVLID, N. & GREHK, T.M.**, "The influence of alkali-degreasing on the chemical composition of hot-dip galvanized steel surfaces". *Surface and Interface Analysis* [en línea], 2006. (S.l.) vol. 38, (7), pp. 1130-1138. [Consulta: 28 enero 2021]. ISSN 0142-2421. DOI 10.1002/sia.2364. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/sia.2364>.
- BRITANNICA**, 1998. "Andreas Sigismund Marggraf German Chemist". *Encyclopaedia Britannica* [en línea]. [Consulta: 29 enero 2021]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Andreas-Sigismund-Marggraf>.

- BRITANNICA, E.**, 2021. "Alessandro Volta | Biography, Facts, Battery, & Invention | Britannica". Encyclopaedia Britannica [en línea]. [Consulta: 29 enero 2021]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>.
- C.H. EVENSEN INDUSTRIOVNER AS**, 2020a. "Fume Enclosure Plant with Optional Integrated Cover Lid - CH Evensen Industriovner AS". [en línea]. [Consulta: 25 enero 2021]. Disponible en: <https://che.no/hot-dip-galvanizing/fume-capture-plant-with-optional-integrated-cover-lid/>.
- C.H. EVENSEN INDUSTRIOVNER AS**, 2020b. "Gas Fired Recirculation Furnace with High Velocity Pulse Fired Burners - CH Evensen Industriovner AS". [en línea]. [Consulta: 25 enero 2021]. Disponible en: <https://che.no/hot-dip-galvanizing/gas-fired-recirculation-furnace-with-high-velocity-pulse-fired-burners/>.
- CARPIO, J., CASADO, J.A., ÁLVAREZ, J.A. & GUTIÉRREZ-SOLANA, F.**, "Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing". Engineering Failure Analysis, 2009. (S.l.) vol. 16, (2), pp. 585-595. ISSN 13506307. DOI 10.1016/j.engfailanal.2008.02.006.
- CHAVAN, R.R. & VIRGINIA, W.**, "Analysis of energy consumption in continuous galvanizing lines at West Virginia University Industrial and Management Systems Engineering". [en línea], 2006. (S.l.) [Consulta: 27 enero 2021]. Disponible en: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/1749>.
- COOK, T.H.**, 2003. *Composition, testing, and control of hot dip galvanizing flux*. 1 julio 2003. S.l.: Elsevier USA.
- CORROTECH S.A.**, 2020. "What Is Zinc Galvanizing with The Hot Dip Galvanizing Plant?". [en línea]. [Consulta: 30 enero 2021]. Disponible en: <https://www.arvindcorrotech.com/what-is-zinc-galvanizing-with-the-hot-dip-galvanizing-plant/>.
- CRADDOCK, P.T.**, "The early history of zinc". Endeavour, 1987. (S.l.) vol. 11, (4), pp. 183-191. ISSN 01609327. DOI 10.1016/0160-9327(87)90282-1.
- ECON, S. & CORREA, R.**, "Administración del Sr. Econ. Rafael Correa Delgado Presidente Constitucional de la República del Ecuador Registro Oficial™". [en línea], 2010. (S.l.) pp.

91. [Consulta: 23 enero 2021]. Disponible en: <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/07/codigoproduccion.pdf>.

GALVANIZER ASO., 2020. "EN ISO 1461 - British Galvanizing Standard - Contact us for more info". Galvanizer Asociation UK [en línea]. [Consulta: 31 enero 2021]. Disponible en: <https://www.galvanizing.org.uk/galvanizing-standards/iso-1461/>.

GALVANIZERS CO, "Hot dip galvanizing". Anti-Corrosion Methods and Materials [en línea], 1999. (S.l.) vol. 46, (2), pp. 216-223. [Consulta: 30 enero 2021]. ISSN 00035599. DOI 10.1108/acmm.1999.12846bab.003. Disponible en: <http://www.galvanizers.co.in/blog/category/hot-dip-galvanizing/>.

GIL, I., 2013. "¿Por qué hay un derrame petrolero por semana en Ecuador?". BBC Mundo [en línea]. 2013. pp. 3. [Consulta: 29 octubre 2020]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/06/130610_ciencia_ecuador_derrame_rio_lim_pieza_ig.

GOBIERNO NACIONAL, 2015. "En Francisco de Orellana el aprovechamiento petrolero significa desarrollo e inclusión – Ecuador Estratégico EP". [en línea]. [Consulta: 29 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.ecuadorestrategicoep.gob.ec/en-francisco-de-orellana-el-aprovechamiento-petrolero-significa-desarrollo-e-inclusion/>.

HERNÁNDEZ-BETANCUR, J.D., HERNÁNDEZ, H.F. & OCAMPO-CARMONA, L.M., "A holistic framework for assessing hot-dip galvanizing process sustainability". Journal of Cleaner Production, 2019. (S.l.) vol. 206, pp. 755-766. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.09.177.

INEN, "RECUBRIMIENTOS DE ZINC – DIRECTRICES Y RECOMENDACIONES PARA LA PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HIERRO Y ACERO". , 2016a. (S.l.)

INEN, "RECUBRIMIENTOS DE ZINC – DIRECTRICES Y RECOMENDACIONES PARA LA PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HIERRO Y ACERO". , 2016b. (S.l.)

- INEN**, 2016c. "RECUBRIMIENTOS DE ZINC POR INMERSION EN CALIENTE SOBRE ELEMENTOS DE SUJECCIÓN. REQUISITOS". [en línea]. [Consulta: 23 enero 2021]. Disponible en: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_672.pdf.
- ISO**, 2017. *ISO 14713-1:2017 - Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures — Part 1: General principles of design and corrosion resistance* [en línea]. 2017. S.l.: s.n. [Consulta: 23 enero 2021]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/71135.html>.
- KERNEY, U.**, "Treatment of spent pickling acids from hot dip galvanizing". Resources, Conservation and Recycling, 1994. (S.l.) vol. 10, (1-2), pp. 145-151. ISSN 09213449. DOI 10.1016/0921-3449(94)90047-7.
- LIU, H., CHEN, J., MEI, J., JIA, J. & SHI, L.**, "A view of iron and steel making technology in the Yan region during the Warring States period and the Han dynasty: Scientific study of iron objects excavated from Dongheishan site, Hebei province, China". Journal of Archaeological Science, 2014. (S.l.) vol. 47, (1), pp. 53-63. ISSN 10959238. DOI 10.1016/j.jas.2014.04.001.
- LUO, W., LI, D., MU, D., BAI, J. & XIAO, B.**, "Preliminary study on zinc smelting relics from the Linjiangerdui site in Zhongxian County, Chongqing City, southwest China". Microchemical Journal, 2016. (S.l.) vol. 127, pp. 133-141. ISSN 0026265X. DOI 10.1016/j.microc.2016.02.015.
- MAASS, P. & PEISSKER, P.**, *Handbook of Hot-Dip Galvanization* [en línea]. Weinheim, Germany: 2011. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. [Consulta: 25 agosto 2020]. ISBN 9783527323241. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527636884>.
- MATTHIJS, D.W., VAN HERCK, K., VAN LIERDE, A., GERAIN, N. & EDWARD MATTHIJS**, 2003. "B2 1 FLUX AND PROCESS FOR HOT DIP GALVANIZATION". . S.l.:
- MERRIAM WEBSTER**, 2010. "Corrode | Definition of corrode by Merriam-webster". Merriam-webster [en línea]. [Consulta: 28 enero 2021]. Disponible en: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/corrode>.

- METCALFE, T.**, "King Tut's Dagger Is «Out of This World»". *Livescience* [en línea], 2017. (S.l.) [Consulta: 18 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.livescience.com/61214-king-tut-dagger-outer-space.html>.
- MULLINGER, P. & JENKINS, B.**, *Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation: Second Edition*. S.l.: 2013. Elsevier Ltd. ISBN 9780080993775. pp. 1-639.
- NEMTINOV, V., MATROCHIN, M., NEMTINOVA, Y. & KRYLOV, A.**, 2020. "Analysis of design solutions for galvanizing of small parts of ferrous metals in bulk". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [en línea]. S.l.: IOP Publishing Ltd, pp. 022013. [Consulta: 27 enero 2021]. DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022013. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/971/2/022013>.
- PHILGALV INDUSTRIAL**, 2016. "Hot Dip Galvanizing- Dipping Process..... in action - YouTube". [en línea]. [Consulta: 31 enero 2021]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Az87Q0JedG4>.
- PUCE**, 2020. "Geografía y clima". [en línea]. [Consulta: 29 octubre 2020]. Disponible en: <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/GeografiaClima/>.
- SEHENSTAR ENERGY TECHNOLOGY**, 2020. "SG Flue Gas Heat Exchanger_Flue Gas Plate Heat Exchanger_Sehenstar Energy Technology Co., Ltd". [en línea]. [Consulta: 25 enero 2021]. Disponible en: <http://www.sehenstar.com/ShowProducts/?6-1.html>.
- SHIBLI, S.M.A., MEENA, B.N. & REMYA, R.**, 2015. *A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process*. 25 enero 2015. S.l.: Elsevier.
- SJOUKES, F.**, 1990. *Chemical reactions in fluxes for hot dip galvanizing*. 1 abril 1990. S.l.: MCB UP Ltd.
- SØRENSEN, P.A., KIIL, S., DAM-JOHANSEN, K. & WEINELL, C.E.**, "Anticorrosive coatings: A review". *Journal of Coatings Technology and Research* [en línea], 2009. (S.l.) vol. 6, (2), pp. 135-176. [Consulta: 29 octubre 2020]. ISSN 15470091. DOI 10.1007/s11998-008-9144-2. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11998-008-9144-2>.

STANDARD ASTM, 20017. "ASTM A123 / A123M - 17 Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products". Standard ASTM International [en línea]. [Consulta: 23 enero 2021]. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/A123.htm>.

TJSV STEEL LTDA, 2020. "galvanizing by TJSV STEEL FABRICATION AND GALVANIZING INDIA LIMITED, galvanizing.Hot Dip Galvanizing Plant | ID - 3829696". [en línea]. [Consulta: 25 enero 2021]. Disponible en: <https://www.exportersindia.com/tjsv-steel-fabrication-and-galvanizing-india-company3195206/galvanizing-3829696.htm>.

TRIBOTECHNIKA, 2013. "Scribd". [en línea]. [Consulta: 10 diciembre 2020]. Disponible en: https://www.scribd.com/embeds/124908180/content?start_page=1&view_mode=book&access_key=key-1qntwavstuwtnlNy98y7&show_recommendations=false.

WAINWRIGHT, G.A., "Iron in Egypt". The Journal of Egyptian Archaeology [en línea], 1932. (S.l.) vol. 18, (1), pp. 3-15. [Consulta: 10 diciembre 2020]. ISSN 0307-5133. DOI 10.1177/030751333201800102. Disponible en: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030751333201800102>.

WEIRONG, Z., 2020. "TRADITIONAL CHINESE ZUIN-SMELTING TECHNOLOGY & THE HISTORY OF ZINC PRODUCTION IN CHINA-- 《 China Historical Materials of Science and Technology》 1997年02期". [en línea]. [Consulta: 28 enero 2021]. Disponible en: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-ZGKS702.011.htm.

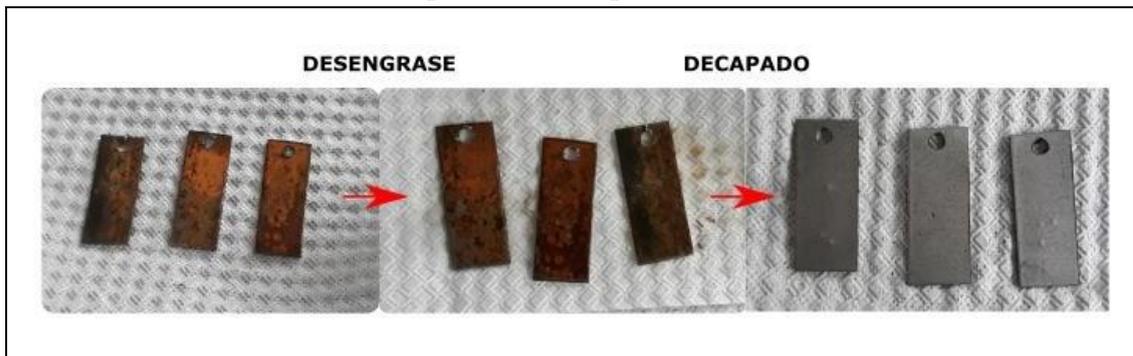
WILLIAMS, L.P., 2021. "Michael Faraday | Biography, Inventions, & Facts | Britannica". Encyclopaedia Britannica [en línea]. [Consulta: 29 enero 2021]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>.

ANEXOS

ANEXO A. Fotografías de los resultados del pretratamiento químico.



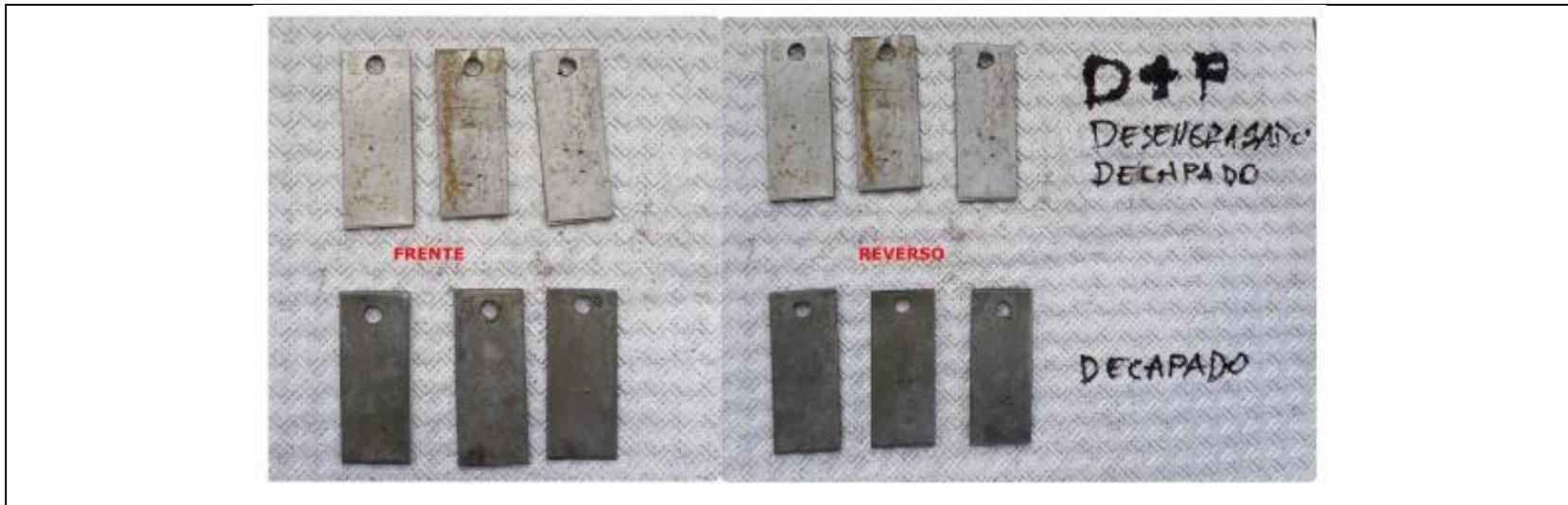
a) Placas de hierro oxidadas a las que se les va a aplicar los distintos tratamientos.



b) Placas tratadas con: desengrase basico, enjuagues y decapado (HCl).

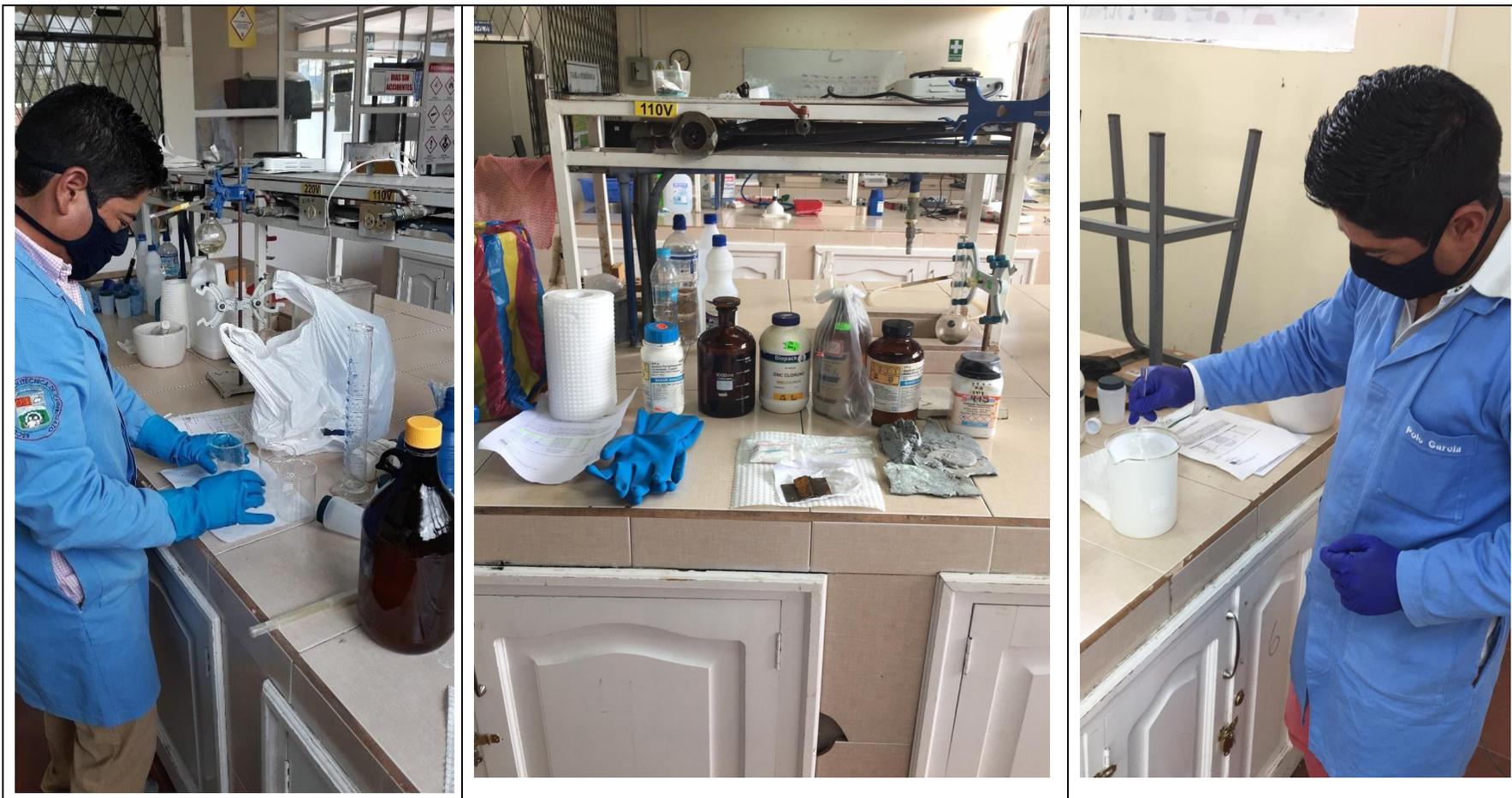


c) Placas tratadas con: desengrase/decapado acido con HCl.

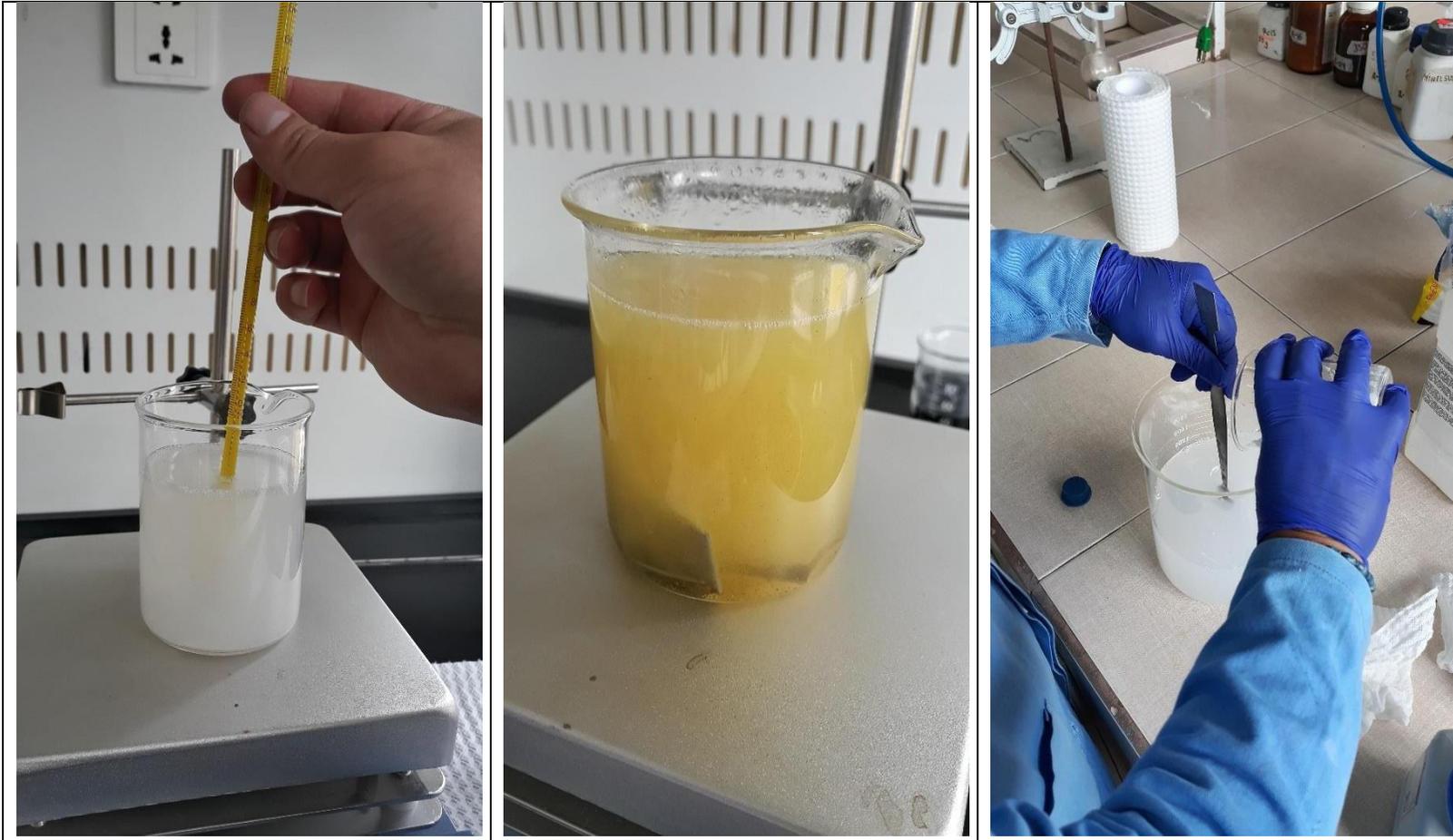


Comparación de resultados de procesos de pretratamiento. Arriba: desengrasado básico + decapado y abajo: desengrasado/decapado ácido.

ANEXO B. Fotografías de preparación de soluciones de tratamiento químico.



Proceso de preparación de las soluciones para el pretratamiento químico.



Pruebas de pretratamiento químico: Izquierda, desengrasado ácido; centro, decapado ácido y derecha fluxado.

ANEXO C. Fotografías de pruebas de fundición de zinc.



Pruebas de fundición del zinc usado para el recubrimiento.

ANEXO D. Fotografías de pruebas de recubrimiento de piezas con zinc.



Pruebas de recubrimiento con zinc en el laboratorio de operaciones unitarias. Izquierda: fundición del zinc; centro: retiro de impurezas; derecha: temperatura del zinc fundido.



Inmersión de piezas en zinc fundido. Izquierda: Temperatura de los gases de combustión; centro: inmersión de piezas; derecha: zinc fundido en crisol

ANEXO E. Tabla con factores para el cálculo de costos de adquisición de equipamiento.

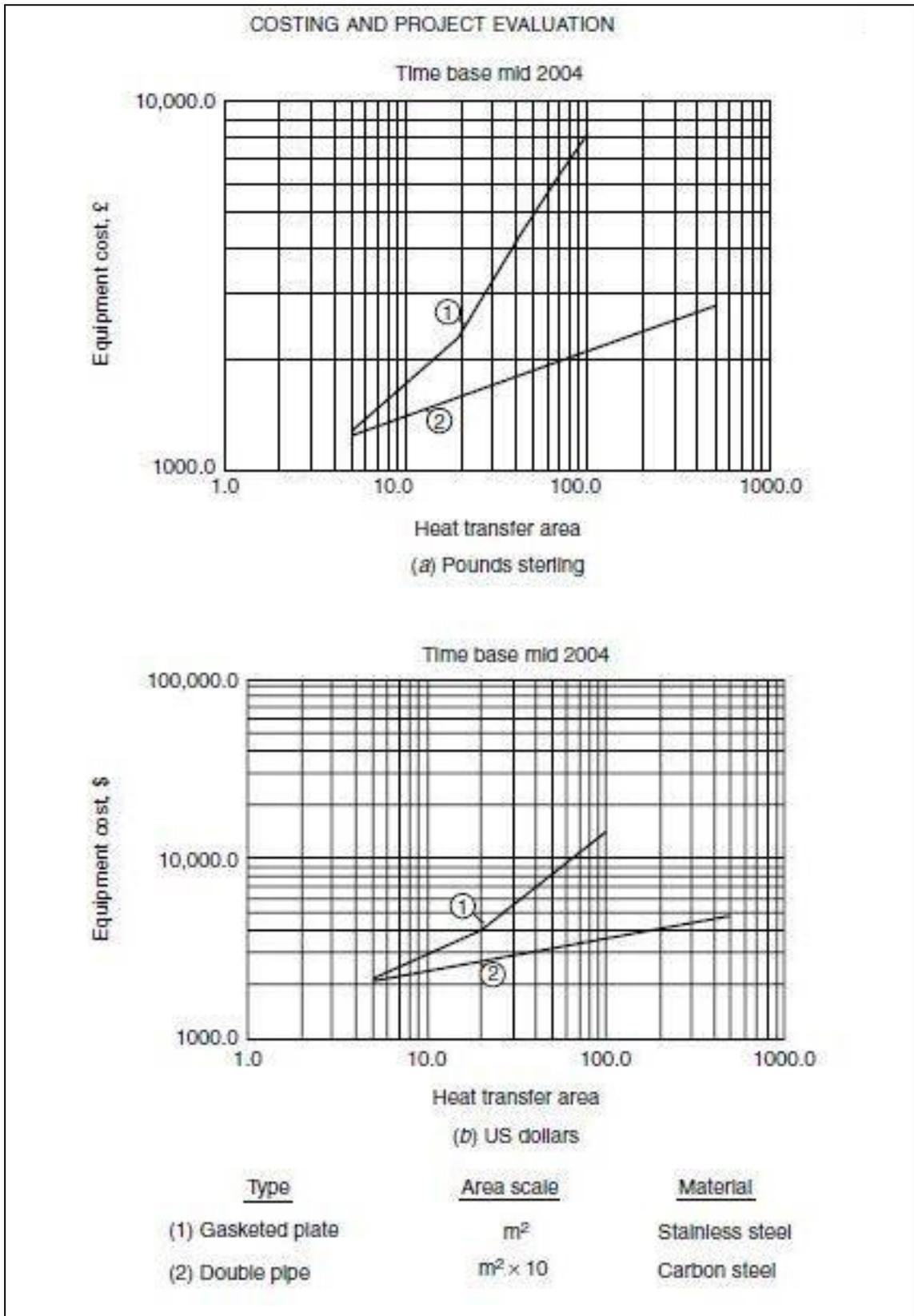
Equipment	Size unit, S	Size range	Constant C,£	C,\$	Index n	Comment
Agitators						
Propeller	driver	5-75	1200	1900	0.5	
Turbine	power, kW		1800	3000	0.5	
Boilers						
Packaged						oil or gas fired
up to 10 bar	kg/h steam	$(5-50) \times 10^3$	70	120	0.8	
10 to 60 bar			60	100	0.8	
Centrifuges						
Horizontal basket	dia., m	0.5-1.0	35,000	58,000	1.3	carbon steel
Vertical basket			35,000	58,000	1.0	$\times 1.7$ for ss
Compressors						
Centrifugal	driver power, kW	20-500	1160	1920	0.8	electric, max. press. 50 bar
Reciprocating			1600	2700	0.8	
Conveyors						
Belt	length, m	2-40				
0.5 m wide			1200	1900	0.75	
1.0 m wide			1800	2900	0.75	
Crushers						
Cone	t/h	20-200	2300	3800	0.85	
Pulverisers	kg/h		2000	3400	0.35	
Dryers						
Rotary	area, m ²	5-30	21,000	35,000	0.45	direct
Pan		2-10	4700	7700	0.35	gas fired
Evaporators						
Vertical tube	area, m ²	10-100	12,000	20,000	0.53	carbon steel
Falling film			6500	10,000	0.52	
Filters						
Plate and frame	area, m ²	5-50	5400	8800	0.6	cast iron
Vacuum drum		1-10	21,000	34,000	0.6	carbon steel
Furnaces						
Process						
Cylindrical	heat abs, kW	10^3-10^4	330	540	0.77	carbon steel
Box		10^3-10^5	340	560	0.77	$\times 2.0$ ss
Reactors						
Jacketed, agitated	capacity, m ³	3-30	9300	15,000	0.40	carbon steel
			18,500	31,000	0.45	glass lined
Tanks						
Process	capacity, m ³					
vertical		1-50	1450	2400	0.6	atmos. press.
horizontal		10-100	1750	2900	0.6	carbon steel
Storage						
floating roof		50-8000	2500	4350	0.55	$\times 2$ for stainless
cone roof		50-8000	1400	2300	0.55	

Table 6.3. Cost of column packing. Cost basis mid 2004

	Cost	£/m ³ (\$/m ³)	
Size, mm	25	38	50
Saddles, stoneware	840 (1400)	620 (1020)	580 (960)
Pall rings, polypropylene	650 (1080)	400 (650)	250 (400)
Pall rings, stainless steel	1500 (2500)	1500 (2500)	830 (1360)

Factores para estimación de costos de adquisición de equipos.

ANEXO F. Diagrama con factores para el cálculo de costos de adquisición de equipamiento.



Factores para estimación de costos de adquisición de equipos.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 10 / 08 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Polo Eduardo García Cepeda</i>
INFORMACION INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Firmado digitalmente por LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.08.09 17:37:50 -05'00'



1488-DBRA-UTP-2021



ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

Oficio Nro. ESPOCH-FC.DOC-2021-5428-O

Riobamba, 28 de agosto de 2021

Asunto: TRADUCCIÓN RESUMEN TRABAJO DE TITULACIÓN - SR. EDUARDO POLO GARCIA CEPEDA

Señor Doctor
Bolívar Edmundo Flores Humanante, Mgs.
Director de la Carrera de Ingeniería Química
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
En su Despacho

De mi consideración:

En respuesta al Oficio No. ESPOCH-FC.IQ-2021-1237-O, en el que se me solicita realizar la Traducción del Resumen de Trabajo de Titulación del Sr. EDUARDO POLO GARCIA CEPEDA, estudiante de la carrera de Ingeniería Química, me permito remitir dicho documento para los fines pertinentes

Con sentimientos de distinguida consideración.

Atentamente,
SABER PARA SER

Documento firmado electrónicamente

Mgs. Ana Gabriela Reinoso Espinosa
DOCENTE OCASIONAL

Referencias:

- ESPOCH-FC.IQ-2021-1237-O

Anexos:

- Resumen Aprobado 1488-DBRA-UTP-2021 POLO EDUARDO GARCIA CEPEDA.pdf
- ABSTRACT_ EDUARDO POLO GARCIA CEPEDA.pdf



ANA GABRIELA
REINOSO
ESPINOSA

Dirección: Panamericana Sur km 1 ½
www.espoch.edu.ec

Teléfono: 593 (03) 2 998200
Código Postal: EC060155