

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Diseño de una Planta de Producción de ácido acetilsalicílico

Javier Rodrigo Gándara Viteri

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 21 de noviembre de 2020

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Diseño de una Planta de Producción de ácido acetilsalicílico

Javier Rodrigo Gándara Viteri

Nombre del profesor, Título académico

Juan Diego Fonseca Ashton, Ph. D.

Quito, 21 de noviembre de 2020

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Javier Rodrigo Gándara Viteri

Código: 00138549

Cédula de identidad: 171721085-8

Lugar y fecha: Quito, 21 de noviembre de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El ácido acetilsalicílico es un fármaco de alto consumo a nivel mundial, pues se consumen alrededor de 40 000 toneladas anuales. Este fármaco es sintetizado únicamente en el Principado de Asturias en España para después ser exportado a otras partes del mundo, donde es manufacturado y comercializado en tabletas. Dados los hechos, se evaluó la posibilidad de instaurar una planta de producción de ácido acetilsalicílico en Ecuador, con el fin de satisfacer la demanda de este fármaco en el continente Americano y reducir costos de importación desde España hacia países de América, además de generar empleo e ingresos para el país. El desarrollo del proyecto consistió en fijar un caudal de producción a partir del consumo del fármaco en América, seleccionar el proceso, diseñar los equipos y, finalmente, efectuar el análisis económico del proceso. Se concluyó que el proyecto es económicamente viable, pues es posible recuperar la inversión en un plazo de 5 años a un precio de venta de \$21.77 por kilogramo de ácido acetilsalicílico, precio que es competitivo frente a estándares mundiales. Sin embargo, dadas las condiciones bajo las cuales se diseñó el proceso, es recomendable efectuar un análisis económico más a fondo, con datos más actuales y precisos, si se desea obtener datos más certeros sobre el proceso diseñado y la viabilidad económica del mismo.

Palabras clave: ácido acetilsalicílico, antipirético, neutralización, carboxilación, precipitación, acetilación.

ABSTRACT

Acetylsalicylic acid is a highly consumed drug worldwide, as around 40 000 tons of it are consumed annually. This drug is only synthesised in the Principality of Asturias in Spain and later exported to other countries, where it is manufactured and commercialized as tablets. Given these facts, it is desired to evaluate the possibility of establishing an acetylsalicylic acid production plant in Ecuador, which would satisfy the demand of this drug in America and reduce importation costs from Spain to American countries, besides generating employment and income for the country. The development of the project consisted on setting a production rate based on the consumption of this drug in the American continent, selecting the process, designing the required equipment and, finally, carrying out the economic analysis of the process. The main conclusion was that the process is economically viable, since it is possible to recover the inversion within 5 years with a product selling price of \$21.77 per kilogram of acetylsalicylic acid, price that is competitive when compared to global standards. Nevertheless, given the conditions under which the process was designed, it is recommended to carry out a deeper economic analysis, with more recent data and prices, if it is desired to obtain more accurate insight into the designed process and its economic viability.

Key words: acetylsalicylic acid, antipyretic, neutralisation, carboxylation, precipitation, acetylation.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Justificación.....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.4. Resultados esperados.....	16
2. BASES DEL DISEÑO.....	17
2.1. Descripción del producto.....	17
2.2. Descripción de materias primas.....	17
2.3. Limitaciones y Normas.....	19
2.4. Selección del proceso.....	20
2.5. Ubicación.....	21
3. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: DEFINIR PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO ACETILSALICÍLICO.....	21
3.1. Introducción.....	21
3.2. Desarrollo.....	22
3.3. Conclusión.....	25
4. OBJETIVO ESPECÍFICO 2: SELECCIONAR Y DIMENSIONAR LOS EQUIPOS REQUERIDOS PARA EL PROCESO.....	26
4.1. Introducción.....	26
4.2. Desarrollo.....	27
4.3. Conclusiones.....	29
5. OBJETIVO ESPECÍFICO 3: EVALUAR VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	29
5.1. Introducción.....	29
5.2. Desarrollo.....	30
5.3. Conclusión.....	31
6. CONCLUSIONES.....	31
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
8. ANEXO A: METODOLOGÍAS Y ECUACIONES.....	35
8.1. Tanques, mezcladores y reactores.....	35
8.1.1. Volumen.....	35
8.1.1.1. Terminación toriesférica.....	36
8.1.1.2. Terminación elíptica.....	36
8.1.1.3. Terminación cónica.....	36
8.1.2. Presión de operación.....	37

8.1.3.	Espesor de paredes.....	37
8.1.3.1.	Terminación toriesférica.....	37
8.1.3.2.	Terminación elíptica.....	37
8.1.3.3.	Terminación cónica.....	37
8.1.3.4.	Terminación plana.....	37
8.1.4.	Masa de carcasa.....	38
8.2.	Intercambiadores de calor.....	38
8.2.1.	Intercambiadores de calor.....	38
8.2.2.	Chaquetas de calentamiento.....	39
8.3.	Bombas.....	40
8.4.	Compresores.....	40
8.5.	Agitadores.....	40
8.5.1.	Agitador tipo turbina.....	40
8.5.2.	Agitador tipo ancla.....	41
8.5.3.	Potencia de agitación.....	41
8.6.	Costos y análisis económico.....	42
8.6.1.	Estimación de costos de compra de equipos.....	42
8.6.2.	Estimación de costos de compra e instalación de equipos.....	42
8.6.3.	Estimación de capitales.....	42
9.	ANEXO B: CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	43
9.1.	Balance de masa.....	43
9.2.	Dimensionamiento de equipos.....	44
9.2.1.	Tanques, mezcladores y reactores.....	44
9.2.1.1.	Reactor de acetilación (R-301).....	44
9.2.1.2.	Tanque de almacenamiento de fenol (T-101).....	47
9.2.1.3.	Tanque de almacenamiento de agua (T-102).....	49
9.2.1.4.	Tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico al 60% (T-103).....	50
9.2.1.5.	Tanque de almacenamiento de anhídrido acético (T-104).....	52
9.2.1.6.	Tanque de almacenamiento de óxido de calcio (T-105).....	53
9.2.1.7.	Tanque de almacenamiento de hidróxido de sodio (T-106).....	54
9.2.1.8.	Tanque de almacenamiento de dióxido de carbono (T-107).....	55
9.2.1.9.	Tanque de almacenamiento de fenolato de sodio (T-201).....	56
9.2.1.10.	Tanque de precipitación de ácido salicílico (T-202).....	57
9.2.1.11.	Tanque de almacenamiento de ácido salicílico (T-203).....	59
9.2.1.12.	Tanque de almacenamiento de agua (T-301).....	60
9.2.1.13.	Tanque de almacenamiento de fenol recuperado (T-501).....	61

9.2.1.14.	Tanque mezclador de salicilato de sodio (M-201).....	62
9.2.1.15.	Reactor de neutralización (R-201).....	64
9.2.1.16.	Reactor de carboxilación (R-202).....	67
9.2.2.	Intercambiadores de calor.....	69
9.2.2.1.	Calentador de agua (I-101).....	70
9.2.2.2.	Condensador de fenol (I-201).....	73
9.2.2.3.	Condensador de agua (I-301).....	74
9.2.2.4.	Enfriador de agua (I-302).....	74
9.2.2.5.	Calentador de agua (I-501).....	75
9.2.3.	Bombas y compresores.....	75
9.2.4.	Equipos no diseñados.....	79
9.2.4.1.	Filtro de fenolato de sodio (F-202).....	79
9.2.4.2.	Columna de adsorción (CA-201).....	80
9.2.4.3.	Caldera de vapor (CV-501).....	80
9.2.4.4.	Centrifugador de ácido salicílico (CF-201).....	81
9.2.4.5.	Secador de ácido salicílico (SE-201).....	81
9.2.4.6.	Centrifugador de ácido acetilsalicílico (CF-401).....	81
9.2.4.7.	Secador de ácido acetilsalicílico (SF-401).....	82
9.2.4.8.	Evaporador (E-301).....	82
9.2.4.9.	Molino de ácido acetilsalicílico (ML-401).....	83
9.2.4.10.	Tamiz de ácido acetilsalicílico (TZ-401).....	83
9.2.4.11.	Dosificador de ácido acetilsalicílico (DS-401).....	83
9.3.	Costos de equipos.....	84
9.4.	Costos del proyecto.....	86
9.5.	Análisis económico.....	87
10.	ANEXO C: CÓDIGOS, SIMBOLOGÍA Y OTROS.....	88
10.1.	Análisis entre procesos.....	88
10.2.	Códigos de equipos y áreas.....	88
10.3.	Simbología.....	89
10.4.	Costos materias primas y hojas de seguridad.....	92
10.4.1.	Costos materias primas.....	92
10.4.2.	Hojas de seguridad.....	93
10.4.2.1.	Fenol.....	93
10.4.2.2.	Hidróxido de Sodio.....	93
10.4.2.3.	Dióxido de Carbono.....	93
10.4.2.4.	Anhídrido Acético.....	93

10.4.2.5.	Óxido de Calcio.....	94
10.4.2.6.	Ácido Sulfúrico.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 1).....	43
Tabla 2. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 2).....	43
Tabla 3. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 3).....	43
Tabla 4. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 4).....	44
Tabla 5. Especificaciones de diseño y operación del R-301.....	45
Tabla 6. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-301.....	46
Tabla 7. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-301.....	47
Tabla 8. Especificaciones de diseño y operación del T-101.....	48
Tabla 9. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del T-101.....	49
Tabla 10. Especificaciones de diseño y operación del T-102.....	50
Tabla 11. Especificaciones de diseño y operación del T-103.....	51
Tabla 12. Especificaciones de diseño y operación del T-104.....	52
Tabla 13. Especificaciones de diseño y operación del T-105.....	53
Tabla 14. Especificaciones de diseño y operación del T-106.....	54
Tabla 15. Especificaciones de diseño y operación del T-107.....	55
Tabla 16. Especificaciones de diseño y operación del T-201.....	56
Tabla 17. Especificaciones de diseño y operación del T-202.....	57
Tabla 18. Especificaciones de diseño y operación del agitador del T-202.....	58
Tabla 19. Especificaciones de diseño y operación del T-203.....	59
Tabla 20. Especificaciones de diseño y operación del T-301.....	60
Tabla 21. Especificaciones de diseño y operación del T-501.....	61
Tabla 22. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del T-501.....	62
Tabla 23. Especificaciones de diseño y operación del M-201.....	63
Tabla 24. Especificaciones de diseño y operación del agitador del M-201.....	64
Tabla 25. Especificaciones de diseño y operación del R-201.....	65
Tabla 26. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-201.....	66
Tabla 27. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-201.....	66
Tabla 28. Especificaciones de diseño y operación del R-202.....	67
Tabla 29. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-202.....	68
Tabla 30. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-202.....	69
Tabla 31. Especificaciones de diseño y operación del I-101.....	73
Tabla 32. Especificaciones de diseño y operación del I-201.....	74
Tabla 33. Especificaciones de diseño y operación del I-301.....	74
Tabla 34. Especificaciones de diseño y operación del I-302.....	75
Tabla 35. Especificaciones de diseño y operación del I-501.....	75
Tabla 36. Especificaciones de diseño y operación de las bombas.....	79
Tabla 37. Especificaciones de diseño y operación de los compresores.....	79
Tabla 38. Especificaciones de diseño y operación del F-202.....	80
Tabla 39. Especificaciones de diseño y operación del CA-201.....	80
Tabla 40. Especificaciones de diseño y operación del CV-501.....	80
Tabla 41. Especificaciones de diseño y operación del CF-201.....	81
Tabla 42. Especificaciones de diseño y operación del SE-201.....	81
Tabla 43. Especificaciones de diseño y operación del CF-401.....	81
Tabla 44. Especificaciones de diseño y operación del SF-401.....	82

Tabla 45. Especificaciones de diseño y operación del E-301.....	82
Tabla 46. Especificaciones de diseño y operación del ML-401.....	83
Tabla 47. Especificaciones de diseño y operación del TZ-401.....	83
Tabla 48. Especificaciones de diseño y operación del DS-401.....	83
Tabla 49. Comparación costos teóricos y reales.....	84
Tabla 50. Análisis combinado (teórico-real) de costos.....	84
Tabla 51. Costos de capital fijo.....	86
Tabla 52. Costos de producción variables.....	86
Tabla 53. Costos de producción fijos.....	86
Tabla 54. Costos de capital de trabajo.....	86
Tabla 55. Análisis económico resumido.....	87
Tabla 56. Parámetros fijos del flujo de caja en 10 años.....	87
Tabla 57. Flujo de caja en 10 años.....	87
Tabla 58. Análisis comparativo tipo binario entre procesos.....	88
Tabla 59. Nomenclatura de equipos.....	88
Tabla 60. Materias primas.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso.....	20
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso.....	24
Figura 3. Número de potencia en función del número de Reynolds.....	42
Figura 4. Selección de paquete termodinámico.....	70
Figura 5. Selección de materiales.....	71
Figura 6. Selección de equipo.....	72
Figura 7. Ingreso de parámetros.....	72
Figura 8. Resolución de incógnitas.....	73
Figura 9. Selección de materiales.....	76
Figura 10. Selección de equipos.....	77
Figura 11. Ingreso de parámetros.....	78
Figura 12. Resolución de incógnitas.....	78

1. INTRODUCCIÓN

10.1. Antecedentes

El ácido acetilsalicílico, comúnmente conocido y comercializado como Aspirina, es uno de los medicamentos más recetados por doctores desde que fue inventado hace ya más de 100 años y comercializado en un inicio bajo la farmacéutica Bayer. Es un medicamento analgésico cuyo mercado es muy amplio dadas las múltiples aplicaciones que tiene y estudios que se han realizado sobre él. Es un fármaco relativamente moderno, sin embargo, sus orígenes son casi tan antiguos como el origen de la civilización misma, pues antes de ser sintetizado era obtenido a partir de la corteza de sauces a modo de salicina, componente bastante similar en estructura al ácido acetilsalicílico y a su precursor, el ácido salicílico. De hecho, el uso de corteza de sauces con fines medicinales está registrado en tratados de farmacopea Sumerios, Egipcios y Griegos (Santos, 2014).

En la actualidad el principal sector poblacional que consume este producto son los adultos mayores, mayoritariamente personas mayores de 65 años, seguidos por niños, cuyas edades están entre 2 y 11 años. Es altamente consumido por estos grupos dado que este fármaco es un analgésico poco irritante y actúa como cardioprotector (Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios).

En el continente americano no se produce este fármaco, pues la mayoría viene importada de Guatemala, México y otros países en forma de pastillas, pero a su vez estos países la reciben principalmente desde Asturias en España, que es en donde se sintetiza (Gutiérrez, 2010). Es por esta razón que existe la oportunidad de invertir en el desarrollo de una planta de

producción de este fármaco, con el fin de reducir costos de importación y promover el crecimiento farmacéutico e industrial del país, además de tener la posibilidad de suplir la necesidad de este producto en países de América.

10.2. Justificación

Entre Sudamérica, México y Estado Unidos se consume una cantidad importante de este fármaco. Tan solo entre México (206.25 toneladas anuales) (PMFarma, 2015) y Estados Unidos (535.91 toneladas anuales), se consumen más de 740 toneladas anuales de ácido acetilsalicílico ya en pastillas de Aspirina 100 (las mismas que contienen 81 mg de ácido acetilsalicílico). En Ecuador se requieren alrededor de 10 toneladas anuales, de las cuales del 6% al 10% es demanda insatisfecha. Se sabe que se consumen alrededor de 40 000 toneladas anuales de este fármaco a nivel mundial (Jones, 2005).

El precio de venta de este producto de alta pureza es de entre \$10 y \$617 por kilogramo, siendo el costo más alto adjudicado a estándares para análisis de ácido acetilsalicílico (Chemical Book, s. f.). Su precio de venta a nivel farmacéutico está entre \$10 y \$40 por kilogramo, pero su costo puede subir drásticamente a \$1728.4 por kilogramo ya en comprimidos de Aspirina 100, que cuestan alrededor de \$0.15 (Fybeca, 2020).

La síntesis del fármaco en un lugar más cercano a las zonas en donde es requerido implicaría un gran alivio económico, pues su importación, en forma de comprimidos, puede costar alrededor de \$1 100 por kilogramo (Terán y Escobar, 2008), sin considerar costos de importación. Adicionalmente, el producir este fármaco podría ser muy benéfico para el país,

pues abre la posibilidad de exportarlo a países en el continente americano y satisfacer su necesidad. Además, dado que las únicas plantas de producción de ácido acetilsalicílico están en España (La Vanguardia, 2012), el implementar una planta de este tipo tendría una alta probabilidad de ser remunerable, más aún si se consigue vender este fármaco a un precio competitivo bajo estándares mundiales.

10.3. Objetivos

Como objetivo general de este proyecto se tiene el determinar la factibilidad tanto técnica como económica de la implementación de una planta de producción de ácido acetilsalicílico, diseñada con la finalidad de satisfacer la necesidad interna de este medicamento a nivel del Ecuador, además de tener una sobreproducción con el propósito de ser exportada.

Para lograr el objetivo previamente presentado se debe, en una primera instancia, definir el proceso de producción a implementar y las materias primas que este requerirá. Posteriormente, conociendo la necesidad a satisfacer se debe determinar un caudal de producción y en base a esto se establecerá la selección y dimensionamiento de equipos requeridos para el proceso. Finalmente, habiendo logrado estos 2 últimos objetivos, se planea evaluar viabilidad económica y técnica del proceso de producción, con el fin de justificar su implementación y ajustar costos de materia prima y precio de venta del producto y optimizar procesos.

10.4. Resultados esperados

Como resultado de este proyecto se espera obtener un diseño económicamente viable de una planta de producción de ácido acetilsalicílico que pueda suplir la demanda de este fármaco a nivel nacional, dejando también la posibilidad de exportarlo para así generar un ingreso adicional al país y disminuir los costos por importaciones. Además, se espera que este proyecto genere empleo, puesto que se impulsará la matriz económica y productiva del país.

Además de esto, se espera obtener un precio de venta de este producto competitivo con respecto al mercado mundial, por medio de la optimización del proceso de producción que involucra: la obtención de materias primas a precios competitivos, el diseño y cotización de equipos a precios competitivos y, finalmente, el reclutamiento de personal para hacer funcionar la planta.

2. BASES DEL DISEÑO

2.1. Descripción del producto

El ácido acetilsalicílico es comúnmente comercializado en tabletas Aspirina de 100 mg, con 81 mg o 100 mg de ácido acetilsalicílico, o en tabletas efervescentes de Aspirina, generalmente conocidas como Alka-Seltzer, con 375 mg de ácido acetilsalicílico.

2.2. Descripción de materias primas

Para la fabricación de ácido acetilsalicílico se requiere de 5 materias primas principales: fenol, hidróxido de sodio, dióxido de carbono, anhídrido acético y óxido de calcio. Los costos de cada materia prima pueden ser muy variados acorde a su procedencia y su proveedor, pues

depende si son importados o suministrados internamente en el país como se presenta en la Tabla 60 en el Anexo C.

El fenol es un compuesto de fórmula química C_6H_6O . A temperatura ambiente es un sólido cristalino blanco comúnmente utilizado en la industria de tejidos, química y farmacéutica con distintos fines. En solución acuosa se comporta como un ácido, con un pKa de 9.88.

El hidróxido de sodio es un compuesto de fórmula química $Na(OH)$. Es un compuesto cristalino generalmente utilizado en la industria de tejidos, papeles, detergentes y petróleos con distintos fines. Es una base fuerte que se disocia totalmente en solución acuosa, con un pKb de 0.20.

El dióxido de carbono es un compuesto de fórmula química CO_2 . Es generalmente un gas incoloro utilizado como refrigerante o gasificante por varias industrias. Es un gas ligeramente soluble en agua lo que da origen a ácido carbónico y carbonatos en solución acuosa lo que acidifica el medio.

El anhídrido acético es un compuesto de fórmula química $C_4H_6O_3$. Es utilizado en la síntesis de fármacos y producción de fibras. Es un líquido incoloro con la característica de ser corrosivo, irritante e inflamable.

El óxido de calcio es un compuesto de fórmula química CaO . Es utilizado como agente secante, neutralizante, conservante y fundente por muchísimas industrias distintas. Es un sólido blanco con texturas de rocas calizas.

2.3. Limitaciones y Normas

El proyecto estaría limitado por la obtención de materias primas para la producción de ácido acetilsalicílico, pues probablemente muchas de ellas deberán ser importadas dado que no se comercializan directamente en el país por ninguna empresa, principalmente el anhídrido acético.

En cuanto a reactivos, el ácido sulfúrico debe ser almacenado en tanques gruesos de material anticorrosivo, se debe trabajar con equipo de protección personal y se debe contar con duchas de emergencia y bicarbonato de sodio (Estrucplan, 2000). El fenol debe ser almacenado en tanques metálicos herméticos, se debe usar equipo de protección y no usar compuestos de Sílice, se debe tener como sustancias de primeros auxilios solución salina y polietilenglicol (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s. f.). El hidróxido de sodio debe ser almacenado en contenedores plásticos herméticos (Harris, 2007). El anhídrido acético debe ser almacenado en contenedores plásticos herméticos (Departamento de Salud y Servicios para personas mayores de Nueva Jersey, 2005). El óxido de calcio debe almacenarse en recipientes herméticos (Fogler, 2008). Se debe trabajar fuera del rango de explosividad de estos compuestos. El proyecto en sí requiere de una inversión inicial para adquirir los equipos necesarios, lo que requiere de la obtención de varios permisos.

En cuanto a los productos resultantes del proceso de producción, es decir el ácido acetilsalicílico y el acetato de calcio, ambos deben ser almacenados en tanques herméticos y especialmente el ácido acetilsalicílico debe ser almacenado con mucho cuidado y con las respectivas barreras de seguridad para evitar su contaminación.

Las normas relacionadas a procesos de producción de fármacos en general vienen dadas por la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigencia Sanitaria y la Asociación de Laboratorios Farmacéuticos Ecuatorianos. Para este proceso, las normas más relevantes serían: el Acuerdo Ministerial 10723 (Normas farmacológicas), la Resolución ARCSA-DE-2019-016-JRC (R.O.) (Registro Sanitario), la Resolución ARCSA-DE-016-2020-LDCL NTS (Importación y Exportación), la Resolución ARCSA-DE-008-2018-JCGO (Buenas Prácticas de Manufactura) y la RESOLUCIÓN ARCSA-DE-002-2020-LDCL (Buenas Prácticas de Almacenamiento, Distribución y Transporte). En adición a esto, el ácido acetilsalicílico debe tener una pureza mayor o igual al 98% para ser comercializado bajo estándares farmacéuticos internacionales.

2.4. Selección del proceso

Existe un único proceso para la síntesis de ácido acetilsalicílico. Este proceso ha sido optimizado desde la fecha de su concepción, hace ya casi 100 años; sin embargo, las reacciones principales siguen siendo las mismas y las operaciones que conforman el proceso se han mantenido casi idénticas. El proceso consiste en adicionar grupos funcionales a un anillo Bencénico, usualmente fenol, hasta obtener ácido acetilsalicílico como se presenta en la Figura 1.

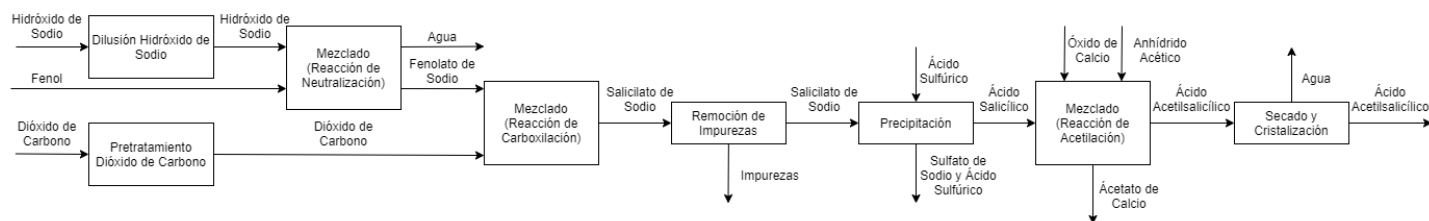


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso

Este proceso de producción tiene pocas variantes, diferenciadas en algunas etapas del proceso. Al analizar cuál de estas variantes es la mejor a implementar, para lo cual se ha optado por comparar el proceso en el que interviene óxido de calcio y en el que no. En la Tabla 58, en el Anexo C, se puede apreciar que ambos procesos son bastante similares en cuanto a ventajas y desventajas, pero ya que el proceso que incluye óxido de calcio es el que presenta más ventajas se puede concluir que es la mejor opción ya que la purificación del producto final es más fácil y requiere de menos recursos, y por ende es más económica.

2.5. Ubicación

Por facilidad en cuanto a la distribución del producto final y para no afectar significativamente a ciertas poblaciones en zonas residenciales, la planta debería ubicarse al norte de la ciudad de Quito, pasando la zona del Comité del Pueblo, antes de llegar a Carcelén o Carapungo, principalmente por el hecho que en esa zona la densidad poblacional es baja y en caso de un derrame o contaminación no afectará mucho a la población. Además, al ser parte de una de las zonas industriales de Quito, los servicios de agua potable y electricidad están instalados como para funcionar correctamente y a escala industrial.

3. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: DEFINIR PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO ACETILSALICÍLICO

3.1. Introducción

Para determinar el mejor proceso a utilizar se debe establecer dos o más procesos de producción que tengan alguna diferencia significativa entre sí; en este caso, uno en el que se incluya como materia prima el óxido de calcio y otro en el que no. Esto se hace con el fin de determinar cuál es el proceso con mejores resultados a ser implementado. Una vez definido el proceso de producción, se debe establecer el requerimiento de materias primas y su dependencia a la cantidad de producto que se debe producir. En otras palabras, se debe realizar un balance de masa que incluya factores de conversión en cada proceso.

Finalmente, se debe definir un mercado o público objetivo y determinar su necesidad o consumo del producto a producir, para así establecer un caudal de producción que cubra esta demanda para realizar el balance de masa y así poder calcular las cantidades y costos de materias primas.

3.2. Desarrollo

Para estimar la demanda de ácido acetilsalicílico a cubrir se utilizaron los datos disponibles de demanda y consumo de este producto en Estados Unidos y México, que suman un total de 740 toneladas de ácido acetilsalicílico anuales. En Ecuador se consumen alrededor de 10 toneladas anuales de este fármaco. Con la demanda ya establecida, se fijó un caudal de producción anual para satisfacer la necesidad de este fármaco en estos países. Posteriormente, se fijó una cantidad extra a producir para hacer de la planta un proyecto más rentable y poder satisfacer la demanda de toda América, además de tener una base de cálculo con la cual poder

ajustar los equipos dimensionados si el caudal llegase a cambiar. Es así que se fijó un caudal de producción anual de 1000 toneladas de ácido acetilsalicílico.

El proceso se compone de varias operaciones entre las que constan: reacciones, mezclado y homogeneizado, centrifugación, secado, filtración, adsorción, precipitación, molienda y tamizado. De estas operaciones y reacciones las principales son: la neutralización del fenol, el secado y filtrado del fenolato de sodio, la carboxilación del fenolato de sodio, la precipitación del salicilato de sodio, el centrifugado y secado de ácido salicílico, la acetilación del ácido salicílico, el centrifugado y secado de ácido acetilsalicílico, la molienda y tamizado del ácido acetilsalicílico.

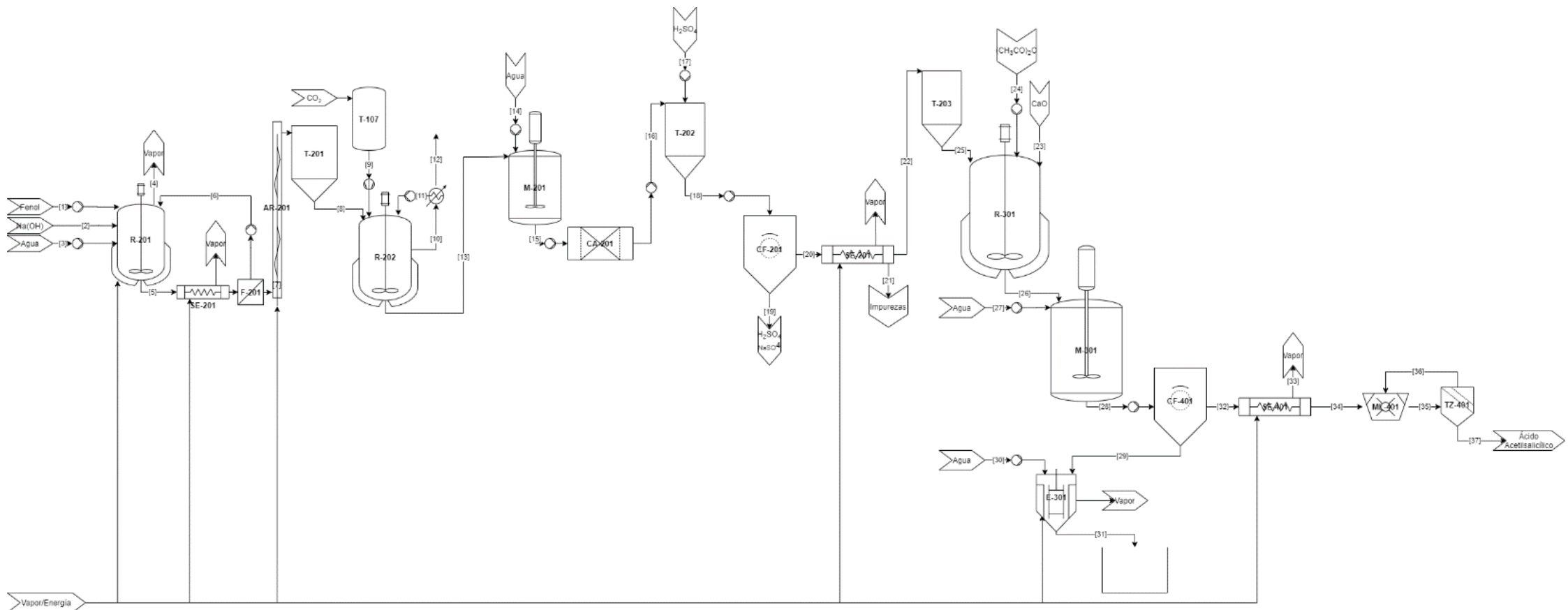


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso

El proceso empieza con la neutralización del fenol con hidróxido de sodio en el R-201. Posteriormente, el fenolato de sodio de la reacción de neutralización pasa a un tanque de almacenaje intermedio, el T-201, para posteriormente ingresar al R-202 en donde, en presencia de dióxido de carbono, se obtendrá salicilato de sodio que será disuelto en agua en el M-201 y pasará por una columna de adsorción CA-201. Luego, la solución con salicilato de sodio ingresará al T-202 en donde se precipitará ácido salicílico mediante el uso de ácido sulfúrico. El ácido salicílico, ya separado del medio acuoso del que precipitó, ingresará al R-301 donde, en presencia de anhídrido acético y óxido de calcio, se llevará a cabo la reacción de acetilación. El ácido acetilsalicílico obtenido de la reacción será lavado y purificado hasta obtener un alto grado de pureza, para finalmente ser secado, molido, tamizado, empaquetado y distribuido para su venta.

El código que siguen los equipos en la Figura 2 pueden ser interpretados al recurrir a la Tabla 59. Asimismo, las corrientes y sus composiciones se encuentran en las tablas de la sección 9.1, en el Anexo B, a modo de un balance de masa por ciclo de producción que fue fijado para producir 1000 toneladas anuales de ácido acetilsalicílico, bajo las consideraciones de que cada ciclo dura aproximadamente 7 horas y la planta operará 300 días al año.

3.3. Conclusión

Con los datos anteriormente recopilados, especialmente con las corrientes y sus composiciones, se puede proceder a diseñar y seleccionar los equipos en los que se va a tratar las sustancias involucradas en el proceso de producción. Asimismo, partiendo del diseño de

estos equipos será posible saber si es más conveniente diseñar y ensamblar dicho equipo o buscar un modelo similar que cumpla con las especificaciones de diseño obtenidas.

4. OBJETIVO ESPECÍFICO 2: SELECCIONAR Y DIMENSIONAR LOS EQUIPOS REQUERIDOS PARA EL PROCESO

4.1. Introducción

Para establecer los equipos principales que están involucrados en el proceso se puede recurrir a la sección 3.2, en donde se describen las operaciones principales del proceso. Para el dimensionamiento de estos equipos se deben tener en cuenta principalmente los flujos de entrada y salida, así como el tiempo de residencia, y parámetros como la conversión, expansión o compresión del volumen de reacción, cambios de temperatura y generación o consumo energético.

En el caso de los reactores, considerando que es un proceso que se opera principalmente de forma discontinua, no es estrictamente necesario diseñarlos a partir de la tasa de reacción sino a partir de los caudales de los flujos de entrada y salida, así como de sus composiciones, como se haría en el caso de tanques de homogenización o de almacenaje.

En el caso de las bombas, se va a trabajar considerando los caudales de fluido que se desean transportar, su composición, y ciertas de sus características físicas como su densidad, viscosidad y temperatura, de ser necesario.

En el caso de equipos como intercambiadores de calor, filtros, centrifugadores, y secadores, entre otros, se deben utilizar parámetros de potencia, requerimientos energéticos, área expuesta o de contacto, y eficiencia de la operación, así como la composición deseada de las corrientes de salida.

4.2. Desarrollo

Para el diseño de los equipos se fijaron varios parámetros de trabajo. Para el diseño de la mayoría de tanques, mezcladores y reactores se seleccionó el acero inoxidable 316 en vez del acero inoxidable 304, dado que es mucho más resistente a las condiciones corrosivas del proceso de producción (Sinnott y Towler, 2012), por lo tanto resulta más económico utilizar este tipo de Acero, ya que se requerirá una menor cantidad de material para la carcasa del equipo.

Para el diseño de los tanques, se utilizaron los datos de Estrés Máximo Permisible del material seleccionado a la temperatura de diseño en el libro de Towler y Sinnott. En adición a esto se fijaron como parámetros de seguridad una eficiencia de soldadura del 90%, un 10% adicional a la presión de operación y entre un 10% y 30% adicional a la temperatura de operación. En cuanto a las dimensiones de este tipo de equipos se fijó una relación entre la altura y el diámetro, del cuerpo cilíndrico, de 1:5. Los fondos, ya sean hemisféricos, esféricos, toriesféricos o incluso planos, fueron diseñados a partir del diámetro obtenido para el contenedor.

Para esto últimos equipos se trabajó acorde a una serie de códigos y normas, muchas de los cuales se mencionaron en el párrafo anterior. Sin embargo, un código relevante que permite trabajar con el espesor de pared calculado sin incurrir en la necesidad de que este tome un valor estandarizado acorde al diámetro del recipiente es el código API 650, que ayuda a optimizar principalmente costos por gasto en Acero. Obviamente, por simplicidad y dada la ubicación en la que se desea implementar el diseño (Ecuador) se utilizará espesores estándar de pared, ya que permiten trabajar más velozmente a pesar de usar un poco más de Acero.

En el caso de chaquetas de calentamiento se fijó que la corriente de energía, es decir de vapor de agua, agua líquida o refrigerante, fluirá a una velocidad de 1.65 metros por segundo, lo que se considera una velocidad estándar de flujo de vapor y óptima para la transferencia de calor (Sinnott, y Towler, 2012).

Para equipos como intercambiadores de calor, bombas y compresores se utilizó el software de simulación Aspen HYSYS, dado que tiene incorporado paquetes de diseño que permiten calcular ya sea el área, caudal de procesamiento, o potencia de cada equipo. No se diseñaron manualmente estos equipos dada la complejidad de los mismos, puesto que se requiere evaluar una serie de condiciones y ecuaciones, que son más simples de evaluar mediante métodos numéricos como los que usa el software escogido.

Los equipos diseñados se presentan de forma resumida en el Anexo B, en la sección 9.2. Un ejemplo del diseño de cada equipo se presenta al inicio de cada sección por tipo de equipo,

donde se encuentran ya sean las ecuaciones resueltas o el proceso de simulación para obtener los parámetros de equipos tipo tanque, intercambiador de calor, bomba y compresor.

4.3. Conclusiones

Obtenidas las dimensiones características de cada equipo, además de otros de sus parámetros de diseño, es posible estimar su costo. El costo de un equipo suele ser exponencialmente proporcional a la magnitud del parámetro característico del equipo, es decir, parámetros como el volumen para tanques y reactores, la masa de carcasa para tanques a presión, el área para intercambiadores de calor, el flujo para bombas, y la potencia para agitadores y compresores, entre otros ejemplos. Por otra parte, partiendo de estos mismos parámetros de diseño para cada equipo es posible buscar equipos similares a implementar en el proceso, con el fin de obtener una estimación económica más realista.

5. OBJETIVO ESPECÍFICO 3: EVALUAR VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

5.1. Introducción

Una vez diseñado el proceso, conociendo los equipos y materias primas requeridas para poner en marcha el proceso de producción, es posible estimar el costo de la implementación del mismo; es decir, es posible realizar un análisis económico y de costos. Sin embargo, es necesario considerar que el análisis económico a efectuar será un análisis económico preliminar y aproximado, donde únicamente se toma en consideración el costo de compra e instalación de equipos principales (Sinnott y Towler, 2012). Por esta razón, solo se va a tomar en cuenta el costo de equipos como reactores, tanques principales, bombas y compresores

principales, e intercambiadores principales, mas no el costo de equipos auxiliares como tanques de almacenamiento externo ni equipos asociados a estos últimos. Dada la clase de análisis económico que se va a efectuar, clasificado como un análisis económico de clase 4, se debe considerar que tiene una precisión máxima del $\pm 30\%$; es decir, que el costo final de implementación que se obtenga para el proceso podría no ser del todo preciso, incluso tomando en cuenta el capital calculado para imprevistos.

Una vez finalizado el análisis será posible determinar si el proyecto es viable y rentable de manera que pueda atraer los fondos necesarios para ser ejecutado. Adicionalmente, será posible definir a qué precio mínimo de venta de producto final es que la implementación de este proyecto es viable y se puede recuperar la inversión en un plazo de tiempo aceptable.

5.2. Desarrollo

Para el análisis económico, se empleó un análisis combinado de costos de compra e instalación de equipos, dada la gran diferencia de valores entre las estimaciones de costos teóricos de los equipos y sus costos reales, como se puede apreciar en las Tablas 49 y 50 en el Anexo B. Para esto, se utilizó el método de estimación de costos del libro de Towler y Sinnott únicamente para calcular el costo de equipos cuyo historial de precios fue muy variable, como fue el caso de los agitadores y el dosificador.

Los costos de implementación del proyecto, presentados en la Tabla 50, fueron calculados a partir de la suma de costos de compra e instalación de equipos, además de los costos de

materias primas, presentados en la Tabla 60. Estos costos incluyen los costos de operación, costos de obra civil, y costos de contingencia, entre otros más.

Finalmente, para el análisis económico, los cálculos de tasa de retorno, valor neto actual y del precio de venta mínimo, se realizó un análisis de flujo de caja en 10 años como el que se presenta en la Tabla 57, dependiente de los parámetros en la Tabla 56, y se utilizó la herramienta iterativa “Búsqueda de Objetivo” de Excel para calcular el precio de venta mínimo bajo el cual se puede recuperar la inversión en un plazo de 5 años (Tabla 55).

5.3. Conclusión

El proceso diseñado es económicamente viable, ya que es posible recuperar la inversión inicial en un plazo de 5 años fijando como precio de venta \$21.77 por kilogramo de ácido acetilsalicílico. También se puede concluir que el proceso diseñado es competitivo porque el precio de venta también lo es, puesto que se encuentra entre el rango de precios de venta de este producto, que es de entre \$10 y \$40 por kilogramo. El VAN y TIR calculados para el proyecto permiten corroborar que la inversión generará ganancias, es decir utilidades, y que la rentabilidad del proyecto es alta, pues un TIR mayor a 30% ya se considera bastante bueno.

6. CONCLUSIONES

El proceso de producción diseñado es técnica y económicamente viable dado que, por una parte, las corrientes definidas y equipos diseñados soportan la producción del caudal de producción fijado, y por otra parte, el precio de venta es competitivo y permite recuperar la inversión en un plazo aceptable para proyectos industriales. En adición a esto, el proyecto

resulta relevante a nivel mundial ya que podría suplir la necesidad de ácido acetilsalicílico de gran parte de la población mundial que lo consume diariamente; en particular, ayudaría a suplir la necesidad de este producto de la población del continente Americano sin incurrir en la importación el mismo desde España.

El proceso de producción elegido y diseñado es el más favorable con respecto a otros, como los que se comparan en la Tabla 58 en el Anexo C, además ser el más actualizado, dado que permite obtener productos finales de alta calidad, de grado farmacéutico, a un costo aceptable para este tipo de proyectos como se demostró en la Sección 5.

En caso de requerir determinar un precio de venta más preciso, es recomendable realizar un análisis económico más detallado, a fondo y con un mayor grado de precisión, utilizando un método de estimación económica más avanzado, principalmente porque muchos de los precios calculados de los equipos son apreciablemente distintos de sus precios reales. Además de que el caudal fijado es una aproximación hecha para satisfacer la demanda aproximada de este fármaco en toda América. Pero puesto que una estimación de costos de muy alto nivel requeriría un esfuerzo mucho mayor al realizado y requeriría de recursos no disponibles, los resultados obtenidos, utilizando las herramientas de estimación presentadas en la Sección 8.6, son bastante adecuados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios. (s. f.). *ASPIRINA 500 mg comprimidos efervescentes*. Recuperado el 24 de Marzo del 2020, de https://cima.aemps.es/cima/pdfs/es/p/67268/P_67268.html.pdf
- Aleu, R., Espinoza, A., Sánchez, E., Sobocinska, M y Ye, J. (2019). *Planta de Producción de Aspirina*. Recuperado el 24 de Marzo del 2020, de https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2019/211033/TFG_Apirina_capitulo01.pdf
- Autores revista Muy Interesante. (2008). *Preguntas y Respuestas*. Muy Interesante. Edición 2008.
- Chemical Book. (s. f.). *Acetylsalicylic acid*. Recuperado el 15 de Junio del 2020, de <https://www.chemicalbook.com/Price/Acetylsalicylic-acid.htm>
- Departamento de Salud y Servicios para personas mayores de Nueva Jersey. (2005). *Anhídrido Acético*. Recuperado el 15 de Junio del 2020, de <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0005sp.pdf>
- Estrucplan. (2000). *Normas de Seguridad para el Manejo del Ácido Sulfúrico*. Recuperado el 2 de Mayo del 2020, de <https://estrucplan.com.ar/normas-de-seguridad-para-el-manejo-del-acido-sulfurico/>
- Fogler, S. (2008). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. (4º Edición). México D. F.: Pearson Education.
- Fybeca. (2020). *Aspirina*. Recuperado el 24 de Marzo del 2020, de <https://www.fybeca.com/FybecaWeb/m/search-results.jsf?cat=-1&q=aspirina&s=0&pp=25>
- Gutiérrez, M. (2010). *Toda la aspirina del mundo nace en Lada*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <https://www.lne.es/nalon/2010/12/12/aspirina-mundo-nace-lada/1006427.html>

Harris, D. (2007). *Quantitative Chemical Analysis*. (7° Edición). China Lake: W. H. Freeman and Company

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). *fenol*. Recuperado el 2 de Mayo del 2020, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia14.pdf>

Jones, A. (2005). *Chemistry: An Introduction for Medical and Health Sciences*. Reino Unido: John Wiley & Sons

La Vanguardia. (2012). *Bayer concentra en Asturias su producción mundial de ácido acetilsalicílico*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <https://www.lavanguardia.com/economia/20121004/54352265947/bayer-concentra-asturias-produccion-acido-acetilsalicilico.html>

Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. (3° Edición). México D. F.: Limusa Wiley.

Mott, R. (2006). *Applied Fluid Mechanics*. (6° Edición). Nueva Jersey: Pearson Education.

Ortiz-Prado, E., Galarza, C., Cornejo, F. y Ponce, J. (2014). *Acceso a medicamentos y situación del mercado farmacéutico en Ecuador*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <https://www.paho.org/journal/sites/default/files/14--OPIN--Ortiz-Prado--57-62.pdf>

Pallares, M. (2017). *Con ingresos por mil mde, Aspirina cumple 120 años*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/negocios/2017/06/16/con-ingresos-por-mil-mde-aspirina-cumple-120-anos>

PMFarma. (2015). *Se vendieron aspirinas por 47.9 mdd en México en el 2014*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <http://www.pmfarma.com.mx/noticias/11654-se-vendieron-aspirinas-por-47.9-mdd-en-mexico-en-el-2014.html>

- Santos, V. (2014). *ASPECTOS BIOFARMACÉUTICOS Y FARMACOCINÉTICOS DEL ÁCIDO ACETILSALICÍLICO*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/VIRGINIA%20SANTOS%20ALONSO.pdf>
- Sinnott, R. y Towler, G. (2012). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. (2° Edición). Nueva York: Butterworth-Heinemann.
- SunSirs. (2020). *SunSirs Comodity Data Group*. Recuperado el 24 de Marzo del 2020, de <http://www.sunsirs.com/es>
- Terán, J. y Escobar, L. (2008). *Precio, Disponibilidad y Asequibilidad de Medicamentos y Componentes del Precio en Ecuador*. Recuperado el 7 de Octubre del 2020, de <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2009/Ecuador%20report%20final.pdf>
- Warner, T. y Mitchel, J. (2002). *Cyclooxygenase-3 (COX-3): Filling in the gaps toward a COX continuum?*. Recuperado el 6 de Octubre del 2020, de <https://doi.org/10.1073/pnas.222543099>

8. ANEXO A: METODOLOGÍAS Y ECUACIONES

8.1. Tanques, mezcladores y reactores

8.1.1. Volumen

El volumen de los tanques será calculado utilizando la masa que van a albergar, siendo esta principalmente los reactivos, y la densidad de los componentes individuales que componen la masa contenida.

$$V_{Equipo} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}$$

El volumen del tanque será el volumen obtenido a partir de la anterior ecuación por un factor de sobredimensionamiento, que puede tomar valores de entre 10% y 30% dependiendo el uso y condiciones de trabajo del equipo.

$$V_{Operación} = (1 + f_s) \cdot V_{Equipo}$$

El diámetro y altura del equipo serán calculados sabiendo que tendrán una forma cilíndrica.

Adicionalmente, se tomará una relación entre altura y diámetro, que será igual a 1.5.

$$V_{Operación} = \frac{\pi}{4} \cdot h \cdot D_i^2$$

8.1.1.1. Terminación toriesférica

El volumen de la terminación toriesférica será determinado utilizando su altura, radio mayor y radio menor, valores que serán obtenidos en la página de utilidades de Horfasa, al proporcionar el diámetro del equipo y el espesor de la terminación.

$$V_T = \frac{\pi}{3} \cdot \left(2 \cdot h_T \cdot R^2 - (2 \cdot r^2 + c^2 + 2 \cdot r \cdot R) \cdot (R - h_T) + 3 \cdot r^2 \cdot c \cdot \sin^{-1} \left(\frac{R - h_T}{R - r} \right) \right)$$

$$c = \sqrt{(R - r)^2 - (R - h_T)^2}$$

8.1.1.2. Terminación elíptica

El volumen de la terminación elíptica será determinado utilizando la falange y diámetro interno del contenedor e ingresándolos en la página de herramientas de LZR Fit. Las demás dimensiones de la terminación serán determinadas a partir de las siguientes relaciones.

$$R = 0.8 \cdot D_i$$

$$r = 0.15 \cdot D_i$$

8.1.1.3. Terminación cónica

El volumen de la terminación cónica será determinado utilizando su altura, obtenida en función del ángulo ápice que se desee, y diámetro interno del cilindro.

$$h_C = \frac{D_i}{2} \cdot \tan(\theta)$$

$$V_C = \frac{\pi}{12} \cdot h_C \cdot D_i^2$$

8.1.2. Presión de operación

La presión de operación será calculada a partir de la presión estática que tendrá que soportar el tanque y la presión atmosférica a la que estará expuesto.

$$P_{Operación} = P_{atm} + O_{\%} \cdot \bar{p} \cdot g \cdot h$$

8.1.3. Espesor de paredes

El espesor de la pared del cuerpo cilíndrico del equipo será calculado utilizando el estrés máximo permisible del acero que se vaya a utilizar y la presión de diseño del equipo, que suele ser un 10% mayor a la presión de operación. En general, las ecuaciones de espesor de pared son similares, solo varían los parámetros numéricos conocidos como factores de experiencia.

$$th = \frac{P_{Diseño} \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{max} \cdot E - 1.2 \cdot P_{Diseño}} + T_{Corrosión}$$

8.1.3.1. Terminación toriesférica

El espesor de la terminación toriesférica será determinado utilizando el estrés máximo permisible del acero que se vaya a utilizar y la presión de diseño del equipo.

$$th_T = \frac{0.885 \cdot P_{Diseño} \cdot D_i}{\sigma_{max} \cdot E - 0.1 \cdot P_{Diseño}} + T_{Corrosión}$$

8.1.3.2. Terminación elíptica

El espesor de la terminación elíptica será determinado utilizando el estrés máximo permisible del acero que se vaya a utilizar y la presión de diseño del equipo.

$$th_E = \frac{P_{Diseño} \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{max} \cdot E - 0.2 \cdot P_{Diseño}} + T_{Corrosión}$$

8.1.3.3. Terminación cónica

El espesor de la terminación cónica será determinado utilizando el estrés máximo permisible del acero que se vaya a utilizar y la presión de diseño del equipo.

$$th_C = \frac{P_{Diseño} \cdot D_i}{2 \cdot (\sigma_{max} \cdot E - 0.6 \cdot P_{Diseño}) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} + T_{Corrosión}$$

8.1.3.4. Terminación plana

El espesor de la terminación plana, es decir el techo o tapa superior, con ángulo de intersección de 45° con respecto a la pared cilíndrica, será determinado utilizando el estrés máximo permisible del acero que se vaya a utilizar y la presión de diseño del equipo. Si es que el contenedor tiene una presión interna cercana a la atmosférica y la terminación será su techo, su espesor será automáticamente 5 milímetros.

$$th_p = D_i \cdot \sqrt{\frac{0.1 \cdot P_{\text{Diseño}}}{\sigma_{\text{max}} \cdot E}}$$

8.1.4. Masa de carcasa

El volumen de la carcasa de la sección cilíndrica de los tanques será calculado utilizando el diámetro interno, el diámetro externo del contenedor, calculado a partir del espesor de pared obtenido anteriormente, y la altura de esta sección.

$$D_{\text{out}} = D_i + 2 \cdot th$$

$$V_{\text{Carcasa}} = \frac{\pi}{4} \cdot h \cdot (D_{\text{out}}^2 - D_i^2)$$

El cálculo del volumen de carcasa de las terminaciones se hará por diferencia, es decir la retar entre el volumen externo de la terminación y el volumen interno de la terminación.

La masa de la carcasa total de los tanques será calculada utilizando la densidad del material del que estarán hechos los equipos y el volumen total de la carcasa de los equipos.

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{Carcasa}} + \sum_{i=1}^n V_{i\text{Carcasa}}$$

$$m_e = \rho_m \cdot V_{\text{Total}}$$

8.2. Intercambiadores de calor

8.2.1. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor que se utilizan en este proceso de producción son en su gran mayoría de tubos y carcasa. Para el diseño de este tipo de equipos se utilizará el software de simulación Aspen HYSYS.

8.2.2. Chaquetas de calentamiento

El calor requerido por cada equipo, principalmente los reactores y algunos tanques, será calculado a partir de un balance de energía sobre el equipo, incluyendo también el calor generado o consumido por la reacción que ocurre en el mismo.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{V}{t} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_0) - V \cdot (-r_A) \cdot \Delta H_{rxn}$$

El calor suministrado a los equipos es aportado por vapor caliente que fluye por tubos que constituyen un serpentín o por el ánulo entre el equipo y la chaqueta que rodea al equipo. Es así que, el calor ganado por el equipo es el calor perdido por el vapor, por lo que principalmente se debe determinar el flujo de vapor requerido para suministrar cierto calor.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \dot{V}_v \cdot \rho_v \cdot \lambda_v$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = m_i \cdot C_{pi} \cdot \Delta T$$

$$\dot{V}_v = \frac{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_0) - V \cdot (-r_A) \cdot \Delta H_{rxn} \cdot t}{\rho_v \cdot \lambda_v \cdot t}$$

En este caso la conducción de calor ocurre en parte por convección por el flujo de vapor y en parte por conducción a través de la pared del equipo, por lo que se debe obtener la resistencia total al flujo de calor.

$$U = \left(\frac{\bar{t}h}{\lambda} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{f_{Ei}} + \frac{1}{h_{out}} + \frac{1}{f_{Eout}} \right)^{-1}$$

Posteriormente se calculará el área de contacto sobre la que ocurre la transferencia de calor.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\log}$$

$$\Delta T_{\log} = \frac{T_i - T_{out}}{\ln \left(\frac{T_A - T_{out}}{T_A - T_i} \right)}$$

Después, ya para el diseño de la chaqueta, se calculará las dimensiones del ánulo o los tubos que constituyen este sistema considerando la sección hidráulica de la chaqueta.

$$S = \frac{\dot{V}_v \cdot \rho_v}{v_v}$$

$$S = \frac{\pi}{8} \cdot D_i^2$$

Finalmente, se calculará el número de espiras necesarias a partir del diámetro interno obtenido, la longitud de tubería requerida, el espesor, ya tabulado, de la tubería y el espaciado entre espiras.

$$L = \frac{A}{D_i}$$

$$N_E = \frac{L}{\pi \cdot D_{out}}$$

$$D_{out} = D_i + 2 \cdot t_{h_E}$$

$$E_E = \frac{h - N_E \cdot D_{out}}{N_E - 1}$$

8.3. Bombas

Por simplicidad en cuanto al diseño de las bombas, la energía que deben suministrar las bombas y parámetros como el NPSH disponible y la cabeza de presión, serán calculados a partir del software de simulación Aspen HYSYS.

8.4. Compresores

Por simplicidad en cuanto al diseño de los compresores, la potencia de trabajo y eficiencia energética serán calculados a partir del software de simulación Aspen HYSYS, por medio de un modelo de compresión politrópico.

8.5. Agitadores

Las dimensiones del agitador están dadas por el tipo de agitador con respecto al contenedor en el que van a estar.

8.5.1. Agitador tipo turbina

Las dimensiones de este tipo de agitadores vienen dadas por las siguientes relaciones con respecto a las dimensiones del contenedor en el que van a estar.

$$\frac{d_A}{D_i} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{H}{D_i} = 1.03$$

$$\frac{C}{D_i} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{th_A}{d_A} = \frac{1}{15}$$

$$\frac{J}{d_A} = \frac{3}{10}$$

$$\frac{L_A}{d_A} = \frac{7}{15}$$

8.5.2. Agitador tipo ancla

Las dimensiones de este tipo de agitadores vienen dadas por las siguientes relaciones con respecto a las dimensiones del contenedor en el que van a estar.

$$\frac{d_A}{D_i} = 0.95$$

$$\frac{H}{D_i} = 1$$

$$\frac{C}{D_i} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{th_A}{d_A} = \frac{1}{50}$$

$$\frac{J}{d_A} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{L_A}{d_A} = \frac{7}{15}$$

8.5.3. Potencia de agitación

La potencia que deben suministrar los agitadores a una mezcla para homogeneizarla o acelerar una reacción se va a calcular a partir de la ecuación general de potencia para agitadores.

$$\dot{W} = N_p \cdot N^3 \cdot d_A^5 \cdot \rho_i$$

$$\Re = \frac{d_A^2 \cdot N \cdot \rho_i}{\mu_i} = \frac{d_A^2 \cdot N \cdot v_i}{v_i}$$

Sabiendo el tipo de agitador que se va a utilizar y la turbulencia del medio se puede ubicar el valor del número de potencia en la Figura 3, sabiendo que la curva A corresponde a agitadores de placas verticales, la curva B a agitadores de placas verticales delgadas, la curva C a agitadores de placas delgadas y la curva D a agitadores en tanques sin placas deflectoras.

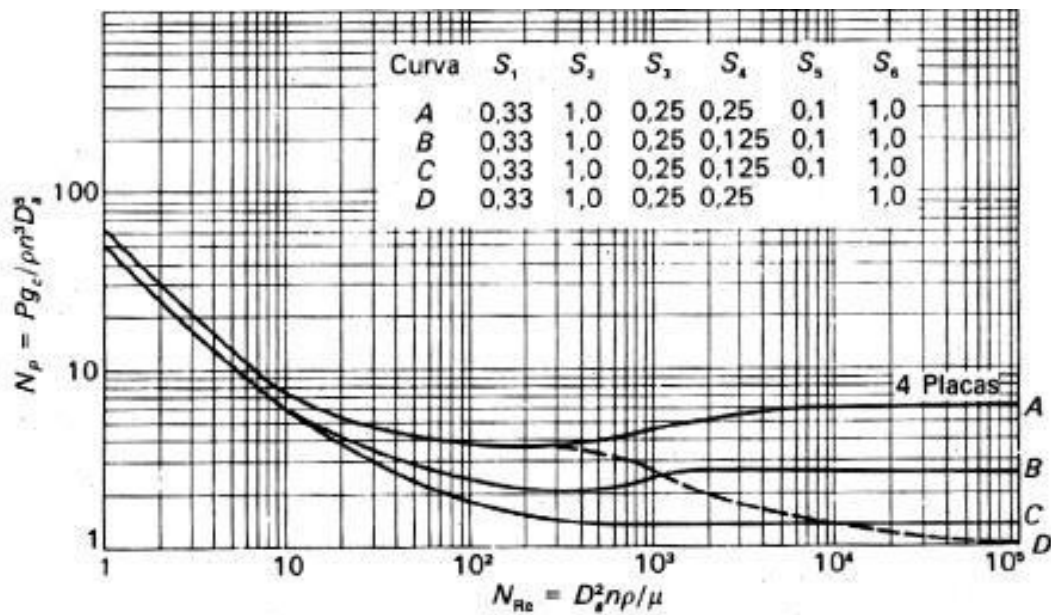


Figura 3. Número de potencia en función del número de Reynolds

8.6. Costos y análisis económico

8.6.1. Estimación de costos de compra de equipos

El costo de compra de los equipos está dado por la siguiente ecuación, que fue obtenida al relacionar el parámetro de diseño más común de cada equipo y su costo de compra.

$$C_{ei} = a + b \cdot S_{Diseño}^n$$

8.6.2. Estimación de costos de compra e instalación de equipos

El costo de comprar e instalación de equipos será calculado por el método factorial detallado.

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^n C_{ei} \cdot \left(1 + f_p + \frac{f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_l}{f_m} \right)_i$$

8.6.3. Estimación de capitales

Los demás costos y capitales de inversión serán calculados a partir del costo de compra e instalación de equipos, es decir los costos ISBL, y el costo de las materias primas que requiere el proceso de producción.

$$OSBL = 40\% \cdot ISBL$$

$$IC = 30\% \cdot (ISBL + OSBL)$$

$$CC = 15\% \cdot (ISBL + OSBL)$$

9. ANEXO B: CÁLCULOS Y RESULTADOS

9.1. Balance de masa

Tabla 1. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 1)

Compuesto:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Agua	0	0	12.445	18.047	0	0	0	0	0	0
Fenol	5.602	0	0	0	1.681	1.681	0	0	0	0.728
Hidróxido de Sodio	0	5.602	0	0	0	0	0	0	0	0
Fenolato de Sodio	0	0	0	0	5.602	0	5.602	5.602	0	0
Dióxido de Carbono	0	0	0	0	0	0	0	0	5.602	0.728
Total:	5.602	5.602	12.445	18.047	7.283	1.681	5.602	5.602	5.602	1.457

Tabla 2. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 2)

Compuesto:	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Agua	0	0	0	42.324	42.324	42.324	9.736	52.060	51.539
Fenol	0	0.728	0	0	0	0	0	0	0
Salicilato de Sodio	0	0	4.874	0	4.874	4.874	0	0	0
Sulfato de Sodio	0	0	0	0	0	0	0	2.413	2.413
Dióxido de Carbono	0.728	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido	0	0	0	0	0	0	2.681	0.268	0.268

Sulfúrico									
Ácido Salicílico	0	0	0	0	0	0	0	4.874	0.244
Total:	0.728	0.728	4.874	42.324	47.198	47.198	12.417	59.614	54.463

Tabla 3. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 3)

Compuesto:	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Agua	0.521	0.521	0	0	0	0	2.315	61.011	63.326
Ácido Salicílico	4.630	0	4.630	0	0	4.630	0	0	0
Óxido de Calcio	0	0	0	2.315	0	0	0	0	0
Anhídrido Acético	0	0	0	0	4.630	0	0	0	0
Acetato de Calcio	0	0	0	0	0	0	2.315	0	2.315
Ácido Acetilsalicílico	0	0	0	0	0	0	4.630	0	4.630
Total:	5.151	0.521	4.630	2.315	4.630	4.630	9.261	61.011	70.272

Tabla 4. Balance de masa en kilomoles por ciclo (Parte 4)

Compuesto:	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Agua	63.010	63.010	0	0.317	0.317	0	0	0	0
Acetato de Calcio	2.315	0	2.315	0	0	0	0	0	0
Ácido Acetilsalicílico	0	0	0	4.630	0	4.630	4.630	0.003	4.627
Total:	65.325	63.010	2.315	4.947	0.317	4.630	4.630	0.003	4.627

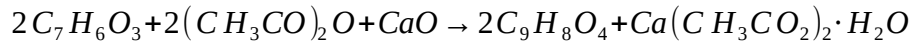
9.2. Dimensionamiento de equipos

9.2.1. Tanques, mezcladores y reactores

Como ejemplo del proceso de diseño se tomó el equipo R-301, ya que es uno de los equipos principales más característicos de este proceso de producción. Posteriormente, los siguientes equipos dentro de esta categoría serán diseñados siguiendo la misma lógica.

9.2.1.1. Reactor de acetilación (R-301)

En este equipo ocurre la reacción entre el ácido acetilsalicílico y el anhídrido acético, en presencia de óxido de calcio para neutralizar el ácido acético producido, siguiendo la siguiente ecuación química, con una entalpía de -10.68 kilojoules por mol:



A este equipo ingresan las corrientes 23, 24 y 25 y se obtiene una conversión muy cercana al 100% con respecto al ácido salicílico. Sin embargo, dado que este reactor tipo mezclador opera de forma discontinua se va a calcular el volumen con las densidades de las corrientes de entrada, considerando que el volumen de la reacción se triplica al final de la misma.

$$V = 3 \cdot \left(\frac{m_{\text{Ácido Salicílico}}}{\rho_{\text{Ácido Salicílico}}} + \frac{m_{\text{Anhídrido Acético}}}{\rho_{\text{Anhídrido Acético}}} + \frac{m_{\text{CaO}}}{\rho_{\text{CaO}}} \right)$$

$$V = 3 \cdot \left(\frac{639.499}{1440} + \frac{472.671}{1082} + \frac{129.818}{3340} \right)$$

$$V = 2.759 m^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 20%, el volumen será de 3.311 m³.

Para el cálculo de presión que deberá soportar el equipo se utilizará la densidad promedio de la mezcla de sustancias en el interior del equipo y la altura de la parte cilíndrica y el porcentaje de ocupación del mismo.

$$P_{\text{Operación}} = P_{\text{atm}} + O_{\%} \cdot \bar{\rho} \cdot g \cdot h$$

$$P_{\text{Operación}} = 1 + 0.000009869 \cdot (0.8 \cdot 1350.21 \cdot 9.81 \cdot 2.117)$$

$$P_{Operación} = 1.312$$

Tabla 5. Especificaciones de diseño y operación del R-301

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Toriesférico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	2.117
Diámetro Interno [m]	1.411
Presión Operación [atm]	1.312
Presión de Diseño [atm]	1.443
Máximo Estrés Permisible [atm]	1193.254
Temperatura Operación [°C]	85
Temperatura de Diseño [°C]	100
Espesor Pared Cilindro [mm]	4.723
Altura Fondo Toriesférico [m]	0.295
Radio Mayor [m]	1.411
Radio Menor [m]	0.141
Espesor Fondo Toriesférico [mm]	5.279
Altura Total [m]	2.718
Volumen [m ³]	3.979
Masa Equipo [kg]	536.099
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	69.34

En este equipo se requiere un agitador de tipo ancla y se requieren condiciones de agitación severas, por lo que se lo diseñará para operar a 120 rpm.

$$\Re = \frac{1.350 \cdot 21^2 \cdot 2 \cdot 1288}{0.03}$$

$$\Re = 154286$$

$$\dot{W} = 1 \cdot 2^3 \cdot 1.340^5 \cdot 1288$$

$$\dot{W} = 44.592 \text{ kW}$$

Tabla 6. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-301

Tipo de Equipo: Agitador tipo Ancla	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Agitador [m]	1.411
Diámetro Externo Agitador [m]	1.340
Espesor Agitador [mm]	26.809
Ancho Palas Agitador [m]	0.134
Largo Palas Agitador [m]	0.626
Distancia entre Agitador y Fondo [m]	0.282
Agitación [rpm]	120
Potencia de Agitación [kW]	44.592
Potencia Real de Agitación [kW]	77.293

Para la chaqueta de calentamiento de este equipo se estima un tiempo de suministro de corriente de energía de 30 minutos.

Tabla 7. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-301

Tipo de Equipo: Chaqueta de calentamiento con Tubería	
Material: Acero Inoxidable	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Calor [kW]	-54.943
Temperatura Inicial Flujo Calor [°C]	25
Temperatura Final Flujo Calor [°C]	30
Temperatura Inicial [°C]	90
Temperatura Final [°C]	80
Coeficiente Global [kW/m².°C]	0.046
Área de Contacto [m²]	19.000
Flujo de Calor [kg/h]	9450.244
Diámetro Interno Tubería [mm]	67.26

Diámetro Externo Tubería [mm]	73.00
Longitud Tubería [m]	89.917
Espiras [-]	20
Espacio entre Espiras [mm]	33.68

9.2.1.2. *Tanque de almacenamiento de fenol (T-101)*

En este equipo se almacena el fenol, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{\text{Fenol}}}{\rho_{\text{Fenol}}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 527.197}{1070}$$

$$V = 13.796 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos está alrededor del 10%, el volumen será de 15.176 m³.

Tabla 8. Especificaciones de diseño y operación del T-101

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	3.516
Diámetro Interno [m]	2.344
Presión Operación [atm]	1.372
Presión de Diseño [atm]	1.509
Máximo Estrés Permisible [atm]	1121.398
Temperatura Operación [°C]	45
Temperatura de Diseño [°C]	60
Espesor Cilindro [mm]	5.686
Espesor Fondo [mm]	5

Angulo Ápice [°]	60
Altura Fondo Cónico [m]	0.677
Espesor Fondo Cónico [mm]	5.746
Altura Total [m]	4.201
Volumen [m³]	16.150
Masa Equipo [kg]	1523.518
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.42

El fenol requiere estar a al menos 43°C para pasar de sólido a líquido, por lo que este tanque debe estar a una temperatura mayor a este punto, en este caso un máximo de 60°C y un mínimo de 45°C. Para esta chaqueta se estima un tiempo de suministro de corriente de energía de 30 minutos.

Tabla 9. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del T-101

Tipo de Equipo: Chaqueta de calentamiento con Tubería	
Material: Acero Inoxidable	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Calor [kW]	175.908
Temperatura Inicial Flujo Calor [°C]	95
Temperatura Final Flujo Calor [°C]	85
Temperatura Inicial [°C]	45
Temperatura Final [°C]	60
Coefficiente Global [kW/m²·°C]	0.167
Área de Contacto [m²]	35.352
Flujo de Calor [kg/h]	15128.262
Diámetro Interno Tubería [mm]	77.92
Diámetro Externo Tubería [mm]	88.90
Longitud Tubería [m]	138.117
Espiras [-]	19
Espacio entre Espiras [mm]	105.101

9.2.1.3. Tanque de almacenamiento de agua (T-102)

Dado que este es un equipo en el que se almacena el agua que será suministrada a la planta y al proceso en sí, se va a calcular el volumen con la densidad del fluido que va a albergar. Ya que el tanque puede ser llenado fácilmente para cada ciclo de producción no se lo diseñará para suplir la demanda de agua de una semana, pero sí para suplir agua para todo un día de producción.

$$V = \frac{4 \cdot m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 224.206}{998.28}$$

$$V = 0.898 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 0.988 m^3 .

Tabla 10. Especificaciones de diseño y operación del T-102

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 304	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.415
Diámetro Interno [m]	0.943
Presión Operación [atm]	1.140
Presión de Diseño [atm]	1.254
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Cilindro [mm]	2.424
Espesor Fondo [mm]	5
Angulo Ápice [°]	30

Altura Fondo Cónico [m]	0.272
Espesor Fondo Cónico [mm]	2.439
Altura Total [m]	1.695
Volumen [m³]	1.051
Masa Equipo [kg]	130.964
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.4. *Tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico al 60% (T-103)*

En este equipo se almacena el ácido sulfúrico, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{H_2SO_4(60\%)}}{\rho_{H_2SO_4(60\%)}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 262.903}{1377.00}$$

$$V = 5.346 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 5.881 m³.

Tabla 11. Especificaciones de diseño y operación del T-103

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	2.564
Diámetro Interno [m]	1.709
Presión Operación [atm]	1.349
Presión de Diseño [atm]	1.484
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919

Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Cilindro [mm]	4.768
Espesor Fondo [mm]	5
Angulo Ápice [°]	30
Altura Fondo Cónico [m]	0.493
Espesor Fondo Cónico [mm]	4.795
Altura Total [m]	3.065
Volumen [m³]	6.258
Masa Equipo [kg]	703.747
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.5. *Tanque de almacenamiento de anhídrido acético (T-104)*

En este equipo se almacena el anhídrido acético, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{\text{Anhídrido Acético}}}{\rho_{\text{Anhídrido Acético}}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 472.679}{1080}$$

$$V = 12.255 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 13.481 m³.

Tabla 12. Especificaciones de diseño y operación del T-104

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad

Altura Cilindro [m]	3.380
Diámetro Interno [m]	2.253
Presión Operación [atm]	1.367
Presión de Diseño [atm]	1.504
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Cilindro [mm]	4.768
Espesor Fondo [mm]	5
Angulo Ápice [°]	30
Altura Fondo Cónico [m]	0.651
Espesor Fondo Cónico [mm]	4.795
Altura Total [m]	4.111
Volumen [m³]	14.346
Masa Equipo [kg]	1222.098
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.6. *Tanque de almacenamiento de óxido de calcio (T-105)*

En este equipo se almacena el óxido de calcio, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{CaO}}{\rho_{CaO}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 129.818}{3340}$$

$$V = 1.088 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 1.197 m³.

Tabla 13. Especificaciones de diseño y operación del T-105

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.508
Diámetro Interno [m]	1.005
Presión Operación [atm]	1.500
Presión de Diseño [atm]	1.650
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Cilindro [mm]	4.452
Espesor Fondo [mm]	5
Angulo Ápice [°]	30
Altura Fondo Cónico [m]	0.290
Espesor Fondo Cónico [mm]	4.468
Altura Total [m]	1.806
Volumen [m ³]	1.274
Masa Equipo [kg]	231.429
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.7. *Tanque de almacenamiento de hidróxido de sodio (T-106)*

En este equipo se almacena el hidróxido de sodio, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{Na(OH)}}{\rho_{Na(OH)}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 224.060}{2130}$$

$$V = 2.945m^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 3.240 m³.

Tabla 14. Especificaciones de diseño y operación del T-106

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	2.102
Diámetro Interno [m]	1.401
Presión Operación [atm]	1.443
Presión de Diseño [atm]	1.587
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Cilindro [mm]	2.629
Espesor Fondo [mm]	5
Angulo Ápice [°]	30
Altura Fondo Cónico [m]	0.404
Espesor Fondo Cónico [mm]	2.652
Altura Total [m]	2.514
Volumen [m³]	3.448
Masa Equipo [kg]	305.816
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.8. Tanque de almacenamiento de dióxido de carbono (T-107)

En este equipo se almacena el dióxido de carbono, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato que se van a producir aproximadamente 4 lotes por día.

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}$$

$$V = \frac{4 \cdot 7 \cdot 246.541}{1075.26}$$

$$V = 6.420 m^3$$

Tabla 15. Especificaciones de diseño y operación del T-107

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Elíptico	
Material: Acero 304	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	3.711
Diámetro Interno [m]	1.484
Presión Operación [atm]	21.6
Presión de Diseño [atm]	23.76
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Pared Cilindro [mm]	16.566
Altura Fondo Elíptico [m]	0.669
Radio Mayor [m]	1.187
Radio Menor [m]	0.223
Espesor Fondo Elíptico [mm]	16.424
Altura Total [m]	5.082
Volumen [m ³]	7.275
Masa Equipo [kg]	3228.888
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	100

9.2.1.9. Tanque de almacenamiento de fenolato de sodio (T-201)

Dado que este es un equipo intermedio en el que la corriente de fenolato de sodio se almacena hasta ser evaluada y hasta que su temperatura descienda unos cuantos grados se va a calcular el volumen con la densidad de la corriente de entrada.

$$V = \frac{m_{\text{Fenolato de Sodio}}}{\rho_{\text{Fenolato de Sodio}}}$$

$$V = \frac{650.328}{898}$$

$$V = 0.724 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 0.796 m^3 .

Tabla 16. Especificaciones de diseño y operación del T-201

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.185
Diámetro Interno [m]	0.877
Presión Operación [atm]	1.107
Presión de Diseño [atm]	1.218
Máximo Estrés Permisible [atm]	1109.149
Temperatura Operación [°C]	192
Temperatura de Diseño [°C]	200
Espesor Pared Cilindro [mm]	4.542
Espesor Fondo [mm]	5
Altura Fondo Cónico [m]	0.253
Angulo Ápice [°]	30
Espesor Fondo Cónico [mm]	4.561
Altura Total [m]	1.446
Volumen [m³]	0.847
Masa Equipo [kg]	179.320
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.10. Tanque de precipitación de ácido salicílico (T-202)

Dado que este es un equipo intermedio en el que se precipita ácido salicílico a partir de la corriente de salicilato de sodio y ácido sulfúrico se va a calcular el volumen con la densidad de la corriente de entrada.

$$V = \frac{m_{\text{Salicilato de Sodio}}}{\rho_{\text{Salicilato de Sodio}}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{SO}_4(60\%)}}{\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4(60\%)}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$V = \frac{780.324}{320.00} + \frac{438.301}{1377.00} + \frac{762.490}{998.28}$$

$$V = 3.521 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 20%, el volumen será de 4.225 m³.

Tabla 17. Especificaciones de diseño y operación del T-202

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Toriesférico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	2.296
Diámetro Interno [m]	1.531
Presión Operación [atm]	1.219
Presión de Diseño [atm]	1.340
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Pared Cilindro [mm]	4.688
Altura Fondo Toriesférico [m]	0.317
Radio Mayor [m]	1.531
Radio Menor [m]	0.153
Espesor Fondo Toriesférico [mm]	5.217
Altura Total [m]	2.940
Volumen [m ³]	5.049

Masa Equipo [kg]	612.195
Eficiencia de Soldadura [%]	90

En este equipo se requiere un agitador de tipo ancla y se requieren condiciones de agitación severas.

$$\Re = \frac{0.510^2 \cdot 2 \cdot 1094}{0.00023}$$

$$\Re = 2477578$$

$$\dot{W} = 1 \cdot 2^3 \cdot 0.510^5 \cdot 1094$$

$$\dot{W} = 0.303 \text{ kW}$$

Tabla 18. Especificaciones de diseño y operación del agitador del T-202

Tipo de Equipo: Agitador tipo Turbina	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Agitador [m]	1.577
Diámetro Externo Agitador [m]	0.510
Espesor Agitador [mm]	10.207
Altura Palas Agitador [m]	0.153
Largo Palas Agitador [m]	0.238
Distancia entre Agitador y Fondo [m]	0.510
Agitación [rpm]	120
Potencia de Agitación [kW]	0.303
Potencia Real de Agitación [kW]	0.525

9.2.1.11. Tanque de almacenamiento de ácido salicílico (T-203)

Dado que este es un equipo intermedio en el que el ácido salicílico, recuperado de la precipitación y ya seco, se almacena hasta ser evaluado se va a calcular el volumen con la densidad de la corriente de entrada.

$$V = \frac{m_{\text{Acido Salicilico}}}{\rho_{\text{Acido Salicilico}}}$$

$$V = \frac{639.499}{1440}$$

$$V = 0.444 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 0.488 m^3 .

Tabla 19. Especificaciones de diseño y operación del T-203

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.118
Diámetro Interno [m]	0.745
Presión Operación [atm]	1.160
Presión de Diseño [atm]	1.276
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Pared Cilindro [mm]	2.335
Espesor Fondo [mm]	5
Altura Fondo Cónico [m]	0.215
Angulo Ápice [°]	30
Espesor Fondo Cónico [mm]	2.347
Altura Total [m]	1.341
Volumen [m³]	0.519
Masa Equipo [kg]	80.277
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	85.43

9.2.1.12. Tanque de almacenamiento de agua (T-301)

En este equipo se almacena el agua, para la producción de una semana, que será transportado a la planta y suministrado al proceso en sí, tomando como dato su capacidad será un 20% mayor a la del taque T-102.

$$V = 1.186 \text{ m}^3$$

Tabla 20. Especificaciones de diseño y operación del T-301

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Toriesférico	
Material: Acero 304	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.503
Diámetro Interno [m]	1.002
Presión Operación [atm]	1.154
Presión de Diseño [atm]	1.269
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Pared Cilindro [mm]	2.450
Espesor Fondo [mm]	5
Altura Fondo Toriesférico [m]	0.206
Radio Mayor [m]	1.002
Radio Menor [m]	0.100
Espesor Fondo Toriesférico [mm]	2.797
Altura Total [m]	1.921
Volumen [m ³]	1.300
Masa Equipo [kg]	167.091
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	82.92

9.2.1.13. *Tanque de almacenamiento de fenol recuperado (T-501)*

En este equipo se almacena el fenol no reaccionado del reactor de carboxilación al haber realizado 4 ciclos por día en una semana, por lo que su capacidad será el 13% del taque T-101.

$$V = 1.973 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 10%, el volumen será de 2.170 m³.

Tabla 21. Especificaciones de diseño y operación del T-501

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Cónico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.839
Diámetro Interno [m]	1.226
Presión Operación [atm]	1.195
Presión de Diseño [atm]	1.314
Máximo Estrés Permisible [atm]	1121.398
Temperatura Operación [°C]	45
Temperatura de Diseño [°C]	60
Espesor Pared Cilindro [mm]	4.551
Espesor Fondo [mm]	5
Altura Fondo Cónico [m]	0.354
Angulo Ápice [°]	30
Espesor Fondo Cónico [mm]	4.570
Altura Total [m]	2.201
Volumen [m³]	2.309
Masa Equipo [kg]	349.594
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación por Ciclo [%]	85.43

El diseño de esta chaqueta sigue los mismos parámetros de diseño de la chaqueta del tanque T-101. Para esta chaqueta se estima un tiempo de suministro de corriente de energía de 45 minutos.

Tabla 22. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del T-501

Tipo de Equipo: Chaqueta de calentamiento con Tubería	
Material: Acero Inoxidable	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Calor [kW]	15.245
Temperatura Inicial Flujo Calor [°C]	95
Temperatura Final Flujo Calor [°C]	85
Temperatura Inicial [°C]	45
Temperatura Final [°C]	60
Coefficiente Global [kW/m²·°C]	0.179
Área de Contacto [m²]	2.867
Flujo de Calor [kg/h]	1311.116
Diámetro Interno Tubería [mm]	26.64
Diámetro Externo Tubería [mm]	33.40
Longitud Tubería [m]	34.255
Espiras [-]	9
Espacio entre Espiras [mm]	197.256

9.2.1.14. Tanque mezclador de salicilato de sodio (M-201)

En equipo se solubiliza el salicilato de sodio, obtenido de la reacción de carboxilación, en agua. A este equipo las corrientes 13 y 14, y dado que es un proceso que se hace de forma discontinua se va a calcular el volumen con las densidades de las corrientes de entrada.

$$V = \frac{m_{\text{Ácido Acetilsalicílico}}}{\rho_{\text{Ácido Acetilsalicílico}}} + \frac{m_{\text{Acetato de Calcio}}}{\rho_{\text{Acetato de Calcio}}} + \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$V = \frac{834.130}{1400} + \frac{366.163}{1509} + \frac{1140.866}{998.28}$$

$$V = 1.981 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 20%, el volumen será de 2.377 m³.

Tabla 23. Especificaciones de diseño y operación del M-201

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Toriesférico	
Material: Acero 304	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.895
Diámetro Interno [m]	1.264
Presión Operación [atm]	1.272
Presión de Diseño [atm]	1.399
Máximo Estrés Permisible [atm]	1360.919
Temperatura Operación [°C]	25
Temperatura de Diseño [°C]	35
Espesor Pared Cilindro [mm]	2.568
Altura Fondo Toriesférico [m]	0.257
Radio Mayor [m]	1.264
Radio Menor [m]	0.126
Espesor Fondo Toriesférico [mm]	3.004
Altura Total [m]	2.415
Volumen [m³]	2.823
Masa Equipo [kg]	232.847
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	70.17

En este equipo se requiere un agitador de tipo ancla y se requieren condiciones de agitación severas.

$$\Re = \frac{0.421^2 \cdot 2 \cdot 1170}{0.00021}$$

$$\Re = 1978100$$

$$\dot{W} = 1 \cdot 2^3 \cdot 0.421^5 \cdot 1170$$

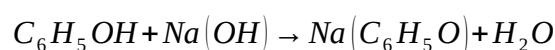
$$\dot{W} = 0.124 \text{ kW}$$

Tabla 24. Especificaciones de diseño y operación del agitador del M-201

Tipo de Equipo: Agitador tipo Turbina	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Agitador [m]	1.302
Diámetro Externo Agitador [m]	0.421
Espesor Agitador [mm]	8.427
Altura Palas Agitador [m]	0.126
Largo Palas Agitador [m]	0.197
Distancia entre Agitador y Fondo [m]	0.421
Agitación [rpm]	120
Potencia de Agitación [kW]	0.124
Potencia Real de Agitación [kW]	0.215

9.2.1.15. Reactor de neutralización (R-201)

En este equipo ocurre la reacción entre el fenol y la solución al 50% de hidróxido de sodio, siguiendo la siguiente ecuación química:



A este equipo ingresan las corrientes 1, 2 y 3 y se obtiene una conversión muy cercana al 100% con respecto al fenol. Para alcanzar dicha conversión se requiere un tiempo muy corto dado que se trata de una reacción de neutralización. Sin embargo, dado que este reactor tipo mezclador opera de forma discontinua se va a calcular el volumen con las densidades de las corrientes de entrada.

$$V = \frac{m_{Na(OH)50\%}}{\rho_{Na(OH)50\%}} + \frac{m_{Fenol}}{\rho_{Fenol}}$$

$$V = \frac{448.268}{1520} + \frac{527.197}{1070}$$

$$V = 0.788 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 20%, el volumen será de 0.946 m^3 .

Tabla 25. Especificaciones de diseño y operación del R-201

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Toriesférico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.394
Diámetro Interno [m]	0.929
Presión Operación [atm]	1.150
Presión de Diseño [atm]	1.265
Máximo Estrés Permisible [atm]	1112.415
Temperatura Operación [°C]	100
Temperatura de Diseño [°C]	130
Espesor Pared Cilindro [mm]	4.511
Altura Fondo Toriesférico [m]	0.2
Radio Mayor [m]	0.929
Radio Menor [m]	0.093
Espesor Fondo Toriesférico [mm]	4.904
Altura Total [m]	1.804
Volumen [m³]	1.147
Masa Equipo [kg]	225.321
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	68.70

En este equipo se requiere un agitador de tipo ancla y se requieren condiciones de agitación entre moderadas y severas.

$$\Re = \frac{0.883^2 \cdot 1 \cdot 1520}{0.079}$$

$$\Re = 14986$$

$$\dot{W} = 1.125 \cdot 1^3 \cdot 0.883^5 \cdot 1520$$

$$\dot{W} = 0.916 \text{ kW}$$

Tabla 26. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-201

Tipo de Equipo: Agitador tipo Ancla	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Agitador [m]	0.929
Diámetro Externo Agitador [m]	0.883
Espesor Agitador [mm]	17.651
Ancho Palas Agitador [m]	0.088
Largo Palas Agitador [m]	0.412
Distancia entre Agitador y Fondo [m]	0.186
Agitación [rpm]	60
Potencia de Agitación [kW]	0.916
Potencia Real de Agitación [kW]	1.587

Para esta chaqueta se estima un tiempo de suministro de corriente de energía de 20 minutos.

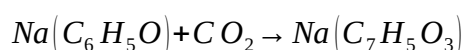
Tabla 27. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-201

Tipo de Equipo: Chaqueta de calentamiento con Tubería	
Material: Acero Inoxidable	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Calor [kW]	28.032
Temperatura Inicial Flujo Calor [°C]	130
Temperatura Final Flujo Calor [°C]	120
Temperatura Inicial [°C]	100
Temperatura Final [°C]	115
Coefficiente Global [kW/m ² ·°C]	0.428

Área de Contacto [m ²]	7.195
Flujo de Calor [kg/h]	2410.815
Diámetro Interno Tubería [mm]	35.08
Diámetro Externo Tubería [mm]	42.20
Longitud Tubería [m]	65.287
Espiras [-]	21
Espacio entre Espiras [mm]	3.052

9.2.1.16. Reactor de carboxilación (R-202)

En este equipo ocurre la reacción entre el fenolato de sodio y el dióxido de carbono, siguiendo la siguiente ecuación química, con una entalpía de -90.1 kilojoules por mol:



A este equipo ingresan las corrientes 8 y 9 y se obtiene una conversión del 87% con respecto al fenolato de sodio. Dado que este reactor tipo mezclador opera de forma discontinua se va a calcular el volumen con las densidades de las corrientes de entrada.

$$V = \frac{m_{\text{Fenolato de Sodio}}}{\rho_{\text{Fenolato de Sodio}}} + \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}$$

$$V = \frac{650.328}{898} + \frac{246.541}{298.68}$$

$$V = 1.550 \text{ m}^3$$

Dado que se tiene como factor de sobredimensionamiento para este tipo de equipos alrededor de un 20%, el volumen será de 1.860 m³.

Tabla 28. Especificaciones de diseño y operación del R-202

Tipo de Equipo: Tanque con Fondo Elíptico	
Material: Acero 316	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Cilindro [m]	1.747

Diámetro Interno [m]	1.164
Presión Operación [atm]	6
Presión de Diseño [atm]	6.6
Máximo Estrés Permisible [atm]	989.524
Temperatura Operación [°C]	192
Temperatura de Diseño [°C]	200
Espesor Pared Cilindro [mm]	8.334
Altura Fondo Elíptico [m]	0.058
Radio Mayor [m]	0.931
Radio Menor [m]	0.175
Espesor Fondo Elíptico [mm]	8.318
Altura Total [m]	1.880
Volumen [m³]	2.272
Masa Equipo [kg]	1827.567
Eficiencia de Soldadura [%]	90
Ocupación [%]	68.22

En este equipo se requiere un agitador de tipo ancla y se requieren condiciones de agitación entre moderadas y severas.

$$\Re = \frac{1.106^2 \cdot 1 \cdot 1209}{0.078}$$

$$\Re = 18953$$

$$\dot{W} = 1.0625 \cdot 1^3 \cdot 1.106^5 \cdot 1209$$

$$\dot{W} = 2.124 \text{ kW}$$

Tabla 29. Especificaciones de diseño y operación del agitador del R-202

Tipo de Equipo: Agitador tipo Ancla	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Altura Agitador [m]	1.164

Diámetro Externo Agitador [m]	1.106
Espesor Agitador [mm]	22.116
Ancho Palas Agitador [m]	0.111
Largo Palas Agitador [m]	0.516
Distancia entre Agitador y Fondo [m]	0.233
Agitación [rpm]	60
Potencia de Agitación [kW]	2.124
Potencia Real de Agitación [kW]	3.681

Para esta chaqueta se estima un tiempo de suministro de corriente de energía de 300 minutos.

Tabla 30. Especificaciones de diseño y operación de la chaqueta de calentamiento del R-202

Tipo de Equipo: Chaqueta de calentamiento con Tubería	
Material: Acero Inoxidable	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Calor [kW]	-22.504
Temperatura Inicial Flujo Calor [°C]	25
Temperatura Final Flujo Calor [°C]	50
Temperatura Inicial [°C]	200
Temperatura Final [°C]	192
Coeficiente Global [kW/m².°C]	0.046
Área de Contacto [m²]	3.025
Flujo de Calor [kg/h]	774,156
Diámetro Interno Tubería [mm]	20.96
Diámetro Externo Tubería [mm]	26.70
Longitud Tubería [m]	45.935
Espiras [-]	13
Espacio entre Espiras [mm]	123.275

9.2.2. Intercambiadores de calor

Por facilidad y dada la metodología para diseñar intercambiadores de calor, las dimensiones y requerimientos de este tipo de equipos será calculado utilizando el software de simulación

Aspen HYSYS. El siguiente equipo, el I-101, será utilizado como ejemplo de la metodología que se utilizó para el diseño de los intercambiadores de calor, los siguientes intercambiadores de calor serán diseñados siguiendo la misma metodología.

9.2.2.1. Calentador de agua (I-101)

En este equipo se calienta agua que será suministrada como fuente de calor al tanque T-101.

Para el diseño del equipo en Aspen HYSYS se empezó por escoger un paquete termodinámico en el panel de propiedades y en la carpeta de “*Fluid Packages*”, en este caso “*Extended NRTL*” (Figura 4), posteriormente se ingresó a la lista de componentes y se escogió agua y fenol como material (Figura 5).

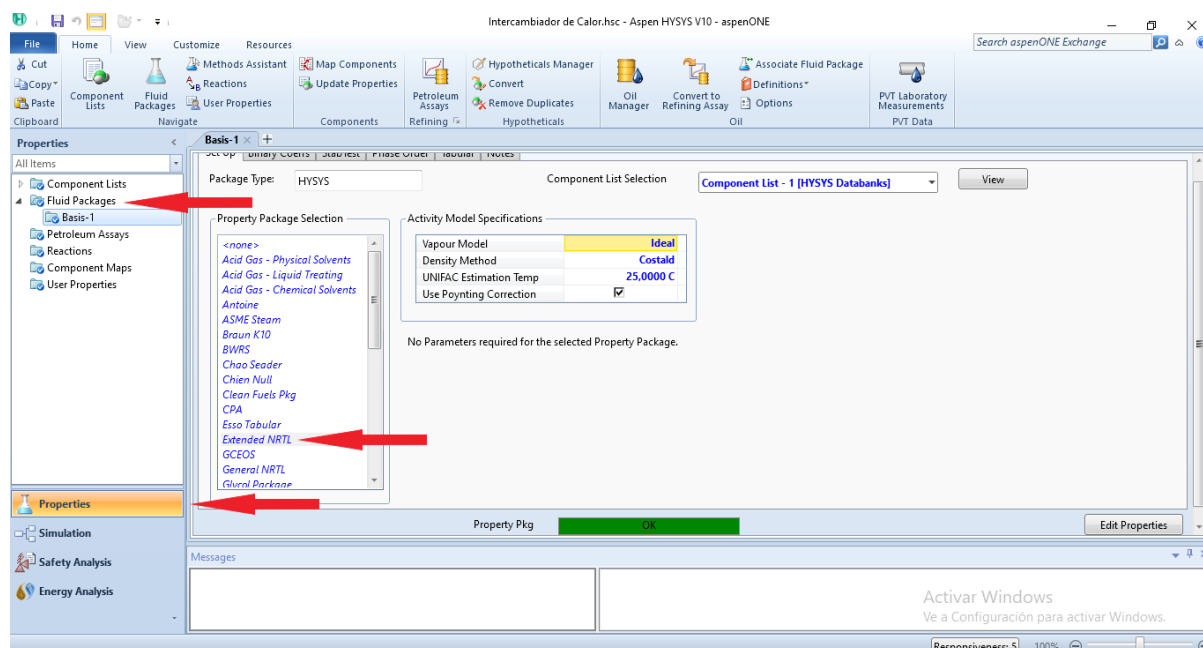


Figura 4. Selección de paquete termodinámico

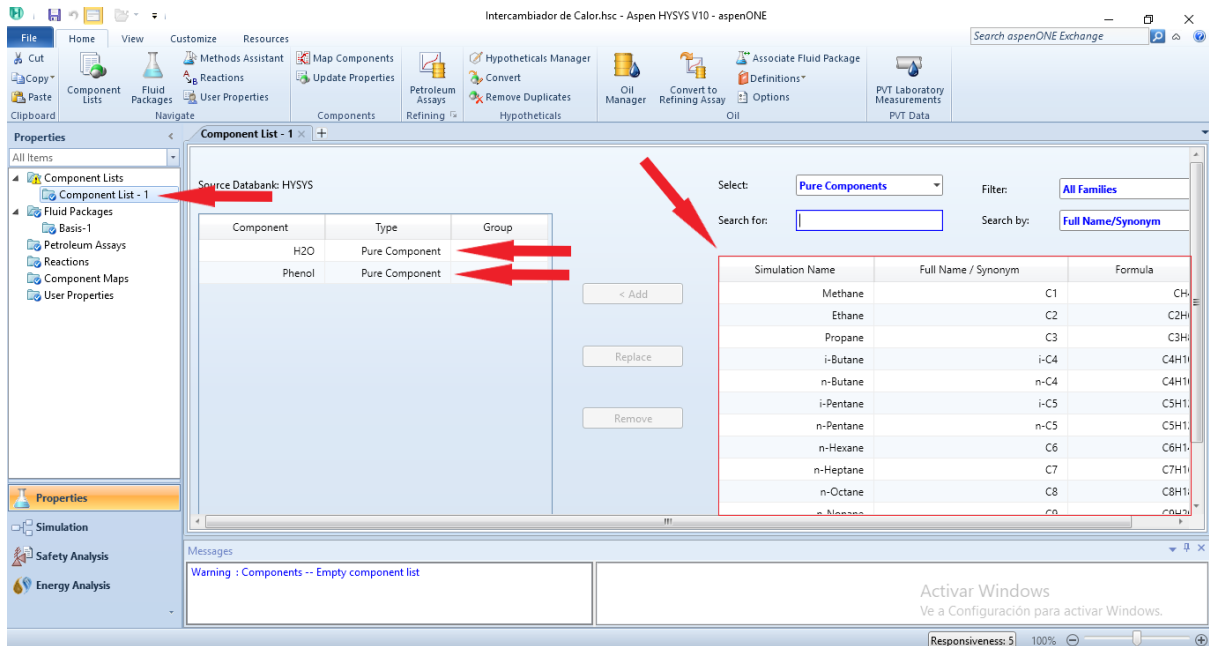


Figura 5. Selección de materiales

Finalmente, se ingresó a la pestaña de simulación y se seleccionó un intercambiador de calor de tubo y carcasa (Figura 6). Se dio clic en el equipo y se ingresó el flujo de corriente que va a ingresar, así como su temperatura y su presión inicial y de salida, además de la temperatura y presión de la corriente de energía (Figura 7) y se dejó que el programa resuelva las incógnitas faltantes, como el flujo de la corriente de energía, al dar clic en “Active” (Figura 8).

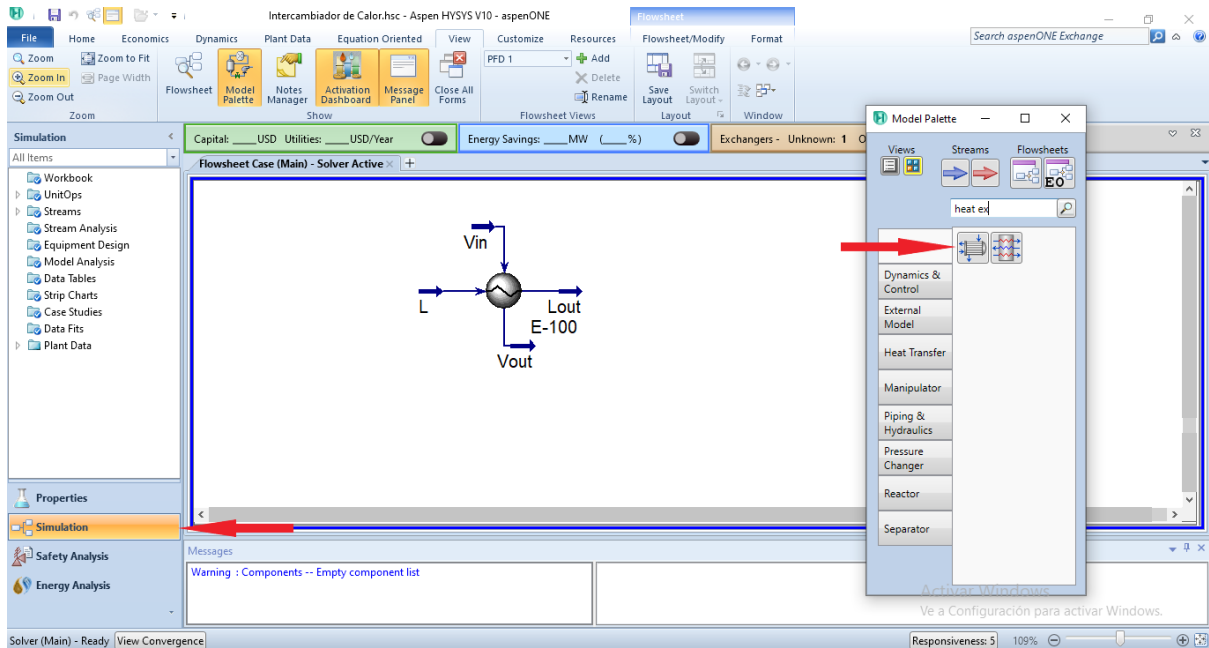


Figura 6. Selección de equipo

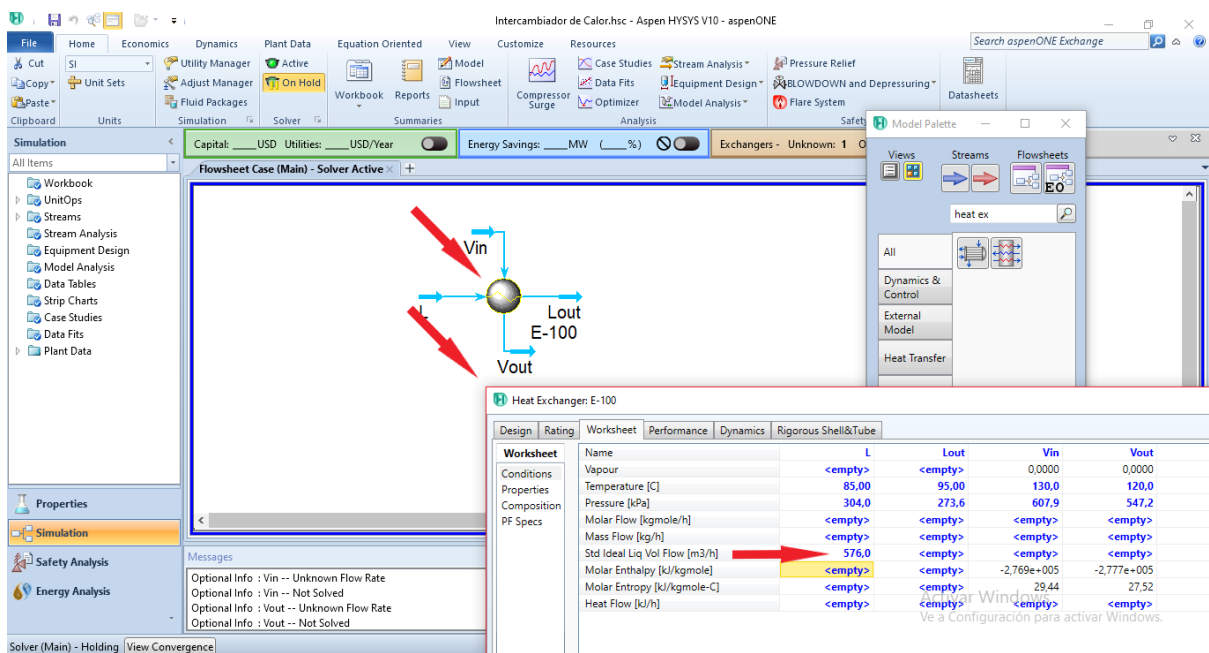


Figura 7. Ingreso de parámetros

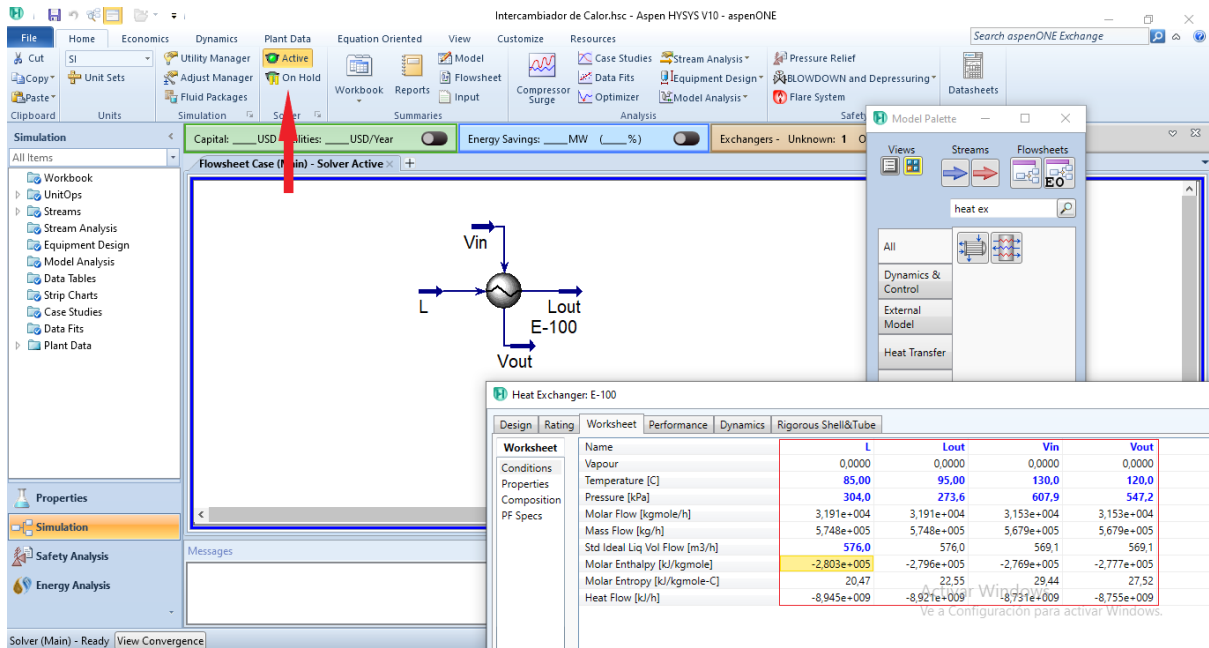


Figura 8. Resolución de incógnitas

Tabla 31. Especificaciones de diseño y operación del I-101

Tipo de Equipo: Intercambiador de calor de Tubos y Carcasa	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Flujo de Vapor [kg/h]	3210
Flujo de Agua [kg/h]	1512
Temperatura Ingreso Vapor [°C]	130
Temperatura Salida Vapor [°C]	120
Temperatura Ingreso Agua [°C]	85
Temperatura Salida Agua [°C]	95
Calor [kW]	17.600
Área de Contacto [m ²]	58.810
Coefficiente Global [kW/m ² .°C]	0.00867

9.2.2.2. Condensador de fenol (I-201)

En este equipo se calienta agua que será suministrada como fuente de calor al tanque T-101.

Tabla 32. Especificaciones de diseño y operación del I-201

Tipo de Equipo: Intercambiador de calor de Tubos y Carcasa	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Flujo de Agua [kg/h]	14.69
Flujo de fenol [kg/h]	16.680
Temperatura Ingreso Agua [°C]	25
Temperatura Salida Agua [°C]	70
Temperatura Ingreso fenol [°C]	150
Temperatura Salida fenol [°C]	70
Calor [kW]	0.774
Área de Contacto [m²]	58.810
Coefficiente Global [kW/m².°C]	0.000269

9.2.2.3. Condensador de agua (I-301)

En este equipo se condensa el vapor de Agua proveniente del evaporador E-301.

Tabla 33. Especificaciones de diseño y operación del I-301

Tipo de Equipo: Intercambiador de calor de Tubos y Carcasa	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Flujo de Vapor [kg/h]	504
Flujo de Agua [kg/h]	860.6
Temperatura Ingreso Vapor [°C]	100
Temperatura Salida Vapor [°C]	40
Temperatura Ingreso Agua [°C]	25
Temperatura Salida Agua [°C]	60
Calor [kW]	35.306
Área de Contacto [m²]	58.810
Coefficiente Global [kW/m².°C]	0.118

9.2.2.4. Enfriador de agua (I-302)

En este equipo se enfría el Agua proveniente del tanque T-301.

Tabla 34. Especificaciones de diseño y operación del I-302

Tipo de Equipo: Intercambiador de calor de Tubos y Carcasa	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Flujo de Refrigerante [kg/h]	9241
Flujo de Agua [kg/h]	5220
Temperatura Ingreso Refrigerante [°C]	-5
Temperatura Salida Refrigerante [°C]	15
Temperatura Ingreso Agua [°C]	40
Temperatura Salida Agua [°C]	5
Calor [kW]	213.083
Área de Contacto [m²]	58.810
Coefficiente Global [kW/m²·°C]	1.359

9.2.2.5. Calentador de agua (I-501)

En este equipo se calienta el agua que será suministrada como fuente de calor al tanque T-501.

Tabla 35. Especificaciones de diseño y operación del I-501

Tipo de Equipo: Intercambiador de calor de Tubos y Carcasa	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Flujo de Vapor [kg/h]	569.1
Flujo de Agua [kg/h]	576
Temperatura Ingreso Vapor [°C]	130
Temperatura Salida Vapor [°C]	120
Temperatura Ingreso Agua [°C]	85
Temperatura Salida Agua [°C]	95
Calor [kW]	6.703
Área de Contacto [m²]	58.810
Coefficiente Global [W/m²·°C]	0.00330

9.2.3. Bombas y compresores

Las bombas requeridas en este proceso serán diseñadas conociendo el tiempo requerido para vaciar o llenar un tanque, o el flujo de materia de un punto a otro. Con estos parámetros se calculará la potencia requerida de las bombas utilizando el software de simulación Aspen HYSYS.

Para el diseño de estos equipos en Aspen HYSYS se empezó por escoger un paquete termodinámico en el panel de propiedades y en la carpeta de “*Fluid Packages*”, en este caso “*Extended NRTL*” (Figura 4), posteriormente se ingresó a la lista de componentes y se escogió agua, fenol, ácido sulfúrico, anhídrido acético y ácido acetilsalicílico, como materiales del programa y se creó materiales como el salicilato de sodio y el acetato de calcio ingresando su densidad y masa molar (Figura 9).

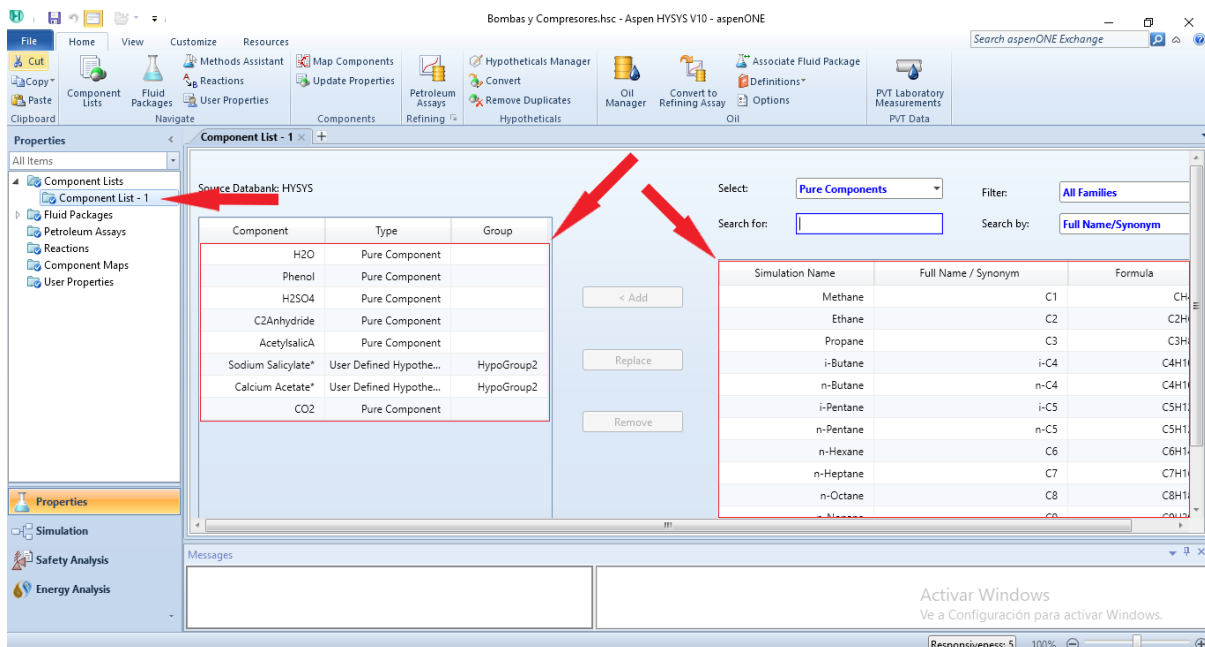


Figura 9. Selección de materiales

Finalmente, se ingresó a la pestaña de simulación y se seleccionó una bomba y un compresor (Figura 10). Se dio clic en el equipo (bomba o compresor) y se ingresó el flujo de corriente que va a ingresar, así como su temperatura y su presión inicial y de salida, además de la temperatura y presión de la corriente de energía (Figura 11) y se dejó que el programa resuelva las incógnitas faltantes, como el requerimiento de potencia, al dar clic en “Active” (Figura 12).

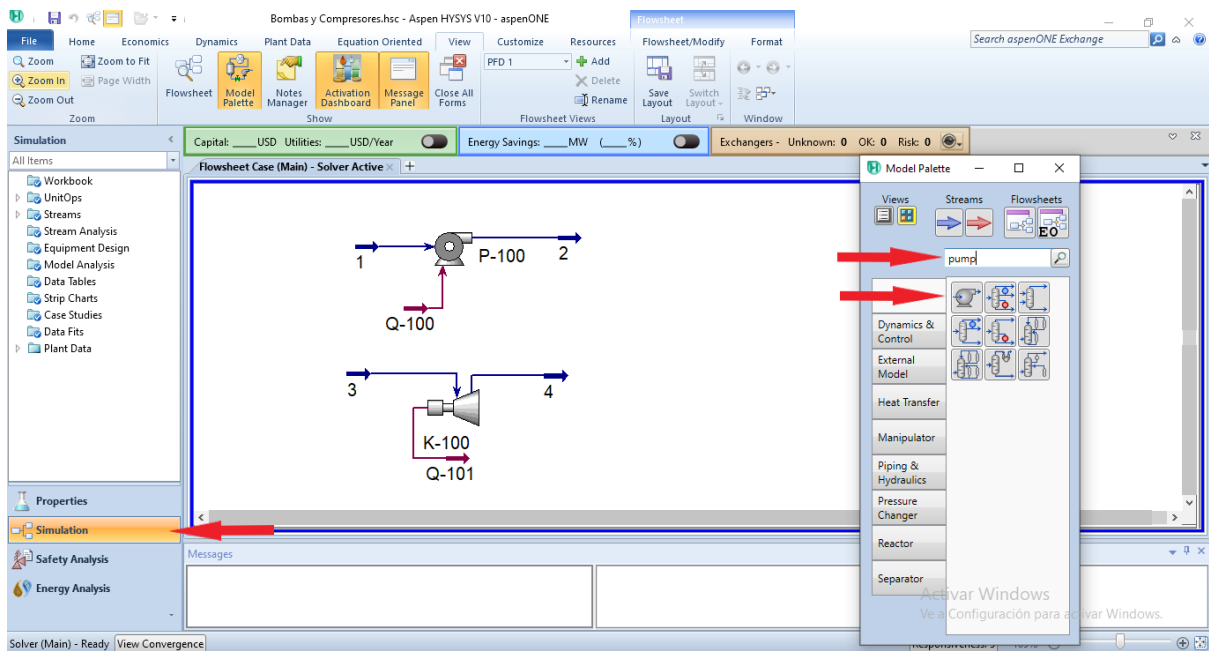


Figura 10. Selección de equipos

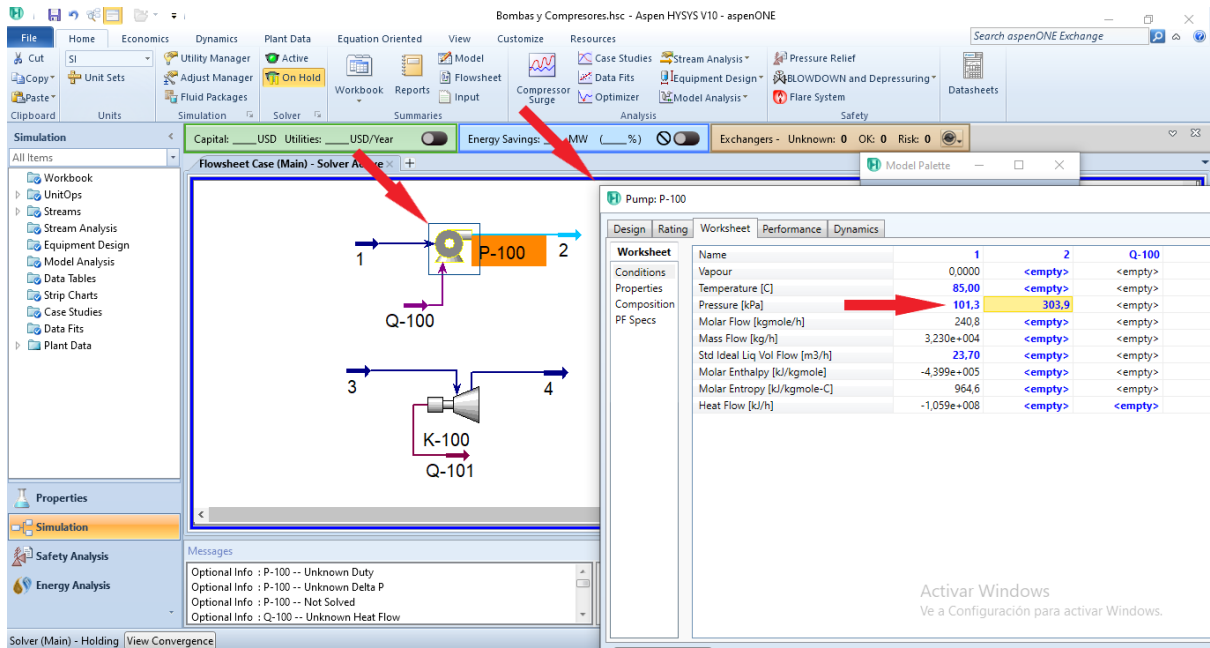


Figura 11. Ingreso de parámetros

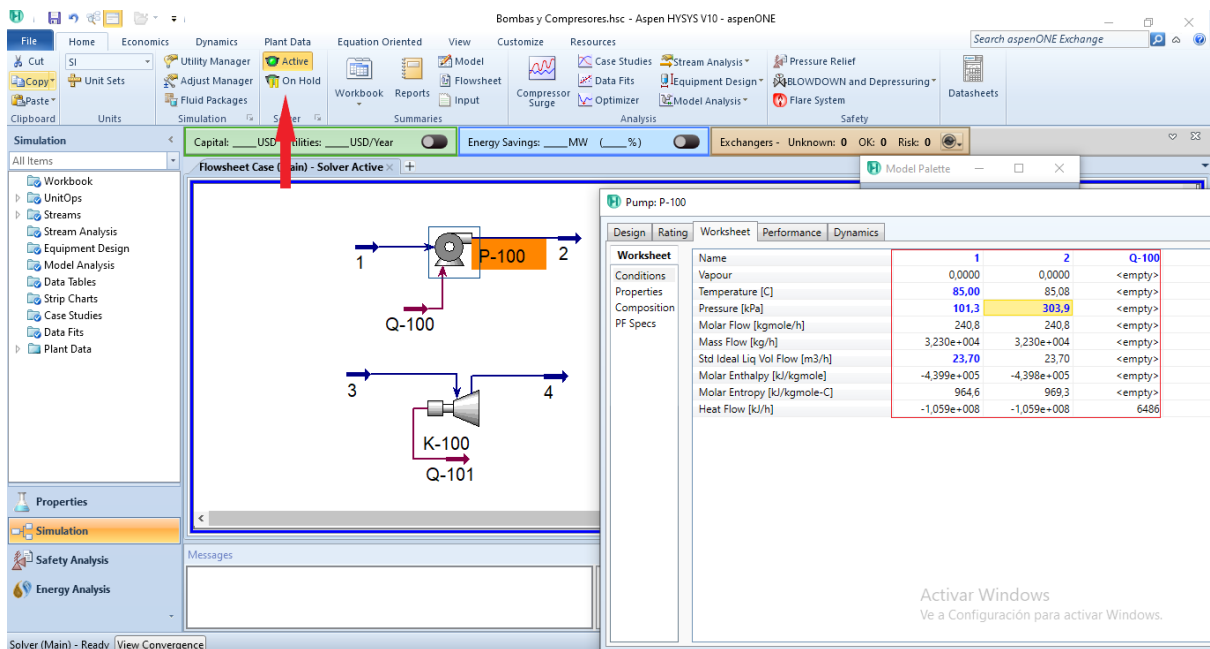


Figura 12. Resolución de incógnitas

Tabla 36. Especificaciones de diseño y operación de las bombas

Bomba	Flujo	Presión de Salida	Cabeza Presión	NPSH _{Disponible}	Potencia
-------	-------	-------------------	----------------	----------------------------	----------

	[m ³ /h]	[atm]	[m]	[m]	[kW]
B-101A	52.8	2.74	2673.0	12.56	541.30
B-101B/C	7.5	1.38	390.4	9.78	11.23
B-102A	33.8	2.96	1352.0	7.72	229.00
B-102B/C	4.6	1.40	27.8	6.58	0.64
B-103A	49.6	2.59	2494.0	12.13	488.1
B-103B/C	6.4	1.33	317.7	9.60	8.03
B-201	3.5	2.96	2004.0	9.80	26.90
B-202	18.0	2.96	4214.0	19.21	132.7
B-203	17.8	1.92	1978.0	19.21	62.29
B-301	23.7	1.55	422.5	6.81	49.57
B-302	9.3	1.95	1036.0	0.10	34.91

Tabla 37. Especificaciones de diseño y operación de los compresores

Compresor	Flujo [m ³ /h]	Presión de Salida [atm]	Eficiencia Isoentrópica [%]	Eficiencia Politrópica [%]	Potencia [kW]
C-107A	26.4	6.0	75.00	72.45	459.60
C-107B	3.5	5.4	75.00	74.81	60.79

9.2.4. Equipos no diseñados

Dada la complejidad de estos equipos, se optó por simplemente buscar modelos ya existentes de estos y acoplarlos al proceso propuesto.

9.2.4.1. Filtro de fenolato de sodio (F-202)

En este equipo se separa el fenolato de sodio del excedente de fenol que salen del Reactor de Neutralización. Este excedente de fenol se recircula al Reactor de Neutralización, mientras que el fenolato de sodio pasa a un tanque intermedio de almacenaje.

Tabla 38. Especificaciones de diseño y operación del F-202

Tipo de Equipo: Filtro Rotatorio de Banda	
Parámetro [unidades]	Cantidad

Capacidad de Operación [m³/h]	1.334
Diámetro Interno [m]	1.214
Longitud [m]	0.694
Área de Contacto [m²]	2.647
Volumen [m³]	0.802

9.2.4.2. Columna de adsorción (CA-201)

A este equipo ingresa la corriente de salida del reactor de carboxilación con la finalidad de remover impurezas de la corriente y remover cualquier coloración que pueda tener.

Tabla 39. Especificaciones de diseño y operación del CA-201

Tipo de Equipo: Columna de Adsorción de Carbón Activado	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [m³/h]	3.203
Diámetro Interno [m]	0.711
Longitud [m]	1.779
Volumen [m³]	0.707
Masa de Carbón Activado [kg]	150
Masa de Partículas de Zinc [kg]	70

9.2.4.3. Caldera de vapor (CV-501)

Este equipo es el encargado de suministrar vapor al proceso de producción a las operaciones que lo requieran como fuente de energía.

Tabla 40. Especificaciones de diseño y operación del CV-501

Tipo de Equipo: Caldera de Vapor de Moderada Presión	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	8000
Volumen [m³]	120
Temperatura [°C]	175
Presión Mínima [atm]	6

Presión Máxima [atm]	25
-----------------------------	----

9.2.4.4. Centrifugador de ácido salicílico (CF-201)

En este equipo se separan los cristales de ácido salicílico del medio acuoso.

Tabla 41. Especificaciones de diseño y operación del CF-201

Tipo de Equipo: Centrifugador de Cesto	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación Mínima [kg/h]	4500
Capacidad de Operación Máxima [kg/h]	5500
Diámetro Cesto [m]	0.4
Velocidad de Rotación [rpm]	3000
Potencia [kW]	30
Volumen Ocupado [m³]	2.8

9.2.4.5. Secador de ácido salicílico (SE-201)

En este equipo se secan los cristales de ácido salicílico.

Tabla 42. Especificaciones de diseño y operación del SE-201

Tipo de Equipo: Secador Rotatorio	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	1000
Diámetro Cesto [m]	0.15
Volumen [m³]	0.800

9.2.4.6. Centrifugador de ácido acetilsalicílico (CF-401)

En este equipo se separan los cristales de ácido acetilsalicílico del medio acuoso.

Tabla 43. Especificaciones de diseño y operación del CF-401

Tipo de Equipo: Centrifugador de Cesto	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación Mínima	1500

[kg/h]	
Capacidad de Operación Máxima [kg/h]	2500
Diámetro Cesto [m]	0.3
Velocidad de Rotación [rpm]	3000
Potencia [kW]	20
Volumen Ocupado [m³]	0.85

9.2.4.7. *Secador de ácido acetilsalicílico (SF-401)*

En este equipo se secan los cristales de ácido acetilsalicílico.

Tabla 44. Especificaciones de diseño y operación del SF-401

Tipo de Equipo: Secador Rotatorio	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	1000
Diámetro Cesto [m]	0.15
Volumen [m³]	0.800

9.2.4.8. *Evaporador (E-301)*

En este equipo se evapora agua de la corriente de acetato de calcio, con la finalidad de obtener únicamente los cristales.

Tabla 45. Especificaciones de diseño y operación del E-301

Tipo de Equipo: Evaporador Cristalizador	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	1750
Flujo de Vapor [kg/h]	700
Volumen Ocupado [m³]	0.85
Temperatura [°C]	100

9.2.4.9. Molino de ácido acetilsalicílico (ML-401)

En este equipo se pulverizan los cristales de ácido acetilsalicílico, con la finalidad de obtener un diámetro de partícula menor o igual a 180 micrómetros.

Tabla 46. Especificaciones de diseño y operación del ML-401

Tipo de Equipo: Molino de Disco	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación Mínima [kg/h]	270
Capacidad de Operación Máxima [kg/h]	1300
Diámetro Disco [m]	0.762
Masa a Procesar [kg]	833.530
Potencia [kW]	275

9.2.4.10. Tamiz de ácido acetilsalicílico (TZ-401)

En este equipo se tamiza el polvo de ácido acetilsalicílico para asegurar que su diámetro de partícula sea menor o igual a 180 micrómetros.

Tabla 47. Especificaciones de diseño y operación del TZ-401

Tipo de Equipo: Tamiz Rotatorio	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	800
Diámetro Tamiz [m]	1.163
Masa a Procesar [kg]	833.530
Velocidad de Rotación [rpm]	1500
Potencia [kW]	0.530

9.2.4.11. Dosificador de ácido acetilsalicílico (DS-401)

Este equipo dosifica en contenedores de capacidad variable, pero generalmente de 200 kilogramos, el ácido acetilsalicílico en polvo.

Tabla 48. Especificaciones de diseño y operación del DS-401

Tipo de Equipo: Dosificador	
Parámetro [unidades]	Cantidad
Capacidad de Operación [kg/h]	300
Diámetro Dispensador [m]	0.15
Potencia [kW]	2

9.3. Costos de equipos

Tabla 49. Comparación costos teóricos y reales

	Costo Compra de Equipos [\$]	Costo Compra e Instalación de Equipos [\$]
Teórico:	3 353 186.79	9 402 785.00
Real:	490 840.00	1 385 545.54

Tabla 50. Análisis combinado (teórico-real) de costos

Equipo:	Costo [\$]	Costo de compra e instalación [\$]
T-101 (Tanque fenol)	14 000.00	40 276.92
T-102 (Tanque Agua)	9 800.00	28 193.85
T-103 (Tanque Ácido Sulfúrico 60%)	9 800.00	28 193.85
T-104 (Tanque Anhídrido Acético)	9 800.00	28 193.85
T-105 (Tanque Óxido de Calcio)	9 800.00	21 560.00
T-106 (Tanque hidróxido de sodio)	9 800.00	21 560.00
T-107 (Tanque dióxido de carbono)	71 400.00	205 412.31
T-201 (Tanque fenolato de Sodio)	4 200.00	9 240.00
T-202 (Tanque Precipitación ácido salicílico)	11 200.00	31 704.62
AA-203 (Agitador Tipo Ancla)	11 200.00	31 704.62
T-203 (Tanque ácido salicílico)	6 720.00	14 784.00
T-301 (Tanque Agua)	10 500.00	30 207.69
T-501 (Tanque fenol Recuperado)	9 800.00	28 193.85
I-101 (Intercambiador de Calor Calentador Agua)	4 200.00	12 083.08
I-201 (Intercambiador de Calor Condensador fenol)	4 200.00	12 083.08
I-301 (Intercambiador de Calor Condensador Agua)	4 200.00	12 083.08
I-302 (Intercambiador de Calor Enfriador Agua)	4 200.00	12 083.08

I-501 (Intercambiador de Calor Calentador Agua)	4 200.00	12 083.08
E-301 (Evaporador)	1 400.00	3 963.08
CV-501 (Caldera de Vapor)	48 160.00	138 552.62
M-201 (Tanque Mezclador Salicilato de Sodio)	28 000.00	79 261.54
AH-201 (Agitador Tipo Hélice)	17 457.86	49 419.18
M-301 (Tanque Mezclador ácido acetilsalicílico)	35 000.00	99 076.92
AH-301 (Agitador Tipo Hélice)	17 224.98	48 759.94
R-201 (Reactor Neutralización)	14 000.00	39 630.77
AA-201 (Agitador Tipo Ancla)	18 835.20	53 318.11
R-202 (Reactor Carboxilación)	14 000.00	39 630.77
AA-202 (Agitador Tipo Ancla)	21 439.59	60 690.52
R-301 (Reactor Acetilación)	2 800.00	7 926.15
AA-301 (Agitador Tipo Ancla)	125 548.95	355 400.10
CA-201 (Columna de Adsorción)	25 480.00	72 128.00
F-201 (Filtro)	42 000.00	118 892.31
CF-201 (Centrifugador ácido salicílico)	35 000.00	99 076.92
SE-201 (Secador ácido salicílico)	1 400.00	3 963.08
CF-401 (Centrifugador ácido acetilsalicílico)	38 500.00	108 984.62
SE-401 (Secador ácido acetilsalicílico)	1 400.00	3 963.08
C-101 (Compresor Descarga dióxido de carbono)	39 200.00	112 775.38
B-101A (Bomba Carga fenol)	2 800.00	8 055.38
B-101B (Bomba Descarga fenol)	2 800.00	8 055.38
B-102A (Bomba Carga Ácido Sulfúrico)	4 900.00	14 096.92
B-102B/C (Bomba Descarga Ácido Sulfúrico)	4 900.00	14 096.92
B-103A (Bomba Carga Anhídrido Acético)	19 600.00	56 387.69
B-103B/C (Bomba Descarga Anhídrido Acético)	19 600.00	56 387.69
B-201 (Bomba Recirculación fenol)	2 800.00	8 055.38
B-202 (Bomba Descarga Salicilato de Sodio)	2 800.00	8 055.38
B-203 (Bomba Descarga Salicilato de Sodio)	4 900.00	14 096.92
B-301 (Bomba Carga Agua)	4 900.00	14 096.92
B-302 (Bomba Carga Agua)	2 800.00	8 055.38
ML-401 (Molino ácido acetilsalicílico)	8 400.00	18 480.00
TZ-401 (Tamizador ácido acetilsalicílico)	2 100.00	4 620.00
DS-401 (Dosificador ácido acetilsalicílico)	163 393.79	359 466.34

Total [\$]:	854 740.37	2 312 599.73
--------------------	------------	--------------

9.4. Costos del proyecto

Tabla 51. Costos de capital fijo

Costos de Campo Directo (ISBL) [\$]:	2 312 599.73
Costos de Modificación o Adición (OSBL) [\$]:	925 039.89
Costos de Ingeniería (IC) [\$]:	971 291.89
Costos de Contingencia (CC) [\$]:	485 645.94
Inversión de Capital Fijo [\$]:	4 694 577.46

Tabla 52. Costos de producción variables

Materia Prima en 1 Mes [\$]:	1 395 919.12
Electricidad en 1 Mes [\$]:	10 380.72
Vapor en 1 Mes [\$]:	101 363.38
Inversión de Producción Variable [\$]:	1 507 663.21

Tabla 53. Costos de producción fijos

Labor de Operación (Operarios) [\$]:	12 500.00
Supervisor [\$]:	9 800.00
Salariales Directos [\$]:	8 920.00
Mantenimiento [\$]:	69 377.99
Impuestos [\$]:	23 126.00
Alquiler de Terreno [\$]:	32 376.40
Gastos Generales [\$]:	20 293.00
Inversión de Producción Fija [\$]:	176 393.39

Tabla 54. Costos de capital de trabajo

Inventario de Materia [\$]:	697 951.98
Valor de Inventario [\$]:	842 028.30
Efectivo [\$]:	348 979.78

Cuentas por pagar [\$]:	1 684 056.60
Crédito [\$]:	1 395 919.12
Repuestos [\$]:	32 376.40
Inversión de Trabajo [\$]:	5 001 312.17

9.5. Análisis económico

Tabla 55. Análisis económico resumido

Precio de Venta [\$]:	21.77
Ventas Anuales [\$]:	22 695 045.22
Margen Bruto [\$]:	4 603 086.68
Beneficio Bruto [\$]:	2 486 366.05
Beneficio Neto [\$]:	1 939 365.52
Tiempo de recuperación [años]:	5.00
Depreciación Lineal [\$]:	469 457.75
Tasa de Interés [%]:	11.00%
VAN [\$]:	5 113 670.96
TIR [%]:	34.39
Amortización Anual [\$]:	1 270 306.87
Amortización Mensual [\$]:	105 858.91

Tabla 56. Parámetros fijos del flujo de caja en 10 años

Beneficio Neto [\$]:	1 939 365.52
Depreciación [\$]:	469 457.75
Ingreso Imponible [\$]:	1 469 907.77
Impuestos [\$]:	323 379.71

Tabla 57. Flujo de caja en 10 años

Año	Flujo de Caja [\$]:	Flujo Acumulativo [\$]:	Saldo [\$]:
0	-4 694 577.46	0.00	-9 695 889.63
1	1 939 365.52	1 939 365.52	-7 756 524.11
2	1 615 985.81	3 555 351.32	-6 140 538.31

3	1 615 985.81	5 171 337.13	-4 524 552.50
4	1 615 985.81	6 787 322.94	-2 908 566.69
5	1 615 985.81	8 403 308.75	-1 292 580.88
6	1 615 985.81	10 019 294.55	323 404.92
7	1 615 985.81	11 635 280.36	1 939 390.73
8	1 615 985.81	13 251 266.17	3 555 376.54
9	1 615 985.81	14 867 251.98	5 171 362.35
10	1 615 985.81	16 483 237.78	6 787 348.15

10. ANEXO C: CÓDIGOS, SIMBOLOGÍA Y OTROS

10.1. Análisis entre procesos

Tabla 58. Análisis comparativo tipo binario entre procesos

Proceso Industrial:	Con Óxido de Calcio	Sin Óxido de Calcio
Menor Costo de Producción	0	1
Menor Volumen del Reactor	0	1
Menor Tiempo de Residencia	0	1
Menor probabilidad Reacciones Secundarias	1	0
Mayor Conversión Instantánea	1	0
Mayor Pureza Producto	1	0
Mayor Facilidad Purificación	1	0
Menor Costo de Purificación	1	0

10.2. Códigos de equipos y áreas

Tabla 59. Nomenclatura de equipos

Código:	AA-###
Letras:	Equipo:
AA	Agitador tipo ancla
AH	Agitador tipo hélice
B	Bomba
C	Compresor
CA	Columna de adsorción

CF	Centrífuga
CV	Caldera de vapor
DS	Dosificador
E	Evaporador
F	Filtro
I	Intercambiador de calor
M	Mezclador
ML	Molino
R	Reactor
SE	Secador
T	Tanque
TZ	Tamiz
Primer Número:	Área:
1	Área de manejo de materias primas
2	Área de manejo de productos intermedios
3	Área de manejo de productos finales
4	Área de tratamiento de producto principal
5	Área de soporte, almacenamiento y equipos adicionales

10.3. Simbología

V_{Equipo} , volumen mínimo del equipo

m_i , masa de la corriente, sustancia o reactivo “i”

ρ_i , densidad de la corriente, sustancia o reactivo “i”

f_S , factor de sobredimensionamiento de equipos

$V_{Operación}$, volumen de operación, ya sobredimensionado, del equipo

h , altura de la parte cilíndrica del equipo

D_i , diámetro interno

D_{out} , diámetro externo

V_T , volumen de la terminación toriesférica

R , radio mayor de la terminación toriesférica

r , radio menor de la terminación toriesférica

h_T , altura de la terminación toriesférica

R_{out} , radio mayor externo de la terminación toriesférica

r_{out} , radio menor externo de la terminación toriesférica

h_{Tout} , altura externa de la terminación toriesférica

c , relación pitagórica entre las dimensiones de la terminación toriesférica

V_C , volumen de la terminación cónica

h_C , altura de la terminación cónica

D_{Cout} , diámetro externo de la terminación cónica

θ , ángulo interno de la terminación cónica

th , espesor de la pared del cilindro

$P_{Operación}$, presión de operación del tanque

P_{atm} , presión atmosférica

g , aceleración gravitacional

$\bar{\rho}$, densidad promedio de la mezcla

$P_{Diseño}$, presión de diseño del tanque

σ_{max} , máximo estrés permisible del material del tanque

E , eficiencia de soldadura

$T_{Corrosión}$, tolerancia por corrosión, 1 mm por corrosión inexistente o mínima, 2 mm por corrosión baja y 4 mm por corrosión moderada o severa

th_T , espesor de la pared de la terminación toriesférica

th_C , espesor de la pared de la terminación cónica

th_P , espesor de la pared de la terminación plana

$V_{Carcasa}$, volumen de la carcasa cilíndrica

$V_{TCarcasa}$, volumen de la carcasa terminación toriesférica

$V_{CCarcasa}$, volumen de la carcasa terminación cónica

$V_{PCarcasa}$, volumen de la carcasa terminación plana

V_{Total} , volumen total de carcasa

m_e , masa de la carcasa del equipo

ρ_m , densidad del material de carcasa del equipo

Q , calor

V , volumen del fluido

ρ , densidad del fluido
 C_p , capacidad calórica del fluido
 T , temperatura final
 T_0 , temperatura inicial
 r_A , tasa de reacción
 ΔH_{rxn} , entalpía de la reacción
 t , tiempo
 \dot{V}_v , flujo de vapor
 ρ_v , densidad del vapor
 λ_v , calor latente de vaporización
 C_{pi} , capacidad calórica a presión constante de la corriente, sustancia o reactivo "i"
 C_{vi} , capacidad calórica a presión constante de la corriente, sustancia o reactivo "i"
 ΔT , gradiente de temperatura
 U , coeficiente global de transferencia de calor
 \bar{th} , espesor promedio o local de la pared
 λ , coeficiente de conductividad térmica
 h_i , coeficiente de convección interno
 h_{out} , coeficiente de convección externo
 f_{Ei} , factor de ensuciamiento interno
 f_{Eout} , factor de ensuciamiento externo
 A , área de contacto
 ΔT_{log} , temperatura media logarítmica
 T_i , temperatura de ingreso del vapor
 T_{out} , temperatura de salida del vapor
 S , sección hidráulica
 v_v , velocidad del vapor
 L , longitud de tubería
 N_E , número de espiras
 th_E , espesor de la tubería
 E_E , espacio entre espiras

W , trabajo

ΔP , gradiente de presión

Δz , gradiente de altura

h_L , pérdidas por fricción

v_i , velocidad de la corriente, sustancia o reactivo "i"

α , factor de corrección

f , factor de fricción

ε , rugosidad

r_ε , rugosidad relativa

\Re , número de Reynolds

μ_i , viscosidad cinemática de la corriente, sustancia o reactivo "i"

ν_i , viscosidad dinámica de la corriente, sustancia o reactivo "i"

n_i , moles de la corriente, sustancia o reactivo "i"

Z_i , factor de compresibilidad de la corriente, sustancia o reactivo "i"

PM_i , masa molar de la corriente, sustancia o reactivo "i"

R , constantes de los gases

P_1 , presión 1

P_2 , presión 2

d_A , diámetro del agitador

H , altura del agitador

C , espacio entre el agitador y el fondo del tanque

th_A , espesor del agitador

J , altura o ancho de las placas del agitador

L_A , largo de las placas del agitador

\dot{W} , potencia

N_p , número de potencia

N , velocidad de agitación

10.4. Costos materias primas y hojas de seguridad

10.4.1. Costos materias primas

Tabla 60. Materias primas

Materia Prima	Proveedor	Costo [\$/kg]	Reacción o Función	Consideraciones
Fenol	Relubquim	-	Obtención de fenolato de sodio	Irritante, corrosivo y explosivo
	Chemlok del Ecuador	1.95		
	Freire Mejía CIA. LTDA.	-		
	Importado	0.71		
Hidróxido de Sodio	Relubquim	0.08	Neutralización fenol	Corrosivo, oxidante e irritante
	Novachem	27.60		
	Importado	0.7		
Dióxido de Carbono	Indura	2.4	Carboxilación fenolato de sodio	Tóxico
	Importado	3.3		
Anhídrido Acético	Laboratorio Cevallos	1.6	Acetilación ácido salicílico	Irritante, corrosivo y explosivo
	Reactiva Trading	-		
	Importado	1.5		
Óxido de Calcio	Relubquim	-	Neutralización y adsorción de ácido acético	Explosivo
	Incoreg	-		
	Importado	30.00		
Ácido Sulfúrico	Relubquim	-	Precipitar ácido salicílico y catalizador reacción de Acetilación	Corrosivo, oxidante e irritante

10.4.2. Hojas de seguridad

Dado que las hojas de seguridad son un documento extenso y muchas veces abarca más de una página, se va a colocar únicamente el vínculo que direcciona a la hoja de seguridad del reactivo.

10.4.2.1. Fenol

<https://fscimage.fishersci.com/msds/18384.htm>

10.4.2.2. Hidróxido de Sodio

<https://fscimage.fishersci.com/msds/21300.htm>

10.4.2.3. Dióxido de Carbono

<https://www.fishersci.com/store/msds?partNumber=AC428310250&productDescription=%28R%29-%28-%29-LINALOOL%2C+95%25+%28S+25GR&vendorId=VN00032119&countryCode=US&language=en>

10.4.2.4. Anhídrido Acético

<https://fscimage.fishersci.com/msds/00130.htm>

10.4.2.5. Óxido de Calcio

<https://fscimage.fishersci.com/msds/22350.htm>

10.4.2.6. Ácido Sulfúrico

<https://fscimage.fishersci.com/msds/22350.htm>