

Universidad del Bío Bío Facultad de ingeniería Departamento de Ingeniería en Maderas Escuela Ingeniería Civil Química



"DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA (NFC) MODIFICADAS QUÍMICAMENTE"

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

CLAUDIA ALEJANDRA FERREIRA PINCHEIRA

Profesor Tutor: Dr. Galo Cárdenas Triviño Ingeniero Supervisor: Juan Cea Roa José Fuentes Domínguez

Concepción, 25 de Agosto del 2021

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo evaluar la factibilidad técnica-económica de una planta piloto demostrativa industrial de Nanofibras de celulosa (NFC), que cambia su superficie química a través de la acetilación que sustituye los grupos hidroxilos (OH-) por grupos acetilos (CH₃CO-). Esta propuesta de modificación de superficie surge por parte de Ingenieros de la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT), de la Universidad de Concepción debido a la limitada compatibilidad de las NFC en medios de carácter hidrofóbico, a consecuencia del gran número de grupos hidroxilos en su superficie que provoca su naturaleza altamente hidrofílica.

Para demostrar la factibilidad técnica se desarrolló la Ingeniería conceptual y básica que comprende las etapas de molienda de las láminas de celulosa, refinación y acetilación de las NFC. En cuanto a la Ingeniería conceptual se determinaron las bases de diseño del proyecto, y definieron los equipos necesarios para cada etapa del proceso productivo que actualmente se encuentran en UDT. Además, se realizó el balance de materia y energía de cada etapa de la planta productiva. En base a estos balances, se determinaron las materias primas, las utilidades que requiere el proceso en cuanto a vapor saturado, agua de enfriamiento y los productos que se obtendrán de esta planta.

La Ingeniería básica tuvo como objetivo diseñar el diagrama de tubería e instrumentación (P&ID), y en base a este se escogieron el tipo de material de las cañerías, válvulas, accesorios e instrumentación y control. Además, en esta sección se estudiaron las pérdidas de carga y calor que se producen en cañerías y equipos durante la operación del proceso.

En base a los puntos anteriores, con el balance de materia y energía, las pérdidas de carga y calor y el P&ID se estimaron los costos de operación e inversión total para la implementación de la planta.

Posteriormente, se evaluó la rentabilidad de la planta, mediante el flujo de caja para un período de 10 años, con una tasa interna de retorno del 15%, financiado por UDT. Se estimaron 3 parámetros económicos para determinar la factibilidad del proyecto: El valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión inicial (PRI). A partir, de estos parámetros se determinó el precio de venta mínimo que corresponde a \$ 30.080 por kg de NFC acetiladas en base seca, con una TIR del 15% y el PRI al sexto año.

Como conclusión se logró determinar que, a partir del desarrollo de la Ingeniería conceptual, Ingeniería básica y del análisis económico, el proyecto es técnicamente y económicamente factible de realizar, siendo una oportunidad para UDT o empresas que se interesen en expandirse y sobresalir entre sus competidores en el mercado introduciendo un producto nuevo.

AGRADECIMIENTOS

A Dr. GALO CARDENAS TRIVIÑO, Químico orgánico del departamento de Ingeniería de Maderas de la Universidad del Bío Bío, por ser el profesor Guía y por su apoyo constante en esta etapa.

A JUAN CEA ROA, Ingeniero Civil Químico de Unidad de desarrollo tecnológico, por acogerme como alumna memorista y ejercer el cargo de Ingeniero Supervisor durante la Habilitación Profesional.

A JOSÉ FUENTES DOMÍNGUEZ, Ingeniero Civil Mecánico de Unidad de desarrollo tecnológico, principal colaborador durante todo este proceso. Gracias por su tiempo, colaboración y entrega de consejos constantes durante la Habilitación profesional.

A MIS PADRES, ABUELOS Y HERMANO, por su apoyo incondicional recibido durante el paso por la Universidad. Gracias por creer en mí y siempre estar cuando los necesite.

A LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA, docentes en general de la Universidad del Bío Bío por la formación académica y por todos los conocimientos adquiridos durante estos años de estudiante.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMENi			
AGRAD	AGRADECIMIENTOS		
TABLA	TABLA DE CONTENIDOSiv		
NOMEN	NOMENCLATURAviii		
LISTA I	LISTA DE FIGURAS		
LISTA I	LISTA DE TABLASix		
1.	INTRODUCCIÓN	1	
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3	
3.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4	
3.1	Celulosa	4	
3.2	Nanofibras de celulosa (NFC)	5	
3.3	Acetilación método de modificación de superficie química de las NFC	5	
3.4	Aplicaciones de las NFC acetiladas	7	
3.4.1	Agente de refuerzo en resinas adhesivas Urea Formaldehído (UF).	7	
3.4.2	Agente de refuerzo en ácido poliláctico (PLA)	8	
3.4.3	Aplicaciones en diversos sectores industriales	8	
3.5	Métodos de producción de NFC	9	
3.5.1	Homogeneización de alta presión	9	
3.5.2	Microfluidización	9	
3.5.3	Refinación	10	
3.6	Mercado y producción de NFC acetiladas en Chile y el Mundo	11	
4.	OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12	
4.1	Objetivo general	12	
4.2	Objetivos específicos	12	

5.	METODOLOGÍA	13
5.1	Recursos	13
5.2	Procedimientos	13
5.2.1	Procedimiento de Ingeniería Conceptual	13
5.2.2	Procedimiento de Ingeniería básica.	18
5.2.3	Procedimiento del análisis económico	21
5.2.3.1	Estudio económico financiero	21
5.2.3.1.1	Capital de inversión	21
5.2.3.1.2	Costos de manufactura	21
5.2.3.2	Evaluación económica	22
5.2.3.2.1	Construcción del flujo de caja del proyecto	22
5.2.3.2.2	Determinación de la factibilidad del proyecto a partir de parámetros económicos	23
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1	Ingeniería Conceptual	24
6.1 6.1.1	Ingeniería Conceptual	24 24
6.1 6.1.1 6.1.1.1	Ingeniería Conceptual Bases de diseño Descripción del proyecto	24 24 24
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 	Ingeniería Conceptual	24 24 24 24
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 	Ingeniería Conceptual Bases de diseño Descripción del proyecto Alcance del proyecto Condiciones de borde	24 24 24 24 24
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 	Ingeniería Conceptual Bases de diseño Descripción del proyecto Alcance del proyecto Condiciones de borde Materias primas del proceso productivo	24 24 24 24 24 24
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 	Ingeniería Conceptual Bases de diseño Descripción del proyecto Alcance del proyecto Condiciones de borde Materias primas del proceso productivo Especificación de productos	24 24 24 24 24 24 24
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 6.1.1.3.3 	Ingeniería Conceptual	24 24 24 24 24 25 25
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 6.1.1.3.3 6.1.1.3.4 	Ingeniería Conceptual	24 24 24 24 24 25 25 25
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 6.1.1.3.3 6.1.1.3.4 6.1.2 	Ingeniería Conceptual	24 24 24 24 24 25 25 25 25
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 6.1.1.3.3 6.1.1.3.4 6.1.2 6.1.3 	Ingeniería Conceptual Bases de diseño Descripción del proyecto Alcance del proyecto Condiciones de borde Materias primas del proceso productivo Especificación de productos Condiciones meteorológicas Utilidades disponibles para la planta de NFC acetiladas Descripción del proceso Condiciones de operación de las etapas del proceso productivo de NFC acetiladas	24 24 24 24 24 25 25 25 25 25
 6.1 6.1.1 6.1.1.1 6.1.1.2 6.1.1.3 6.1.1.3.1 6.1.1.3.2 6.1.1.3.3 6.1.1.3.4 6.1.2 6.1.3 6.1.4 	Ingeniería Conceptual Bases de diseño	24 24 24 24 24 25 25 25 25 25 25

6.1.6	Listado de equipos y materiales31
6.2	Ingeniería básica
6.2.1	Diseño y dimensionamiento de cañerías y tuberías
6.2.2	Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)33
6.2.2.1	Diagrama de tuberías e instrumentación del área 10 (P&ID)34
6.2.2.2	Diagrama de tuberías e instrumentación del área 20 (P&ID)35
6.2.3	Pérdidas de carga y pérdidas de calor en equipos y cañerías
6.2.3.1 de NFC a	Pérdida de carga en las cañerías de las etapas de refinación y acetilación de la planta de producción acetiladas
6.3.2.3 acetilació	Pérdida de calor en el intercambiador de calor (E-101) en la etapa del calentamiento en la n
6.3.2.4	Pérdidas de calor de la suspensión en las cañerías en la etapa de calentamiento en la acetilación37
6.3.2.5	Pérdidas de calor de la suspensión en el reactor (R-101) en la etapa de calentamiento en la
acetilació	n
6.3.2.6	Vapor saturado requerido para mantener la temperatura en la etapa de acetilación37
6.2.4	Listado y especificación de cañerías
6.2.5	Listado de válvulas
6.2.6	Listado de servicios auxiliares40
6.2.6.1	Listado de utilidades40
6.2.6.2	Listado de cargas eléctricas40
6.3	Análisis económico
6.3.1	Inversión de capital fijo
6.3.2	Costos de manufactura43
6.3.3	Evaluación económica45
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
7.1	Conclusiones
7.2	Recomendaciones

8.	REFERENCIAS	.49
9.	ANEXOS	.52
9.1	Toxicidad del ácido acético glacial	.52
9.2	Factor de transferencia de calor por el lado de los tubos	.52
9.3	Velocidad en las cañerías y tuberías	.53
9.4	Emisiones de calor de vapor saturado en cañerías de acero al carbono	.53
9.5	Distribución de la red de vapor saturado desde la caldera a los centros de distribución	.53
9.6	Nomenclatura y especificación de cañerías y tuberías	.54
9.7	Condiciones meteorológicas	.55
9.8	Grado de sustitución de las fibras de celulosa con respecto al tiempo y concentración del ácido	
acético		.55
9.9	Grado de sustitución en diferentes condiciones de la pulpa de celulosa (GS)	.56
9.10	Microscopía FT-IR	.57
9.11	Balances de materia y energía	.58
9.12	Hojas de especificaciones de los equipos	.64
9.13	Vapor Flash	.69
9.14	Pérdidas de calor de la suspensión en cañerías al ambiente	.69
9.15	Características geométricas del reactor (R-101)	.70
9.16	Pérdida de calor en el reactor	.72
9.17	Cotizaciones de válvulas, cañerías y accesorios.	.72

NOMENCLATURA

UDT	Unidad de desarrollo tecnológico
NFC	Nanofibras de celulosa
MFC	Microfibras de celulosa
GS	Grado de sustitución
OMS	Organización mundial de la salud

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Molécula de celulosa.
Figura 2.	Ordenamiento lineal de las unidades de glucosa en las cadenas de celulosa.
Figura 3.	Cadenas de celulosa constituidas por dominios amorfos y cristalinos.
Figura 4.	Estructura de las NFC acetiladas.
Figura 5.	Homogeneizador de alta presión.
Figura 6.	Microfluidizador y la cámara de colisión en forma de Z.
Figura 7.	Representación de un refinador de discos.
Figura 8.	Diagrama de bloques de los procesos de la planta productiva de NFC acetiladas.
Figura 9.	Diagrama de flujos de la planta de producción de NFC acetiladas.
Figura 10.	P&ID del Área 10.
Figura 11.	P&ID del Área 20.
Figura 12.	Factor de transferencia de calor en el lado de los tubos (Macías 2007).
Figura 13.	Planimetría de la red de vapor saturado en UDT.
Figura 14.	Superficie de respuesta del grado de sustitución vs Temperatura – Concentración.

- **Figura 15.** Superficie de respuesta del grado de sustitución vs Tiempo Concentración.
- **Figura 16.** Absorbancia de los grupos carbonílicos de las MFC acetiladas.
- Figura 17. Medidas del radio sección lateral, superior e inferior del reactor.

LISTA DE TABLAS

Utilidades suministradas en la planta de producción de NFC acetiladas.
Resumen del balance de materia y energía de las pasadas 1 y 15 por el refinador.
Condiciones de las 25 pasadas restantes por el refinador.
Resumen de condiciones de operación del calentamiento de la suspensión en la acetilación.
Resumen condiciones de operación del enfriamiento al finalizar la acetilación.
Tabla resumen del balance de materia al finalizar la reacción de acetilación.
Equipos y materiales que componen a la planta de producción de NFC acetiladas.
Listado de cañerías y tuberías del Área 10 y Área 20 de la planta piloto demostrativa industrial.
Listado de válvulas.
Listado de utilidades de la planta de producción de NFC acetiladas.
Consumo eléctrico en la etapa de molienda.
Consumo eléctrico en la etapa de refinación.
Consumo eléctrico de la etapa de acetilación.
Consumo eléctrico del enfriamiento final y transporte productos.
Detalle de costos de inversión total para la realización de la planta.
Costos de operación anual de la planta piloto de NFC acetiladas.

- **Tabla 17.**Flujo de caja con VAN cercano a 0 para determinar el precio de venta mínimo.
- **Tabla 18.**Tabla con diferentes precios de venta para determinar el precio de venta.
- **Tabla 19.**Emisiones de calor en tuberías (Spirax sarco n.d.).
- Tabla 20.Especificación de cañerías.
- Tabla 21.Código de servicio.
- **Tabla 22.**Especificación de las cañerías y tuberías (CCC).
- **Tabla 23.**Resumen de temperaturas registradas en la Comuna de Coronel.
- **Tabla 24.**GS en diferentes condiciones de pulpa de celulosa.
- **Tabla 25.**Condiciones de la pulpa y su grado de sustitución.
- **Tabla 26.**Resumen de datos de los componentes y el calor específico de la suspensión.
- **Tabla 27.**Resumen de temperaturas a la salida del refinador.
- **Tabla 28.**Datos geométricos del intercambiador de tubo y carcasa.
- **Tabla 29.**Datos de los fluidos por los tubos y carcasa.
- Tabla 30.Resultados de los parámetros de la suspensión para el coeficiente de convección
interno (h_i).
- Tabla 31.Resultado de los parámetros del agua de enfriamiento para el coeficiente de
convección externo (h_o).
- Tabla 32.Resultado del método de eficiencia NTU, para el enfriamiento en la etapa de
refinación.
- **Tabla 33.**Propiedades del vapor saturado a 5 barG.
- Tabla 34.Resultado del análisis térmico para el calentamiento de la suspensión en la
acetilación.
- Tabla 35.Resultados de los parámetros del método de eficiencia NTU para el enfriamiento
final en la etapa de acetilación.

- **Tabla 36.**Temperaturas de salida por los tubos y la carcasa.
- **Tabla 37.**Hoja de especificación del reactor.
- **Tabla 38.**Hoja de especificación de la bomba centrifuga.
- **Tabla 39.**Hoja de especificación del intercambiador de calor.
- **Tabla 40.**Hoja de especificación del refinador.
- **Tabla 41.**Resultados del vapor flash en la línea de condensado.
- **Tabla 42.**Datos de la suspensión a 120°C.
- **Tabla 43.**Datos geométricos y térmicos de las cañerías que transportan la suspensión.
- **Tabla 44.**Pérdidas de calor en el reactor.
- **Tabla 45.**Cotización de las válvulas de la planta de NFC acetiladas según el P&ID.
- **Tabla 46.**Cotización de cañerías y accesorios.

1. INTRODUCCIÓN

La celulosa es un biopolímero de gran importancia a nivel mundial porque se considera el polímero natural más abundante, biodegradable y con bajo impacto ambiental en comparación con los polímeros obtenidos de fuentes fósiles. Es un polisacárido que se encuentra unidos por monómeros de glucosa que presenta estructura lineal y alto peso molecular (Homem and Amorim 2020).

La extracción y producción de Nanofibras de celulosa (NFC) se ha estudiado ampliamente en la última década como agente de refuerzo en materiales compuestos debido a sus excelentes propiedades mecánicas en comparación con la celulosa como baja densidad, alta superficie específica, mayor resistencia y rigidez, entre otras. Por lo tanto, las NFC pueden actuar como un agente de refuerzo para diversas aplicaciones industriales (Sharma et al. 2019). Es por ello por lo que se han implementado diversos métodos para obtener Microfibras de celulosa (MFC) y Nanofibras de celulosa (NFC) como microfluidización, homogeneización y refinación.

A pesar de las ventajosas propiedades mecánicas de las NFC existen dos inconvenientes principales. Su fuerte carácter hidrofílico restringe su dispersabilidad en medios no polares como adhesivos y resinas hidrofóbicas como, por ejemplo, en el ácido poliláctico (PLA) y la resina Urea-Formaldehído (UF). En segundo lugar, la gran cantidad de grupos hidroxilos conducen a fuertes interacciones de enlaces de hidrógeno entre las fibras produciendo aglomeraciones. Para dar solución a esto, se proponen modificaciones de la superficie química como la acetilación de la celulosa en ácido acético glacial que reemplaza los grupos hidroxilos por grupos carbonílicos para aumentar su compatibilidad con distintas matrices de diferente polaridades (Missoum, Belgacem, and Bras 2013).

Por lo tanto, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar una planta de producción de NFC acetiladas que a partir de láminas de pulpa Kraft se modificará su superficie química por medio del agente acetilante ácido acético glacial. Para el diseño del proceso productivo de la planta se utilizarán equipos y materiales que actualmente están en las dependencias de la "Unidad de Desarrollo Tecnológico" de la Universidad de Concepción.

La organización del estudio y desarrollo del diseño de la planta de NFC acetiladas fue realizada de la siguiente manera:

- a) Revisión bibliográfica con relación a la problemática expuesta.
- b) Diseño de la Ingeniería conceptual y básica de las etapas de molienda, refinación y acetilación de la planta de producción de NFC acetiladas.
- c) Desarrollo de un análisis económico de la instalación y operación de la planta productiva.
- d) Conclusiones y recomendaciones para dejar asentamientos para la continuidad del proyecto.

Este proyecto (19IAT-112022) es financiado por CORFO, Programa Innova Alta Tecnología de apoyo a centros de investigaciones como "Unidad de Desarrollo Tecnológico", que apoya proyectos de I+D+i con alto riesgo tecnológico y comercial para que escalen a nivel global.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las NFC han generado un potencial interés en la comunidad científica e industrial debido a sus características de biodegradabilidad, sustentabilidad y por su extracción desde una variedad de fuentes inagotables presentes en la biomasa terrestre. Además, de sus excelentes propiedades mecánicas lo que hace que sean un agente de refuerzo para diversos tipos de materiales compuestos. La limitante principal de las NFC es que su carácter hidrofílico y la gran cantidad de grupos hidroxilos presentes en su superficie hacen que sean compatibles en medios acuosos y matrices hidrofílicas. En cambio, si se agregan en medios o matrices de carácter hidrofóbico la energía de adhesión entre fibra/matriz es baja y su dispersabilidad no es homogénea puesto a que estas NFC tienden a aglomerarse por medio de sus grupos hidroxilos generando fuertes interacciones de enlaces de hidrogeno entre las fibras provocando una disminución en las propiedades mecánicas finales.

En el proceso tradicional de producción de NFC se obtiene un gel con consistencia entre 1 y 2% en agua, lo que genera grandes costos en el transporte del producto final, ya que por cada tonelada de NFC en base seca se transportan 99 toneladas de agua. Este inconveniente radica en que las NFC al secarlas se produce un fenómeno irreversible llamado "Hornificación". Este fenómeno conduce a una pérdida en la calidad de las NFC producto de la formación irreversible de enlaces de hidrógeno adicionales entre las moléculas de celulosa creando zonas de unión que resisten a las fuerzas de hinchamiento durante la rehumectación. Esto trae consigo consecuencias indeseables como reducción de la fibra se vuelve más compacta debido a que el volumen interno se encoge a causa de los cambios estructurales, provocando un empaquetamiento apretado entre las cadenas de celulosa aumentando su rigidez, perdiendo la capacidad para absorber agua e hincharse para formar fibras flexibles y resistentes. Una fibra con estas características no solo es más débil, sino que pierde su capacidad de enlace con otras fibras con lo cual la resistencia global de la red fibrosa se reduce. Por lo tanto, la hornificación se mide con el valor de retención del agua que indica la pérdida de hinchamiento acompañada por una mayor agregación de las cadenas (Salmén and Stevanic 2018).

El proceso de producción de NFC acetiladas que se propone requiere de grandes cantidades del agente acetilante ácido acético glacial, para el cual su separación de las NFC acetiladas aún no está definido, transformándose en un desafío ya que es un componente que genera toxicidad al momento de manipularlo (Ver anexo 9.1).

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Celulosa

La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante ya que se encuentra en la mayor parte de la biomasa terrestre y se considera una fuente casi inagotable de materia prima para la demanda creciente de productos sostenibles con el medio ambiente. Compone la estructura básica de las plantas y está constituida por carbono, hidrogeno y oxígeno que les proporcionan almacenamiento de energía y soporte estructural para la pared celular de las plantas, arboles, entre otros. La celulosa es el polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de β -glucosa donde cada unidad repetida se gira 180 grados alrededor del eje de la columna vertebral de celulosa en relación con el anillo vecino uniéndose por medio de enlaces glucosídicos β -1,4-O-Glucosidico formando en primer lugar un dímero de glucosa conocido como celobiosa, donde la unión de muchas de estas unidades forma el polímero de celulosa. La fórmula general de la celulosa es (C₆H₁₀O₅)_n y se muestra en la Figura 1 (Morales 2015).

Glucosa => Celobiosa => Celulosa

Enlaces β -(1 \rightarrow 4)- glucosídico



Figura 1. Molécula de celulosa.

El polímero de celulosa forma cadenas de estructura lineal de longitud variable donde se establecen interacciones de Van der Waals y enlaces de hidrogeno intramoleculares e intermoleculares promoviendo el apilamiento paralelo formando fibras elementales o NFC creando una estructura de red, como se muestra en la Figura 2 (Ávila 2019).



Figura 2. Ordenamiento lineal de las unidades de glucosa en las cadenas de celulosa (Ávila 2019).

3.2 Nanofibras de celulosa (NFC)

Las NFC pueden extraerse mediante la desfibrilación mecánica a partir de Macrofibras de celulosa de madera y plantas. Estas NFC presentan dimensiones de diámetro menor a 100 nm y una longitud de unos pocos micrómetros que les confieren una alta relación de aspecto mayor a 10 (Longitud/Diámetro), estas dimensiones varían según la fuente y el proceso utilizado para su producción. Además, cada NFC presenta regiones en las cuales las cadenas de celulosa se disponen de forma ordenada (cristalina), que le confieren fuerza y una elevada resistencia, y de forma desordenada (amorfa), que le otorgan elasticidad como se muestra en la siguiente figura 3 (Ávila 2019).



Figura 3. Cadenas de celulosa constituidas por dominios amorfos y cristalinos (Ávila 2019).

Las características excepcionales de estas fibras son biodegradabilidad, alta superficie específica, baja densidad, alta resistencia, módulo de Young específico más alto que el del acero, bajo coeficiente de expansión térmica comparada con la del vidrio, entre otras (Taira et al. 2020).

3.3 Acetilación método de modificación de superficie química de las NFC

Como se mencionó anteriormente uno de los inconvenientes de las NFC es su escasa capacidad de dispersión homogénea en matrices hidrofóbicas generando aglomeraciones a causa de su alto carácter hidrofílico. Por lo tanto, para mejorar la interacción entre las NFC y matrices hidrofóbicas existen diferentes tratamientos de modificación de superficie química de las NFC para disminuir el número de grupos hidroxilos y así reducir su hidrofilia (Abu Ghalia and Dahman 2017). Uno de estos métodos es la acetilación de la superficie química de las NFC, donde los grupos hidroxilos (OH-) de la celulosa se sustituyen por grupos acetilos (CH₃CO-). También en la acetilación de los grupos hidroxilos en la superficie (Ashori et al. 2014). En general, la acetilación se realiza con anhídrido acético en ácido acético concentrado, aunque también es posible suspender fibras de

celulosa en ácido acético glacial a altas temperaturas. En la Figura 4 queda representado la modificación de la superficie química de las NFC.



Figura 4. Estructura de las NFC acetiladas.

De la figura 4, se ve que la reacción de acetilación ocurre en los carbonos C-2 y C-6. Esto se debe a que la reactividad de todos los grupos hidroxilos no es idéntica. El hidroxilo primario del C-6 es el que está menos impedido estéricamente y, por lo tanto, reacciona preferencialmente frente a sustituyentes. Por lo tanto, el orden de reactividad de la unidad de celulosa se da como sigue: C6-OH > C2-OH > C3-OH (Chen 2014).

La modificación de la superficie química es recomendable realizarla después de algún proceso mecánico, porque al refinar la pulpa antes de la acetilación provoca una acetilación más homogénea debido a que la limitación en el alcance de la acetilación reside en la susceptibilidad y accesibilidad de la superficie, produciendo diferentes grados de sustitución (GS). Dicho lo anterior, se estima que el GS aumenta a medida que el tamaño de las NFC disminuye, porque al aumentar la disgregación de las fibras aumentan los grupos hidroxilos accesibles en la superficie (Missoum, Belgacem, and Bras 2013).

El GS depende de variables como el tiempo de reacción, temperatura de reacción, concentración del agente acetilante y la interacción entre temperatura/Concentración. Para medir el GS existen técnicas como titulación inversa que mide el número promedio de los grupos acetilos por unidad de glucosa que se rige mediante la Norma ASTM D871-96.

Otra técnica utilizada para medir o visualizar el GS es la Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) que muestra las longitudes de onda a las cuales se absorbe la luz infrarroja y permite identificar los grupos funcionales. Para medir el cambio en el carácter hidrofílico de las NFC se realiza a través de la medición del ángulo de contacto, este proceso consiste en depositar cuidadosamente mediante un cuentagotas una gota de agua sobre la superficie de cada muestra, donde al contactar la gota con la superficie forma 180° hasta que alcanza el equilibrio estático con un ángulo determinado θ . El valor del ángulo de contacto depende de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido, y las fuerzas cohesivas del líquido. Si $\theta < 90^\circ$ el material es hidrofílico, por otro lado, si $\theta > 90^\circ$ el material es hidrofóbico. Para observar a nivel microscópico el cambio estructural de las fibras mediante la acetilación se utilizan técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopia electrónica de transmisión (TEM).

3.4 Aplicaciones de las NFC acetiladas.

Al realizar la acetilación de las NFC se amplía el rango de aplicaciones a medios de carácter hidrofóbico, como las que se indican a continuación.

3.4.1 Agente de refuerzo en resinas adhesivas Urea Formaldehído (UF).

La industria de la madera es uno de los principales usuarios de las resinas UF, ya que es ampliamente utilizada en la fabricación de tableros aglomerados por sus propiedades como alta reactividad, facilidad de procesamiento, resistencia a los microorganismos, resistencia térmica, entre otras. A pesar de esto, los inconvenientes es que el producto final contiene un alto contenido de formaldehído compuesto cancerígeno declarado por la OMS, que, además, se libera durante el prensado por ser altamente volátil (Temperatura de ebullición -19°C) y por la reacción reversible con la humedad ambiental que absorbe el tablero (Estévez Bolívar 2012).

A través del proyecto COPEC UC 2015.R.536 de UDT se comprobó el reforzamiento mecánico del adhesivo UF con NFC acetiladas con ácido acético glacial, donde demostraron que la adición de solo 1% de NFC acetiladas en el adhesivo UF, logro una disminución del 20% en la dosificación de la resina en la producción de tableros aglomerados conservando las mismas propiedades mecánicas.

3.4.2 Agente de refuerzo en ácido poliláctico (PLA).

El PLA es un polímero biodegradable que despierta un gran interés fundamentado en su biocompatibilidad, alta resistencia, su carácter hidrofóbico, la versatilidad para producirlo mediante mecanismos sintéticos o fermentativos, además de su fácil procesamiento en equipos convencionales. A pesar de tener un módulo elástico comparable con el PET, el PLA es un material relativamente frágil con baja resistencia al impacto, presenta baja resistencia térmica, baja capacidad de cristalización y una limitada propiedad de barrera a gases como oxígeno y agua, que limita su utilización en packaging y envasado de alimentos (Ávila 2019).

Trifol y colaboradores evaluaron el efecto de refuerzo de NFC acetiladas en PLA en porcentajes de 1, 3 y 5% (p/p). Los autores observaron a través de las mediciones de la tasa de transmisión de oxígeno que al incorporar NFC acetiladas al PLA había una importante disminución a la permeabilidad de oxígeno y al vapor de agua. El material compuesto de PLA/CNF al 1% mostró alrededor de un 10% de mejora en términos de alargamiento y tensión de rotura, mientras que una pérdida del 5% en el módulo de Young. También, investigaron la resistencia mecánica mediante análisis mecánico dinámico (DMA), donde se obtuvo mejores propiedades termomecánicas del PLA/NFC acetiladas en comparación al PLA puro cuando se supera la Temperatura de transición vítrea (Tg) del PLA, donde las NFC acetiladas ofrecen una mayor resistencia térmica (Trifol et al. 2016).

3.4.3 Aplicaciones en diversos sectores industriales

En cuanto a lo mencionado en los puntos anteriores, se puede inferir que las NFC acetiladas debido a su excepcional rigidez, resistencia y su alta capacidad de construir una red se convierte en uno de los agentes de refuerzo más prometedores en los composites. Por lo tanto, las NFC acetiladas tendrán un gran impacto en las soluciones biodegradables y amigables con el medio ambiente en diversos sectores del mercado como en envases, papel y cartón, compuestos, recubrimientos y películas, medicina y atención sanitaria, productos higiénicos y absorbentes, textiles, petróleo y gas, filtración, modificadores de reología, aerogeles, entre otras.

3.5 Métodos de producción de NFC

La producción de NFC se obtienen a partir de tecnologías Top-Down a partir de fibras vegetales de diversas fuentes (como la madera) que se someten a desintegración mecánica a altas presiones y fuerzas de cizallamiento como homogeneización, microfluidización, refinación, entre otros (Abdul Khalil et al. 2014).

3.5.1 Homogeneización de alta presión

La homogeneización a alta presión consiste en bombear suspensiones diluidas de fibras de celulosa que se alimentan a través de un conjunto de válvulas cargadas a alta presión. A medida que las válvulas se abren y se cierran en rápida sucesión, las fibras se someten a una gran caída de presión con fuerzas de cizallamiento e impacto. A pesar de que el homogeneizador es un equipo fácil de escalar y que además puede operar de manera continua, tiene dos desventajas como el alto consumo energético y la posibilidad de obstrucción del equipo cuando se utilizan fibras largas, requiriendo de un pretratamiento (Nanci and Ehman 2019).



Figura 5. Homogeneizador de alta presión (Nanci and Ehman 2019).

3.5.2 Microfluidización

En el microfluidizador la suspensión de fibras se bombea a través de una bomba intensificadora a través de una cámara de interacción en forma de Z donde son sometidas a elevadas fuerzas de cizallamiento. El interior de la cámara está diseñado especialmente con microcanales a través de los cuales el producto se acelera a altas velocidades, creando las fuerzas de cizallamiento e impacto cuando la suspensión de fibras impacta contra sí misma, y contra las paredes de los canales. Conforme la bomba de alta intensidad continúa bombeando la suspensión en una dirección, una serie de válvulas de retención permiten que el producto sea arrastrado hacia el lado opuesto de la bomba. A medida que la bomba completa su recorrido, invierte la dirección y el nuevo volumen de producto se presuriza, repitiendo el proceso (Espinosa Víctor 2019).



Figura 6. Microfluidizador y la cámara de colisión en forma de Z (Espinosa Víctor 2019).

3.5.3 Refinación

En el refinador la suspensión de fibras de celulosa diluida se hace pasar a través de un hueco que se encuentra entre un disco estático y otro en rotación que al pasar la suspensión provocan fuerzas de cizalla que permiten la separación de las fibras. Las superficies de estos discos están provistas de ranuras y barras contra las que la pulpa se expone a esfuerzos cíclicos secuenciales. En la figura 7 se muestra un equipo de refinación (Blanco et al. 2018).



Figura 7. Representación de un refinador de discos (Andritz n.d.).

Este equipo posee un alto consumo de energía debido al elevado número de pasadas para alcanzar un alto grado de fibrilación. Dependiendo de las condiciones del proceso se evalúan bajas concentraciones de baja consistencia para reducir los consumos energéticos. Es de fácil ampliación para aplicaciones a nivel industrial (Blanco et al. 2018).

De los equipos mencionados, la alternativa más recomendable es la desestructuración por refinación, porque a diferencia de la homogeneización y microfluidización este se distingue en que puede trabajar bajo capacidades industriales y no sufrir atascos durante el proceso. Por otra parte, el

equipo usado para refinación es un equipo sencillo y en el mercado existe una gran variedad de proveedores, ya que es el mismo equipo usado para la preparación de la pasta Kraft.

3.6 Mercado y producción de NFC acetiladas en Chile y el Mundo.

Se realizo una búsqueda bibliográfica de empresas productoras de NFC acetiladas, para la cual no se encontró ninguna. Solo empresas que se dedican a producir NFC en un proceso tradicional donde las fibras se suspenden en agua. Por lo tanto, concebir y establecer una planta en Chile que genere NFC acetiladas abre posibilidades de entrar a una amplia gama de aplicaciones dentro del mercado, tanto para consumo interno o para exportar a otros países, por lo que sería un gran avance para el desarrollo del país y su economía.

4. OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica-económica de una planta piloto demostrativa industrial de Nanofibras de celulosa (NFC) con polaridad modificada para luego ser incorporada en medios de carácter hidrofóbicos.

4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar la Ingeniería conceptual y básica para una planta piloto demostrativa de Nanofibras de celulosa acetiladas.
- Desarrollar una evaluación económica de la planta piloto demostrativa considerando las etapas de molienda, refinación y acetilación.

5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la metodología se definieron en primera instancia los equipos de la etapa de molienda que corresponden a un triturador y un molino de martillo. Los equipos de las etapas de refinación y acetilación son un reactor *batch*, una bomba centrifuga, un intercambiador de calor y un refinador. A continuación, se mencionarán los programas y procedimientos para el desarrollo de la Ingeniería conceptual y básica de la planta.

5.1 Recursos

- Simulador de procesos de la industria química Aspen Plus V12, para la obtención de propiedades de los componentes y mezclas.
- Microsoft Excel, para la realización de cálculos y diseño de tablas.
- Microsoft Visio, para la realización de Diagrama de flujo y Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).
- Software AutoCAD, para la vista de planos.

5.2 Procedimientos

El procedimiento para la demostración de la factibilidad técnica del diseño de la planta piloto de producción de NFC acetiladas, se divide en tres partes de Ingeniería Conceptual, Ingeniería básica y Análisis económico.

5.2.1 Procedimiento de Ingeniería Conceptual

La ingeniería conceptual del proyecto comenzó con el desarrollo de las bases de diseño de la planta de producción de NFC acetiladas, donde se definió el alcance del proyecto. Se detallaron las materias primas y los productos que se obtendrán en la planta, además se hizo un breve análisis de

las condiciones meteorológicas. Se identificaron la disponibilidad de servicios que actualmente tiene UDT, para cumplir con las necesidades de calentamiento o enfriamiento que requieran los procesos de la planta.

Luego se hizo una descripción del proyecto donde se identificaron las etapas principales ilustrándolas en un diagrama de bloques. Cada una de las etapas se definió brevemente y se mencionaron los equipos necesarios de cada etapa de la planta de NFC acetiladas.

Posteriormente, se definieron las condiciones de operación de las etapas del proceso productivo de NFC acetiladas. En esta sección se mencionaron las características de cada material y equipo utilizados, como sus capacidades geométricas, volumétricas, másicas y de producción. Además, en esta parte se justifican los parámetros de operación que se implantarán en el diseño de la planta productiva de NFC acetiladas.

Se confecciono un diagrama de flujo de procesos, donde se ilustraron los sentidos de flujos y equipos de la planta piloto industrial de NFC acetiladas.

Se realizo el balance de materia y energía para cada una de las etapas de la planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas, como se indican a continuación:

a) Balance de materia de las materias primas al reactor.

Las materias primas que se alimentan al reactor son 25 kg de fibras de celulosa, con una humedad promedio de 10% en base húmeda (X^{BH}). A partir de esto se calcula la humedad en base seca (X^{BS}) y la masa de agua (m_{H2O}) según la masa de fibra de celulosa (m_{fc}) a refinar, haciendo uso de las siguientes ecuaciones.

$$X^{BS} = \frac{X^{BH}}{1 - X^{BH}} \tag{1}$$

$$m_{H_20} = X^{BS} * m_{fc} \tag{2}$$

La concentración de las fibras de celulosa en ácido acético glacial es de 1% en base seca. Por ende, la masa de ácido acético glacial (m_{aa}) requerida en la solución (m_{sol}), se calcula mediante las siguientes ecuaciones.

$$1\% = \frac{\frac{m_{fc}}{m_{fc}}}{\frac{m_{fc}}{m_{sol}}}$$
(3)

$$m_{aa} = m_{solución} - m_{H_2O} \tag{4}$$

14

b) Balances de materia y energía en el refinador

Para calcular el tiempo en que la suspensión pase una vez por el refinador (t₁), se debe conocer el volumen de la suspensión (V_s) y el caudal volumétrico que impulsa la bomba (\dot{V}). Este tiempo se multiplica por las pasadas (t_p) por el refinador, por medio de la ecuación (5). Se determino el volumen de cada componente a partir de sus densidades extraídas del simulador Aspen Plus.

$$t_1 = \frac{V_S}{\dot{V}} \tag{5}$$

Para los balances de energía en el refinador, se hacen a partir de la energía cedida en forma de calor por el trabajo mecánico realizado. En UDT se ha estimado que la energía que cede el refinador a la suspensión de NFC es de 25 kW. Por lo tanto, el calor total recibido ($Q_{recibido}$) en una pasada de la suspensión por el refinador, se demuestra en la siguiente ecuación.

$$Q_{recibido/t_1} = Q_{recibido} * t_1 \tag{6}$$

Para calcular la temperatura de la suspensión a la salida del refinador (T_f) , se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$Q = m_m * Cp * \left(T_f - T_i\right) \tag{7}$$

El calor específico (Cp) de la suspensión, se calcula con la ecuación (8) a partir del calor específico y fracción másica de cada componente.

$$Cp_m = X_{fc} * Cp_{fc} + X_{H_20} * Cp_{H_20} + X_{aa} * Cp_{aa}$$
(8)

c) Balance de masa y energía en el Intercambiador de Calor

Para realizar el balance de masa y energía en el intercambiador de calor se determinaron las propiedades térmicas a partir de correlaciones para el flujo interno por los tubos y el flujo externo por la carcasa y se aplicó un algoritmo de cálculo para determinar las condiciones de salida del intercambiador de calor de tubo y carcasa del Libro *Transferencia de calor y masa de Yunus A, Cengel.*

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor, se utilizaron dos correlaciones para el análisis de flujo interno y externo. El coeficiente convectivo de transferencia de calor del flujo por los tubos se determinó con la correlación (9) para el número de Nusselt (Macías 2007).

$$Nu_D = \frac{h_i * d_i}{k_f} = j_H * Re * Pr^{0,33} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$
(9)

Esta correlación (9) requiere del factor de transferencia de calor (j_H) que se encuentra en la figura 12, del Anexo 9.2.

La correlación (9) está en función del Número de Reynolds (Re_D), del área de flujo (A_f) y la velocidad del fluido (\dot{V}), las cuales se calculan mediante las siguientes ecuaciones (Macías 2007).

$$A_f = \frac{N_t}{N_p} \frac{\pi}{4} d_i^2 \tag{10}$$

$$\dot{V} = \frac{m_t}{\rho A_f} \tag{11}$$

$$Re_D = \frac{\rho \dot{V} d_i}{\mu} \tag{12}$$

Para el flujo externo el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h_o), se calcula mediante la correlación (13) de Zukauskas (Hortelano 2013).

$$Nu_{D} = \frac{h_{o}d_{o}}{k} = CRe_{D,max}^{m}Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{s}}\right)^{1/4}$$
(13)

Donde los coeficientes "C" y "m" están en función del Reynolds, como se indica a continuación:

10 < Re ≤ 100 → C = 0,9; m = 0.4
100 < Re ≤ 1.000 → C = 0,683; m = 0.466
1.000 < Re ≤
$$2x10^5$$
 → C = 0,35; m = 0.65

El Reynolds de la correlación (13) está basado sobre el diámetro de los tubos (d_o) y el flujo másico (m_{carc}) sobre el área de paso (A_s) de la carcasa, como se indica en las siguientes ecuaciones (Hortelano 2013).

$$Re_{D,max}^{m} = \frac{m_{carc} d_{o}}{A_{paso} \mu}$$
(14)

$$A_{\text{paso}} = \left[\frac{L_{carc}}{N_{baf}+1}\right] \left[D_i - \left(\frac{D_i}{P_t} - 1\right) d_o \right]$$
(15)

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se obtuvo a partir de los coeficientes de transferencia de calor por convección interna y externa. Además, de las resistencias térmicas de

16

ensuciamiento para el fluido por los tubos (R_i) y la carcasa (R_o) . Este coeficiente se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$U = \frac{1}{\frac{d_o(1)}{d_i(h_i)} + \frac{d_o R_i}{d_i} + \frac{d_o Ln(\frac{d_o}{d_i})}{2 k_{mat}} + R_o + \frac{1}{h_o}}$$
(16)

El rendimiento a la transferencia de calor del intercambiador disponible en UDT, se calcula con el método de la efectividad NTU que realiza un análisis térmico que se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad (ε) de la transferencia de calor, como se indica a continuación (Yunus A. Cengel 2017).

$$\varepsilon = \frac{Q_r}{Q_{máx}} = \frac{Razón \, de \, la \, transferencia \, de \, calor \, real}{Razón \, máxima \, posible \, de \, la \, transferencia \, de \, calor}$$
(17)

Para determinar la razón máxima de transferencia de calor del intercambiador, se calcula la diferencia de temperatura máxima (ΔT_{max}), a partir de la temperatura de entrada del fluido caliente ($T_{h,ent}$) y el fluido frío ($T_{c,ent}$), utilizando la ecuación (18).

$$\Delta T_{max} = T_{h,ent} - T_{c,ent} \tag{18}$$

El fluido con la capacidad calorífica (mCp) menor experimentará un cambio más grande en la temperatura y, de este modo, será el primero en experimentar la diferencia máxima de temperatura. Por lo tanto, la razón máxima de transferencia de calor se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{m\acute{a}x} = (mCp)_{min} \Delta T_{m\acute{a}x} \tag{19}$$

Las relaciones de efectividad incluyen el grupo adimensional que se llama Número de unidades de transferencia, NTU. Este valor está en función del área (A) de transferencia de Calor. Estos términos se calculan mediante las siguientes ecuaciones.

$$NTU = \frac{UA}{(mCp)_{min}}$$
(20)

$$A = \pi d_o L_t N_t \tag{21}$$

Para calcular la efectividad (E), se utiliza la siguiente relación para un intercambiador de calor de tubo y carcasa de 1 paso por la carcasa y 6 pasos por los tubos, sin cambio de fase. Y para este cálculo, se define otra cantidad adimensional llamada relación de capacidades (c):

$$c = \frac{(mCp)_{min}}{(mCp)_{máx}}$$
(22)

17

$$\varepsilon = 2\left\{1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp\left[-NTU\sqrt{1 + c^2}\right]}{1 - \exp\left[-NTU\sqrt{1 + c^2}\right]}\right\}^{-1}$$
(23)

El cálculo de las temperaturas de salida del fluido frío (T_c ,sal) y caliente ($T_{h,sal}$) se calcularon con las siguientes ecuaciones.

$$T_{c,sal} = T_{c,ent} + \frac{Q_r}{m_c C p_c}$$
(24)

$$T_{h,sal} = T_{h,ent} - \frac{Q_r}{m_h C p_h}$$
(25)

Cuando hay cambios de fase en el intercambiador de calor, el método de efectividad NTU, en lugar de la ecuación (19) de la razón máxima de transferencia de calor se calcula mediante la siguiente ecuación que considera el cambio de fase (h_{fg}).

$$Q_{m\acute{a}x} = m_v h_{fg} \tag{26}$$

La efectividad de la ecuación (23), para cambios de fase se calculan con la ecuación (27) que corresponde a un intercambiador de calor con cambio de fase.

$$\mathcal{E} = 1 - \exp\left(-NTU\right) \tag{27}$$

Una vez terminado el balance de materia y energía se realizó un listado de equipo, con sus *TAG* y correspondientes *Datasheet*.

5.2.2 Procedimiento de Ingeniería básica.

El procedimiento del desarrollo de la Ingeniería básica del proyecto comenzó con el diseño y dimensionamiento de las cañerías y tuberías. Se escogieron el tipo de material de cada una según las propiedades de los fluidos al interior. En cuanto al diámetro de las cañerías y tuberías se dimensionaron de acuerdo con las velocidades recomendadas según criterios conservadores, el cálculo de las velocidades se efectuó mediante la ecuación 38 del Anexo 9.3. Para fluidos líquidos se considera aceptable si la velocidad se encuentra entre 1 a 3 m/s según el libro *Rules of Thumb for mechanical engineers* (Hall 2012). En las líneas de distribución de vapor saturado se recomiendan velocidades entre 25 a 40 m/s (Spirax sarco n.d.). El dimensionamiento de las cañerías de retorno de condensado depende del vapor *flash* generado por un diferencial de presión, por lo que el dimensionamiento de la cañería depende de la cantidad de condensado y vapor *flash* generado. Por lo tanto, en la red de condensados se debe considerar que no se pueden alcanzar las velocidades que

se pueden alcanzar con una red de vapor saturado, ya que el agua arrastrada produce elevadas erosiones, por lo que es aconsejable limitar las velocidades a valores inferiores de 15 a 20 m/s (EREN 2010).

La línea de recuperación de condensados en UDT se dirigen hacia un estanque abierto. Por lo tanto, cuando se tiene un condensado caliente, y se libera a una presión más baja, parte de esos líquidos se vuelven a evaporar, y a esto es a lo que se llama Vapor *Flash*. El porcentaje del condensado que se convertirá en Vapor *Flash* se calculó usando la ecuación (28). El flujo másico (M) y volumétrico (V) del condensado y vapor *flash* se calculan a través de las ecuaciones (29) y (30).

% Vapor Flash =
$$\frac{hA - hB}{\lambda} x100$$
 (28)

M = (% Vapor flash) x (carga de condensado)(29)

 $V = M \times Volumen específico del vapor Flash$ (30)

El porcentaje de vapor *flash* generado depende de la diferencia de entalpía específica del agua saturada a la entrada de la trampa de vapor (hA) y la entalpía específica del agua saturada a la salida de la trampa (hB). Divido en el calor latente (λ) a la presión que se descargó (Armstrong 1998).

Una vez diseñadas las cañerías y tuberías, se procede a la ilustración esquemática del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), donde se muestra el flujo del proceso en las tuberías, números de líneas y sus dimensiones, los equipos instalados, las válvulas y los instrumentos de control.

Posteriormente, se calcularon las pérdidas de calor por medio de la tasa de condensación para las cañerías de distribución de vapor saturado desde la caldera al Manifold 4, y desde este último al intercambiador de calor. Para este cálculo de perdida de calor se hizo mediante la siguiente ecuación para tuberías horizontales de distintos tamaños a varias presiones.

$$\dot{M} = \frac{Q \, x \, L \, x \, 3.6}{\lambda} f \tag{31}$$

Donde \dot{M} es la tasa de condensación (kg/h), Q es la emisión calorífica (W/m) (según la tabla 19 del anexo 9.4), L es la longitud efectiva de tubería, teniendo en cuenta bridas y accesorios (m), λ es el calor latente del vapor (kJ/kg) y el f es el factor de aislamiento. Para tuberías sin aislar f = 1 y

para tuberías bien aisladas f = 0,15. (Spirax sarco n.d.). La distancia desde la caldera al Manifold 4 está representado en el Anexo 9.5.

Posteriormente, para calcular las pérdidas de calor que se producen desde el intercambiador de calor de tubo y carcasa y en las cañerías, se consideraron como conductos circulares. Por lo tanto, el cálculo de la perdida de calor se hizo mediante las siguientes ecuaciones.

$$A_i = 2\pi L R_1 \tag{32}$$

$$A_o = 2\pi L R_2 \tag{33}$$

$$Q = \frac{T_{\infty_i} - T_{\infty_o}}{\left[\frac{1}{h_i A_i} + \frac{L n \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L k_{ai}} + \frac{1}{h_o A_o}\right]}$$
(34)

Como los fluidos internos se mueven en conductos circulares, la correlación que se usó para el cálculo del coeficiente de convección interno de transferencia de calor (h_i) se muestra a continuación.

$$N_{uD} = \frac{h_i d_i}{k_f} = 1,86 \left(\frac{R_{eD} Pr}{L/D}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_S}\right)^{0,14}$$
(35)

Las pérdidas de calor en el reactor se producen en todas las superficies por ser cerrado, por ende, la metodología de cálculo se subdivide en dos ecuaciones distintas, una para la pérdida de calor en la sección lateral ($Q_{lateral}$) y otra para las pérdidas de calor en la sección superior y el fondo del reactor (Q_{syb}).

$$Q_{lateral} = \frac{\frac{T_1 - T_{\infty_0}}{\frac{Ln_{R_1}^R}{2\pi Lk_{al}} + \frac{Ln_{R_2}^R}{2\pi Lk_{fm}} + \frac{Ln_{R_3}^R}{2\pi Lk_{al}} + \frac{1}{h_0 A_0}}$$
(36)

$$Q_{syb} = \frac{T_1 - T_{\infty_0}}{\frac{1}{2\pi k_{ai}} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{1}{2\pi k_{fm}} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}\right) + \frac{1}{2\pi k_{ai}} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4}\right) + \frac{1}{h_0 A_0}}$$
(37)

Una vez determinado las pérdidas de calor, se procedió a la realización del listado y especificación de cañerías, siguiendo la Nomenclatura y especificación de cañerías y tuberías del Anexo 9.6. Luego, se realizó el listado de válvulas de la planta, donde se detalla el diámetro nominal en cañerías y el diámetro exterior en tuberías, el tipo de material y se específica que tipo de

válvula es y su modo de accionar. Posteriormente, se identificaron los servicios auxiliares como las utilidades y el consumo eléctrico de cada equipo.

5.2.3 Procedimiento del análisis económico

5.2.3.1 Estudio económico financiero

El estudio económico en especial, comprende el monto de las inversiones necesarias que implica la realización del proyecto previo a su puesta en marcha, así como la determinación del costo total requerido en su periodo de operación. A continuación, se muestra la estimación de cada una de ellas.

5.2.3.1.1 Capital de inversión

El capital de inversión es la cantidad de dinero requerida para la construcción de la planta y es producto de la suma del capital fijo de inversión y el capital de trabajo. El primero se refiere a los costos asociados con la construcción de la planta con todos los componentes necesarios para su operación, este se subdivide en costos directos e indirectos. Los costos directos incluyen todos los gastos que están relacionados con la instalación de la planta, en este caso en particular los equipos ya se encuentran en UDT por lo que no están considerados en la inversión de capital fijo, pero si se debe invertir en válvulas, cañerías, accesorios y en instrumentación y control. Los costos de los tres primeros se cotizaron en empresas como Provaltec, Vaporisa y Sodimac.

Los costos indirectos se refieren al costo de los factores que no están directamente relacionados con la instalación de la planta. Este comprende la contratación de 2 trabajadores de UDT para la construcción y, además, costos de imprevistos recomendados por Peter y Timmerhaus.

El capital de trabajo involucra los costos requeridos para financiar el primer mes para iniciar la operación de la planta una vez que ya se encuentra instalada y lista para operar en régimen normal, para este caso solo se consideró la compra de 2.475 litros de ácido acético glacial (Esquivel 2004).

5.2.3.1.2 Costos de manufactura

También llamados costos de producción incluyen todos los gastos directamente relacionados con el proceso de manufactura de la planta. Para su determinación, en primer lugar, se definió la jornada de trabajo de lunes a sábado en 2 turnos de 8 horas cada uno, los que equivalen a 312 días de trabajo y que se dividen en costos de operación variables y costos de operación fijos.

Los costos de operación variables corresponden a los costos de mantención y reparaciones, laboratorio, imprevistos, insumos y suministros y costos de almacenamiento. Los primeros tres, se estimaron aplicando las recomendaciones de Peters y Timmerhaus. En cuanto a los costos de insumos y suministros, incluyen los costos de las láminas de celulosa, pérdidas de ácido acético glacial, energía eléctrica, agua y vapor de baja de presión. Los costos de la celulosa se cotizaron en CMPC, del acético glacial en OXIQUIM, de la energía eléctrica en CGE, el agua en Aguas San Pedro y el vapor de baja presión se determinó por medio de una calculadora online de TLV que estima el valor unitario del vapor (TLV n.d.).

En cuanto a los costos de operación fijos son los que no se ven afectados por el nivel de producción. En la planta los constituyen los sueldos del personal de trabajo que está compuesta por 2 jefes de planta, 4 operadores de planta, 1 químico analista, 1 técnico en mantención y 1 personal administrativo. Además, a los costos de operación fijo se le suman los costos de impuesto y de depreciación según lo indicado en el Servicio de Impuestos Internos (SII).

5.2.3.2 Evaluación económica

Para evaluar la factibilidad del proyecto es necesario realizar algunos análisis con todas las inversiones y costos que supondría la construcción y operación de la planta, así como los posibles beneficios que se obtendrían de esta. Estos análisis se encuentran en los siguientes puntos.

5.2.3.2.1 Construcción del flujo de caja del proyecto

El flujo de caja del proyecto es un estado de cuenta que permite medir las inversiones, los costos y los ingresos resumiendo las entradas y salidas de dinero a lo largo de un período, por lo que permite determinar la rentabilidad de la inversión. Por lo tanto, el flujo de caja se construyó para un período de 10 años. Dado que el producto de NFC acetiladas se pretende vender, se consideró como

ingreso el monto de dinero que se obtendría por la venta de cada kg de NFC acetiladas en base seca. Los egresos se consideraron como los costos totales de manufactura.

La depreciación se consideró como una depreciación normal, aplicada durante el tiempo de vida útil de los equipos que se determina en base a la información provista por el Sistema impuestos internos (SII). En base a esto, se calcula la utilidad antes del impuesto, en cuanto a este se aplicó una tasa de impuesto de un 27%, según lo indicado por el SII.

Al finalizar el período de análisis del flujo de caja se aplicó un valor de salvamento para los equipos de la planta del 10%. Con esta información, se calcula el flujo neto de caja y el flujo de caja acumulado.

5.2.3.2.2 Determinación de la factibilidad del proyecto a partir de parámetros económicos

Se calcularon tres parámetros económicos de decisión a partir del flujo de caja utilizados en el análisis de proyectos: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión total (PRI). El cálculo del VAN se aplicó utilizando una tasa de descuento de un 15%.

La factibilidad económica de la planta de NFC acetiladas se evaluó mediante los parámetros económicos mencionados anteriormente. Su resultado, debe cumplir con los siguientes requisitos:

VAN > \$0 $TIR \ge 15\%$ $PRI \le 10$ años

De cumplirse estos requisitos en conjunto, se determina si el proyecto es factible. De lo contrario, el proyecto no es rentable y no se recomienda su realización.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Ingeniería Conceptual

6.1.1 Bases de diseño

6.1.1.1 Descripción del proyecto

El desarrollo del proyecto consiste en el diseño de la Ingeniería conceptual y básica de una planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas. Haciendo uso de equipos e implementos que se encuentren actualmente en UDT. Con el fin de obtener un producto que actúe como agente de refuerzo en distintos medios de naturaleza hidrofóbica como matrices poliméricas (ácido poliláctico) y resinas (Urea-Formaldehído).

6.1.1.2 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consiste en el diseño de la Ingeniería conceptual y básica de una planta piloto demostrativa industrial que produce NFC acetiladas. Este diseño considera las etapas de molienda, refinación y acetilación de las NFC.

El diseño no considera las etapas de separación y recirculación del ácido acético y almacenamiento del producto final.

- 6.1.1.3 Condiciones de borde
- 6.1.1.3.1 Materias primas del proceso productivo
- a) Celulosa: es proveniente desde la planta Laja de CMPC que produce celulosa Kraft blanqueada, la cual viene en formato de pliegues con dimensiones de largo de 0,81 m, ancho de 0,73 m y espesor de 0,015 m. Esta celulosa para poder ser procesada en la planta productiva se le realiza un prepicado en un triturador y se hace pasar por un molino de martillo para obtener fibras de celulosa. Usualmente las fibras de celulosa contienen un 10% de humedad en base húmeda.
- b) Ácido acético glacial: este es el agente acetilante y es procedente de la empresa química OXIQUIM en un 99% de concentración.
6.1.1.3.2 Especificación de productos

El producto obtenido son NFC acetiladas en el solvente ácido acético y agua residual (proveniente de la humedad de las fibras y la generada durante la reacción de acetilación).

6.1.1.3.3 Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas del lugar geográfico donde está instalada la planta de producción de NFC acetiladas corresponden a la comuna de Coronel, Chile. Según los datos de temperatura registrados por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire y parámetros meteorológicos localizadas en Coronel, se resumen en tabla 23 del Anexo 9.7. La temperatura promedio anual de 12,4 °C es la que se considera como temperatura ambiente y temperatura del agua para hacer los cálculos en el presente proyecto.

La humedad relativa del aire en la ciudad de Coronel es superior al 66% en los meses de otoño, invierno y primavera. Y los valores mínimos son en torno al 15% y tienden a concentrarse en los meses de verano (Ecoronel n.d.).

6.1.1.3.4 Utilidades disponibles para la planta de NFC acetiladas

La planta productiva de NFC acetiladas requiere de procesos de calentamiento y enfriamiento, para ello se suministra vapor saturado de baja presión y agua de enfriamiento disponibles en UDT, para cumplir con las condiciones de operación necesarias. Las utilidades disponibles se describen en la siguiente tabla.

Servicio	Condición	Origen	Función
Agua de enfriamiento	12,4 °C / 1,5 barG	Puntera	Fluido de enfriamiento
Vapor saturado	158,9 °C / 5 barG	Caldera	Fluido calefactor
Potencia eléctrica	85 kW / 380 V / 50 Hz	Red central	Suministro de equipos
			eléctricos.

Tabla 1. Utilidades suministradas en la planta de producción de NFC acetiladas.

6.1.2 Descripción del proceso

La producción de NFC acetiladas consiste en procesos *batch* llevados a cabo en una planta piloto-demostrativa industrial. Esta planta comprende 4 etapas que consisten en procesos de molienda de la celulosa, refinación, acetilación de las NFC y por último separación y recirculación del ácido acético. Las etapas se resumen en el diagrama de bloques de la figura 8.



Figura 8. Diagrama de bloques de los procesos de la planta productiva de NFC acetiladas.

La primera etapa de la planta productiva corresponde a la molienda de las láminas de celulosa. Primero, las láminas se hacen pasar por fuerzas de corte a través de un triturador que realiza el prepicado de las láminas con el objetivo de reducir el tamaño. Luego, la celulosa se lleva a un molino de martillo donde a causa del impacto generado por los martillos oscilantes y contra los revestimientos de la carcasa la celulosa es triturada y desfibrilada produciendo así fibras de celulosa.

La segunda etapa corresponde al proceso de refinación de las fibras de celulosa que consiste en reducir el tamaño de las fibras hasta un diámetro a escala micrométrica y nanométrica. Los equipos requeridos para esta etapa corresponden a un reactor donde son incorporados las fibras y el ácido acético glacial. Una bomba centrifuga que impulsa la suspensión hacía un intercambiador de calor para reducir la temperatura de la suspensión debido a la ganancia de energía en forma de calor que el refinador de discos le cede, y este es el que realiza el proceso mecánico de reducción de tamaño.

La tercera etapa de la planta es el proceso de acetilación en la que se realiza la modificación química superficial de las NFC. En esta etapa, el solvente ácido acético glacial se transforma en el agente acetilante, que reemplaza los grupos hidroxilos por grupos acetilos. Esta reacción, se ejecuta en el reactor *batch* con agitación constante a una temperatura de 120°C.

6.1.3 Condiciones de operación de las etapas del proceso productivo de NFC acetiladas.

En la molienda la reducción del tamaño de la celulosa depende de los diámetros de malla del triturador y del molino de martillo que corresponden a 0,02 m y 0,01 m respectivamente. La producción en esta etapa es de 2 a 3 kg/h. El producto que se obtiene de la molienda son fibras de celulosa que se almacenan en *Big bag* de 1 m³. La elección del molino de martillo se fundamenta en la necesidad de no solo cortar, sino que también aumentar la disgregación de las fibras ya que al ser refinadas en ácido acético glacial no tienen tanta afinidad como tienen con el agua. Por lo tanto, al aumentar la disgregación permite que el ácido acético penetre con mayor facilidad los canales internos de las fibras logrando que estas absorban el ácido provocando su hinchamiento, lo que resulta favorable ya que en teoría debería disminuir el consumo de energía en la refinación posterior.

La refinación es un proceso *batch*, donde la suspensión es recirculada al reactor 40 veces para alcanzar un alto grado de disminución de tamaño de las fibras. Esta etapa comienza con la carga del ácido acético glacial desde un estanque al reactor. Luego las fibras de celulosa son cargadas a un estanque para ser transportadas desde un tornillo sinfín al reactor. Se cargan 25 kg de fibra de celulosa en base seca a 1% de consistencia formando una suspensión de 2.500 kg. La concentración del ácido acético glacial debe ser mayor a 99% basado en el diseño experimental realizado en UDT, en el que se comprobó que a mayor concentración del ácido acético mayor es el GS (Anexo 9.8). La suspensión se deja en agitación constante en un rango de 31 a 174 rpm con un agitador de hélice durante 1 h a 20°C para alcanzar una mayor homogeneidad. Después, a través de una bomba centrifuga que impulsa 12 m³/h a una presión de 8 barG lleva la suspensión hacia los tubos de un intercambiador de calor, donde se hará circular agua de enfriamiento cuando la temperatura de la suspensión alcance aproximadamente 98°C, producto de la transformación del trabajo mecánico en calor durante la refinación. La configuración del intercambiador de calor es de 6 pasos por los tubos

y 1 por la carcasa, una vez que la suspensión pasa por los tubos se produce una pérdida de carga de 6,8 barG aproximadamente, la cual es necesaria ya que el siguiente equipo corresponde al refinador que no puede operar por sobre los 2 barG. La apertura de los discos del refinador se ajusta durante la operación en función de la corriente consumida por el motor que depende del flujo y la consistencia de la suspensión. La duración de la refinación es de aproximadamente 8 horas.

En la etapa de acetilación de las NFC, la suspensión se recircula por el intercambiador de calor hasta alcanzar una temperatura de 120°C donde el fluido calefactor es vapor saturado de 5 barG a 158,9 °C. La suspensión se deja reaccionar durante un tiempo de 2 h. La elección de estas variables es basada según ensayos realizados en la empresa UDT del GS y por microscopía FT-IR, donde se comprobó que al realizar la refinación previa a la reacción de acetilación se alcanza un mayor GS y mayor homogeneidad en la acetilación (Anexo 9.9 y 9.10). Una vez terminado el tiempo de reacción para evitar que siga ocurriendo la reacción de acetilación, la suspensión es recirculada nuevamente por el intercambiador de calor, circulando agua de enfriamiento por la carcasa hasta alcanzar aproximadamente 40°C en las NFC acetiladas.

6.1.4 Diagrama de flujo de procesos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de procesos en el cual se indican los flujos del proceso y los equipos que componen a la planta piloto demostrativa industrial de Nanofibras de celulosa modificadas químicamente.



Figura 9. Diagrama de flujo de la planta de producción de NFC acetiladas.

6.1.5 Balances de materia y energía

Temperatura pasada 15 (°C)

Presión por cada pasada (barG)

En la obtención de fibras de celulosa en la etapa de molienda se tiene una producción que varía entre 2 a 3 kg/h. Tomando el promedio del rango de producción y solo considerando un *batch*, se necesitan 10 horas para obtener 25 kg de fibras de celulosa.

Las materias primas que ingresan al reactor *batch* (R-101) corresponden a 25 kg de fibras de celulosa con 2,78 kg de agua que contienen en humedad. Y se alimentan 2.472,22 kg de ácido acético glacial a 20°C. El volumen que ocupa la suspensión a estas condiciones es de 2,38 m³, donde la bomba impulsa 12 m³/h, por lo tanto, el tiempo de residencia por el refinador es de 0,1985 horas y en pasar 40 veces es de aproximadamente 8 horas.

Durante la etapa de refinación la suspensión aumenta su temperatura por cada pasada por el refinador, donde se estima que la energía que cede es aproximadamente 25 kW. La temperatura de salida de la suspensión en las 15 primeras pasadas por el refinador se encuentra en el Anexo 9.11 parte a. Y en la siguiente tabla se indican las temperaturas de salida (T_f) en la pasada 1 y pasada 15.

N° Corriente	10	11	12	13
Temperatura pasada 1 (°C)	20	20	20	25,25

93,52

0

93,52

8

93,52

1.2

98,77

1,1

Tabla 2. Resumen del balance de materia y energía de las pasadas 1 y 15 por el refinador.

Una vez que la suspensión alcance los 98,77 °C en la pasada 15, se hará circular agua de enfriamiento por la carcasa del intercambiador de calor (E-101) en las 25 pasadas restantes. Estas pasadas tendrán las mismas condiciones para cada una, solo con el objetivo de evitar que la temperatura aumente por sobre los 100°C debido a la restricción de presión de 2 barG máximo en el refinador. En el Anexo 9.11 parte b y c se encuentran los datos del intercambiador de calor de tubo y carcasa, las propiedades de los fluidos, los resultados de los coeficientes de convección interno y externo y los resultados del método de efectividad NTU. En la tabla 3 se resumieron las condiciones de operación de las 25 pasadas restantes.

N° Corriente	10	11	12	13	14	15
Temperatura (°C)	98,77	98,77	91,75	97	12,4	57,11
Presión (barG)	0	8	1,2	1,1	1,5	1
Flujo volumétrico de la suspensión (m ³ /h)	12	12	12	12	0	0
Flujo másico del agua de enfriamiento (kg/h)	0	0	0	0	600	600

Tabla 3. Condiciones de operación de las 25 pasadas restantes por el refinador.

El balance de materia y energía del calentamiento de la suspensión para alcanzar la temperatura de reacción de 120°C en la etapa de acetilación se realiza por medio de vapor saturado por la carcasa del intercambiador de calor (E-101). El cálculo del coeficiente de convección por el lado de la carcasa necesita de métodos rigurosos e iterativos, por lo que se toma como valor referencial de 8.517,40 W/m²°C recomendado en el libro Procesos de transferencia de calor de Donald Kern (Kern 1999). Porque el fluido que no experimenta cambio de fase presenta la mayor resistencia y es el controlante. Los resultados del análisis térmico con el método de efectividad NTU se encuentran en detalle en el Anexo 9.11 parte d. En la siguiente tabla se resumen las condiciones de operación.

 Tabla 4. Resumen de condiciones de operación del calentamiento de la suspensión en la acetilación.

N° Corriente	10	11	16	17	18
Temperatura (°)	98,77	98,77	158,9	158,9	120,53
Presión (barG)	0	8	5	0	1,2
Flujo másico del vapor saturado (kg/h)	0	0	168	0	0
Flujo másico del condensado (kg/h)	0	0	0	168	0

Una vez terminado las 2 horas de la reacción de acetilación, se debe enfriar la suspensión para que se detenga la reacción. Para ello, se enfriará a través del mismo intercambiador de calor (E-101) y para los cálculos se usó la misma metodología para el enfriamiento en la etapa de refinación, solo se aumentó el flujo másico del agua de enfriamiento por la carcasa a 1.000 kg/h, y los resultados en detalle se encuentran en el Anexo 9.11 parte e. Para estas especificaciones la temperatura de salida de la suspensión en la primera pasada por el intercambiador de calor es de 109,69 °C, la cual no es suficiente para detener la reacción de acetilación. Por lo que la suspensión pasará 13 veces por el

intercambiador hasta alcanzar una temperatura aproximada de 41°C. En la siguiente tabla se especifican las condiciones para la pasada 1 y la última pasada 13 por el intercambiador de calor.

N° Corriente	10	11	14	15	18
Temperatura pasada 1 (°C)	120,53	120,53	12,4	52,84	109,69
Temperatura pasada 13 (°C)	44,54	44,54	12,4	24,48	41,46
Flujo másico agua de enfriamiento (kg/h)	0	0	1.000	1.000	0

Tabla 5. Resumen condiciones de operación del enfriamiento al finalizar la acetilación.

Los productos que se obtienen luego de la acetilación se estimaron a partir de métodos Karl Fisher en experimentos realizados anteriormente en UDT que consisten en una titulación donde el agua reacciona con un reactivo que contiene yodo. A partir de este método se determinó que, por cada 1 kg de fibra de celulosa acetilada, se genera un 1 kg de agua. Y por mediciones experimentales de recuperación del ácido acético se estima que se recupera el 98,5% del ácido acético. En la siguiente tabla se encuentra el balance de masa de los productos obtenidos en la acetilación.

Tabla 6. Tabla resumen del balance de materia al finalizar la reacción de acetilación.

Componente	Masa de los productos de la acetilación (kg)	Fracción másica
Ácido acético	2.435,14	0,97
Agua	27,78	$1,11 \times 10^{-2}$
Fibras de celulosa	37,08	1,48x10 ⁻²

6.1.6 Listado de equipos y materiales

Los equipos y materiales que la planta de producción de NFC acetiladas necesita para realizar los procesos se enlistan a continuación. En el Anexo 9.12 se encuentran las hojas de especificaciones de los equipos principales de la planta piloto de NFC acetiladas, en cuanto a la hoja de especificación del intercambiador de calor se construyó para el proceso de enfriamiento en la etapa de refinación.

TAG	Equipo	Datasheet
S - 101	Triturador	
M - 101	Molino de martillo	
B - 101	Big Bag	
V - 101	Estanque de alimentación de las fibras de celulosa	
T - 101	Tornillo Sinfín	
V - 102	Estanque de almacenamiento del ácido acético glacial	
P - 101	Bomba centrifuga	
R - 101	Reactor	01
P - 102	Bomba centrifuga	02
E - 101	Intercambiador de calor	03
N - 101	Refinador	04
V - 103	Estanque de almacenamiento	

Tabla 7. Equipos y materiales que componen a la planta de producción de NFC acetiladas.

6.2 Ingeniería básica

6.2.1 Diseño y dimensionamiento de cañerías y tuberías

Las cañerías que transportan ácido acético son de acero inoxidable 316 L que se encuentran diseñadas bajo la Norma ASTM A312. La elección de este tipo de cañerías se fundamenta en su buena resistencia a la corrosión y a altas condiciones de temperatura y presión. El diámetro nominal es de 1 ¹/₂" desde el estanque de almacenamiento de ácido acético (V-102) al reactor (R-101). En cuanto, a las cañerías que transportan la suspensión en la planta de refinación y acetilación son de 2".

El material de las tuberías que transportan agua de enfriamiento son de polipropileno copolímero Random (PP-R). La elección de este tipo de tuberías se debe fundamentalmente a sus propiedades como gran resistencia a altas temperaturas y presiones, bajas pérdidas de carga, resistentes al impacto, entre otras. El diámetro interno de las tuberías es de 16,2 mm.

Las cañerías que se utilizan para la distribución de las líneas de vapor saturado y condensado son de acero al carbono que siguen la especificación estándar ASTM A53. Estas cañerías que transportan el vapor saturado están aisladas con caños de lana mineral. El diámetro nominal de estas cañerías desde la caldera al Manifold 4 son de $1 \frac{1}{2}$ " y desde el manifold 4 al intercambiador de calor son de 1". Las cañerías de distribución de vapor saturado están aisladas con lana mineral de espesor 40 mm y revestimiento de aluminio de espesor 0,5 mm. En cuanto, al diámetro de las cañerías de condensado son de 1" y fueron dimensionadas de acuerdo con la generación de vapor *flash* en la línea de condensado y los resultados se encuentran en el Anexo 9.13.

6.2.2 Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

El P&ID se dividió en dos secciones una para el área 10 que corresponde al área de almacenamiento de materias primas y productos. El área 20 corresponde al área de refinación y acetilación de la planta de producción de NFC acetiladas.

6.2.2.1 Diagrama de tuberías e instrumentación del área 10 (P&ID)



Figura 10. P&ID del Área 10.



6.2.2.2 Diagrama de tuberías e instrumentación del área 20 (P&ID)

Figura 11. P&ID del Área 20.

- 6.2.3 Pérdidas de carga y pérdidas de calor en equipos y cañerías
- 6.2.3.1 Pérdida de carga en las cañerías de las etapas de refinación y acetilación de la planta de producción de NFC acetiladas

Las pérdidas de carga en las cañerías que transportan la suspensión en el proceso de refinación y acetilación en la planta de producción de NFC acetiladas se despreciaron debido a que los equipos están distribuidos en distancias cortas donde las cañerías se encuentran entre 0,5 a 3 m de longitud.

6.2.3.2 Pérdidas de calor en las cañerías de distribución de Vapor saturado en la etapa del calentamiento de la acetilación.

Las pérdidas de calor se consideraron como un factor importante en las cañerías de distribución de vapor saturado, ya que la distancia entre la caldera al intercambiador de calor (E-101) es considerablemente larga. De la figura del Anexo 9.5 se mide la distancia desde la caldera al manifold 4 la cual es de 45 m, con un diámetro de cañería de 1 ½". Con esto, se calculó la pérdida de calor con la ecuación (31) expresada en la tasa de condensación de 4,45 kg/h. Desde el manifold 4 al intercambiador de calor (E-101) la distancia es de 15 m, con un diámetro de cañería de 1" y siguiendo la misma metodología anterior la tasa de condensación es de 1,2 kg/h.

6.3.2.3 Pérdida de calor en el intercambiador de calor (E-101) en la etapa del calentamiento en la acetilación.

El intercambiador de calor se considera como un conducto circular donde el vapor pierde calor al ambiente por las paredes de la carcasa. El radio interno (R_1) y externo (R_2) de la carcasa son de 0,10578 y 0,10954 m respectivamente. En cuanto al coeficiente de convección interno para el vapor se considera el valor referencial de 8.517,39 W/m²°C y el coeficiente de convección externo para el aire de 20 W/m²°C y una conductividad del acero al carbono de 52 W/m°C (Kern 1999)(Dassault systemes 2011). Con la ecuación (34) la pérdida de calor resulto ser de 4,02 kW que corresponden 3 kg/h de vapor adicionales producto de las pérdidas. Por lo tanto, el flujo másico total de vapor saturado requerido en el calentamiento de la suspensión al comienzo de la etapa de acetilación es la

suma del flujo másico del balance de materia y energía, las pérdidas de calor en las cañerías y las pérdidas de calor en el intercambiador de calor dando un valor de 176,65 kg/h.

6.3.2.4 Pérdidas de calor de la suspensión en las cañerías en la etapa de calentamiento en la acetilación.

Las cañerías donde circula la suspensión son de acero inoxidable de diámetro de 2", por lo que su radio interno (R_1) y el radio externo (R_2) son de 0,026255 y 0,030165 m respectivamente. Suponiendo un largo total de 6 m, la pérdida de calor desde la suspensión al ambiente es de 1,97 kW. Los cálculos se encuentran en detalle en el Anexo 9.14.

6.3.2.5 Pérdidas de calor de la suspensión en el reactor (R-101) en la etapa de calentamiento en la acetilación.

Las pérdidas de calor que la suspensión cede al ambiente se producen en todas las superficies del reactor (E-101), donde se considera que la temperatura de la superficie interna del reactor es la misma que en la suspensión y que el coeficiente de convección externo del aire es 20 W/m²°C. El reactor tiene 2 paredes de 50 mm de espesor de acero inoxidable y en el medio de estas paredes está aislado con lana mineral de 100 mm de espesor como se indica en la figura 17 del Anexo 9.15. Las pérdidas de calor total en todas las superficies del reactor son de 0,354 kW, para más detalles del cálculo ver Anexo 9.16.

6.3.2.6 Vapor saturado requerido para mantener la temperatura en la etapa de acetilación.

Las pérdidas de calor total de la suspensión entre las cañerías y el intercambiador de calor son de 2,324 kW, por lo tanto, en pasar una vez por el intercambiador de calor se demora 0,1985 horas lo que se traduce en una pérdida de energía de 1.660,73 kJ. Con la ecuación (7) en la primera pasada la temperatura de la suspensión disminuye desde 120,53 a 120,07 °C. Entonces, para mantener la temperatura en este rango se necesita un flujo másico que considera las pérdidas de condensado en las líneas de vapor saturado y las que se producen en el intercambiador de calor dando un resultado de 15,65 kg/h durante las 2 horas del tiempo de la reacción de acetilación.

6.2.4 Listado y especificación de cañerías

La siguiente tabla se realizó siguiendo la metodología del Anexo 9.6.

Tabla 8. Listado de cañerías y tuberías del Área 10 y Área 20 de la planta piloto demostrativa industrial.

Newsla			Ι)enominació	n			6.1.11	D. t. l.	Ubi	cación	V.1. (1.1 ()	Par	ámetros de opei	ación
Nomenciatura	D N(")	Dint (mm)	SERV	N°	Material	AISL	REV	Schedule	Estado	Desde	Hasta	velocidad (m/s)	P (barG)	T (°C)	Q (m3/h)
1 ½ "-AA-1001-SS1	1 1/2	40,89	AA	1001	SS1	No aplica	No Aplica	40	Líquido	Distribución	V-102	1,27	1,5	20	б
1 ½ "-AA-1002-SS1	1 1/2	40,89	AA	1002	SS1	No aplica	No Aplica	40	Líquido	V-102	P-101	1,27	1,5	20	6
1 ½ "-AA-1003-SS1	1 1/2	40,89	AA	1003	SS1	No aplica	No Aplica	40	Líquido	P-101	R-101	1,27	1,5	20	6
1"-VS-2005-AC1-FMA0,5	1	26,64	VS	2005	AC1	FM	A0,5	40	Vapor	Caldera	R-101	-	-	-	-
1"-VS-2006-AC1-FMA0,5	1	26,64	VS	2006	AC1	FM	A0,5	40	Vapor	1"-VS-2005-AC1-FMA0,5	R-101	-	-	-	-
1"-CO-2007-AC1	1	26,64	CO	2007	AC1	No aplica	No Aplica	40	Líquido	R-101	Caldera	-	-	-	-
1"-CO-2008-AC1	1	26,64	CO	2008	AC1	No aplica	No Aplica	40	Líquido	R-101	Caldera	-		-	-
2"-VA-2009-SS1	2	52,51	VA	2009	SS1	No aplica	No Aplica	40	Gas - Líquido	R-101	Sistema de contención	-	-	-	-
2"-VA-2010-SS1	2	52,51	VA	2010	SS1	No aplica	No Aplica	40	Gas - Líquido	R-101	Sistema de contención	-		-	-
2"-CA-2011-SS1	2	52,51	CA	2011	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	R-101	P-102	1,54	0	20 - 120	12
2"-CA-2012-SS1	2	52,51	CA	2012	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	P-102	E-101	1,54	8	20 - 120	12
2"-CA-2013-SS1	2	52,51	CA	2013	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	E-101	2"-CA-2015-SS1	1,54	1,2	20 - 120	12
2"-CA-2014-SS1	2	52,51	CA	2014	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	2"-CA-2013-SS1	N-101	1,54	1,2	20 - 120	12
2"-CA-2015-SS1	2	52,51	CA	2015	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	2"-CA-2013-SS1	2"-CA-2016-SS1	1,54	1,2	20 - 120	12
2"-CA-2016-SS1	2	52,51	CA	2016	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	N-101	R-101	1,54	1,1	20 - 120	12
2"-CA-2017-SS1	2	52,51	CA	2017	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	2"-CA-2014-SS1	2"-CA-2016-SS1	1,54	2	20 - 120	12
2"-CA-2018-SS1	2	52,51	CA	2018	SS1	No aplica	No Aplica	40	Solido en líquido	2"-CA-2012-SS1	V-103	1,54	8	40	12
AE-2019-PP	No aplica	16,2	AE	2019	PP	No aplica	No Aplica	No aplica	Líquido	Puntera	E-101	0,8 - 1,35	1,5	12,4	0,6 - 1
1"-AV-2020-AC1	1	26,64	AV	2020	AC1	No aplica	No Aplica	40	Líquido - Vapor	Ambas direcciones	Ambas direcciones	0,3 - 15,92	1,5 - 5	12,4 - 158,92	0,6 - 53,68
1"-AV-2021-AC1	1	26,64	AV	2021	AC1	No aplica	No Aplica	40	Líquido - Vapor	Ambas direcciones	Ambas direcciones	0,3 - 26,74	1,5 -5	12,4 - 158,92	0,6 - 53,68
AE-2022-PP	No aplica	16,2	AE	2022	PP	No aplica	No Aplica	No aplica	Líquido	E-101	Puntera	0,8 - 1,35	1,5	12,4 - 60	0,6 - 1
1"-VS-2023-AC1-FMA0,5	1	26,64	VS	2023	AC1	FM	A0,5	40	Vapor	Caldera	E-101	26,74	5	158,92	53,68
1"-CO-2024-AC1	1	26,64	CO	2024	AC1	No aplica	No Aplica	40	Líquido y vapor Flash	E-101	Caldera	15,92	0	158,92	31,94

6.2.5 Listado de válvulas

Nomenclatura	DN (")	Material	Tipo de válvula	Modo
VA-101	1 1/2	SS1	Globo	Manual
VA-102	1	SS1	Globo	Manual
VA-103	1/2	SS1	Globo	Manual
VA-104	1 1/2	SS1	Globo	Manual
VA-205	1	AC1	Globo	Manual
VA-206	1	AC1	Bola	Electrónica
VA-207	1/2	AC1	Bola	Manual
VA-208	1	AC1	Reguladora de presión	Automática
VA-209	1/2	AC1	Bola	Manual
VA-210	1	AC1	De seguridad o de alivio de presión	Automática
VA-211	2	SS1	De seguridad o de alivio de presión	Automática
VA-212	2	SS1	Disco de ruptura para aliviar presión	Automática
VA-213	1⁄2	SS1	Bola	Manual
VA-214	1	AC1	Globo	Manual
VA-215	1	AC1	Trampa de vapor	Automática
VA-216	1	AC1	Check	Manual
VA-217	1	AC1	Globo	Manual
VA-218	2	SS1	Bola	Manual
VA-219	1	SS1	Bola	Manual
VA-220	1⁄2	SS1	Bola	Manual
VA-221	2	SS1	Bola	Manual
VA-222	2	SS1	Globo	Manual
VA-223	2	SS1	Bola	Eléctrica
VA-224	2	SS1	Bola	Eléctrica
VA-225	1⁄2	SS1	Bola	Manual
VA-226	2	SS1	Disco de ruptura	Automática
VA-227	2	SS1	Bola	Manual
VA-228	-	PP	Globo	Manual
VA-229	-	PP	Check	Automática
VA-230	1	AC1	Globo	Manual
VA-231	1	AC1	Check	Automática
VA-232	1	AC1	Trampa de vapor	Automática
VA-233	1	AC1	Globo	Manual
VA-234	1	AC1	Globo	Manual
VA-235	1	AC1	Globo	Manual
VA-236	1	AC1	Globo	Manual
VA-237	1	AC1	Globo	Manual
VA-238	1	AC1	Globo	Electrónica
VA-239	1	AC1	Check	Automática
VA-240	1	AC1	De seguridad o de alivio de presión	Automática
VA-241	1	AC1	Bola	Manual
VA-242	1	AC1	Globo	Electrónica
VA-243	1	AC1	Reguladora de presión	Automática
VA-244	1	AC1	Bola	Manual
VA-245	1	AC1	Globo	electrónica

Tabla 9. Listado de válvulas.

6.2.6 Listado de servicios auxiliares

Los servicios auxiliares que requiere los procesos de la planta de producción de NFC acetiladas corresponden a las utilidades y cargas eléctricas.

6.2.6.1 Listado de utilidades

Las utilidades que necesita la planta de producción de NFC acetiladas, se encuentran en la siguiente tabla.

Utilidades	Función	Etapa	Consumo	Tiempo	Cantidad	Equipo de
			(kg/h)	(h)	(kg)	destino
Vapor	Fluido	Acetilación	176.65	0,1985	35,1	E-101
saturado	calefactor	Acetilación	15,65	2	31,3	E-101
Agua de	Fluido	Refinación	600	4,96	2.976	E-101
enfriamiento	enfriador	Acetilación	1.000	2,58	2.580	E-101

Tabla 10. Listado de utilidades de la planta de producción de NFC acetiladas.

6.2.6.2 Listado de cargas eléctricas

El consumo de electricidad de los equipos que requieren energía eléctrica de la planta de producción de NFC acetiladas en solo un proceso *batch*, se encuentra distribuidos por etapas en las siguientes tablas.

Equipo	TAG	Potencia (kW)	Función	Tiempo (h)	Consumo (kWh)		
Triturador	S-101	7,5	Prepicar	10	75		
Molino de martillos	M-101	2,2	Desfibrilar y picar	10	22		
Consumo de energía total							

Equipo	TAG	Potencia	Función	Tiempo	Consumo	
		(kW)		(h)	(kWh)	
Tornillo Sinfín	T-101	4,5	Alimentación de fibras al reactor	0,5	2,25	
Motor bomba	P-101	1,5	Alimentación del ácido al reactor	0,5	0,75	
Aspa del reactor	R-101	5	Mezclado inicial	1	5	
Motor bomba	P-102	7,5	Mover la suspensión a través del circuito	7,95	59,625	
Aspa del reactor	R-101	5	Agitar la suspensión	7,95	39,75	
Refinador	N-101	45	Refinar las fibras de celulosa	7,95	357,75	
Consumo de energía total						

Tabla 12. Consumo eléctrico en la etapa de refinación.

Tabla 13. Consumo eléctrico en la etapa de acetilación.

Equipo	TAG	Potencia	Función	Tiempo	Consumo
		(k W)		(h)	(kWh)
Motor de la	P-102	7,5	Mover la suspensión a través	0,1985	1,49
bomba			del circuito en el calentamiento		
Aspa del reactor	R-101	5	Agitación de la suspensión	0,1985	1
Motor de la	P-102	7,5	Mover la suspensión a través	2	15
bomba			del circuito en la acetilación		
Aspa del reactor	R-101	5	Agitación en el calentamiento	2	10
			de la acetilación		
Consumo de energía total					

Equipo	TAG	Potencia	Función	Tiempo	Consumo
		(k W)		(h)	(kWh)
Motor de la bomba	P-102	7,5	Mover la suspensión a través	2,58	19,35
			del circuito		
Aspa del reactor	R-101	5	Agitación de la suspensión en	2.58	12,9
			el enfriamiento		
Motor de la bomba	P-102	7,5	Impulsar productos al	0,1985	1,49
			estanque final		
Aspa del reactor	R-101	5	Agitación en la descarga	0,1985	0,9925
Consumo de energía total					

Tabla 14. Consumo eléctrico del enfriamiento final y transporte productos.

El mayor consumo de energía se produce en la etapa de refinación de las fibras de celulosa, ya que se necesita 40 pasadas por el refinador para alcanzar un alto grado de disminución de tamaño y, además, por ser el equipo con mayor requerimiento de potencia eléctrica, por ende, es el que más consume energía.

6.3 Análisis económico

6.3.1 Inversión de capital fijo

Los costos de inversión de capital directos corresponden a la inversión de las distintas válvulas, cañerías y accesorios que requiere la planta de producción según el P&ID de las figuras 10 y 11, estas se cotizaron en distintas empresas y el valor de cada material se encuentra en el Anexo 9.17. En cuanto a la instrumentación y control se va a contratar una empresa externa para que se encargue del control digital. En cuanto a los costos indirecto se va a contratar a dos personas de UDT para la construcción de la planta, y se le sumará un 15% del capital fijo en imprevistos. En cuanto a los costos de capital de trabajo se consideró la compra de 2.475 kg de ácido acético glacial. En la siguiente tabla se resumen la inversión de capital fijo.

Costos de inversión total							
Costos directos de la planta	Valo	or CLP \$					
Válvulas	\$	11.911.800					
Cañerías y accesorios	\$	4.989.400					
Instrumentación y control	\$	15.000.000					
Inversión total costos directos	\$	31.901.200					
Costos indirectos de la planta	Valo	or CLP \$					
Costo de newsonal LIDT (2 newsonas news 2 massa)							
Costo de personal ODT (2 personas para 2 meses)	\$	5.000.000					
Imprevistos (15% del capital fijo)	\$ \$	5.000.000 6.511.976					
Costo de personal ODT (2 personas para 2 meses) Imprevistos (15% del capital fijo) Inversión total costos indirectos	\$ \$ \$	5.000.000 6.511.976 11.511.976					
Costo de personal ODT (2 personas para 2 meses) Imprevistos (15% del capital fijo) Inversión total costos indirectos Inversión de capital fijo total	\$ \$ \$ \$	5.000.000 6.511.976 11.511.976 43.413.176					

Tabla 15. Detalle de costos de inversión total para la realización de la planta.

6.3.2 Costos de manufactura

Los costos operacionales se calcularon en base a un *batch* que dura aproximadamente 15 horas, el cual se realizará en 2 turnos de 8 horas cada uno desde las 01:00 AM a 9:00 AM y de 09:00 AM a 18:00 PM de Lunes a Sábado, con un total de 312 días trabajados al año.

Los costos de los insumos y suministros se calcularon de acuerdo con el consumo que se genera por día. Es importante mencionar que en el costo del ácido acético se calcula en base a la pérdida que se genera por cada proceso *batch*, ya que a futuro se desea recircular el ácido acético, para el cual el proceso de recirculación aún no está definido. La pérdida estimada que se genera por día es de un 5% de los 2.472,2 kg, que se pierden durante la reacción de acetilación y por el agua que traen consigo las fibras como humedad y por la que se genera durante la reacción de acetilación.

En la siguiente tabla se resume los precios y el costo total que genera cada insumo y suministro de la planta de producción de NFC acetiladas. Esta tabla, incluye otros costos de operación variables y fijos como mantenciones y reparaciones, imprevistos, costes de laboratorios, costos de almacenamiento y costos de personal.

Costos de op	eración variables						
Insumos y su	ıministros	Consumo/	Cos	to unitario	Co	sto/día	Costo/anual
		día	CLI	P \$			
Celulosa (kg))	25	\$	639	\$	15.975	\$ 4.984.200
Ácido acético)	2.472.22	\$	4.016	\$	496.422	\$ 154.387.172
Energía eléct	rica (kWh)						
Etapa c	le molienda	97	\$	52	\$	5.044	\$ 1.573.728
Etapa c	le refinación	465,125	\$	52	\$	24.187	\$ 7.546.188
Etapa c	le acetilación	27,49	\$	52	\$	1.429	\$ 445.998
Enfriamiento	final y transporte de	34,73	\$	52	\$	1.806	\$ 563.460
productos							
Vapor de baja	a presión (kg)	66,4	\$	39	\$	2.590	\$ 807.955
Agua de enfri	iamiento	5.556	\$	0,43	\$	2.389	\$ 745.393
Subtotal de i	\$ 171.054.094						
Otros costos de operación variables C							
Mantencione	s y reparaciones (20% c	le la inversión o	de cap	oital fijo)			\$ 36.086.235
Imprevistos (5% de los costos de ope	eración)					\$ 8.552.705
Costos de lab	oratorio (10% del subto	otal del persona	l)				\$ 10.860.000
Costos de aln	nacenamiento						\$ 600.000
Costos de op	eración variables tota	les					\$ 227.153.034
Costos de op	eración fijos						
Personal	Cantidad	Cantidad		Sueldo/	'mes		Sueldo/anual
Jefe de planta	1	2		\$ 3.000	.000		\$ 36.000.000
Operador de j	planta	4		\$ 3.600	.000		\$ 43.200.000
Químico anal	lista	1		\$ 900.0	00		\$ 10.800.000
Técnico en m	antención	1		\$ 700.0	00		\$ 8.400.000
Personal adm	inistrativo	1		\$ 850.0	00		\$ 10.200.000
Costo total d	e manufactura						\$ 335.753.034

Tabla 16. Costos de operación anual de la planta piloto de NFC acetiladas.

De la tabla 16 se infiere que el mayor costo de operación variable es la compra del ácido acético glacial, esto debido a su elevado precio por litro.

Uno de los costos relativamente alto es el costo de mantenimiento y reparaciones, los cuales se determinaron siguiendo las recomendaciones de Peter y Timmerhaus que sugieren un intervalo del 2% al 20% del costo de los equipos. La elección de la estimación del 20% se fundamenta en que los equipos de la planta piloto de NFC acetiladas tienen más de 10 años de uso, por lo que lógicamente estos equipos requieren más frecuentemente mantenciones y reparaciones. Además, en el cálculo de los costos de mantenciones y reparaciones si se consideró el costo de los equipos inicialmente.

6.3.3 Evaluación económica

Una vez calculados todos los costos asociados a la inversión y operacionales de la planta se realizó el flujo de caja. Esta información se resume en la siguiente tabla.

ITÉM	0	1	2-9	10
Demanda (kg)		11.568,96	11.568,96	11.568,96
Precio/kg		\$ 30.080	\$ 30.080	\$ 30.080
Ingresos		\$ 347.995.988	\$ 347.995.988	\$ 347.995.988
Costos fijos		\$ -108.600.000	\$ -108.600.000	\$ -108.600.000
Costos variables		\$ -227.153.034	\$ -227.153.034	\$ -227.153.034
Depreciación		\$ -3.190.120	\$ -3.190.120	\$ -3.190.120
Utilidad antes del impuesto		\$ 9.052.834	\$ 9.052.834	\$ 9.052.834
Impuesto (27%)		\$ -2.444.265	\$ -2.444.265	\$ -2.444.265
Utilidad neta		\$ 6.608.569	\$ 6.608.569	\$ 6.608.569
Depreciación		\$ 3.190.120	\$ 3.190.120	\$ 3.190.120
Inversión capital fijo	\$ -43.413.176			
Inversión costos de capital de	\$ -9.939.600			
trabajo				
Valor de venta, salvamento				\$ 16.891.920
Flujo neto de caja	\$ -53.352.776	\$ 9.798.689	\$ 9.798.689	\$ 26.690.609
Flujo de caja acumulado	\$ -53.352.776	\$ -43.554.087	\$ 5.439.357	\$ 61.526.032

Tabla 17. Flujo de caja con VAN cercano a 0 para determinar el precio de venta mínimo.

La depreciación solo se considera para las válvulas, cañerías, accesorios e instrumentación y control con un tiempo de vida útil de 10 años según lo indicado en el Servicio de impuestos internos (SII). No se consideró la depreciación de los equipos de la planta ya que tienen más de 10 años de uso. Pero si se incluyó en el valor de salvamento, en un 10% del costo de todos los equipos.

La elaboración del flujo de caja permitió encontrar el precio de venta mínimo, en el cual el VAN del proyecto es CLP\$ 0 con una tasa de descuento del 15%. Para encontrar este valor se usó la función solver de Excel, estableciendo como objetivo el valor de la casilla VAN y cambiando el precio de venta por kg de NFC acetiladas en base seca. El precio de venta mínimo es de \$ 30.080, donde la tasa interna de retorno, TIR es 15% y su período de recuperación de la inversión, PRI es aproximadamente en el sexto año.

Luego, para determinar cuál podría ser el precio tentativo de venta se calculó el VAN, TIR y PRI aumentando el precio de venta progresivamente en CLP\$ 460. Esta información se resume en tabla 18.

Precio venta			VAN	TIR	PRI
CLP \$ seco NFC ace	tiladas		CLP \$	Valor	Años
\$	30.080	\$	0	15%	6
\$	30.540	\$	19.491.076	23%	4
\$	31.000	\$	38.988.273	31%	4
\$	31.460	\$	58.485.472	39%	3

Tabla 18. Tabla con diferentes precios de venta para determinar el precio de venta.

Al observar los valores de la tabla 18, se tiene que el VAN aumenta considerablemente aumentando en tan solo \$460 el precio de venta, sin embargo, es necesario tener un precio razonable para llamar la atención del consumidor y que compre este producto relativamente nuevo en el mercado. Es por ello, que se escogió el valor de venta de \$30.540/kg en base seca de NFC acetiladas. Con este precio de venta se cumplen los 3 criterios que determinan la factibilidad económica de un proyecto, que se encuentran en el procedimiento parte 5.2.3.2.2.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En la Ingeniería Conceptual se determinaron los procesos y los equipos que requiere cada etapa para la implementación de una planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas. Se establecieron 3 etapas principales que corresponden a la molienda, refinación y acetilación de las NFC, para cada etapa se desarrolló el balance de materia y energía desde el cual se logró determinar las utilidades que necesita cada etapa de la planta.

En el desarrollo de la Ingeniería básica se confeccionó un diagrama de tuberías e instrumentación, P&ID desde el cual se identificaron la instrumentación y control mínimos necesarios para el buen funcionamiento durante la operación de la planta. Además, se hizo un estudio más profundo sobre el tipo de material que requiere cada equipo, válvulas, accesorios, entre otros. También, se calcularon las pérdidas de calor en equipos y cañerías lo cual permite que se cumplan con los parámetros establecidos para cada etapa del proceso productivo de la planta.

De la realización de la Ingeniería conceptual y básica de una planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas se pudo cumplir con todos los criterios propuestos para su implementación. Dicho diseño también cumplió con los criterios de la evaluación económica, donde se pudo encontrar un precio de venta mínimo que corresponde a \$ 30.080 por kg de NFC acetiladas en base seca. Por lo tanto, el proyecto es factible de realizar, ya que además su rentabilidad podría aumentar significativamente con el aumento de precio de venta de los rangos vistos en la sección de resultados.

Finalizando este segmento se puede concluir en función de los resultados de la Ingeniería Conceptual y básica y del análisis económico, que el proyecto de implementación de una planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas es técnica y económicamente factible, siendo una oportunidad de crecimiento importante para UDT o cualquier empresa que esté interesada.

7.2 Recomendaciones

 Considerar la compra del triturador y molino de martillo con mayor capacidad de producción para disminuir el tiempo de molienda.

- Efectuar la compra de un intercambiador de calor para evitar el estrés que se produce en las cañerías y tuberías por hacer uso de un mismo intercambiador de calor en las etapas que requieren enfriamiento y calentamiento.
- Considerar la compra de un nuevo motor para el ASPA del reactor con mayor rpm ya que el actual es de 31 a 174 rpm, la cual es baja para mantener una buena distribución de las fibras.
 También, para posibles aumentos futuros en la producción, considerando que con una agitación más eficiente se pueda aumentar la consistencia de la suspensión.
- Aprovechar en algún proceso el calor que se requiere retirar de la suspensión al finalizar la reacción de acetilación, para que el proceso sea más eficiente.

8. **REFERENCIAS**

- Abdul Khalil, H. P.S. et al. 2014. "Production and Modification of Nanofibrillated Cellulose Using Various Mechanical Processes: A Review." *Carbohydrate Polymers* 99: 649–65.
- Abu Ghalia, M., and Y. Dahman. 2017. "Synthesis and Utilization of Natural Fiber-Reinforced Poly (Lactic Acid) Bionanocomposites." In Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials: Processing, Properties and Applications, Elsevier Inc., 313–45.
- Andritz. "Tecnologías de Tableros ANDRITZ." https://www.andritz.com/panelboard-en (August 2, 2021).
- Armstrong. 1998. "Calculo Trampas de Vapor." https://es.slideshare.net/capitu91/calculo-trampasde-vapor (August 6, 2021).
- Ashori, Alireza, Mehran Babaee, Mehdi Jonoobi, and Yahya Hamzeh. 2014. "Solvent-Free Acetylation of Cellulose Nanofibers for Improving Compatibility and Dispersion." *Carbohydrate Polymers* 102(1): 369–75.
- Ávila, Jhon. 2019. "Obtención y Esterificación Sostenible de Nanocelulosa Bacteriana Para Usos Que Requieren Regular La Polaridad de Las Nanofibras." https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/83633/CONICET_Digital_Nro.eeab05e3-43a1-4b83-a3e8-15783a032eea_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y (April 3, 2021).
- Blanco, Angeles et al. 2018. "Nanocellulose for Industrial Use: Cellulose Nanofibers (CNF), Cellulose Nanocrystals (CNC), and Bacterial Cellulose (BC)." In *Handbook of Nanomaterials* for Industrial Applications, Elsevier, 74–126.
- Chen, Hongzhang. 2014. Biotechnology of Lignocellulose.
- Dassault systemes. 2011. "Coeficiente de Transferencia de Calor Por Convección -." http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Analysis Background/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm (August 6, 2021).
- Ecoronel. "Clima Comunal." https://www.ecoronel.cl/atlas-ambiental-de-coronel/mediofisico/clima-comunal/ (August 4, 2021).

- EREN. 2010. "Manual Técnico de Diseño y Cálculo de Redes de Vapor | Energía y Minería | Junta de Castilla y León." https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100Detalle/1284410087447/Publicacion/12 84159036625/Redaccion (August 3, 2021).
- Espinosa Víctor, Eduardo. 2019. TITULO: LIGNONANOFIBRAS DE CELULOSA (LNFC) A PARTIR DE RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES NO MADEREROS. OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES. https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es (April 28, 2021).
- Esquivel, José. 2004. "Evaluación Económica Preliminar de Plantas Químicas ." https://es.scribd.com/document/398065566/Evaluacion-Economica-Preliminar-de-Plantas-Químicas (August 22, 2021).
- Estévez Bolívar, Pedro Antonio. 2012. "Desarrollo, Caracterización y Optimización de Resinas Base Urea-Formol (UF), Como Adhesivos Para Tableros Aglomerados Con Baja Emisión de Formaldehído." https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=41357&info=resumen&idioma=SPA (August 2, 2021).
- Hall, Stephen. 2012. "Rules of Thumb for Chemical Engineers." Branan's Rules of Thumb for Chemical Engineers.
- Homem, Natália Cândido, and Maria Teresa Pessoa Amorim. 2020. "Synthesis of Cellulose Acetate Using as Raw Material Textile Wastes." *Materials Today: Proceedings* 31: S315–17.
- Hortelano, Juan. 2013. Comparación Teórico-Numérico de Un Intercambiador de Calor Carcasa y Tubos. https://www.researchgate.net/publication/333827468_Comparacion_teoriconumerico_de_un_intercambiador_de_calor_carcasa_y_tubos (August 4, 2021).
- Kern, Donald. 1999. "Procesos de Transferencia de Calor." https://www.academia.edu/16085930/Procesos_de_Transferencia_de_Calor_Donald_Q_Kern_ (August 5, 2021).
- Macías, Manuel. 2007. "Diseño de Una Unidad de Tratamiento de Aguas Ácidas En Refinería." https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/6394 (August 3, 2021).

- Missoum, Karim, Mohamed Belgacem, and Julien Bras. 2013. "Nanofibrillated Cellulose Surface Modification: A Review." *Materials* 6(5): 1745–66. http://www.mdpi.com/1996-1944/6/5/1745 (April 2, 2021).
- Morales, Silvia. 2015. "DIGITAL.CSIC: HIDRÓLISIS ÁCIDA DE CELULOSA Y BIOMASA LIGNOCELULÓSICA ASISTIDA CON LÍQUIDOS IÓNICOS." https://digital.csic.es/handle/10261/132717 (August 2, 2021).
- Nanci, Ing Qca, and Vanesa Ehman. 2019. NANOCELULOSA A PARTIR DE RESIDUOS AGRO Y FORESTOINDUSTRIALES.
- Salmén, Lennart, and Jasna S. Stevanic. 2018. "Effect of Drying Conditions on Cellulose Microfibril Aggregation and 'Hornification." *Cellulose* 25(11): 6333–44. https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-018-2039-1 (May 10, 2021).
- Sharma, Amita et al. 2019. "Commercial Application of Cellulose Nano-Composites A Review." *Biotechnology Reports* 21: e00316.
- Spirax sarco. "GUIA DE REFERENCIA TECNICA DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR."
- Taira, Shogo et al. 2020. "Cellulose Acetate with CTA I Polymorph Can Be Defibrated into Nanofibers to Produce a Highly Transparent Nanopaper." *Cellulose* 27(9): 4991–5001. https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-020-03156-z (April 4, 2021).
- TLV. "Calculadora: Costo Unitario Del Vapor." https://www.tlv.com/global/LA/calculator/steamunit-cost.html (August 22, 2021).
- Trifol, Jon et al. 2016. "A Comparison of Partially Acetylated Nanocellulose, Nanocrystalline Cellulose, and Nanoclay as Fillers for High-Performance Polylactide Nanocomposites." *Journal of Applied Polymer Science* 133(14): n/a-n/a. http://doi.wiley.com/10.1002/app.43257 (April 12, 2021).
- Yunus A. Cengel. 2017. "Transferencia de Calor y Masa 4ta Ed. Yunus Cengel." https://www.academia.edu/12140362/Transferencia_de_Calor_y_Masa_4ta_ed_Yunus_Cenge l (August 4, 2021).

9. ANEXOS

9.1 Toxicidad del ácido acético glacial.

El ácido acético es un líquido combustible, corrosivo, irritante, transparente e incoloro con un olor agrio, acre, parecido al del vinagre. Es una sustancia química estable, pero reacciona con oxidantes fuertes, cáusticos fuertes y otras sustancias químicas. Es corrosivo para la mayoría de los metales (incluido el acero inoxidable) y atacará a la mayoría de los plásticos y el caucho.

Los vapores de ácido acético pueden formar mezclas explosivas con el aire, constituyendo un riesgo de incendio, bien directamente o por liberación de hidrógeno. El ácido acético glacial es muy irritante para la piel y producen eritema (enrojecimiento), quemaduras químicas y ampollas. En casos de ingestión accidental, puede provocar lesiones graves en el esófago o la muerte debido a un shock u otras reacciones. Se han observado lesiones ulceronecróticas graves del tracto digestivo superior, con vómitos sanguinolentos, diarrea, shock y hemoglobinuria seguida de anuria y uremia. Los vapores de ácido acético tienen una acción irritante en las mucosas, sobre todo en la conjuntiva, la rinofaringe y el tracto respiratorio superior.

9.2 Factor de transferencia de calor por el lado de los tubos.



Figura 12. Factor de transferencia de calor en el lado de los tubos (Macías 2007).

9.3 Velocidad en las cañerías y tuberías

Para el cálculo de las velocidades de los fluidos en cañerías y tuberías se realizan de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$v = \frac{w}{A} = \frac{w}{\frac{\pi d_l^2}{4}}$$
(38)

La velocidad está en función del flujo volumétrico (w) y el área de la sección transversal de las cañerías o tuberías (A).

9.4 Emisiones de calor de vapor saturado en cañerías de acero al carbono.

D'10 1 1				-						
Diferencia de				la	mano do t	uberia	-		_	
temperatura	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
entre vapor y	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
aire °C					W/m					
56	54	65	79	103	108	132	155	188	233	324
67	68	82	100	122	136	168	198	236	296	410
78	83	100	122	149	166	203	241	298	360	500
89	99	120	146	179	205	246	289	346	434	601
100	116	140	169	208	234	285	337	400	501	696
111	134	164	198	241	271	334	392	469	598	816
125	159	191	233	285	285	394	464	555	698	969
139	184	224	272	333	333	458	540	622	815	1 1 3 3
153	210	255	312	382	382	528	623	747	939	1 305
167	241	292	357	437	437	602	713	838	1 093	1 492
180	274	329	408	494	494	676	808	959	1 1 9 0	1 660
194	309	372	461	566	566	758	909	1 080	1 303	1 852
Nota: Emisión de o	tota: Emisión de calor en tuberías horizontales sin protección con temperatura ambiente entre 10°C y 21°C y aire en calma.									

Tabla 19. Emisiones de calor en tuberías (Spirax sarco n.d.).

9.5 Distribución de la red de vapor saturado desde la caldera a los centros de distribución.



Figura 13. Planimetría de la red de vapor saturado en UDT.

9.6 Nomenclatura y especificación de cañerías y tuberías

a) Nomenclatura de identificación de tuberías y cañerías

DD-FF-XXYY-CCC-NNEE

Tabla 20. Especificación de cañerías.

Nomenclatura	Especificación
DD	Diámetro nominal de la cañería (en pulgadas)
FF	Código de servicio
XX	Número de área
YY	Correlativo
CCC	Especificación de cañería y tuberías
NNREE	Tipo de aislación y/o revestimiento (externo en mm)

- b) Descripción de la nomenclatura de la tabla 20.
- El código de servicio (FF) corresponde a los fluidos o suspensiones en las cañerías y tuberías.

	Tabla	21.	Código	de	servicio.
--	-------	-----	--------	----	-----------

Código	Servicio
AA	Ácido acético
CA	Fibra de celulosa en ácido acético
AE	Agua de enfriamiento
VS	Vapor saturado
СО	Condensado
VA	Vapores
AV	Agua o vapor saturado

- La Especificación de la cañería y tuberías (CCC) corresponden al material en que están construidas. Para la planta los materiales se especifican a continuación.

CCC	Material	Norma
SS1	Acero inoxidable	ASTM Gr. 316 L
AC1	Acero al carbono	ASTM A 53.
PP	Polipropileno	

Tabla 22. Especificación de las cañerías y tuberías (CCC).

- El Tipo de aislación y/o revestimiento (NNREE) son los siguientes.

La aislación (NN) en las cañerías de vapor saturado es de lana mineral (LN), con revestimiento (R) de aluminio (A) y el espesor (EE) se indica en mm.

9.7 Condiciones meteorológicas

Tabla 23. Resumen de temperaturas registradas en la Comuna de Coronel.

Temperatura media anual	12,4°C
Temperatura media del mes más cálido (enero)	16,1 °C
Temperatura media del mes más frío (Julio)	8,5 °C
Temperatura extrema máxima	34,2 °C
Temperatura extrema mínima	-4,2 °C
Amplitud térmica anual	7,6 °C

9.8 Grado de sustitución de las fibras de celulosa con respecto al tiempo y concentración del ácido acético.

Del diseño experimental realizado en el proyecto COPEC UC 2015.R.536 se graficaron dos superficies de respuesta representados en las figuras 14 y 15.



Figura 14. Superficie de respuesta del grado de sustitución vs Temperatura – Concentración.

Para la superficie de respuesta de la figura 14 se mantuvieron constante las variables de tiempo en 120 min y la razón sólida/líquido (SLR) en 25, variando la temperatura y concentración del ácido acético. Se observa que al aumentar estas dos variables aumenta fuertemente el GS.



Figura 15. Superficie de respuesta del grado de sustitución vs Tiempo – Concentración.

Para la superficie de respuesta de la figura 15 se mantuvieron constante las variables de temperatura en 150°C y la razón sólida/líquido (SLR) en 25, variando el tiempo y concentración del ácido acético. En la cual se infiere que, al aumentar el tiempo y la concentración de ácido acético en la pulpa, se observa un aumento en el GS, siendo más importante la concentración.

9.9 Grado de sustitución en diferentes condiciones de la pulpa de celulosa (GS)

El GS mide el número promedio de los grupos acetilos por unidad de glucosa y se mide mediante la norma ASTM D871-96, la que considera una sucesión de titulaciones.

Reacción	%Acetilos	Grados de sustitución
Pulpa sin reaccionar	0	0
Pulpa sin refinar acetilada con ácido acético	8,4	0,3
Pulpa parcialmente refinada seguida de una	13,4	0,6
acetilación en ácido acético		

Tabla 24. GS en diferentes condiciones de pulpa de celulosa.

9.10 Microscopía FT-IR

La microscopía FT-IR analiza las longitudes de onda de los grupos funcionales en diferentes puntos de la muestra, lo que permite observar su homogeneidad. En este caso en particular, en las películas de MFC acetiladas, se puede reconocer la homogeneidad de la acetilación de las fibras analizando los grupos funcionales. Se crearon imágenes según absorbancia promedio de la banda C=O, es decir, en el rango 1.745-1.755 cm⁻¹, donde las intensidades de gris representan valores de absorbancia de los grupos carbonilos. La siguiente tabla 25 se especifican las condiciones de la pulpa en la reacción y en la Figura 16 muestra los resultados obtenidos para cada muestra de MFC acetiladas.

Reacción	%	Grado de
	Acetilos	sustitución
Pulpa sin reaccionar	0	0
Pulpa sin previa refinación (Tiempo de reacción: 30 min)	5,58	0,22
Pulpa sin previa refinación (Tiempo de reacción: 60 min)	7,20	0,29
Pulpa refinada en ácido acético (Tiempo de reacción: 40 min)	7,37	0,30
Pulpa sin previa refinación (Tiempo de reacción: 90 min)	8,12	0,33
Pulpa sin previa refinación (Tiempo de reacción: 120 min)	9,36	0,39
Pulpa refinada en ácido acético (Tiempo de reacción: 80 min)	9,80	0,41
Pulpa refinada en ácido acético (Tiempo de reacción: 120 min)	11,95	0,51

Tabla 25. Condiciones de la pulpa y su grado de sustitución.



Figura 16. Absorbancia de los grupos carbonílicos de las MFC acetiladas.

- 9.11 Balances de materia y energía
- a) Temperaturas de la suspensión a la salida del refinador por cada pasada.

Para el cálculo de la temperatura de salida por cada paso de la suspensión por el refinador, se necesita el calor especifico de la suspensión. La cual se calculó a partir de la ecuación (8), y su resultado está en la siguiente tabla.

Tabla 26. Resumen	de datos de los con	nponentes y el calor es	specífico de la susp	pensión
-------------------	---------------------	-------------------------	----------------------	---------

Componente	Fracción másica	Cp (kJ/kg°C)
	(Xi)	
Fibra de celulosa	0,01	1,53
Agua	1,11x10 ⁻³	4,10
Ácido acético	9,89x10 ⁻¹	1,36
Calor específico de la suspensión (Cpm)	1,30	6

Del balance de energía de la ecuación (7), se obtuvo la temperatura de salida por cada paso de la suspensión por el refinador y los resultados se encuentran en la siguiente tabla.

Numero de pasos	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura (°C)	25,25	30,50	35,75	41,00	46,26	51,51	56,76	62,01
	I		1	II			1	1
Número de pasos	9	10	11	12	13	14	4	15

Tabla 27. Resumen de temperaturas a la salida del refinador.

 b) Resultados de los coeficientes de convección de transferencia de calor en el enfriamiento de la suspensión en la etapa de refinación.

Para los cálculos del balance de materia y energía en el intercambiador de calor (E-101), se recolectaron los datos geométricos del equipo en la siguiente tabla.

Datos geométricos	Valor	Datos geométricos	Valor
Distancia entre centro tubos, $P_t(m)$	0,0175	Largo de la carcasa, L (m)	2
Diámetro interno de la carcasa, D _i (m)	0,21156	Longitud de los tubos, Lt (m)	1,85
Diámetro externo de la carcasa, Do (m)	0,21908	Distancia entre bafles	1
Número de pasos por la carcasa, Nc	1	Número de bafles, N _{baf}	1
Diámetro interno de los tubos, $d_i(m)$	0,012	Número de tubos, Nt	46
Diámetro externo de los tubos, $d_o(m)$	0,014	Conductividad del	15,1
Número de pasos por los tubos, Np	6	material, k_{mat} (W/m°C)	

Tabla 28. Datos geométricos del intercambiador de tubo y carcasa.

Por los tubos circulara la suspensión de fibras en ácido acético y por la carcasa el agua de enfriamiento, donde las propiedades de los fluidos están en la tabla 29.

Propiedades		Ubicación			
		Tubos (95 °C)	Carcasa (30 °C)		
Densidad, ρ (kg/m ³)		991,23	992,83		
Flujo másico, m (kg/h)		11.810,6	600		
Viscosidad dinámica, µ (cP)		100	0,82		
Calor específico, Cp (kJ/kg K)		1,36	4,14		
Conductividad térmica, (kW/m°C)	k	1,48x10 ⁻⁴	6,13x10 ⁻⁴		
Resistencia térmica, R (m ² K/W)		$3,52 \times 10^{-4}$	5,28x10 ⁻⁴		

Tabla 29. Datos de los fluidos por los tubos y carcasa.

En las siguientes tablas se encuentran los resultados de cada parámetro para el cálculo del coeficiente global interno (h_i) y externo (h_o).

Tabla 30. Resultados de los parámetros de la suspensión para el coeficiente de convección interno

(h_i).

Parámetros calculados para el flujo interno	Valor
$A_{f}(m^{2})$	8,67x10 ⁻⁴
V (m/s)	3,82
Re _D	454,04
L_t/d_o	132,14
J _H	0,007
Nu _D	30,24
h_i , (W/m ² K)	372,44
Tabla 31. Resultado de los parámetros del agua de enfriamiento para el coeficiente de convección externo (h₀).

Parámetros calculados para el flujo externo	Valor
A_{paso} , (m^2)	5,63x10 ⁻²
Re _{D,max} ^m	50,55
Nu _D	8,00
h_{o} , (W/m ² K)	350,9

A partir de los coeficientes globales interno y externo y las resistencias térmicas, por medio de la ecuación (16) se estimó el coeficiente global de transferencia de calor dando un resultado de 142,94 $W/m^{2\circ}C$.

c) Resultados del método de efectividad NTU para el enfriamiento de la suspensión en la etapa de refinación.

Los cálculos del método de efectividad NTU se hicieron para determinar el flujo másico de agua en la pasada 15 que se necesita para evitar que la temperatura aumente por sobre los 100°C. Y los resultados de las condiciones de operación del agua de enfriamiento será la misma para las pasadas restantes de la refinación.

Tabla 32. Resultado del método de eficiencia NTU, para el enfriamiento en la etapa de refinación.

Parámetros calculados con el método NTU	Valor
Área total, A (m ²)	3,74
Capacidad calorífica máxima, (mCp) _{máx} (Tubos)	4,47
Capacidad calorífica mínima, (mCp) _{mín} (Carcasa)	0,69
Número de unidades de transferencia de calor, NTU	0,78
Relación de capacidades, C	0,15
Efectividad, E	0,52
Razón máxima de transferencia de calor, Q_{max} (kW)	59,57
Razón de transferencia de calor real, Qr (kW)	30,84
Temperatura de salida de la suspensión (T _{h,sal})	91,87

Temperatura de salida del agua de enfriamiento $(T_{c,sal})$ 57,11

 d) Resultados del método de efectividad NTU, para el calentamiento de la suspensión en la etapa de acetilación.

Para los cálculos del método de efectividad NTU, se recolectaron las propiedades del vapor saturado a 5 barG, en la siguiente tabla.

Propiedades del vapor saturado	Valor
Temperatura, T _h (°C)	158,9
Densidad, ρ (kg/m ³)	3,01
Flujo másico, m _v (kg/h)	168
Viscosidad dinámica, µ(Cp)	1,48x10 ⁻²
Calor específico, Cp (kJ/kg°C)	1,92
Conductividad térmica, k (kW/m°C)	3,13x10 ⁻⁵
Calor latente, h _{fg} (kJ/kg)	2.085,36

Tabla 33. Propiedades del vapor saturado a 5 barG.

El coeficiente de convección de transferencia de calor interno se consideró el mismo que el calculado para la etapa de enfriamiento de la refinación. En cuanto, al coeficiente de convección externo se consideró un valor referencial para vapor saturado de 8.517,40 W/m²°C. Los resultados del análisis térmico por el método de efectividad NTU para intercambiadores de calor con cambios de fase, se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 34. Resultado del análisis térmico para el calentamiento de la suspensión en la acetilación.

Parámetros calculados con el método NTU	Valor
Área total, A (m ²)	3,74
Capacidad calorífica máxima, (mCp) _{máx} (Tubos)	4,47
Capacidad calorífica mínima, (mCp) _{mín} (Carcasa)	0,089
Número de unidades de transferencia de calor, NTU	9,82

Relación de capacidades, C	~ 0
Efectividad, E	0,99
Razón máxima de transferencia de calor, Q_{max} (kW)	97,32
Razón de transferencia de calor real, Qr (kW)	97,31
Temperatura de salida de la mezcla (T _{C,sal})	120,53

e) Enfriamiento al finalizar la etapa de acetilación

Para el cálculo del balance de masa y energía en el intercambiador de calor (E-101) se usó la misma metodología de cálculo para el coeficiente global de transferencia de calor y el análisis térmico del enfriamiento de la etapa de refinación.

Para los cálculos del balance de masa y energía se consideraron los mismos datos de la tabla 29, solo se modificó el flujo másico de agua en la carcasa a 1.000 kg/h.

El coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador es de 153,09 W/m²°C, para estas nuevas condiciones de operación.

Los resultados del método de eficiencia NTU, se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 35. Resultados de los parámetros	del método de	e eficiencia N	NTU para el	enfriamiento	final en
la	i etapa de acet	ilación.			

Parámetros calculados con el método NTU	Valor
Área total, A (m ²)	3,74
Capacidad calorífica máxima, (mCp) _{máx} (Tubos)	4,47
Capacidad calorífica mínima, (mCp) _{mín} (Carcasa)	1,14
Número de unidades de transferencia de calor, NTU	0,50
Relación de capacidades, C	0,25
Efectividad, E	0,38

Los resultados de las temperaturas de salida por cada paso por el intercambiador de calor a partir del análisis térmico de eficiencia NTU, se encuentran en la siguiente tabla.

Variable	N	Número de pasadas por el intercambiador de calor						
calculada	1	2	3	4	5	6	7	
Q _{max} (kW)	122,61	110,86	100,24	90,64	81,96	74,11	67,01	
Q _r (kW)	46,09	41,67	37,68	34,07	30,81	27,85	25,19	
$T_{h,sal}(^{\circ}C)$	109,69	100,37	91,94	84,32	77,43	71,20	65,57	
$T_{c,sal}(^{\circ}C)$	52,84	48,97	45,47	42,30	39,43	36,85	34,50	
Variable	Número	de pasada	is por el int	ercambi	ador de ca	alor		
calculada	8	9	10	11	12	13		
Q _{max} (kW)	60,59	54,78	49,54	44,79	40,50	36,62		
Q _r (kW)	22,77	20,59	18,62	16,84	15,22	13,76		
T _{h,sal} (°C)	60,48	55,87	51,71	47,94	44,54	41,46		
$T_{c,sal}(^{\circ}C)$	32,39	30,47	28,74	27,17	25,76	24,48		

Tabla 36. Temperaturas de salida por los tubos y la carcasa.

9.12 Hojas de especificaciones de los equipos

Las hojas de especificaciones de los equipos principales de la planta piloto demostrativa industrial de NFC acetiladas, se encuentran en las siguientes tablas.

Hoja de especificación del Reactor de NFC acetiladas					
Designación: Reactor de NFC acetiladas. N° de Datasheet:					
Función: Reacción de acetilación de NFC.		Fecha: 24/08/2021			
Número de unidades: 1		TAG: R-101			
Área: A20					
the second se	Datos	de operación			
A2B1 C1 7	Material a procesar	Fibras de celulo	sa – ácido		
A3		acético glacial			
	Presión máxima, bar	6			
	Presión de prueba, bar	7,8			
	Temperatura °C	165			
B3 =	Datos de	e construcción			
	Capacidad, m ³	3			
	Material	Acero Inoxidat	ole 316 L		
	Diámetro interior, m	1			
	Diámetro exterior, m	1,3			
	Aislamiento	Lana mine	eral		
	Espesor de aislamiento,				
	mm				
	Altura, m	2,64			
	Velocidad del aspa, rpm	31 – 17	4		
	Conexión		TAG		
	Entrada ácido acético glacia	al	A_1		
	Entrada fibras de celulosa	A ₂			
	Recirculación de suspensió	A ₃			
	Salida de suspensión		A ₄		
	Aspa del reactor		\mathbf{B}_1		
	Tapa del reactor	\mathbf{C}_1			
	Entrada al serpentín superio	D ₁			
	Salida del serpentín superio	D ₂			
	Entrada al serpentín inferio	D3			
	Salida del serpentín inferior	r	D ₄		

Tabla 37. Hoja de especificación del reactor.

Hoja de especificacion	nes de la bomba cer	ntrifuga				
Designación: Bomba centrifuga		N° de Datasheet: 02				
Función: Bomba centrifuga a la salida del react	tor	Fecha: 24/08/2	Fecha: 24/08/2021			
Marca: Hilge		TAG: P-102				
Número de unidades: 1						
Área: A20						
Datos de operación						
		Bomba	Motor			
A Start Marker N	Potencia, kW		7,5			
	Altura, m	85				
	8					
	Caudal, m ³ /h	12				
rpm			2800			
	Voltaje, V		380			
	Solidos	Si				
	suspendidos					
Corrosivos		Si				
	Datos de construcción					
	Material	Acero ind	oxidable 316 L			

Tabla 38. Hoja de especificación de la bomba centrifuga.

Hoja de especificación del intercambiador de calor									
Designación: Intercambiador de calor de tubo y carcasa N° de datasheet: 03									
TAG: E-101									
Función: Enfriar la suspensión en la etapa de refinación.									
Largo: 2.000 mm				Conectado a	a:	1 parale	lo	1 :	serie
Área: 3,74 m ²	rea: 3,74 m ² Carcasa/Unidad						d 1		
Cumplimiento de una unidad									
Localización del fluido				Lado ca	ircasa	ì	La	do tub	os
Nombre del fluido				Agua de en	friam	iento	Su	spensić	in
Cantidad total del fluido		kg/s		0,167	7			3,28	
Vapor (Ent/sal)		kg/s		0				0	
Líquido		kg/s		0.167	0.	167	3,28	3	,28
No condensable		kg/s		0				0	
Temperatura (Ent/sal)		°C		12,4	57	,11	98,76	9	1,87
Densidad kg/m ³			992,827		991,226				
Viscosidad		cP		0,8	2			100	
Calor específico		kJ/kg⁰C	kg°C 4,14		-	1,36			
Conductividad térmica	I	V/m*°C	/ m *° C 0,61 0,4),48				
Presión		barG		1,5		1	8		1,2
Factor de ensuciamiento		W/m ² °C		1.893		2.840			
Calor intercambiado 3	3,84	kW							
Coeficiente de transferenci	ia de c	alor		142,94	W/m	^{2°} C			
D	atos d	e constru	icci	ón				2 mor no	
	Lad	o carcasa	L	Lado tul	00				
Presión de diseño barG		6		6					
Temperatura °C		180		180			6		4
Numero de pasos		1		6					
Número de tubos 46	OD	12	Lor	ngitud tubos	1.8	50 m i	m Pitch	17,5	mm
Material tubos Ace	ero inoz	kidable 31	16 L						
Carcasa	Di	211,5	6	De		219,0	8		mm

Tabla 39. Hoja de especificación del intercambiador de calor.

Tabla 40. Hoja de especificación del refinador.

Hoja de especificación del Refinador de discos						
Designación: Refinador de discos.	N° de Datasheet: 04					
Función: Romper las fibras de celulosa	Fecha: 24/08/2021					
Número de unidades: 1	TAG: N-101					
Tipo: Desfibrador de platos horizontales						
Área: A20						



Datos de operación del motor		
Material a procesar	Fibras de celulosa – ácido	
	acético glacial	
rpm	2.900	
Potencia, kW	45	
Voltaje, V	380	
Amperaje, A	82	
Capacidad de trabajo, m³/h	12	
Capacidad de procesamiento, m ³ /h	16,56	
Presión, barG	2	
Temperatura de operación, °C	0-100	
Datos de construcción		
Diámetro ext. platos, pulgadas	12	
Diámetro int. Platos, pulgadas	5	
Material de los discos	Acero inoxidable	
Material del cuerpo	Acero inoxidable	

9.13 Vapor Flash

La línea de distribución de recolección de condensados de UDT se dirige hacían un estanque abierto. Por lo tanto, los datos de la línea de recuperación de condensado se calculan con la ecuación (28) y los resultados se encuentran en la siguiente tabla para una carga de condensado de 171 kg/h (este dato considera las pérdidas de calor que se detallan en los siguientes puntos) en el calentamiento de la suspensión en la etapa de acetilación.

Tabla 41. Resultados del vapor flash en la línea de condensado.

Propiedades del agua saturada (Líquido – Vapor)	Valor
Entalpía específica del agua antes de la descarga a 5 barG (kJ/kg)	670,88
Entalpía específica del agua después de la descarga a 0 barG (kJ/kg)	418,99
Calor latente del vapor después de la descarga a 0 barG, (kJ/kg)	2.256,54
Resultados	Valor
% Vapor Flash	11,16
Flujo másico del vapor flash (kg/h)	19,09
Flujo másico de condensado (kg/h)	151,91
Flujo volumétrico del vapor flash (m ³ /h)	31,94
Flujo volumétrico del condensado (m ³ /h)	0,16

La fracción volumétrica del condensado es solo de un 0,5%, por lo tanto, el dimensionamiento de las cañerías de retorno de condensado depende en mayor medida del flujo volumétrico del vapor *flash*, donde la cañería tiene que acomodar el flujo de agua y vapor *flash*. Para la determinación del diámetro de la cañería se utilizó la misma metodología del anexo 9.3.

9.14 Pérdidas de calor de la suspensión en cañerías al ambiente.

Los datos de la suspensión a 120°C se encuentran en la siguiente tabla.

Propiedades de la suspensión a 120°C	Valor	
Densidad, ρ (kg/m ³)	948,218	
Viscosidad, μ (cP)	100	
Calor específico, Cp (kJ/kg°C)	1,43984	
Conductividad térmica, k (kW/m°C)	1,423x10 ⁻⁴	

Tabla 42. Datos de la suspensión a 120°C.

Los datos térmicos y geométricos de las cañerías se encuentran en la siguiente tabla. Con sus respectivos resultados de pérdida de calor a partir de la ecuación (34).

Tabla 43. Datos geométricos y térmicos de las cañerías que transportan la suspensión.

Datos geométricos	Cañerías	
Radio interno, R ₁ (m)	0,026255	
Radio externo, $R_2(m)$	0,030165	
Área interna, $A_i(m^2)$	0,99	
Área externa, $A_o(m^2)$	1,14	
Datos térmicos	Cañerías	
Temperatura del fluido interno, T_{∞_i} (° <i>C</i>)	120,53	
Temperatura del aire, T_{∞_o} (° <i>C</i>)	12,4	
Coeficiente de convección interno, h_i (W/m ² °C)	95,43	
Coeficiente de convección externo, $h_o(W/m^{2o}C)$	20	
Perdidas de calor, Q (kW)	1,97	

9.15 Características geométricas del reactor (R-101)

El reactor está aislado con lana mineral entre dos paredes de acero inoxidable. Los radios de la sección lateral, superior e inferior se encuentran en la siguiente figura 17.



Figura 17. Medidas del radio sección lateral, superior e inferior del reactor.

9.16 Pérdida de calor en el reactor.

A partir de las ecuaciones (36) y (37) se calcularon las pérdidas de calor en el reactor, y los resultados se encuentran en la siguiente tabla.

Datos geométricos del reactor	Parte lateral	Parte superior y base
Radio interno, R ₁ (m)	0,5	0,37
Radio externo, $R_2(m)$	0,525	0,395
Radio externo, $R_3(m)$	0,625	0,495
Radio externo, R ₄ (m)	0,65	0,52
Área externa, $A_0 (m^2)$	7,76	1,69
Datos térmicos	Parte lateral	Parte superior y base
Temperatura de la superficie, T_1 (° <i>C</i>)	120,53	120,53
Conductividad térmica de la lana mineral, k	0,036	0,036
(W/m°C)		
(W/m°C) Temperatura del aire, T_{∞_o} (°C)	12,4	12,4
(W/m°C) Temperatura del aire, T_{∞_o} (°C) Coeficiente convectivo Externo, h _o (W/m ^{2°} C)	12,4 20	12,4 20

Tabla 44. Pérdidas de calor en el reactor.

9.17 Cotizaciones de válvulas, cañerías y accesorios.

Las cotizaciones que se muestran en las siguientes tablas se realizaron en distintas empresas dedicadas al rubro.

Tipo de válvulas	Cantidad	Valor unidad	Valor total	Empresa
Globo de AC1 1 ¹ / ₂ " (Manual)	2	265.800	531.600	Provaltec
Globo de AC1 1" (Manual)	1	232.700	232.700	Provaltec
Globo de AC1 ½" (Manual)	1	133.600	133.600	Provaltec
Alivio de presión de SS1 2" (automática)	1	1.030.200	1.030.200	Provaltec
Ruptura de SS1 2" (Automática)	2	870.000	1.740.000	Provaltec
Bola de SS1 ½" (Manual)	3	121.700	365.100	Provaltec
Bola de SS1 2" (Manual)	3	197.300	591.900	Provaltec
Bola de SS1 1" (Manual)	1	168.900	168.900	Provaltec
Globo de SS1 2" (Manual)	1	431.000	431.000	Provaltec
Bola de SS1 2" (Eléctrica)	2	1.000.000	2.000.000	Provaltec
Globo de PP (Manual)	1	20.000	20.000	Sodimac
Check de PP (Automática)	1	20.000	20.000	Sodimac
electroválvulas 1" (Eléctrica)	2	850.000	1.700.000	Provaltec
Trampa de vapor 1" (Automática)	1	250.000	250.000	Vaporisa
Check de AC 1" (Manual)	2	100.000	200.000	Vaporisa
Globo de AC1 1" (Manual)	8	81.200	649.600	Provaltec
Alivio de presión de AC1 1" (Automática)	1	384.800	384.800	Provaltec
Globo de AC1 1" (Eléctrica)	1	1.000.000	1.000.000	Provaltec
Reguladora de presión de AC1 1"	1	462.400	462.400	Provaltec

Tabla 45. Cotización de las válvulas de la planta de NFC acetiladas según el P&ID.

Tabla 46. Cotización de cañerías y accesorios.

Cañerías, accesorios y otros	Valor total
Cañerías y accesorios de la línea de distribución	1.639.400
de vapor saturado y condensado	
Cañerías y accesorios de la planta de NFC	3.000.000
acetiladas	
Botella de argón	350.000