

Evaluación de la eficiencia del proceso de extracción de celulosa a partir de residuos de pseudotallo de plátano mediante el análisis de flujos de materia

Kiara Mayerly Pabon Cadena

Director:

Martha Barrera Hernández, Msc

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela De Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingeniería ECBTI

Programa de ingeniería de alimentos

2025

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios por brindarme fortaleza, salud y sabiduría para culminar este proceso académico. Su guía constante iluminó cada paso y me permitió superar los desafíos con esperanza y determinación cuando sentía rendirme.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mi directora de proyecto, la docente Martha Barrera, quien no solo fue tutora en varios cursos durante mi formación profesional, sino también una maestra en distintas situaciones de este proceso. Su dedicación, exigencia, acompañamiento y confianza en mis capacidades marcaron una diferencia significativa en mi crecimiento académico y personal.

A mis docentes, especialmente a quienes interactuaron conmigo durante mi participación en el Semillero de Investigación SIA y a los integrantes de la 890, en particular al doctor Eduart Andrés Gutiérrez, por compartir generosamente su conocimiento y fomentar en mí el interés por la investigación y la disciplina académica.

A mi familia, por su amor incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por ser mi motor diario. Su apoyo emocional y comprensión fueron fundamentales para llegar hasta aquí.

A mis compañeros y amigos, quienes hicieron este camino más ligero y humano, gracias por los trabajos compartidos, las risas y el apoyo mutuo.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones, como la Universidad del Quindío, que contribuyeron al desarrollo de este trabajo. Cada aporte fue esencial para alcanzar este resultado.

Dedicatoria

Dedico este proyecto primeramente a Dios, cuya guía, fortaleza y sabiduría me sostuvieron en cada etapa de este camino académico y personal. A mis hijas, motor de mis días y razón profunda de cada esfuerzo; su amor, paciencia y luz me impulsaron a perseverar incluso cuando el trayecto se tornó desafiante. A mi familia, por su apoyo incondicional, por creer en mí y por acompañarme con amor en cada paso.

A la tutora Martha Barrera, cuya guía convirtió cada desafío en una oportunidad de aprendizaje.

Maestra excepcional y referente en mi formación, gracias por su dedicación, su orientación rigurosa y su acompañamiento constante. Su confianza y enseñanzas hicieron posible que este trabajo alcanzara la solidez y el sentido que hoy posee.

A todos ustedes, con profundo agradecimiento.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de un pretratamiento químico con peróxido alcalino en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera. Para ello, se realizó un análisis de flujos de materia mediante el modelamiento del proceso en el software SuperPro Designer®, con el fin de establecer una base para su posterior optimización. Este análisis se fundamentó en datos experimentales previamente obtenidos dentro de la convocatoria 890, en los cuales se caracterizaron las fracciones resultantes del pretratamiento, específicamente celulosa, hemicelulosa y lignina.

Los objetivos específicos de la investigación incluyeron la revisión de estudios previos donde se evaluó el pretratamiento con peróxido alcalino en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica, la caracterización de las fracciones obtenidas mediante técnicas analíticas como TGA, FTIR y HPLC, y el establecimiento de un balance de materia para el proceso con pretratamiento químico. Este enfoque permitió comprender la eficiencia del pretratamiento en la disrupción de la estructura lignocelulósica y optimizar su aplicación en la producción de nuevos bioproductos de alto valor agregado.

Los resultados de este estudio contribuyeron al desarrollo de bioproductos innovadores a partir de los residuos de la industria platanera, promoviendo su aprovechamiento integral y la obtención de compuestos con aplicaciones industriales estratégicas. Asimismo, el uso de la herramienta computacional SuperPro Designer® permitió simular el comportamiento del sistema, fortaleciendo el análisis del proceso y facilitando la toma de decisiones.

Palabras clave: Caracterización, Pretratamiento, Biomasa, Optimización, Software.

Abstract

The present study aimed to evaluate the effect of an alkaline peroxide chemical pretreatment on the fractionation of lignocellulosic biomass from the banana industry. To achieve this, a material flow analysis was conducted by modeling the process using SuperPro Designer®, in order to establish a basis for its subsequent optimization. This analysis was based on previously obtained experimental data from Call 890, in which the fractions resulting from the pretreatment—specifically cellulose, hemicellulose, and lignin—were characterized.

The specific objectives of the research included reviewing previous studies that evaluated alkaline peroxide pretreatment in the fractionation of lignocellulosic biomass, characterizing the obtained fractions using analytical techniques such as TGA, FTIR, and HPLC, and establishing a material balance for the process with chemical pretreatment. This approach made it possible to understand the efficiency of the pretreatment in disrupting the lignocellulosic structure and to optimize its application in the production of new high value-added bioproducts.

The results of this study contributed to the development of innovative bioproducts from banana industry residues, promoting their integral utilization and the production of compounds with strategic industrial applications. Furthermore, the use of the computational tool SuperPro Designer® made it possible to simulate system behavior, strengthening process analysis and facilitating decision-making.

Keywords: Characterization, Pretreatment, Biomass, Optimization, Software.

Tabla de Contenido

Introducción.....	11
Planteamiento Del Problema	12
Justificación.....	14
Objetivos	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Marco Teórico y Referencial.....	17
Biomasa Lignocelulósica.....	17
Estructura y Composición.....	17
Celulosa.....	17
Hemicelulosa.....	18
Lignina	18
Fraccionamiento de Biomasa Lignocelulósica	18
Pretratamientos de Biomasa Lignocelulósica	19
Clasificación General de los Pretratamientos	19
Físicos	19
Químicos.....	19
Fisicoquímicos	19
Biológicos	20

Pretratamientos Químicos: Fundamentos y Aplicaciones	20
Ácidos (H_2SO_4 , HCl)	20
Alcalinos (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$)	20
Oxidantes (H_2O_2 , ozono).....	21
Fundamentos del Pretratamiento Oxidativo con Peróxidos Aplicado al Pseudotallo de Plátano	21
Evaluación Comparativa de Métodos	24
Análisis de Flujos de Materia	25
Aplicaciones Industriales.....	26
FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier)	28
XRD (Difracción de Rayos X).....	28
TGA (Análisis Termogravimétrico)	28
SEM (Microscopía Electrónica de Barrido)	28
SuperPro Designer	28
Metodología.....	31
Materiales y Métodos	34
Recolección y Pretratamiento de Muestras.....	34
Resultados y Análisis de Resultados	39
Conclusiones	52
Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55
Apéndices	60

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Criterios comparativos en evaluación de métodos</i>	24
Tabla 2 <i>Condiciones Experimentales para el Pretratamiento AHP</i>	33
Tabla 3 <i>Datos Experimentales Entradas y Salidas</i>	33
Tabla 4 <i>Rendimientos de Datos Preliminares</i>	39
Tabla 5 <i>Rendimiento Muestra Promedio de Celulosa</i>	41
Tabla 6 <i>Rendimiento Muestra Promedio de Hemicelulosa</i>	41
Tabla 7 <i>Rendimiento Muestra Promedio de Lignina</i>	41

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de Flujo - Obtención de los Datos Experimentales</i>	32
Figura 2 <i>Instalación SuperPro Designer®</i>	36
Figura 3 <i>Modo de Operación</i>	37
Figura 4 <i>Registro de Componentes Puros</i>	38
Figura 5 <i>Elaboración del Balance de Materia en SuperPro Designer®</i>	47
Figura 6 <i>Resultado Celulosa Seca</i>	48
Figura 7 <i>Resultados Hemicelulosa Seca</i>	48
Figura 8 <i>Resultado Lignina Seca</i>	49

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Paso a Paso Fase 1: Separación Sólido-Líquido Para Obtener Celulosa</i>	60
Apéndice B <i>Paso a Paso Fase 2: Separación Líquido-Líquido Para Recuperar Hemicelulosa</i>	68
Apéndice C <i>Paso a Paso Fase 3: Separación Líquido-Líquido Para Aislar Lignina</i>	75
Apéndice D <i>Resultados Emitidos SuperPro Designer®</i>	81

Introducción

El proyecto realizado evaluó el efecto de un pretratamiento químico en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera, con el fin de establecer una base para la optimización del proceso mediante el análisis de flujos de materia. Este estudio buscó proporcionar un marco científico que permitiera mejorar la conversión de la biomasa lignocelulósica en productos de mayor valor agregado y fortalecer la eficiencia de los procesos industriales asociados a este sector.

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes renovables más relevantes en el campo de la biotecnología. Está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, y presenta una estructura compleja, en la cual la celulosa se encuentra protegida por la hemicelulosa y la lignina. Esta conformación dificulta su accesibilidad en la producción de compuestos de valor agregado (Yang et al., 2013). En este contexto, el pretratamiento químico se posiciona como una de las estrategias más utilizadas para mejorar la disponibilidad de los azúcares estructurales y aumentar la eficiencia del proceso de conversión.

El análisis de flujos de materia es fundamental para evaluar la eficiencia de procesos como la conversión de biomasa lignocelulósica, ya que permite identificar pérdidas de material, puntos críticos y oportunidades de optimización. Para ello, se empleó la herramienta SuperPro Designer®, mediante la cual se realizó una simulación detallada del proceso, permitiendo así respaldar la evaluación de su viabilidad técnica y económica.

Planteamiento Del Problema

La industria platanera genera grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos que representan una fuente renovable de materiales con alto potencial para la obtención de compuestos de valor agregado. Sin embargo, su aprovechamiento eficiente se ve limitado por la compleja estructura de la lignocelulosa, compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales forman una matriz altamente recalcitrante y difícil de degradar (Sun et al., 2016). Para mejorar la accesibilidad de los componentes celulósicos y facilitar su posterior aprovechamiento en la producción de bioproductos, es necesario aplicar tratamientos previos que permitan la disrupción de la estructura lignocelulósica (Mosier et al., 2005). En este contexto, los pretratamientos químicos han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad para descomponer la lignina y solubilizar la hemicelulosa, incrementando así la eficiencia del fraccionamiento de la biomasa (Alvira et al., 2010).

Sin embargo, para mejorar la eficiencia del proceso es fundamental contar con herramientas analíticas que permitan cuantificar los cambios en la composición de la biomasa a lo largo del pretratamiento. Un enfoque prometedor es el uso de balances de materia, los cuales permiten evaluar el rendimiento de cada etapa del proceso y optimizar los parámetros operativos (Kumar et al., 2009). En este contexto, el uso del software SuperPro Designer se plantea como una alternativa estratégica para el desarrollo de balances de materia simulados, permitiendo modelar el comportamiento del proceso de fraccionamiento de biomasa lignocelulósica bajo diferentes condiciones operativas. Esta herramienta facilita la estimación de flujos de materia, consumos de reactivos y generación de subproductos sin necesidad de realizar múltiples ensayos experimentales, lo que contribuye significativamente a la reducción de costos operativos y gastos asociados al uso de reactivos en laboratorio.

Además, la simulación permite realizar análisis de sensibilidad y evaluar escenarios de optimización del pretratamiento químico, fortaleciendo la toma de decisiones a nivel técnico y económico antes de la validación experimental.

A partir de esta problemática, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible realizar un balance simulado de materia, apoyado en herramientas de simulación como SuperPro Designer, para evaluar el efecto de un pretratamiento químico en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera mediante el análisis de flujos de materia?

Justificación

En el marco del proyecto CD 890-82229 y como estudiante de movilidad UNIQUINDIO - UNAD CEAD Bucaramanga, este proyecto ha sido planteado con el propósito de contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras para la valorización de los residuos lignocelulósicos generados en la industria platanera. Estos residuos, que tradicionalmente han sido considerados subproductos de bajo valor o incluso desechos, tienen un alto potencial para la obtención de bioproductos con aplicaciones industriales estratégicas. Sin embargo, su aprovechamiento eficiente se encuentra limitado por la falta de procesos optimizados que permitan su fraccionamiento de manera rentable y sostenible.

La importancia de este estudio ha radicado en la necesidad de transformar los residuos agroindustriales en recursos aprovechables mediante la aplicación de pretratamientos eficientes. El pretratamiento con peróxido alcalino ha demostrado ser una alternativa viable para mejorar la accesibilidad de la celulosa y facilitar la separación de sus componentes. Sin embargo, su implementación óptima requiere un análisis detallado de los flujos de materia en cada etapa del proceso, permitiendo establecer un balance de materia que facilite la evaluación del rendimiento y la eficiencia del fraccionamiento de la biomasa.

Aunque existen investigaciones sobre el uso de pretratamientos en otras biomásas, son escasos los trabajos que abordan el análisis cuantitativo del proceso mediante balances de materia simulados a partir de datos experimentales previos. Esto representa una oportunidad para generar información valiosa y aplicable, que contribuya al entendimiento y optimización de los procesos de valorización de este tipo de residuos.

A largo plazo, los resultados obtenidos permitirán consolidar la optimización de los procesos de transformación de residuos plataneros en bioproductos de alto valor agregado, como

biopolímeros, bioplásticos y aditivos industriales. Esto contribuirá de manera sostenida al fortalecimiento de la bioeconomía y la producción sostenible, al tiempo que impulsará la generación de nuevas oportunidades de negocio en el sector agroindustrial y la adopción de modelos de economía circular.

Además, este estudio tiene un impacto ambiental significativo, ya que el aprovechamiento eficiente de los residuos agroindustriales no solo reduce su acumulación, sino que también minimiza sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Mediante el modelamiento en SuperPro Designer®, a partir de datos experimentales, no solo se contribuye a la conversión de estos residuos en bioproductos de valor agregado, esta estrategia, también favorece la reducción de la huella de carbono, sino que adicionalmente impulsa un modelo de producción más sostenible, responsable y eficiente, tanto desde el punto de vista económico como en la optimización de procesos y productos.

Para la ingeniería de alimentos el aporte del presente estudio no solo aporta a la cadena de formación si no que tiene una especial relevancia en cuanto es la aplicación de las ciencias básicas en procesos y productos alimentarios.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto de un pretratamiento químico en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera mediante la simulación del análisis de flujos de materia con el fin de establecer una base en la optimización del proceso.

Objetivos Específicos

Evaluar el pretratamiento con peróxido alcalino en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera.

Caracterizar las fracciones de biomasa lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina) obtenidas del pseudotallo de plátano mediante pretratamiento con peróxido alcalino, con el fin de cuantificar su distribución y evaluar la eficiencia del proceso a través de balances de materia.

Determinar el balance de materia del proceso de pretratamiento de biomasa con peróxido alcalino, en función de la distribución porcentual de celulosa, hemicelulosa, lignina.

Marco Teórico y Referencial

Para poner en contexto el tema podemos aclarar algunos términos que se detallan a continuación:

Biomasa Lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes renovables más importantes en el contexto de la biotecnología. Está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, y se encuentra en una gran variedad de materiales vegetales, incluyendo residuos agrícolas, como la paja, el bagazo de caña y, en este caso, los residuos generados en la industria platanera (Himmel et al., 2007). Estos materiales tienen un alto potencial, pero su conversión eficiente requiere de un pretratamiento adecuado que permita descomponer la estructura rígida de la biomasa.

La biomasa lignocelulósica tiene una estructura compleja y recalcitrante, donde la celulosa está rodeada por la hemicelulosa y la lignina, lo que dificulta su accesibilidad para los microorganismos o las enzimas utilizadas en productos de valor agregado (Yang et al., 2013). El pretratamiento químico es uno de los métodos más utilizados para mejorar la accesibilidad de los azúcares presentes en la biomasa y aumentar la eficiencia del proceso de conversión.

Estructura y Composición

Celulosa

Es un polisacárido lineal compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces β (1 \rightarrow 4). Tiene una estructura cristalina que le confiere resistencia mecánica. Representa entre el 35–50% de la biomasa vegetal seca (Alvira et al., 2010).

Hemicelulosa

Polisacárido ramificado y amorfo, conformado por diferentes azúcares como xilosa, manosa y arabinosa. Es más fácil de hidrolizar que la celulosa, pero su contenido varía ampliamente (15–30%) dependiendo del tipo de biomasa (Sun & Cheng, 2002).

Lignina

Es un polímero aromático tridimensional, altamente resistente, que actúa como un “cemento” entre las fibras vegetales. Tiene propiedades hidrofóbicas y es la principal barrera para el acceso a la celulosa durante los procesos de conversión (Himmel et al., 2007).

La estructura compacta y entrelazada de estos tres componentes hace que la biomasa lignocelulósica sea altamente recalcitrante, es decir, difícil de degradar. Por ello, se requieren etapas de pretratamiento que rompan esa matriz y permitan liberar los azúcares fermentables (Kumar et al., 2009).

Fraccionamiento de Biomasa Lignocelulósica

El fraccionamiento de la biomasa lignocelulósica es el proceso mediante el cual se separan sus componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Este proceso es crucial, ya que la celulosa y la hemicelulosa son los principales precursores para la producción de biocombustibles y otros productos de alto valor agregado, mientras que la lignina puede ser utilizada como fuente de energía o en la producción de productos químicos (Kumar et al., 2009).

El fraccionamiento puede realizarse por métodos mecánicos, térmicos, químicos o una combinación de estos. El pretratamiento químico desempeña un papel fundamental en este proceso, ya que facilita la descomposición de la estructura lignocelulósica, mejora la liberación de los azúcares y permite su posterior utilización en la producción de etanol, metano o plásticos biodegradables.

Pretratamientos de Biomasa Lignocelulósica

El pretratamiento es una etapa fundamental en el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, ya que determina la eficiencia de los procesos posteriores como la hidrólisis, fermentación o extracción de componentes específicos como la celulosa. El objetivo general de un pretratamiento es romper la estructura recalcitrante de la biomasa para mejorar la accesibilidad de sus componentes, en especial de la celulosa, sin provocar su degradación (Alvira et al., 2010; Kumar et al., 2009).

Clasificación General de los Pretratamientos

Según diversos autores (Sun & Cheng, 2002; Yang et al., 2013), los pretratamientos pueden clasificarse de la siguiente manera:

Físicos

Implican la reducción del tamaño de partícula por métodos como la molienda, corte, ultrasonido o irradiación. Aunque no alteran la composición química, aumentan la superficie de contacto y mejoran la eficiencia de otros tratamientos posteriores.

Químicos

Utilizan ácidos, álcalis, solventes orgánicos u oxidantes para degradar selectivamente componentes de la biomasa. Son los más aplicados a escala piloto e industrial debido a su alta eficacia (Kumar et al., 2009).

Fisicoquímicos

Combinan calor y presión con reactivos químicos. Ejemplos: explosión con vapor, tratamiento con CO₂ supercrítico o extrusión.

Biológicos

Usan microorganismos o enzimas para degradar lentamente hemicelulosa o lignina. Son más ecológicos pero lentos y menos eficientes (Alvira et al., 2010).

Pretratamientos Químicos: Fundamentos y Aplicaciones

Los pretratamientos químicos son especialmente relevantes para este estudio, por su capacidad para alterar la estructura química de la biomasa con relativa facilidad. Dentro de estos, destacan tres grandes grupos:

Ácidos (H_2SO_4 , HCl)

Actúan principalmente sobre la hemicelulosa. Son efectivos, pero generan compuestos inhibidores (furfural, HMF) y requieren materiales resistentes a la corrosión (Sun & Cheng, 2002). Implica el uso de ácidos como el ácido sulfúrico o ácido clorhídrico. Estos reactivos rompen los enlaces de la hemicelulosa y, en algunos casos, también pueden hidrólisis parcial de la celulosa (Huang et al., 2013).

Alcalinos ($NaOH$, $Ca(OH)_2$)

Este pretratamiento actúa principalmente sobre la lignina, rompiendo enlaces éter y disminuyendo la cristalinidad de la celulosa. Emplea soluciones de hidróxido de sodio o potasio, que modifican la estructura de la lignina y eliminan compuestos fenólicos que dificultan la conversión posterior. Al ser más selectivo para la lignina, facilita la accesibilidad de la celulosa para la acción enzimática subsecuente (Sun & Cheng, 2002). Además, genera menos inhibidores en comparación con los tratamientos ácidos (Torres Jaramillo et al., 2017; Huang et al., 2013).

Oxidantes (H_2O_2 , ozono)

Descomponen la lignina mediante reacciones de oxidación radicalaria. Tienen la ventaja de no requerir altas temperaturas y de preservar la celulosa (Franco et al., 2009; Hamelinck et al., 2005).

Se utiliza ozono para fragmentar la lignina y permitir que las enzimas descompongan mejor los componentes celulósicos (Hamelinck et al., 2005).

Los pretratamientos químicos pueden ser aplicados a la biomasa de la industria platanera para mejorar la disponibilidad de la celulosa y hemicelulosa, lo que facilita la conversión de estos materiales en productos útiles como etanol o biocombustibles de segunda generación. Este tipo de pretratamiento es importante no solo para la eficiencia del proceso de conversión, sino también para la optimización del uso de recursos y la reducción de costos operativos en la industria.

Fundamentos del Pretratamiento Oxidativo con Peróxidos Aplicado al Pseudotallo de Plátano

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un agente oxidante ampliamente utilizado en el procesamiento de biomasa debido a su capacidad para despolimerizar la lignina sin afectar significativamente la estructura de la celulosa. En medio alcalino, el peróxido genera radicales hidroxilos ($\bullet OH$), que rompen los enlaces β -O-4 de la lignina, permitiendo su solubilización (Franco et al., 2009; Kumar et al., 2009).

Una ventaja clave de este pretratamiento es que no requiere altas temperaturas ni presión, lo que lo hace económicamente atractivo y ambientalmente más limpio que tratamientos ácidos o térmicos. Además, minimiza la formación de inhibidores como furfural o ácido levulínico, los cuales interfieren en procesos fermentativos o de hidrólisis posterior (Yang et al., 2013).

Uno de los estudios más relevantes para este proyecto es el realizado por Shimizu et al. (2018), quienes aplicaron diferentes combinaciones de pretratamientos (ácido, alcalino y peróxidos) sobre pseudotallo de plátano. Sus resultados indicaron que el tratamiento con H_2O_2 combinado con NaOH logró Reducir la lignina a menos del 2 %, Mantener la celulosa en niveles superiores al 75 %, Aumentar la digestibilidad enzimática en más de un 60 %.

Los resultados antes mencionados coinciden con lo observado por Guarnizo Franco et al. (2009), quienes demostraron que el uso de oxidantes como el peróxido promueve la apertura estructural de las fibras vegetales, favoreciendo el fraccionamiento posterior sin degradación de la celulosa.

Por otra parte, Hamelinck et al. (2005) y Luzardo et al. (2023) argumentan que los pretratamientos oxidativos tienen ventajas en la adaptación a contextos rurales y bajos recursos, como en muchas zonas agrícolas de Colombia, donde se requiere minimizar insumos tóxicos y el consumo energético.

Rahardjo et al. (2021) señalan que los residuos agrícolas tropicales, como los generados en el cultivo de plátano, constituyen una fuente estratégica de biomasa para el desarrollo de procesos energéticos y de valorización. Este enfoque apoya la elección del pseudotallo como materia prima, dada su alta disponibilidad y escaso aprovechamiento en Colombia. En contextos tropicales, donde abundan residuos como el pseudotallo de plátano, la posibilidad de su transformación en productos de valor agregado ofrece ventajas ecológicas y socioeconómicas, alineándose con los principios de economía circular. Diversas revisiones recientes sobre pretratamiento de biomasa lignocelulósica han destacado la importancia de emplear procesos eficientes y optimizados, que reduzcan el consumo de recursos y mejoren la viabilidad a escala industrial (Espinosa-Negrín et al., 2022). En este contexto, los pretratamientos químicos,

incluyendo aquellos basados en agentes oxidantes como el peróxido, han demostrado ser efectivos para la remoción de lignina y la mejora de la accesibilidad estructural de la biomasa, lo que favorece su posterior transformación (Torres Jaramillo et al., 2017).

El tratamiento oxidativo con peróxidos representa una alternativa eficaz dentro del espectro de pretratamientos sostenibles, por lo que su aplicación permite mantener la eficiencia del proceso sin comprometer la seguridad ambiental ni la accesibilidad económica.

Asimismo, Salazar et al. (2024) desarrollaron una metodología para la extracción de nanofibras de celulosa a partir de hojas de maíz, utilizando un pretratamiento con peróxido de hidrógeno alcalino (PHA) y posterior oxidación TEMPO. El proceso incluyó separación sólido-líquido, recuperación de más del 80 % de celulosa y caracterización por FTIR, SEM y análisis conductimétrico. Aunque su objetivo fue desarrollar películas activas, los resultados metodológicos y de eficiencia aportan un marco comparativo valioso para este proyecto. En particular, la reacción de deslignificación con $H_2O_2/NaOH$ permitió disolver lignina y hemicelulosa preservando la estructura celulósica, lo cual respalda la elección de este tratamiento para pseudotallo de plátano.

Por lo expuesto la elección del peróxido como pretratamiento en el presente proyecto no es arbitraria, sino que se basa en resultados previos favorables específicamente, alta selectividad hacia la lignina sin pérdida de celulosa, ausencia de subproductos tóxicos, facilidad de implementación en laboratorios rurales o académicos, compatibilidad con metodologías de análisis de flujos de materia.

Este enfoque permite integrar sostenibilidad, eficiencia y aplicabilidad local en una sola estrategia experimental, asimismo, se le da valor agregado al utilizar la herramienta Super Pro Designer®. para simular el proceso. Uno de los principales aportes del presente estudio es el

análisis detallado del proceso de extracción de celulosa. A continuación, se identifican los puntos críticos donde se puede optimizar el proceso del estudio:

Concentración y volumen del peróxido: afecta la eficiencia de remoción de lignina.

Tiempo de reacción y temperatura: impactan directamente en la integridad de la celulosa.

Relación sólido-líquido: influye en la transferencia de masa.

Número de etapas de lavado y filtrado: determina la pureza final del producto.

Evaluación Comparativa de Métodos

La elección del pretratamiento adecuado depende de múltiples factores: tipo de biomasa, producto deseado, costos operativos, impacto ambiental y facilidad de escalado. Yang et al. (2013) señalan que no existe un pretratamiento universalmente superior, sino que cada uno presenta ventajas y limitaciones. La Tabla 1 resume algunos criterios comparativos clave:

Tabla 1

Criterios comparativos en evaluación de métodos

Tipo de pretratamiento	Eficiencia	Formación de inhibidores	Costo	Escalabilidad	Impacto ambiental
Ácido	Alta	Alta	Medio	Alta	Medio
Alcalino	Media-Alta	Baja	Medio	Alta	Medio-Bajo
Oxidativo (H ₂ O ₂)	Alta	Muy baja	Bajo	Alta	Bajo
Biológico	Baja	Nula	Bajo	Limitada	Muy bajo

Fuente: elaboración propia a partir de Kumar et al., 2009; Franco et al., 2009; Yang et al., 2013.

Análisis de Flujos de Materia

El análisis de flujos de materia (AFM) es una herramienta fundamental en ingeniería para cuantificar y representar el movimiento y transformación de materiales en un proceso industrial. En este proyecto, el AFM se utiliza para realizar balances de masa etapa por etapa, identificar pérdidas o acumulaciones, calcular rendimientos de recuperación de celulosa y proponer mejoras en el proceso experimental.

Esta metodología es clave para el diseño, evaluación y optimización de procesos, aportando datos objetivos que permiten seleccionar condiciones óptimas de pretratamiento y optimizar recursos (Siddique et al., 2020). En particular, el AFM facilita comparar rendimientos antes y después del pretratamiento y cuantificar la eficiencia de extracción de celulosa a partir del pseudotallo de plátano, validando la eficacia del tratamiento con peróxidos y los esquemas de separación aplicados.

Estudios previos Salazar et al. (2024), han demostrado que pretratamientos sencillos como el uso de peróxido de hidrógeno alcalino pueden alcanzar rendimientos superiores al 80 % en la recuperación de celulosa, apoyando la viabilidad técnica del proceso. Otros estudios han trabajado con cáscaras agotadas de maíz morado sometidas a un pretratamiento con peróxido de hidrógeno alcalino (AHP), tanto con cómo sin asistencia ultrasónica. La caracterización inicial de esta biomasa reveló una composición del 33,08% de celulosa, 21,19% de hemicelulosa y apenas 2,69% de lignina, lo que confirma su idoneidad como fuente de biopolímeros. El pretratamiento AHP se llevó a cabo bajo condiciones suaves (10% de H₂O₂, pH 11,5), aplicando ultrasonido durante 0, 1, 5 y 10 minutos (Pasca et al., 2025).

El AFM, aplicado en la simulación, permite evaluar la cantidad de biomasa procesada, los productos útiles generados, los subproductos y residuos, así como la sostenibilidad del

proceso mediante la cuantificación de flujos de carbono y energía (Siddique et al., 2020). Esta aproximación también ha sido empleada en estudios como Biomass Conversion and Biorefinery (2025), que validan metodologías de pretratamiento secuencial y balances de masa para optimizar procesos.

Además, el enfoque es relevante para procesos adaptados a contextos rurales, buscando tecnologías simples, de bajo costo y con mínimo impacto ambiental, como señala Luzardo et al. (2023). La replicabilidad del método con pretratamiento con peróxidos y fraccionamiento simplificado abre oportunidades para la bioeconomía local.

Finalmente, el aprovechamiento del pseudotallo de plátano, un residuo abundante en regiones tropicales requiere superar retos técnicos asociados a la compleja estructura lignocelulósica (Yang et al., 2013; Kumar et al., 2009). Por ello, el análisis de flujos de materia es crucial para valorar efectivamente esta biomasa, orientando la optimización del pretratamiento y la valorización industrial de sus fracciones (Ruiz-Colorado et al., 2022; Shimizu et al., 2018)

Aplicaciones Industriales

El interés en la biomasa lignocelulósica ha aumentado en las últimas décadas debido a su potencial para sustituir materias primas fósiles, y por ser un recurso renovable, abundante y no competitivo con la producción de alimentos (Huang et al., 2013). Entre sus aplicaciones destacan:

Producción de biocombustibles de segunda generación, como bioetanol y biodiésel (Alvira et al., 2010)

Obtención de biopolímeros, como ácido poliláctico (PLA) o nanocelulosa

Generación de compuestos plataforma para la industria química (levulínico, furfural, etc.)

Uso en la fabricación de papel, textiles o materiales compuestos

Estas aplicaciones dependen de la capacidad de separar y purificar cada fracción de la biomasa. Por tanto, el desarrollo de métodos eficientes para su fraccionamiento y caracterización es clave en el diseño de procesos industriales sostenibles.

La biomasa lignocelulósica constituye la base del presente estudio, ya que el pseudotallo de plátano está compuesto precisamente por celulosa (~40–50%), hemicelulosa (~20–30%) y lignina (~10–20%), lo cual ha sido confirmado por investigaciones como las de Shimizu et al. (2018) y Ruiz-Colorado et al. (2022), Gutiérrez – Pineda et al 2025.

Al comprender la estructura interna del material, se justifica la necesidad de aplicar un pretratamiento eficaz que libere la fracción de celulosa sin degradarla, permitiendo su cuantificación y recuperación eficiente. Asimismo, la selección del tipo de pretratamiento y de las técnicas de caracterización se fundamentan directamente en los principios descritos por autores como Yang et al. (2013) y Kumar et al. (2009).

Por lo expuesto la elección del peróxido como pretratamiento en el presente proyecto no es arbitraria, sino que se basa en resultados previos favorables específicamente, alta selectividad hacia la lignina sin pérdida de celulosa, ausencia de subproductos tóxicos, facilidad de implementación en laboratorios rurales o académicos, compatibilidad con metodologías de análisis de flujos de materia.

Este enfoque permite integrar sostenibilidad, eficiencia y aplicabilidad local en una sola estrategia experimental, asimismo, se le da valor agregado al utilizar la herramienta Super Pro Designer® para simular el proceso.

Una vez separado cada componente, es fundamental caracterizar su composición y estructura, para comprobar la pureza y propiedades de la celulosa obtenida. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran

FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier)

Permite identificar grupos funcionales presentes en cada fracción. Es útil para verificar la presencia de lignina residual o grupos carbonílicos (Shimizu et al., 2018).

XRD (Difracción de Rayos X)

Evalúa el grado de cristalinidad de la celulosa, que se relaciona con su pureza y resistencia estructural (Yang et al., 2013).

TGA (Análisis Termogravimétrico)

Determina la estabilidad térmica de los compuestos, lo que permite inferir la proporción de lignina y celulosa.

SEM (Microscopía Electrónica de Barrido)

Muestra la morfología de las fibras tratadas, evidenciando cambios estructurales producto del pretratamiento (Franco et al., 2009).

Estas técnicas no solo brindan información científica valiosa, sino que permiten comparar los resultados obtenidos con estándares preindustriales y con otros estudios publicados. Para hacer análisis más integrales se hace necesario hacer simulaciones y utilizar herramientas que permitan visualizar el proceso desde varios puntos de vista de ahí la importancia de los análisis de flujos de materia como se detalla a continuación:

SuperPro Designer

SuperPro Designer® es un programa de software sencillo, de fácil uso para evaluaciones de viabilidad de bioprocesos a gran escala. Integra funciones y formulas reduciendo el tiempo de cálculo, lo que permite al usuario evaluar un mayor número de escenarios. Su uso facilita el modelado, la evaluación y la optimización de procesos integrados. Fue desarrollado para la simulación de operaciones unitarias de bioprocesos; por lo tanto, puede manejar esquemas de

procesamiento por lotes y continuos (Alnur Auli et al., 2013). También se puede utilizar en todas las etapas del desarrollo de procesos, desde el diseño conceptual hasta la operación y optimización del proceso. Además del modelado de procesos, el software tiene muchas características avanzadas que se pueden utilizar para el cálculo de balances de materia y energía. Canizales et al. (2020) justifican el uso de SuperPro Designer como herramienta clave para evaluar técnica y económicamente procesos biotecnológicos, incluyendo el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales.

El trabajo de Rini Hazwani Binti Rithuan (2021) sobre la simulación del proceso de recuperación de ácido succínico en SuperPro Designer® guarda una estrecha relación con el presente proyecto, ya que ambos se fundamentan en el uso de este software como herramienta de modelado, análisis y optimización de bioprocesos. Aunque el producto final es diferente —ácido succínico en el caso del estudio citado y celulosa a partir de pseudotallo de plátano en este proyecto—, la metodología es coincidente en aspectos esenciales como la incorporación de operaciones unitarias específicas (filtración, lavado, neutralización, secado, entre otras), datos tomados de estudios previos de laboratorio, la obtención de balances de materia y la evaluación del proceso para a toma de decisiones. Esto demuestra que SuperPro Designer® no solo permite simular con precisión procesos, sino también proponer optimizaciones antes de escalar experimentalmente.

Existen otras herramientas como Excel® y ASPEN Plus® utilizadas durante las etapas de desarrollo asociadas con la operación y optimización de procesos. Excel® es utilizado ampliamente debido a su disponibilidad y fácil acceso. Los cálculos de procesos se realizan con hojas de cálculo, lo que limita el análisis a un número reducido de unidades. Los modelos de hojas de cálculo requieren experticia del usuario porque las plantillas preexistentes requieren

adaptación posterior. Por su parte ASPEN Plus® es un software de modelado que permite optimizar el rendimiento, la calidad del producto y el consumo energético. Se utiliza en procesos con operaciones por lotes, continuas y mixtas, utilizado para diseñar procesos químicos, y ofrece la posibilidad de simular diversas combinaciones de operaciones unitarias, pero, requiere datos experimentales previos para la simulación, por lo tanto, no resulta accesible para no expertos, lo que dificulta la introducción de los datos de entrada, además de tener limitaciones en procesos a gran escala. (Athimulam & Kumares, 2006). Además, el software no tiene una función integrada para calcular la energía de las corrientes del proceso, se requieren programas de software adicionales para realizar el análisis, sin embargo, ambas herramientas tienen valores predeterminados para muchos de los datos de entrada extraídos de la literatura que podrían ser útiles cuando los datos experimentales no están fácilmente disponibles.

Metodología

La metodología empleada correspondió a un diseño experimental en su fase inicial (ver Tabla 3), basado en datos preliminares obtenidos en el marco del proyecto CD 890-82229. Como materia prima se utilizó plátano de la variedad Dominico Hartón, proveniente de fincas ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga. El material vegetal fue almacenado en condiciones controladas en las neveras del Laboratorio de Investigación y Desarrollo Agroindustrial Bucaramanga (LIDA Bucaramanga), manteniéndose a una temperatura de 4 °C hasta su posterior procesamiento y ejecución de los ensayos de laboratorio en las mismas instalaciones.

Las muestras se limpian manualmente para eliminar polvo y material particulado. Posteriormente, se fraccionan en segmentos de 10 cm y luego en tiras de 1 cm x 10 cm.

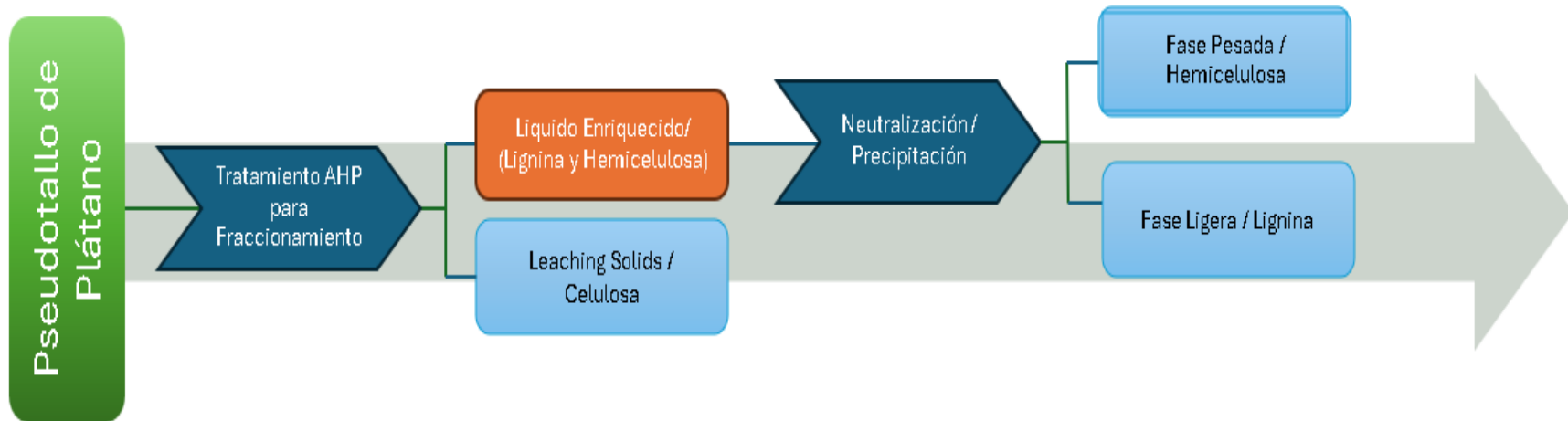
Se establecen ocho corridas experimentales basadas en variaciones de tiempo y concentración de H_2O_2 , NaOH., cada una de estas ocho corridas se realizaron por triplicado, sumando un total de 24 ensayos experimentales. (Tabla 2).

En cada una de ellas, se emplearon 5 g de biomasa seca, los cuales fueron suspendidos en el volumen necesario de solución para alcanzar una carga sólida del 8 % p/v, equivalente aproximadamente a 125 mL. El pretratamiento se llevó a cabo empleando H_2O_2 al 10–20% p/p, ajustando el pH a 11,5 mediante la adición de NaOH (2 o 4 M). Finalizada la reacción, la mezcla fue filtrada y el sólido recuperado se lavó hasta alcanzar un pH aproximado de 7, para posteriormente secarlo a 45 °C durante 24 h. El licor filtrado se reservó para la posterior recuperación de hemicelulosa y lignina.

La obtención de las fracciones en laboratorio se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Pineda (2025), de acuerdo con las condiciones presentadas en la Tabla 2 y según el esquema mostrado en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de Flujo - Obtención de los Datos Experimentales



Fuente: adaptado de Gutiérrez-Pineda et al., 2025 .

Tabla 2*Condiciones Experimentales para el Pretratamiento AHP*

Muestra	H ₂ O ₂ (w/v)	Tiempo (min)	NaOH (M)
1	10%	60	2
2	10%	60	4
3	10%	120	2
4	10%	120	4
5	20%	60	2
6	20%	60	4
7	20%	120	2
8	20%	120	4

Con los datos previamente obtenidos (Ver Tabla 3) se procedió a modelar el proceso mediante el software SuperPro Designer®. Este simulador permite representar de manera simplificada las entradas y salidas del sistema, así como realizar una simulación integral de las etapas involucradas.

Tabla 3*Datos Experimentales Entradas y Salidas*

Muestra	Entradas		
	1. Biomasa tratada (g)	3. NaOH/H ₂ O ₂ (ml)	4. HCl (ml)
a.	5,071	345	274
b.	5,036	350	232
c.	5,092	350	270
d.	5,0162	300	255

e.	5,002	296	
f.	5,012	260	240
g.	5,005	290	110
h.	5,007	280	230
Promedio usado en SuperPro	5	309	230

Muestra	Salidas		
	2. Celulosa (g)	5. Hemicelulosa (g)	8. Lignina (g)
a.	1,8167	1,2243	0,213
b.	1,9035	1,1703	0,159
c.	3,4117	1,119	0,121
d.	1,7289	1,2024	0,1911
e.	1,0693		
f.	1,778	0,8315	0,205
g.	1,4533	1,205	0,189
h.	1,6358	1,023	0,185
Promedio	1,84965	1,110785714	0,18044286

Materiales y Métodos

Recolección y Pretratamiento de Muestras

Para la realización de los ensayos se recolectaron las muestras (Tallo de plátano Dominico Artón) en el municipio de Bucaramanga del departamento de Santander, Colombia. Antes del tratamiento, se eliminó polvo y material particulado mediante limpieza manual. Posteriormente, el tallo se fraccionó en segmentos de aproximadamente 10 cm de longitud y, a partir de estos, se obtuvieron tiras de 1 cm × 10 cm. Finalmente, el material se secó a 110 °C durante 48 h.

Todos los ensayos fueron realizados por triplicado, considerando cada repetición como una unidad experimental independiente, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Los datos experimentales utilizados en este estudio provienen de ensayos de laboratorio desarrollados en el marco del Proyecto CD 890-82229 – CT ICETEX 2021-1085, apoyado por el

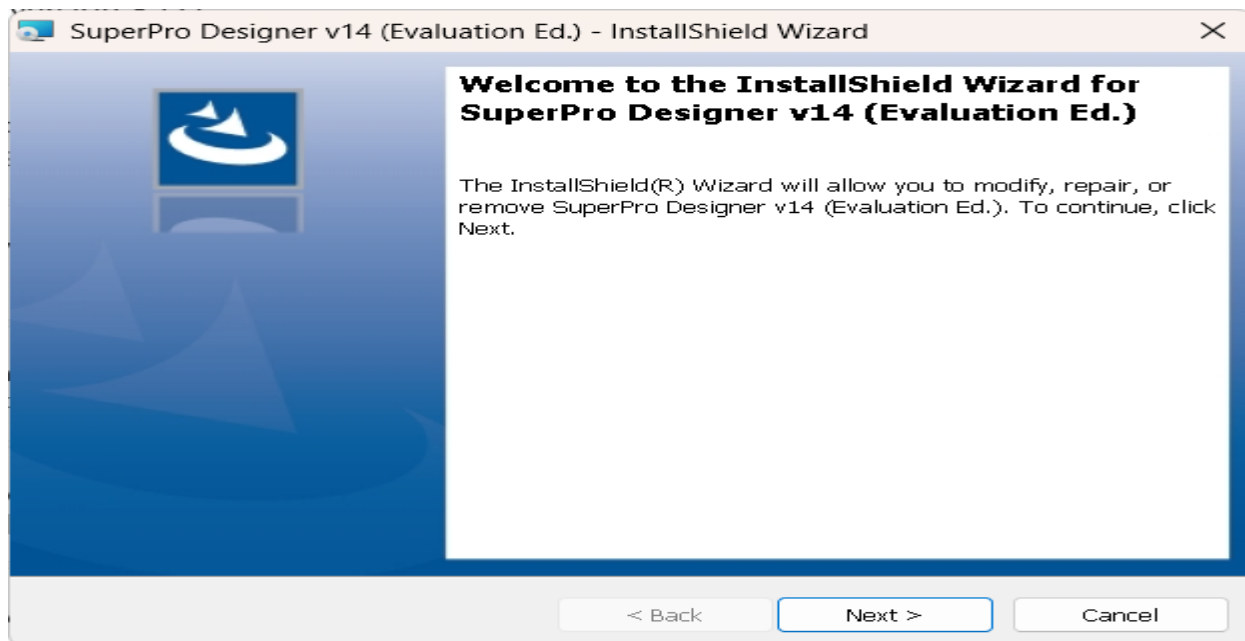
Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colombia). Estos datos constituyen la base para la parametrización y validación del modelo de simulación (ver Tabla 3).

Cabe señalar que el dato correspondiente a la fila “e” fue identificado como un valor atípico mediante criterios estadísticos. Para su evaluación, se emplearon medidas robustas de tendencia central y dispersión, con el fin de reducir la influencia de valores extremos.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad que evidenció que la inclusión de dicho dato no generaba variaciones significativas en los resultados del modelo. En consecuencia, se optó por excluirlo del análisis, evitando posibles sesgos en la interpretación de los resultados.

En el componente de simulación, se realizó la instalación del software SuperPro Designer en un equipo de cómputo, con el propósito de modelar y analizar cada una de las etapas del proceso. La simulación se estructuró en tres fases principales: (1) una etapa de separación sólido-líquido orientada a la obtención de celulosa, (2) una etapa de separación líquido-líquido para la recuperación de hemicelulosa y (3) una segunda etapa de separación líquido-líquido para el aislamiento de lignina.

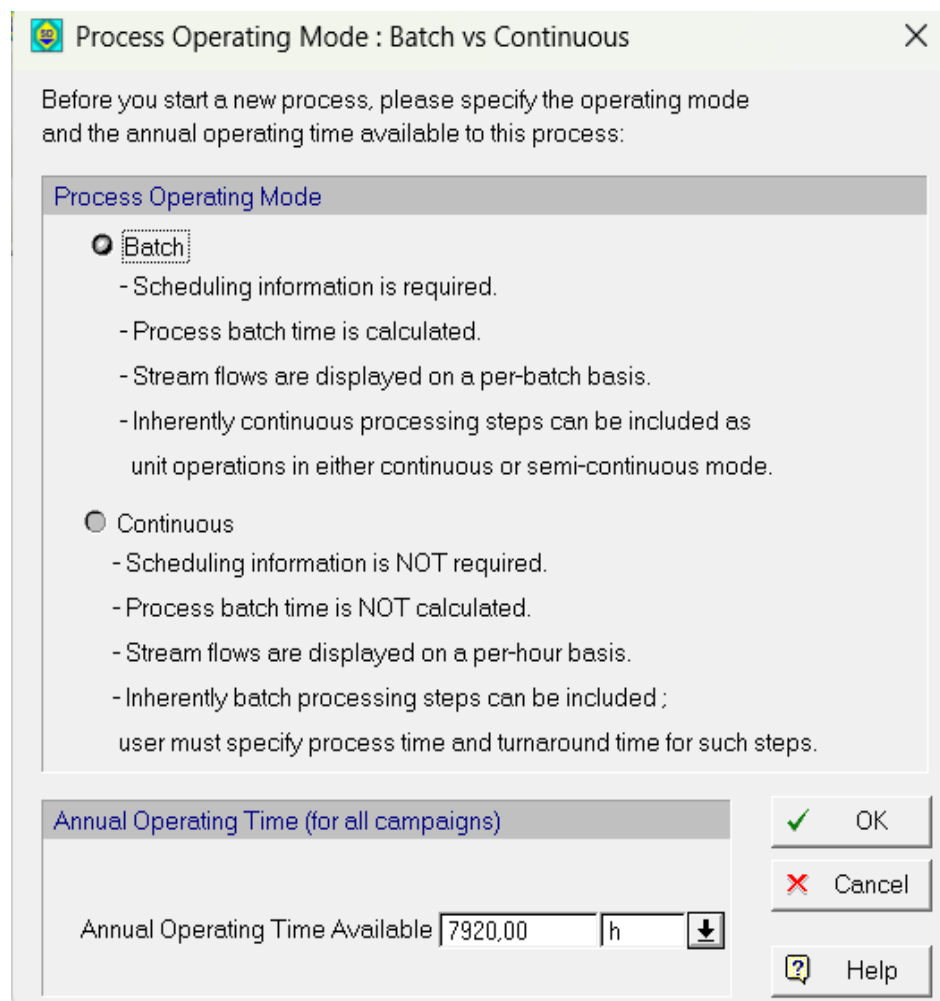
La integración de los datos experimentales obtenidos en los ensayos por triplicado permitió alimentar el modelo de simulación con parámetros representativos del proceso real, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados generados y facilitando la evaluación técnica del sistema. La Figura 2 presenta la instalación y configuración del software utilizado para la simulación del proceso.

Figura 2*Instalación SuperPro Designer®*

Fuente. Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

En este estudio, el proceso se modela en modo Batch, debido a que incluye etapas secuenciales de extracción, pretratamiento y separación. Además, estos sistemas rara vez operan en flujo continuo, a menos que se encuentren en un estado avanzado de industrialización.

El siguiente paso consistió en registrar todos los componentes y mezclas que intervienen en el proceso. La Figura 3 muestra el cuadro de diálogo utilizado para este fin, donde se listan todos los componentes puros empleados en la simulación.

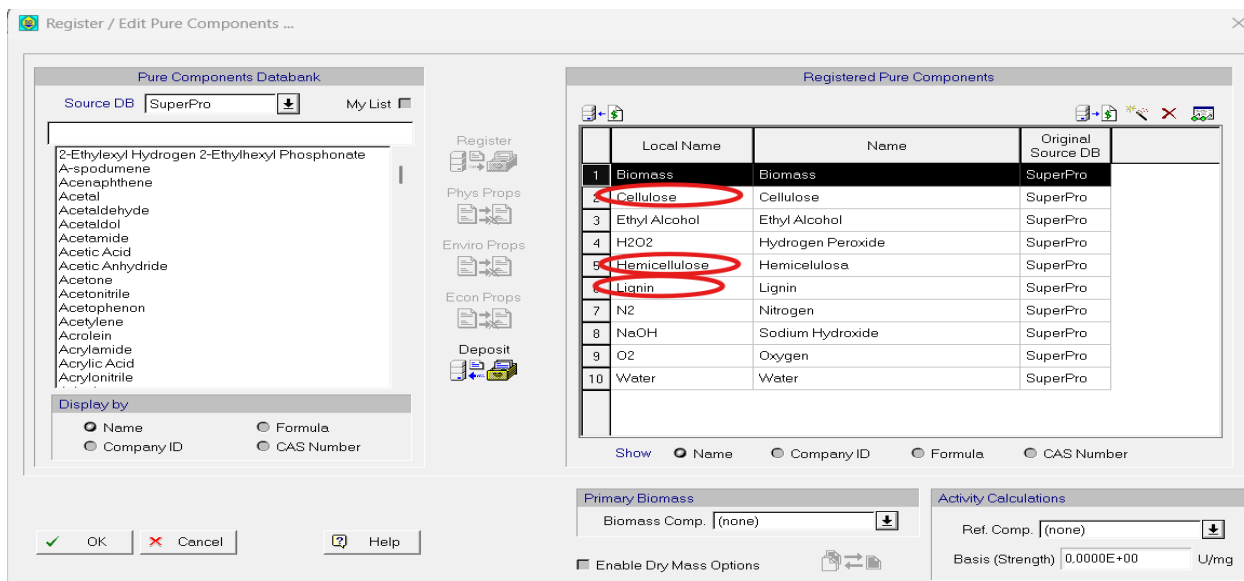
Figura 3*Modo de Operación*

Fuente. Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

A continuación, se ingresaron los datos obtenidos en el laboratorio para crear nuevos componentes personalizados. Estos estarán disponibles para su incorporación al proyecto, lo que permitió definir las corrientes de entrada y salida en el diagrama de flujo, así como se asignaron las diferentes unidades de proceso (reactores, extractores, entre otros), tal como se observa en la Figura 4. En SuperPro Designer®, las propiedades de los componentes y las mezclas se proporcionan en la base de datos del programa, obtenidas de múltiples fuentes.

Figura 4

Registro de Componentes Puros



Fuente. Software SuperPro Designer® (<https://www.intelligen.com/download/>)

Resultados y Análisis de Resultados

Para obtener los datos que sirvieron de base para la utilización del SuperPro Designer® se parte de una evaluación previa realizada en laboratorio registrados en la table 3 donde se evaluó la eficiencia del pretratamiento AHP en la extracción selectiva de celulosa y la recuperación de hemicelulosa y lignina, mediante un balance de masa en peso seco, las fracciones sólidas fueron lavadas y secadas (Gutiérrez-Pineda et al., 2025). La eficiencia del fraccionamiento se cuantificó utilizando las ecuaciones de recuperación y remoción (Ecuaciones 1 y 2) reportadas por Y. Su et al (2015)(15) aplicadas originalmente a corontas de maíz:

$$Recuperación_x(\%) = \frac{W_{AHP_x}}{W_{PST}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Remoción_x(\%) = 1 - Recuperación_x(\%) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde x corresponde a la fracción recuperada, $W_{AHP,x}$ es el peso de la fracción obtenida y W_{PST} corresponde al peso inicial de la biomasa.

Ejemplo: tomando los datos de la Tabla 3

$$Rendimiento = \frac{1.8167gr}{5gr} \times 100 = 35.82528101\%$$

Que corresponde al porcentaje % de celulosa de la fila “a”

Tabla 4

Rendimientos de Datos Preliminares

Muestra	Rendimiento %		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
a.	35,82528101	24,14316703	4,20035496
b.	37,79785544	23,23868149	3,15726767
c.	67,00117832	21,97564808	2,37627651
d.	34,46632909	23,97033611	3,80965671
e.	21,37744902		
f.	35,47486034	16,59018356	4,09018356
g.	29,03696304	24,07592408	3,77622378
h.	32,67026163	20,43139605	3,69482724
Promedio	36,70627224	19,30316705	3,1380988

Fuente: adaptada de datos preliminares Gutiérrez-Pineda et al., 2025 (Proyecto CD 890-82229).

La Tabla 4 presenta rendimientos promedio de: Celulosa: 36,70 g, Hemicelulosa: 19,30 g y Lignina: 3,14 g

Estos valores reflejaron el comportamiento típico luego de un proceso de fraccionamiento químico o fisicoquímico de biomasa vegetal.

Respecto a la celulosa el valor reportado se encuentra dentro del rango para biomasa lignocelulósica tras procesos de pretratamiento. entre 30 % y 50 % (Sun & Cheng 2002), lo que indica una buena preservación de la celulosa, lo cual sugiere que el pretratamiento logró remover parte de hemicelulosa y lignina sin degradar excesivamente la fibra celulósica.

Respecto al rendimiento de Hemicelulosa, los valores obtenidos corresponden al rango típico de hemicelulosa presente en biomasa, usualmente entre 20 % y 35 %, aunque su recuperación tras pretratamiento suele ser menor según las condiciones experimentales. Para Sun & Cheng (2002), la hemicelulosa se ubica entre 20–35 % en la biomasa, pero su recuperación efectiva tras extracción puede variar entre 10–25 %.

Respecto al rendimiento de Lignina, el contenido de lignina es claramente más bajo que el de celulosa y hemicelulosa, lo cual es típico en procesos de fraccionamiento donde la lignina se solubiliza parcialmente o se pierde durante el pretratamiento. El promedio obtenido de 3,14 g indica que la lignina residual corresponde a una fracción típica tras tratamientos químicos, sugiriendo remoción efectiva de lignina.

Por otra parte, la herramienta Super Pro Designer®. permitió evaluar el pretratamiento con peróxido alcalino en el fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera mediante un modelamiento, de manera tal que se optimizó el proceso y se disminuyeron costos operativos de laboratorio, en el caso del estudio permite comparaciones

para la toma de decisiones. Las tablas 5,6 y 7 muestran los rendimientos obtenidos en el SuperPro Designer®.

Tabla 5

Rendimiento Muestra Promedio de Celulosa

Fase 1: separación sólido-líquido para obtener celulosa.				
Muestra	Entradas		Salidas	Rendimiento %
Promedio	1. Biomasa tratada (g)	2. Celulosa (g)		
	15		2,3407	15,60466667

Tabla 6

Rendimiento Muestra Promedio de Hemicelulosa

Fase 2: Separación líquido-líquido para recuperar hemicelulosa.				
Muestra	Entradas		Salidas	Rendimiento %
Promedio	1. Biomasa tratada (g)	2. Hemicelulosa (g)		
	15		5	33,33333333

Tabla 7

Rendimiento Muestra Promedio de Lignina

Fase 3: Separación Líquido-Líquido para aislar lignina.				
Muestra	Entradas		Salidas	Rendimiento %
Promedio	1. Biomasa tratada (g)	2. Lignina (g)		
	15		0,0275	0,183333333

De acuerdo con Shimizu et al. (2018), el rendimiento de obtención de celulosa de 15 %, se encuentra dentro del rango esperado para procesos iniciales de fraccionamiento de biomasa lignocelulósica, para el autor, el pseudotallo de plátano presenta bajos niveles de accesibilidad a la celulosa en condiciones suaves de pretratamiento, con recuperaciones que suelen oscilar entre 12 y 18 % de la biomasa inicial, lo cual coincide con los resultados del presente ensayo, sin embargo según lo reportado por Sun & Cheng (2002) lo encontrado en el SuperPro Designer®

con los mismos datos difiere ya que los autores mencionan un rendimiento entre 30 y 50 % para la celulosa. Es de aclarar que estos datos se consideran preliminares en una investigación que Gutiérrez et al. (2025), profundiza dentro de su estudio posteriormente. Por otra parte Restrepo et al. (2021) obtuvieron fibras de celulosa a partir de residuos de pseudotallos de banano por dos rutas químicas diferentes: hidróxido de sodio al 30 % y peróxido de hidrogeno al 8%, los rendimientos promedio obtenidos fueron 24.4 % y 49,3%, respectivamente Restrepo et al. (2021)

Por lo expuesto se puede considerar que los resultados preliminares están dentro de los rangos aceptables experimentales comparándolo con otros estudios, sin embargo, se debe profundizar en el tema considerando todas las variables de obtención y recuperación de la celulosa.

Estos valores relativamente bajos se explican por la fuerte asociación de la celulosa con la hemicelulosa y la lignina en la matriz vegetal, lo que dificulta su liberación sin una etapa de pretratamiento más agresiva (Sun & Cheng, 2002; Torres Jaramillo et al., 2017). Además, Siddique et al. (2020) señalan que, en el análisis de flujos de biomasa lignocelulósica, gran parte de la fracción celulósica permanece retenida o protegida en la estructura, lo que limita su disponibilidad inicial.

En este contexto, resulta importante destacar que la aplicación de condiciones más severas, especialmente con el uso de peróxidos o tratamientos alcalinos, puede mejorar de manera significativa el rendimiento. De hecho, Shimizu et al. (2018) reportaron incrementos superiores al 70 % en la obtención de celulosa cuando se emplearon pretratamientos intensivos, lo cual contrasta con los valores moderados alcanzados en condiciones iniciales. En otros estudios realizados en el marco del Proyecto CD 890-82229, la recuperación de celulosa se mantuvo por encima del 50% ($\approx 60\%$), es de aclarar que en dicho estudio se utilizó otras técnicas

adicionales y ensayos más especializados. Asimismo, Yang et al. (2013) y Zhang et al. (2011) han demostrado que la accesibilidad y separación de la celulosa dependen en gran medida de la desorganización de la matriz lignocelulósica y de la solubilización diferencial de sus componentes.

En conclusión, el rendimiento de 15 % obtenido refleja la efectividad limitada de un pretratamiento suave, pero se encuentra en concordancia con lo reportado por algunos autores, confirmando que el pseudotallo de plátano requiere procesos más selectivos y severos para incrementar la accesibilidad de la celulosa y alcanzar mayores porcentajes de recuperación.

Por otro lado, Pasca et al. (2025) reportaron, para una biomasa diferente (cáscara de maíz morado agotada), composiciones de 33,08 % de celulosa, 21,19 % de hemicelulosa y 2,69 % de lignina. Aunque el material inicial difiere del pseudotallo de plátano, se observa que los porcentajes de recuperación de hemicelulosa y lignina obtenidos en ambos estudios se mantienen dentro de los rangos típicos para materiales lignocelulósicos sometidos a pretratamientos alcalinos con peróxido, en concordancia con lo mostrado en las Tablas 5 y 6. Esto puede interpretarse como evidencia de que el pretratamiento AHP promueve patrones de solubilización y fraccionamiento relativamente consistentes entre diferentes biomásas, aun cuando el material utilizado inicialmente no sea idéntico. Se puede inferir que:

- La celulosa tiende a concentrarse en el sólido pretratado, debido a su mayor estabilidad frente a condiciones alcalinas.
- La hemicelulosa muestra una recuperación acorde con su proporción natural, y su solubilización parcial es un comportamiento esperado bajo condiciones de pH elevado.

- La lignina solubilizada permanece en niveles compatibles con los reportados en la literatura, lo que sugiere que el pretratamiento aplicado tuvo una eficacia similar a la observada en otros estudios.

Estos resultados indican que el proceso de pretratamiento evaluado presenta un comportamiento comparable al observado en biomásas estudiadas previamente, lo que valida su aplicabilidad y abre la posibilidad de ajustar sus condiciones para maximizar la obtención de fracciones de interés. Sin embargo, al igual que ocurre con la celulosa (Yang et al., 2013), la aplicación de condiciones más selectivas de pretratamiento podría incrementar la eficiencia de recuperación en estudios posteriores.

De manera similar, Siddique et al. (2020) destacan que los balances de flujo de biomasa evidencian que no toda la hemicelulosa es recuperable, ya que parte de ella se solubiliza o se degrada durante los pretratamientos, lo cual explica que el rendimiento no alcance valores cercanos al 100 %. Asimismo, Torres Jaramillo et al. (2017) señalan que los pretratamientos químicos influyen directamente en la eficiencia de la separación, y que condiciones moderadas permiten recuperar fracciones representativas de hemicelulosa sin provocar pérdidas excesivas.

Es importante resaltar que la composición particular del pseudotallo de plátano también incide en la recuperación. Shimizu et al. (2018) demostraron que el uso de ácidos, álcalis y peróxidos mejora la accesibilidad de los polisacáridos en esta biomasa, lo cual favorece la obtención de azúcares fermentables. Sin embargo, bajo condiciones iniciales de fraccionamiento, como las aplicadas en el presente proyecto, los valores obtenidos se asemejan a los reportados por Zhang et al. (2011), quienes mostraron que la separación de hemicelulosa depende de la solubilidad diferencial frente a otros componentes como lignina y celulosa.

En conclusión, el rendimiento de hemicelulosa 33,3 % es consistente con lo descrito en la literatura y confirma que el método aquí empleado resulta eficaz para la recuperación parcial de hemicelulosa a partir de biomasa lignocelulósica. Sin embargo, al igual que ocurre con la celulosa (Yang et al., 2013), la aplicación de condiciones más selectivas de pretratamiento podría incrementar la eficiencia de recuperación en estudios posteriores.

Como se puede observar en la Tabla 7, se logró aislar lignina a partir de la biomasa tratada, obteniéndose un rendimiento promedio de 0,1833 g, (equivalente al 1,22 % respecto a la biomasa inicial). Aunque el valor es bajo, se encuentra en concordancia con lo reportado en estudios previos sobre el pseudotallo de plátano y otras biomásas lignocelulósicas, donde la lignina tiende a permanecer mayoritariamente en solución tras los tratamientos oxidativos iniciales. Shimizu et al. (2018) demostraron que el uso de peróxido en condiciones alcalinas genera una disolución significativa de la lignina, lo que reduce la fracción sólida recuperada en las primeras etapas de separación. Este comportamiento explica que los resultados obtenidos en el presente trabajo reflejen un bajo porcentaje de lignina aislada, similar a lo encontrado en condiciones iniciales de dicho estudio.

Finalmente, lo planteado por Salazar Acevedo et al. (2021), Gutiérrez – Pineda et al. 2025 confirman que la eficiencia en la separación de lignina depende estrechamente de parámetros de operación como pH, temperatura, concentración de reactivos y tiempo de reacción. Bajo las condiciones iniciales aplicadas en este ensayo, los resultados se ajustan a las tendencias reportadas por otros autores consultados, una mayor proporción de lignina se mantiene en el licor residual, mientras que solo una fracción minoritaria se logra recuperar de manera directa.

El bajo rendimiento de lignina aislada no representa un error experimental, sino una característica propia del material y de las condiciones utilizadas, reafirmando la validez de los resultados obtenidos.

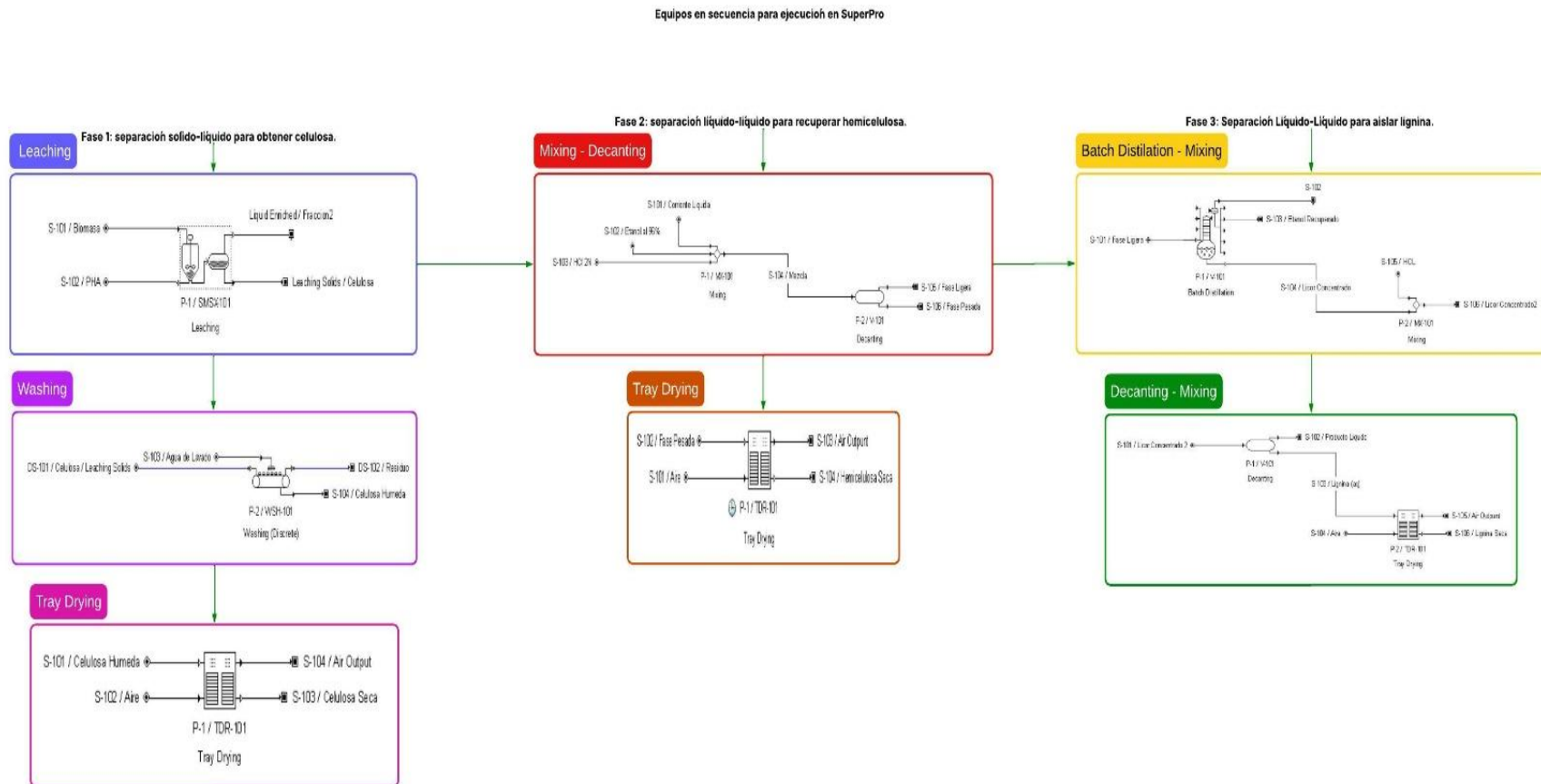
Continuando con los objetivos propuestos, para establecer el balance de materia del proceso de pretratamiento de biomasa con peróxido alcalino se empleó la herramienta SuperPro Designer® cuya base de cálculo se da en kilogramos. En la Figura 5 se presenta la secuencia utilizada para obtener los resultados, donde se visualiza la generación de las distintas fracciones mediante un diagrama que permite evaluar el pretratamiento aplicado al fraccionamiento de biomasa lignocelulósica proveniente de la industria platanera. Estos resultados se fundamentan en los datos obtenidos durante una caracterización previa realizada en laboratorio, los cuales sirvieron como base para la elaboración del balance de materia del proceso.

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran los resultados del modelamiento del proceso de digestión alcalina, que emplea peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 20 % y NaOH 2 N, seguido de la filtración del sólido para la recuperación de la celulosa (Fracción 1). Posteriormente, el licor filtrado se acidifica con HCl 2 N para precipitar la hemicelulosa (Fracción 3) y, finalmente, se realiza una destilación seguida de una segunda acidificación para obtener la lignina (Fracción 5) en el software SuperPro Designer®, de acuerdo con los procedimientos y datos obtenidos en laboratorio.

Es importante señalar que los valores generados por SuperPro Designer® se expresan en kilogramos después del proceso de secado. Cada fracción sólida recuperada fue lavada, secada a 40 °C durante 24 horas y posteriormente pesada para su análisis.

Figura 5

Elaboración del Balance de Materia en SuperPro Designer®



Fuente: elaboración propia a partir de simulación de Procesos en Software SuperPro Designer®

Figura 6

Resultado Celulosa Seca

Stream S-103 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Celulosa extraí	0,00234	100,0000	1425,547649

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Figura 7

Resultados Hemicelulosa Seca

Stream S-104 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Hemicelulosa	0,00518	100,0000	1425,547649

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Figura 8

Resultado Lignina Seca

Stream S-106 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Lignina (aq)	0,00220	100,0000	1425,547649

Total Flowrates

Mass Flow | 0,0022 | kg/batch

Volumetric Flow | 0,0015 | L/batch

Temperature | 40,0 | °C

Pressure | 1,013 | bar

Enthalpy | 0,00 | kW-h/batch

Units Mass | kg | Vol. | L | Composition | % | Conc. | g/L | Enthalpy | kW-h

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT) | h

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Fuente. Software SuperPro Designer® (<https://www.intelligen.com/download/>)

Las tres figuras mostradas (6,7, y 8) indican los flujos de salida (Stream) de cada una de las fracciones lignocelulósicas después del proceso de extracción. Estas corrientes muestran: Celulosa extraída (Stream S-103) y Hemicelulosa extraída (Stream S-104) y la lignina en menor concentración, a partir de allí se puede inferir que en todos los casos, SuperPro Designer® muestra que la corriente de salida contiene 100% del componente considerando esa corriente como una corriente ya separada de impurezas y otros componentes. En términos de proceso, indica que la etapa de separación está funcionando idealmente, o que el modelo fue configurado para entregar el producto en su estado más puro, el paso a paso de cada una de las fracciones obtenidas se puede observar en cada uno de los apéndices ubicados al final del documento.

En procesos de fraccionamiento alcalino, ácido o solventes, es habitual asumir separaciones ideales para cálculos preliminares (Sluiter et al., 2010, Humbird et al., 2011)

Los flujos máxicos obtenidos con base de cálculo de 1 kilogramo, para celulosa es de 0,00234 kg/Batch con un volumen asociado de 0,0016 L/Batch y para la hemicelulosa 0,00518 kg/h con un volumen asociado de 0,0036 L/h. Estos flujos están directamente relacionados con los rendimientos experimentales que se mostraron inicialmente. El software ha reflejado la proporcionalidad de recuperación, donde la hemicelulosa aparece con un flujo mayor que la celulosa y la celulosa es más concentrada (g/L más altos), por otra parte la lignina tendría un flujo aún menor según lo reportado en los diferentes apéndices, consistente con su menor recuperación tras pretratamiento.

La hemicelulosa suele solubilizarse más fácilmente, lo que genera fracciones líquidas relativamente grandes (Sun & Cheng, 2002) y la celulosa permanece en fase sólida o semisólida y se recupera en menores volúmenes, lo cual coincide con las salidas de SuperPro Designer®.

Las concentraciones (1425 g/L) en las salidas muestran una concentración inusualmente alta tanto para celulosa como hemicelulosa, esto ocurre porque SuperPro Designer® calcula concentración en función de masa/volumen de la corriente, y si el volumen de líquido es muy pequeño (0,0016 L), entonces incluso masas pequeñas generan valores muy altos.

Con este tipo de resultados se puede inferir que el material no necesariamente está a esa concentración, sino que el software está indicando una corriente muy concentrada, porque se modeló como un producto casi puro, con apenas volumen de solvente. Y esto es completamente coherente con procesos simulados donde el producto se representa como sólido casi seco.

En modelamientos de procesos lignocelulósicos se acostumbra a representar las fracciones sólidas como corrientes prácticamente anhidras (Humbird et al., 2011).

Por otra parte la temperatura 40°C y presión constantes 1,013 bar son condiciones estándar y suaves, que indican que la separación se modeló posterior al pretratamiento, durante filtración, sedimentación o secado intermedio por lo tanto refleja que el material ya está estabilizado luego del proceso.

La comparación entre los datos experimentales (Tablas 3 y 4) y los valores simulados evidencia una adecuada concordancia, consistente con los resultados reportados previamente en el Apéndice, lo que valida la confiabilidad del modelo implementado.

Conclusiones

El pretratamiento con peróxido alcalino aplicado a pseudotallo de plátano demostró ser efectivo en el fraccionamiento de la biomasa lignocelulósica, permitiendo la separación diferenciada de celulosa, hemicelulosa y lignina. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad de este método para mejorar la accesibilidad de la fracción celulósica, en concordancia con lo reportado en estudios previos sobre este tipo de residuos agroindustriales.

El rendimiento del 15 % en la obtención de celulosa a partir del pseudotallo de plátano bajo condiciones suaves de pretratamiento es consistente con los valores reportados en la literatura por algunos autores (12-18 %). Esto indica que la celulosa permanece fuertemente asociada con la hemicelulosa y la lignina, limitando su liberación y recuperación, por lo que para aumentar el rendimiento es necesario implementar pretratamientos más severos o selectivos.

El rendimiento del 33,3 % para la recuperación de hemicelulosa está dentro del rango esperado para biomasa lignocelulósica y demuestra la efectividad del método aplicado en esta fase. Sin embargo, dado que no toda la hemicelulosa es recuperable debido a su solubilización o degradación parcial, mejorar las condiciones de pretratamiento podría optimizar la eficiencia de extracción y recuperación.

El bajo rendimiento de lignina aislada (1,22 %) refleja la naturaleza del pseudotallo de plátano, que posee bajo contenido estructural de lignina, y las condiciones suaves del tratamiento inicial que favorecen su permanencia mayoritaria en solución. Esto confirma que la baja recuperación no es un error experimental sino una característica del material y del proceso, sugiriendo que ajustes en parámetros como pH, temperatura y reactivos serían necesarios para mejorar la extracción.

El balance de materia establecido para el proceso, mediante el uso del SuperPro Designer® permitió cuantificar y caracterizar las fracciones de biomasa lignocelulósica a lo largo de cada etapa, identificando pérdidas mínimas y verificando la coherencia entre las corrientes de entrada y salida. Este modelado constituye una herramienta fundamental para futuras simulaciones y optimizaciones del proceso en software especializado, aportando una base sólida para el escalamiento del procedimiento en el ámbito industrial.

Los rendimientos obtenidos en la simulación mediante SuperPro Designer® 15 % para celulosa y 33 % para hemicelulosa, son coherentes con estudios experimentales que analizan la eficiencia de pretratamientos alcalinos en biomasa lignocelulósica. La relación inversa celulosa – hemicelulosa probablemente se deba a la deslignificación progresiva y la eliminación de hemicelulosa de la matriz de biomasa, lo que expone las fibras de celulosa a interacciones mecánicas y químicas más intensas.

Se determino el balance de materia del proceso de pretratamiento de biomasa con peróxido alcalino en función de la distribución porcentual de celulosa, hemicelulosa y lignina. El modelamiento en SuperPro Designer® muestran que las corrientes de salida correspondientes a la celulosa y hemicelulosa presentan composiciones del 100 %, reflejando una separación ideal del modelo.

Recomendaciones

Se sugiere seguir realizando modelamientos de este tipo y contrastar con datos experimentales para optimizar recursos y validar los resultados obtenidos en laboratorio.

Los cursos de los planes de estudio de la cadena de alimentos relacionados con transferencias de masa y energía, procesos y transporte de sólidos y fluidos deberían contar con esta herramienta para profundizar el aprendizaje e incentivar la autonomía del estudiante.

Referencias Bibliográficas

- Alnur Auli, N.; Sakinah, M.; Mustafa Al Bakri, AM; Kamarudin, H.; Norazian, MN Simulación de la producción de xilitol: una revisión. *Agosto. J. Aplicación básica. Ciencia.* 2013 , 7 , 366–372. [[Google Académico](#)]
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851–4861.
- Athimulam, A.; Kumaresan, S. Modelado y optimización de la producción de extracto acuoso de *Eurycoma Longifolia*. *Proceso de bioproducción alimentaria.* 2006 , 84 , 139–149. [[Google Académico](#)] [[CrossRef](#)] [[Versión verde](#)]
- Biomass Conversion and Biorefinery. (2025). *Advances in combined acid-organosolv pretreatments for lignocellulose valorization. Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(1), 77–91.
- Canizales, L., Rojas, F., Pizarro, CA, Caicedo-Ortega, NH, y Villegas-Torres, MF (2020). SuperPro Designer® , software orientado al usuario utilizado para analizar la viabilidad técnico-económica de la generación de energía eléctrica a partir de vinaza de caña de azúcar en Colombia. 8 (9), 1180. <https://doi.org/10.3390/pr8091180>
- Cano Basto, G. J. (2024). *Evaluación de vida útil con enfoque fisicoquímico y microbiológico de papa criolla (Solanum phureja) sembrada en suelos enriquecidos con enmiendas orgánicas* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD].
- Cuervo, L., Folch, J., & Quiroz, R. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *Bio Tecnología*, 13(3), 11–25.

- Espinosa-Negrín, A. M., López-González, L. M., & Casdelo-Gutiérrez, N. L. (2022). Pretratamientos aplicados a biomásas lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 87–110.
- Galbe, M., & Wallberg, O. (2019). *Pretreatment strategies for improved bioconversion of lignocellulosic materials*. *Bioresource Technology*, 301, 122725.
- Guarnizo Franco, A., Martínez Yepez, P. N., & Valencia Sánchez, H. A. (2009). Pretratamientos de la celulosa y colombia para la sacarificación. *Scientia et Technica*, 15(42), 284–289.
- Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., & Faaij, A. P. C. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 384–410.
- Himmel, M. E., Ding, S. Y., Johnson, D. K., Adney, W. S., Nimlos, M. R., Brady, J. W., & Foust, T. D. (2007). Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, 315(5813), 804–807.
- Huang, Y. F., Kuan, W. H., Lo, S. L., & Lin, C. F. (2013). Hydrothermal pretreatment of rice straw for bioethanol production: A comparison of acid and alkali pretreatment. *Applied Energy*, 104, 20–26.
- Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., Hsu, D., Aden, A., Schoen, P., Lukas, J., Olthof, B., Worley, M., Sexton, D., & Dudgeon, D. (2011). *Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol: Dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover* (NREL/TP-5100-47764). National Renewable Energy Laboratory.

- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729.
- López, J., García, D., & Márquez, G. (2016). Aprovechamiento energético del pseudotallo de plátano mediante digestión anaerobia. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 28(4), 25–32.
- Luzardo Gorozabel, B. P., Ruíz Reyes, E., & Pérez Parra, J. C. (2023). Transformación de biomasa lignocelulósica en biocombustible de segunda generación: Estado del arte del pretratamiento. *Revista Bases de La Ciencia*, 7(ESPECIAL).
<https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>
- Mussatto, S. I., & Roberto, I. C. (2004). *Alternatives for detoxification of diluted-acid lignocellulosic hydrolyzates for use in fermentative processes: A review*. **Bioresource Technology**, 93(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.005>
- Nikolov, P., Ivanova, D., & Yordanov, Y. (2018). Biowaste valorization in tropical agriculture: Challenges and perspectives. *Tropical Agriculture Review*, 29(3), 145–153.
- Pasca Supanta, E., León Félix, L., Pacheco-Salazar, D. G., & Gutiérrez-Pineda, E. (2025). *Ultrasound-assisted alkaline hydrogen peroxide pretreatment for biopolymer recovery from exhausted purple corn cobs*. *ACS Omega*, 10(44), 52634–52647.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06039>
- Pereira, R. A., Silva, L. A., & Costa, J. A. V. (2021). *Sequential extraction of XOS and fermentable sugars from banana peel biomass*. *Industrial Crops and Products*, 165, 113442.

- Rahardjo, S. H., Setiawan, R. R., & Fadillah, R. (2021). *Potential of tropical agricultural waste for bioenergy production: a comparative study. Renewable Energy Research and Applications*, 2(3), 45–57.
- Restrepo, H. J., Valencia-Duarte, J. S., Arriola-Villaseñor, E., Bedoya-Betancur, S., Valencia-González, J. D., & Ardila-Arias, A. N. (2021). *Evaluación de la extracción de fibras de celulosa a partir de pseudotallos de banano con uso potencial en la industria papelera. Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S)*, 3(1), 35–40.
- Rithuan, R. H. B. (2021). *Simulation study of process flow design for downstream processing of succinic acid production using SuperPro Designer software* [Bachelor's thesis, Universiti Kuala Lumpur, Malaysian Institute of Chemical & Bioengineering Technology].
- Ruiz-Colorado, A., Quintana, J. C., Niño, J., Cano, N., Gómez, A. C., Daza, S., Sierra, A. F., & Correa, J. F. (2022). Biomasa lignocelulósica en Colombia, pretratamientos y productos de valor agregado. En *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv2renqc5.4>
- Salazar Acevedo, M. L. (2024). *Películas activas a partir de nanofibras de celulosa modificadas con nanopartículas de óxido de zinc como estrategia para prolongar la vida útil de productos cárnicos* [Trabajo de grado, UNAD].
- Santos, J. C., Pereira, F. A., Silva, M. R., & Almeida, L. G. (2023). Simulation and optimization of cellulose recovery from banana biomass using alkaline oxidative pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 197, 117118.
- Shimizu, F. L., Monteiro, P. Q., Ghiraldi, P. H. C., Melati, R. B., Pagnocca, F. C., Souza, W. de, Sant'Anna, C., & Brienzo, M. (2018). Acid, alkali and peroxide pretreatments increase

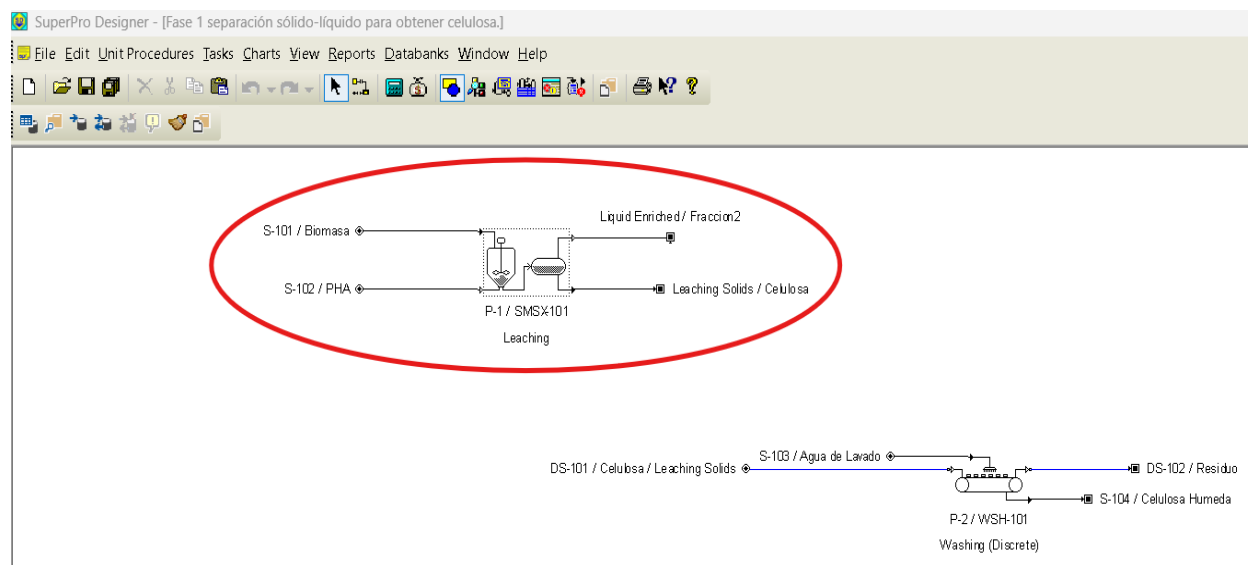
- the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem. *Industrial Crops and Products*, 115, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.024>
- Siddique, M. H., Wahid, Z. A., & Salleh, M. A. M. (2020). Material flow analysis of lignocellulosic biomass for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110144.
- Silverstein, R. A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R. R., Boyette, M. D., & Osborne, J. A. (2007). *A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks*. *Bioresource Technology*, 98(16), 3000–3011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.022>
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11.
- Torres Jaramillo, D., Morales Vélez, S. P., & Quintero Díaz, J. C. (2017). Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos. *Ingeniare: Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 627–636. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400733>
- Yang, B., Dai, Z., Ding, S. Y., & Wyman, C. E. (2013). Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. *Biofuels*, 4(1), 19–34.
- Ye Sun, Jiayang Cheng, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology*, Volume 83, Issue 1, 2002, Pages 1-11,
- Zhang, H., Wu, Z., & Li, Z. (2011). *Dissolution and separation of lignocellulosic biomass using ionic liquids*. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 1036–1043.

Apéndices

Apéndice A

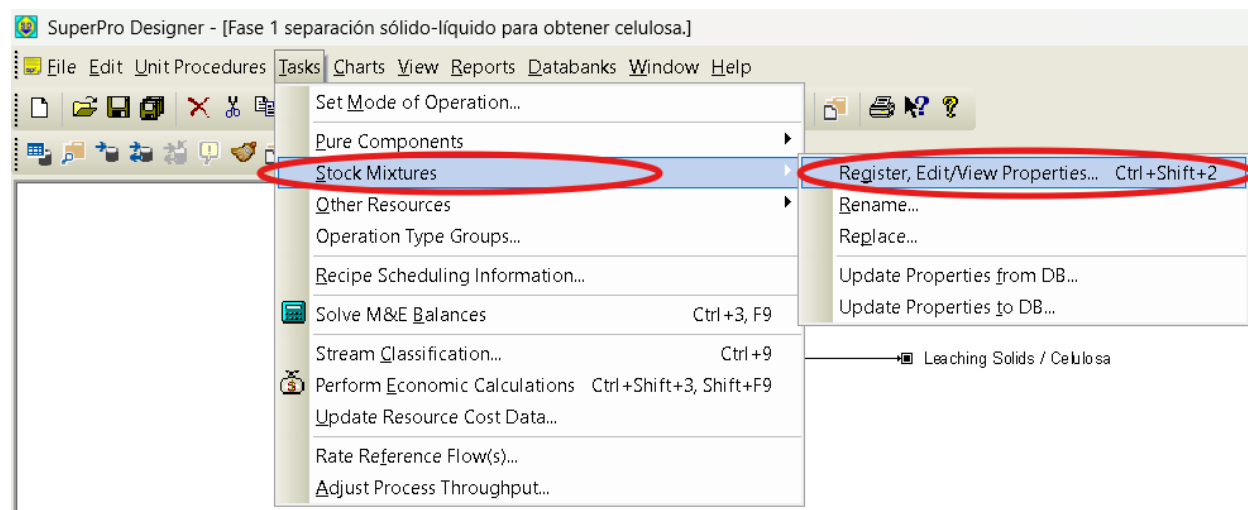
Paso a Paso Fase 1: Separación Sólido-Líquido Para Obtener Celulosa

Plantilla 1 Obtención de Celulosa - Leaching



Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Registro de mezclas en Leaching.

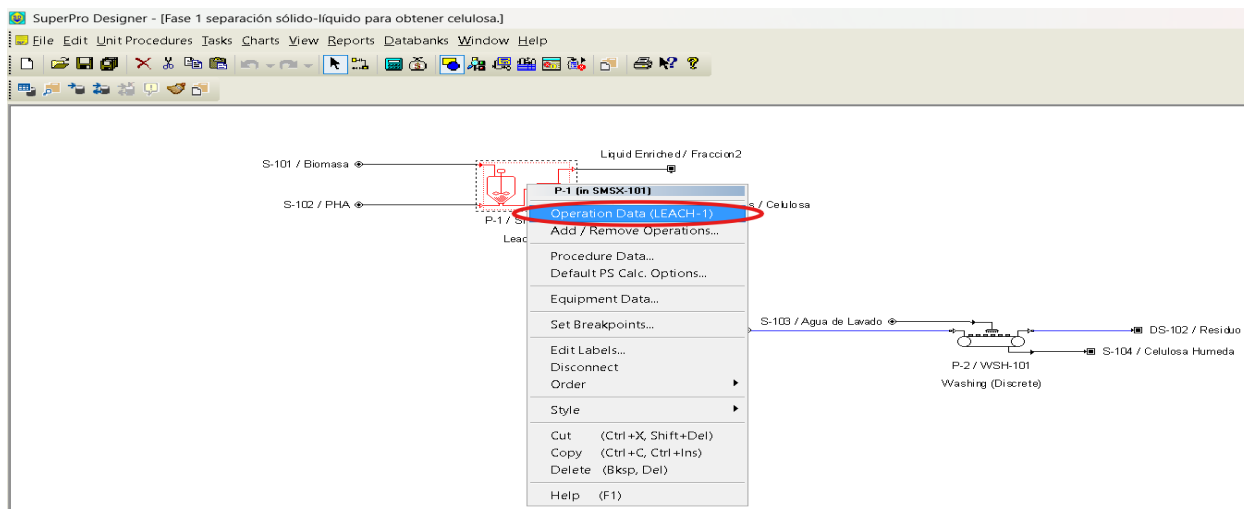


Se han creado las mezclas correspondientes para cada corriente como se muestra en la

P-1 Equipo Leaching

Se crean 2 Entrada Solids: Biomasa(Celulosa, Hemicelulosa, Ligninas), Entrada Solvent: PHA (NaOH, H2O2, WATER), Salida Liquid Enriched: Licor Residual, Salida Leached Solids: Solido/Celulosa.

Datos de Operación



Mezcla de la Biomasa del Plátano (BPL)

The screenshot shows the 'Stock Mixture Properties for : BPL' dialog box. The 'Ingredient Composition' table is highlighted in red. The table lists three ingredients: Cellulose, Hemicelulosa, and Lignin, with their respective Source DB, Pure Comp?, and Mass % values.

Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1 Cellulose	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	15.6046
2 Hemicelulosa	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	65.6409
3 Lignin	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	18.7545

The dialog box also shows 'Available Ingredients' on the left, including Biomass, Cellulose, Ethyl Alcohol, Hemicelulosa, Hydrogen Peroxide, Lignin, Nitrogen, Oxygen, Sodium Hydroxide, and Water. The 'Density' section at the bottom allows for setting a liquid/solid density model with parameters a and b.

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Mezcla del etanol al 96% de concentración

Stock Mixture Properties for : EtOH (50% w/w)

IDs Composition Economics Comments

Available Ingredients

Pure Components
 Stock Mixtures

From Registered
 From Database

Source DB SuperPro

Biomass
 Biomass
 Cellulose
 Ethyl Alcohol
 Hemicelulosa
 Hydrogen Peroxide
 Lignin
 Nitrogen
 Oxygen
 Sodium Hydroxide
 Water

Display by
 Name
 Company ID
 Formula
 CAS Number

Ingredient Composition

	Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1	Ethyl Alcohol	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	96,0000
2	Water	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	4,0000

Density

Assume a Liquid/Solid Density Model
 Density (in g/L) = $a + bT$ (T in K), Where a and b Are:
 Set by User
 a | 913,84 and b | 0,0000
 Calculated from Composition and a, b of Ingredients
 With Available Liquid/Solid Density Correlation Parameters

Assume a Gaseous Density Model
 Use Ideal Gas Law

Ejecución equipo de Leaching

LEACH-1 (Solids Leaching) in P-1

Oper. Cond's Mat. Balance Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Component Classification and Recovery Yield in Liquid Phase

Component	Classification	Yield (%)
Biomass	(none)	0,0000
Cellulose	Carrier	0,0000
Ethyl Alcohol	(none)	0,0000
H2O2	Solvent	99,9731
Hemicellulose	Solute	95,0000
Lignin	Solute	95,0000
N2	(none)	0,0000
NaOH	Solvent	99,9731

Total Solute Recovery Yield in Liquid Phase | 95,0000 %
 Total Carrier Loss in Liquid Phase | 0,0000 %
 Total Solvent Loss in Solid Phase | 0,0269 %
 Amount of Retained Solution in Solid Phase | 0,2989 kg/kg of Carrier

Solute Recovery Yield in Liquid Phase
 Same As Total Solute Recovery Yield in Liquid Phase
 Set By User (Per Component)

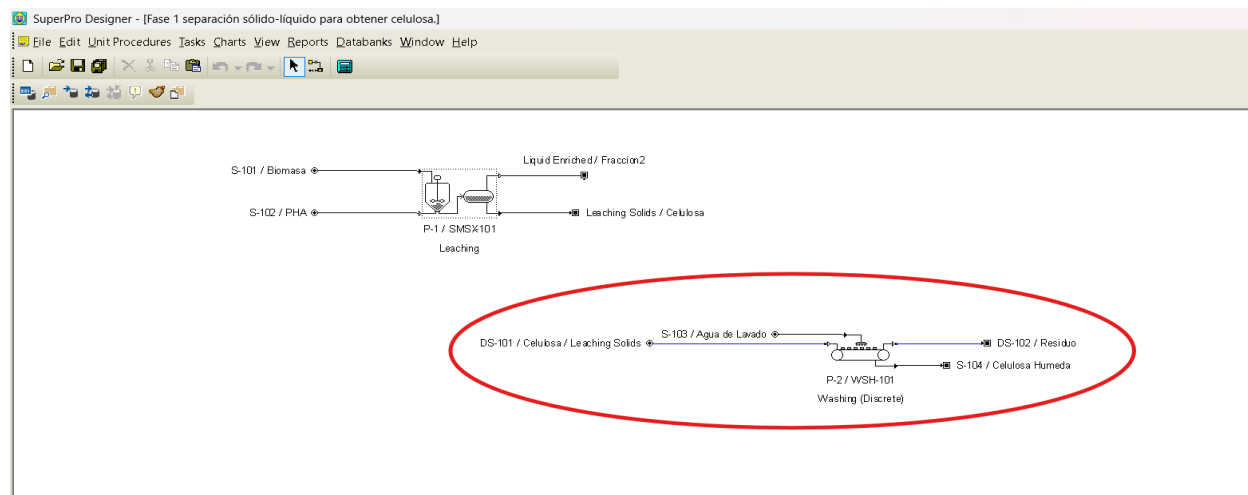
Carrier Loss in Liquid Phase
 Same As Total Carrier Loss in Liquid Phase
 Set By User (Per Component)

Solvent Recovery Yield in Liquid Phase
 Calculated Based On Total Solvent Loss in Solid Phase
 Calculated Based On Amount of Retained Solution in Solid Phase

Main Solute
 Name Hemicellulose

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Washing (Discrete)



Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la corriente de salida Leaching Solids he creado una mezcla con sus componentes para posteriormente ser ingresada en la corriente de entrada Discret Input como lo muestra la Figura 12 a continuación.

Mezcla corriente de entrada

ID	Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1	Cellulose	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	76.9882
2	Hemicelulosa	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	16.1926
3	Hydrogen Peroxide	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	0.4736
4	Lignin	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	4.6264
5	Sodium Hydroxide	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2456
6	Water	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	1.4735

Density

Assume a Liquid/Solid Density Model
Density (in g/L) = $a + bT$ (T in K). Where a and b are:

Set by User
a [1453.81] and b [-0.7920]

Calculated from Composition and a, b of Ingredients
With Available Liquid/Solid Density Correlation Parameters

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Aquí ingresa la cantidad de agua empleada para el lavado de la celulosa

Wash Input: Agua de Lavado

Stream S-103 (INPUT --> P-2)

Composition, etc. Physical State Env. Properties Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures
- Water
- Biomass
- Cellulose
- Ethyl Alcohol
- H₂O₂
- Hemicellulose
- Lignin
- N₂
- NaOH
- O₂
- Water

Composition

	Ingredient Name	Comp. ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Water	<input checked="" type="checkbox"/>	0.09947	100.0000	994.70433

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust

Mass Flow [0.0995] kg/batch Temperature [25.0] °C

Set Vol. Flow [0.1000] L/batch Pressure [1.013] bar

Enthalpy [0.00] kW-h/batch

Units Mass [kg] Vol. [L] Composition [%] Conc. [g/L] Enthalpy [kW-h]

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT) [h]

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Aquí ingreso la mezcla llamada solido/celulosa

Discret Input: Celulosa / Leaching Solids

Stream DS-101 (INPUT --> P-2)

Entity Composition, etc. Density Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures
- Sólido/Celulosa
- Air
- BPL
- EtOH (50% w/w)
- Hydrogen Peroxi
- NaOH 2N
- PHA
- Sólido/Celulosa

Composition

	Ingredient Name	Comp. ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Sólido/Celulosa	<input type="checkbox"/>	0.00304	100.0000	1217.68260

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates

Mass Flow [0.0030] kg/batch Temperature [25.0] °C

Set Vol. Flow [0.0025] L/batch Pressure [1.013] bar

Enthalpy [0.00] kW-h/batch

Units Mass [kg] Vol. [L] Composition [%] Conc. [g/L] Enthalpy [kW-h]

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT) [h]

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Ejecución del Washing

WASH-1 (Discrete Washing) in P-2

Oper.Cond's Utilities Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Entity Description

Entering Entity Cellulose
 Exiting Entity Discrete Entity

Wash-in Stream

S-103

Amount

Available In Wash-in Stream
 Volumetric Flowrate 0.02 L/h
 Volume per Entity 0.11 L

Component Removal to Wash Out Stream

Component	Removal %
Biomass	0.0000
Cellulose	100.0000
Ethyl Alcohol	0.0000
H2O2	0.0000
Hemicellulose	0.0000
Lignin	0.0000
N2	0.0000
NaOH	0.0000

Product Stream Temperature Specification Ignore

Equilibrium Temperature 25.0 °C

Product Stream Temperature Specification

Set Approach to Equilibrium 50.00 %
 Set Product Stream Temperature 25.0 °C

Operating Throughput per Unit 1.90 entities/h

Duration

Setup Time 0.00 min

Process Time

Set by User 30.000 min
 Calculated Based on Throughput
 Set by Master-Follower Relationship Setup...

Match the duration of this operation to the duration of another operation or string of operations.

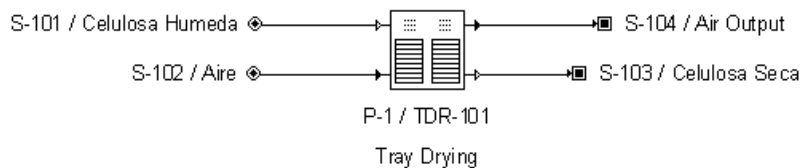
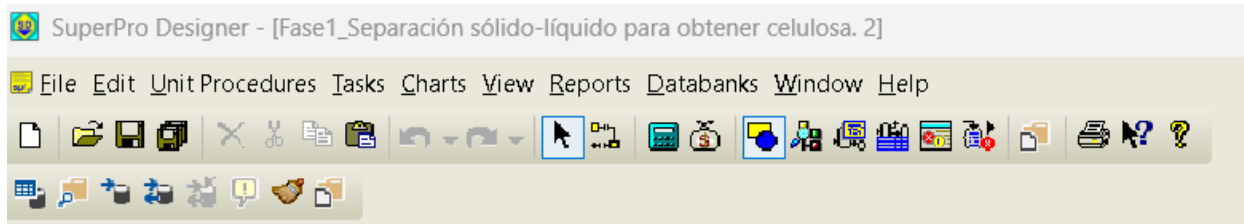
Ignore Labor

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

En la plantilla 2 se ejecutara el equipo de secado para la obtencion final de Celulosa

Pantilla 2 Obtencion de Celulosa – Tray Drying



Mezcla para corriente S-101

	Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1	Celulosa extraida	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	2.2969
2	Water	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	97.7031

Density

Assume a Liquid/Solid Density Model
Density (in g/L) = a + bT (T in K). Where a and b Are:

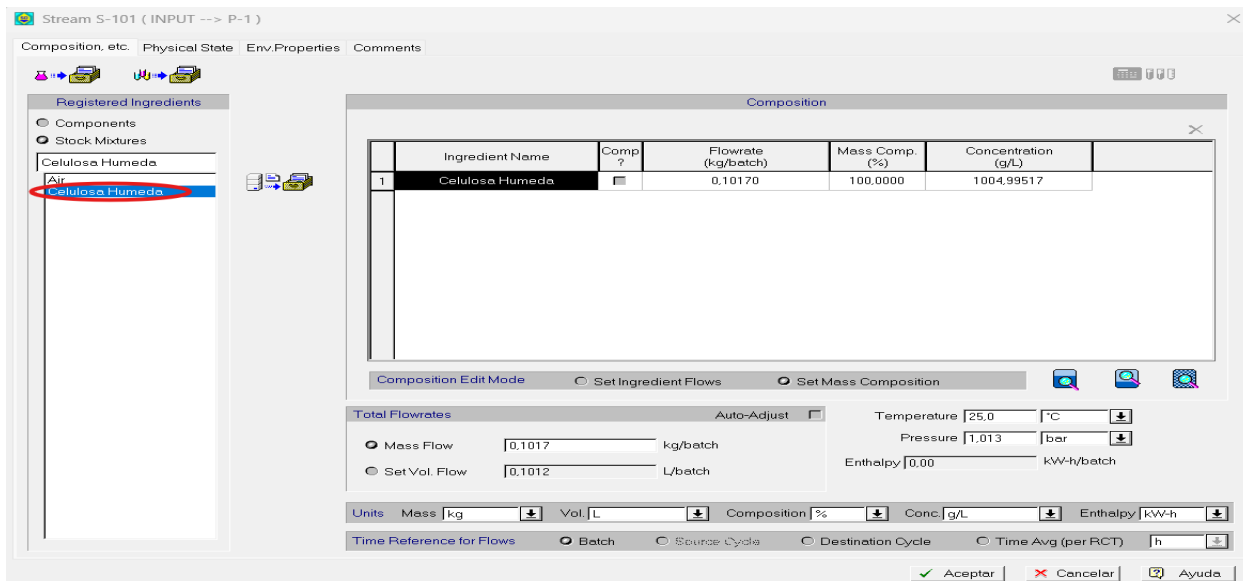
Set by User
a | 1119.02 and b | -0.3824

Calculated from Composition and a, b of Ingredients
With Available Liquid/Solid Density Correlation Parameters

Assume a Gaseous Density Model
Use Ideal Gas Law

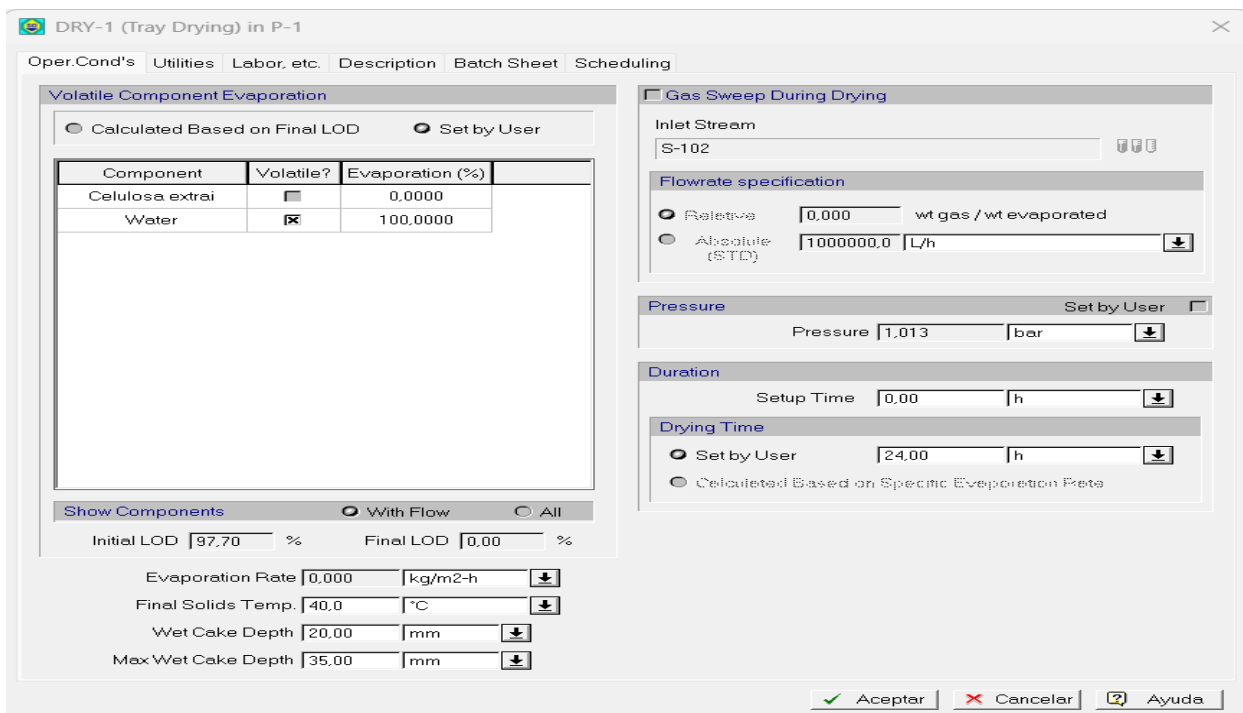
Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Celulosa humeda



Aquí he ajustado temperatura y tiempo del secado

Ejecución del Try Drying

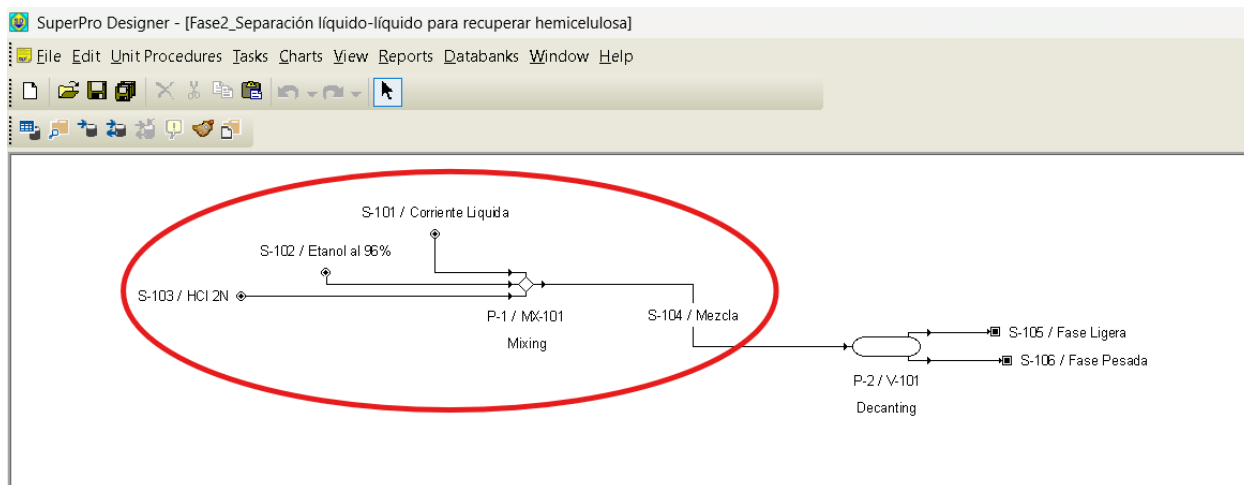


Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Apéndice B

Paso a Paso Fase 2: Separación Líquido-Líquido Para Recuperar Hemicelulosa

Plantilla 1 Obtención Hemicelulosa – Mixing



He creado una mezcla para cada una de las corrientes la principal es creada con los componentes de la corriente Liquid Enriched obtenida en el Leaching ejecutado en la Fase1_ Separación por Extracción sólido-líquido las otras 2 fueron creadas a partir de la concentración de cada solvente.

Mixing 3-Stream

Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1 Hemicelulosa	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	3.5982
2 Hydrogen Peroxide	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	20.6007
3 Lignina	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0281
4 Sodium Hydroxide(aq)	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	10.6819
5 Water	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	64.0911

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Stream / Corriente Liquida

Stream S-101 (INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures

Mezcla Liquida

Air

EtOH (50% w/w)

HCl (20% w/w)

Mezcla Liquida

Composition

	Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Mezcla Liquida	<input type="checkbox"/>	0.24003	100.0000	1205.85763

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust

Mass Flow [0.2400] kg/h

Set Vol. Flow [0.1991] L/h

Temperature [25.0] °C

Pressure [1.013] bar

Enthalpy [0.01] kW-h/h

Units Mass [kg] Vol [L] Composition [%] Conc [g/L] Enthalpy [kW-h]

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average [h]

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Stream / Etanol al 96%

Stream S-102 (INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures

EtOH (50% w/w)

Air

EtOH (50% w/w)

HCl (20% w/w)

Mezcla Liquida

Composition

	Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	EtOH (50% w/w)	<input type="checkbox"/>	0.59092	100.0000	794.24241

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust

Mass Flow [0.5909] kg/h

Set Vol. Flow [0.7440] L/h

Temperature [25.0] °C

Pressure [1.013] bar

Enthalpy [0.01] kW-h/h

Units Mass [kg] Vol [L] Composition [%] Conc [g/L] Enthalpy [kW-h]

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average [h]

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Stream / HCl 2N

Stream S-103 (INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures
- Air
- EtOH (50% w/w)
- HCl (20% w/w)
- Mezcla Liquida

Composition

	Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	HCl (20% w/w)	<input checked="" type="checkbox"/>	0,13615	100,0000	1098,00000

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust

Mass Flow 0,1362 kg/h
 Set Vol. Flow 0,1240 L/h

Temperature 25,0 °C
Pressure 1,013 bar
Enthalpy 0,00 kW-h

Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average h

Aceptar Cancelar Ayuda

Salida del Mixing al Decanting

Stream S-104 (P-1 --> P-2)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,49408	55,4618	494,718649
2	H2O2	0,04945	5,5506	49,511710
3	HCl(aq)	0,00973	1,0928	9,747406
4	Hemicelulosa	0,00864	0,9695	8,647912
5	Lignina	0,00247	0,2770	2,470935
6	NaOH(aq)	0,02564	2,8781	25,672872
7	Water	0,30084	33,7702	301,229732

Total Flowrates

Mass Flow 0,8909 kg/h
Volumetric Flow 0,9987 L/h

Temperature 25,0 °C
Pressure 1,013 bar
Enthalpy 0,02 kW-h

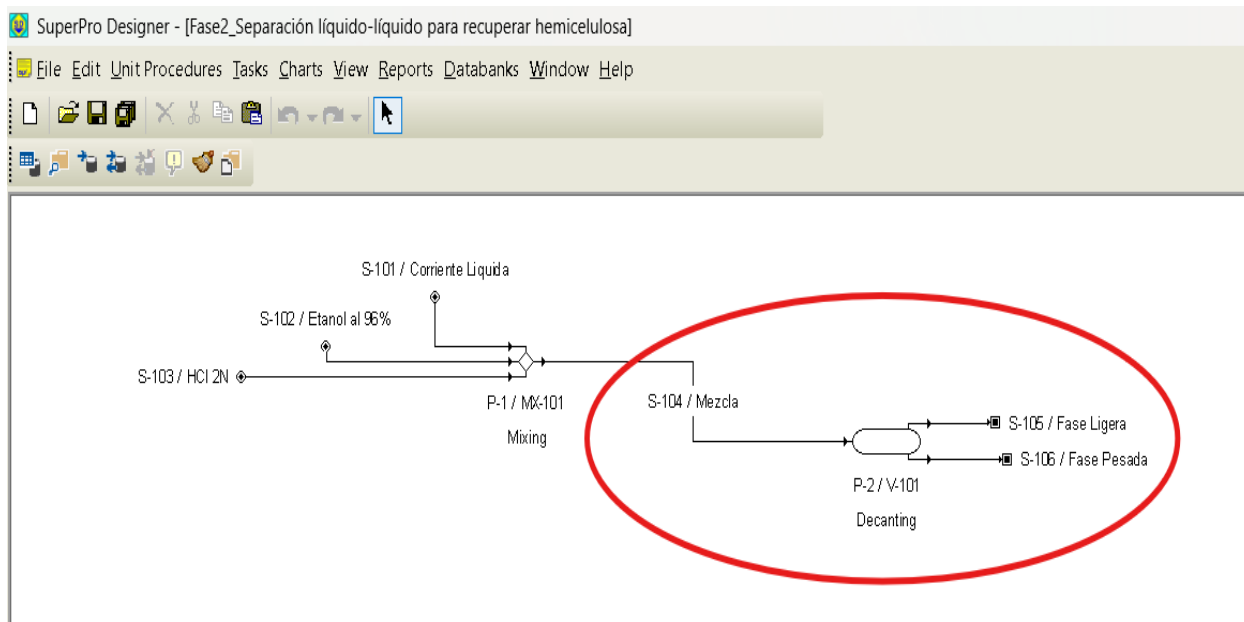
Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average h

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Plantilla 1 Obtención Hemicelulosa – Decanting



Resultados emitidos por Decanting

DECANT-1 (Decanting) in P-2

Oper.Cond's Mat.Balance Labor, etc. Description

Partition Coefficients ($K_i = y_i/x_i$) of Non-Solvent Components

Component	K_i	Split %
H ₂ O ₂	0,000	100,00
HCl(aq)	0,000	100,00
Hemicelulosa	0,000	100,00
Lignina	100,000	0,53
NaOH(aq)	0,000	100,00

Show Components With Flow All

Solvent System

Two-Solvent System

Light Phase Solvent

Name: Ethyl Alcohol

Solubility in Heavy Phase: 0,00 g/L

Heavy Phase Solvent

Name: Water

Solubility in Light Phase: 0,00 g/L

Single-Solvent System

Common Solvent: (none)

Fraction in Top (Light) Phase: 0,40

Product Component

Name: Hemicelulosa

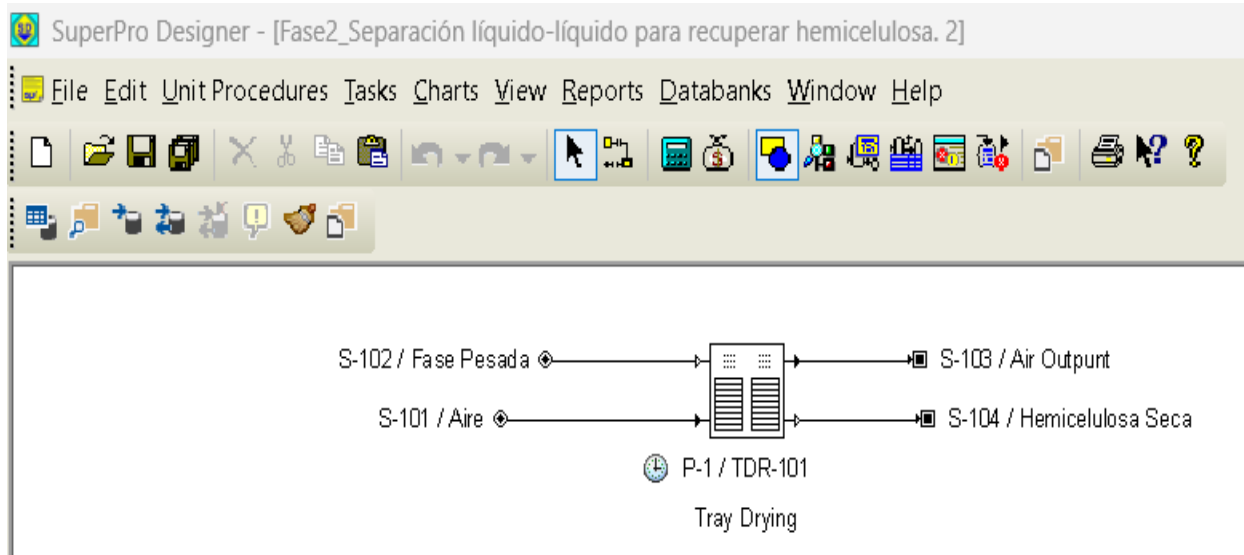
Recovered in: Heavy Phase

Recovery Yield: 100,00 %

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Plantilla 2 Obtención Hemicelulosa – Tray Drying



Mezcla para corriente S-102

Stock Mixture Properties for : Fase Pesada

Available Ingredients

Ingredient Composition

	Ingredient Name	Source DB	Pure Comp?	Mass %
1	HCl (20% w/w)	SuperPro	<input type="checkbox"/>	2.4499
2	Hemicelulosa	SuperPro	<input type="checkbox"/>	2.1735
3	Hydrogen Peroxide	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	12.4440
4	Lignina	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0029
5	Sodium Hydroxide(aq)	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	6.4525
6	Water	SuperPro	<input checked="" type="checkbox"/>	76.4772

Density

Assume a Liquid/Solid Density Model
Density (in g/L) = a + bT (T in K). Where a and b Are:

Set by User
a | 1263.44 and b | -0.4744

Assume a Gaseous Density Model
Use Ideal Gas Law

Accepter Cancelar Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Mezcla de Fase Pesada

Stream S-102 (INPUT --> P-1)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Registered Ingredients

- Components
- Stock Mixtures

Fase Pesada

Air

Fase Pesada

HCl(20% w/w)

Composition

	Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Fase Pesada	<input type="checkbox"/>	0.39430	100.0000	1122.01432

Composition Edit Mode Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust

Mass Flow 0.3943 kg/h

Set Vol. Flow 0.3514 L/h

Temperature 25.0 °C

Pressure 1.013 bar

Enthalpy 0.01 kW-h

Units Mass kg Vol. L Composition % Conc g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average h

Aceptar Cancelar Ayuda

Aquí he ajustado temperatura y tiempo del secado

Ejecución del Tray Drying

DRY-1 (Tray Drying) in P-1

Oper.Cond's Utilities Labor, etc. Description Scheduling

Volatile Component Evaporation

Calculated Based on Final LOD Set by User

Component	Volatile?	Evaporation (%)
H2O2	<input checked="" type="checkbox"/>	100.0000
HCl(aq)	<input checked="" type="checkbox"/>	100.0000
Hemicelulosa	<input checked="" type="checkbox"/>	40.0000
Lignina	<input checked="" type="checkbox"/>	100.0000
NaOH(aq)	<input checked="" type="checkbox"/>	100.0000
Water	<input checked="" type="checkbox"/>	100.0000

Show Components With Flow All

Initial LOD 100.00 % Final LOD 100.00 %

Evaporation Rate 0.000 kg/m²-h

Final Solids Temp. 40.0 °C

Wet Cake Depth 20.00 mm

Max Wet Cake Depth 35.00 mm

Gas Sweep During Drying

Inlet Stream S-101

Flowrate specification

Relative 0.000 wt gas / wt evaporated

Absolute 1000000.0 L/h

Pressure Set by User

Pressure 1.013 bar

Duration

Setup Time 0.00 min

Drying Time

Set by User 24.00 h

Calculated Based on Specific Evaporation Rate

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Resultados emitidos por Air Output

Stream S-103 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	H2O2	0.04945	12.7072	0.054153
2	HCl(aq)	0.00070	0.1789	0.000762
3	Hemicelulosa	0.00345	0.8878	0.003783
4	Lignina	0.00001	0.0033	0.000014
5	NaOH(aq)	0.02564	6.5890	0.028079
6	Water	0.30987	79.6338	0.339365

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Aceptar Cancelar Ayuda

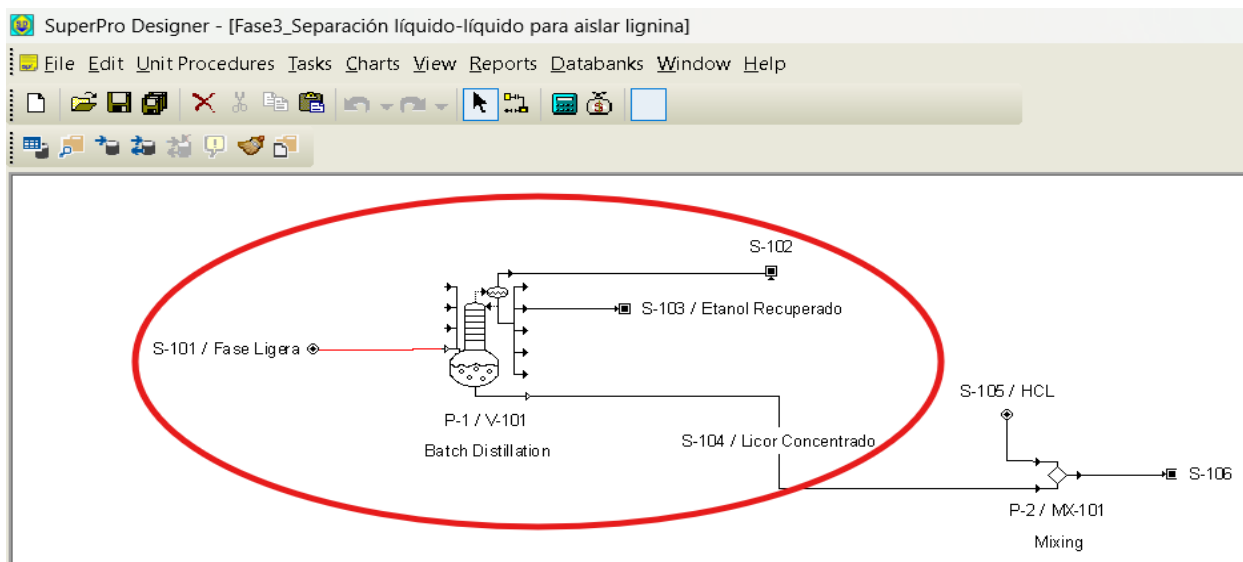
Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Apéndice C

Paso a Paso Fase 3: Separación Líquido-Líquido Para Aislar Lignina

En la plantilla 1 e creado una mezcla para la entrada predeterminada con los componentes de la corriente Fase Ligera obtenida en el Decanting ejecutado en la Fase2_separación líquido-líquido para recuperar hemicelulosa.

Plantilla 1 Obtención Lignina – Batch Distillation



Default Input

Ingredient Name	Comp.?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
Fase Ligera		0.50099	100.0000	795.86040

Total Flowrates: Mass Flow [0.5010] kg/batch, Set Vol. Flow [0.6295] L/batch
 Temperature [25.0] °C, Pressure [1.013] bar, Enthalpy [0.01] kW-h/batch

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Ejecución del Batch Distillation

DISTILL-1 (Batch Distillation) in P-1

Oper.Cond's | Volumes | Oper.Period | Profiles | Labor, etc. | Description | Batch Sheet | Scheduling

Volatility Data

Volatility Reference Comp. [↓]

Relative Volatility Set Calculated

Component	Volatile ?	Relative Volatility
Ethyl Alcohol	<input checked="" type="checkbox"/>	1,0000
Lignina	<input type="checkbox"/>	0,0000
N2	<input type="checkbox"/>	0,0000
O2	<input type="checkbox"/>	0,0000
Water	<input type="checkbox"/>	0,0000

Show Components With Flow All

Duration

Setup Time min [↓]

Distillation Time

Set by User Calculated

Distillation Time min [↓]

Condenser Temp. °C [↓]

Reboiler Temp. °C [↓]

Operating Pressure bar [↓]

[✓] Aceptar [✗] Cancelar [?] Ayuda

Bottoms / Licor Concentrado

Stream S-104 (P-1 --> P-2)

Composition, etc. | Physical State | Env.Properties | Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,34576	93,8915	748,724996
2	Lignina	0,00249	0,6749	5,382072
3	Water	0,02001	5,4335	43,328993

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C [↓]

Pressure bar [↓]

Enthalpy kW-h/batch

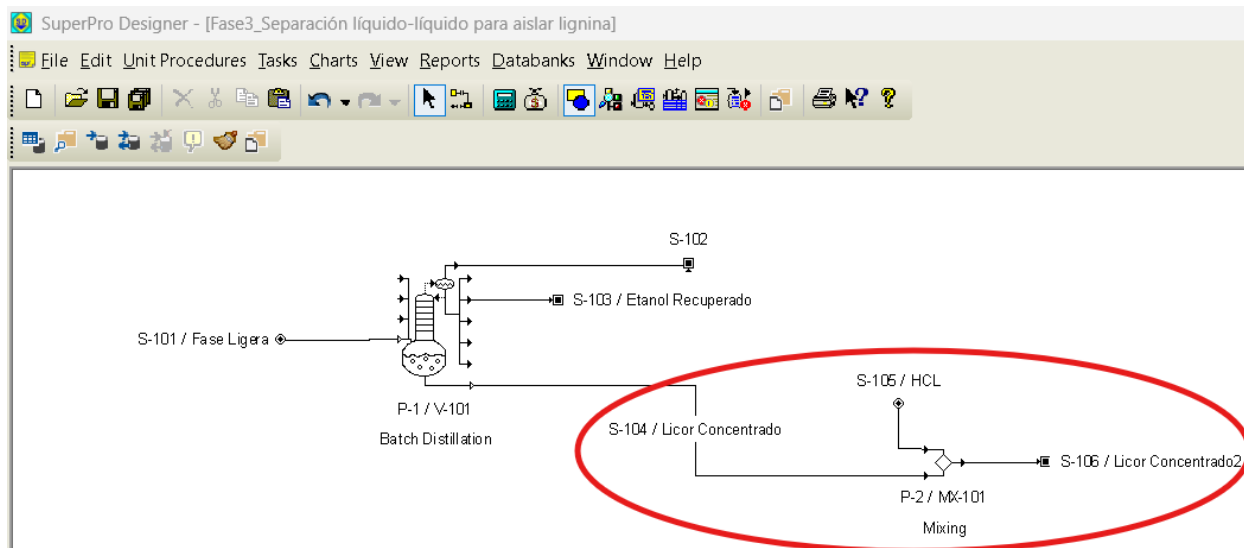
Units Mass [↓] Vol. [↓] Composition [↓] Conc. [↓] Enthalpy [↓]

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT) [↓]

[✓] Aceptar [✗] Cancelar [?] Ayuda

Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Plantilla 1 Obtención Lignina – Mixing



Ingreso de HCl para neutralización de PH

Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
HCl (20% w/w)	<input type="checkbox"/>	0.01254	100.0000	1098.00000

Total Flowrates: Mass Flow: 0.0125 kg/batch, Set Vol. Flow: 0.0114 L/batch

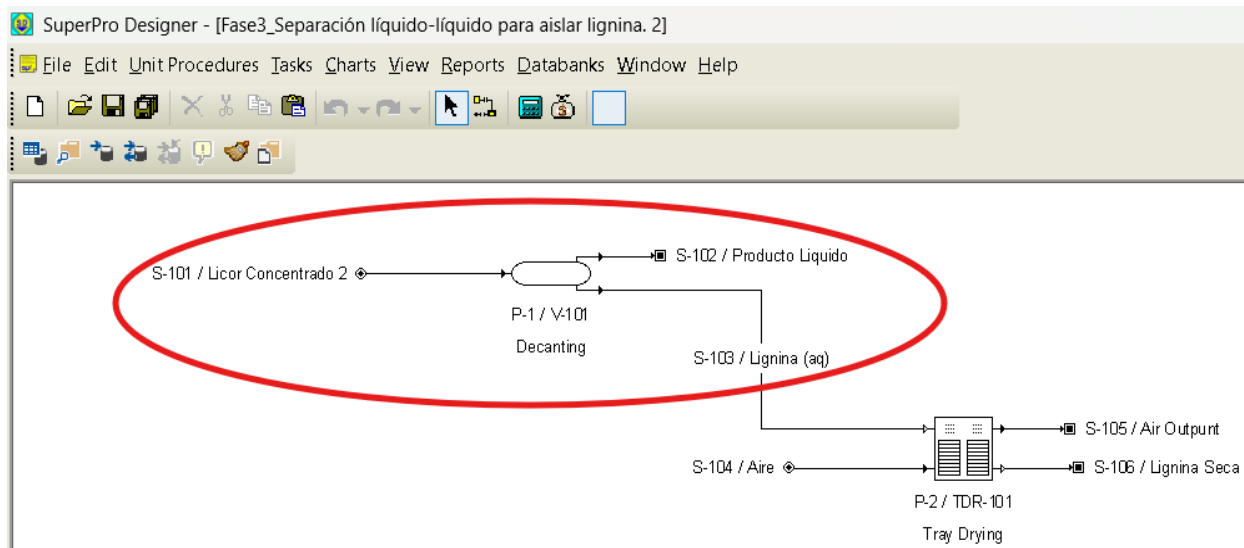
Temperature: 25,0 °C, Pressure: 1,013 bar, Enthalpy: 0,00 kW-h/batch

Units: Mass | kg, Vol | L, Composition | %, Conc | g/L, Enthalpy | kW-h

Time Reference for Flows: Batch, Source Cycle, Destination Cycle, Time Avg (per RCT) | h

Este licor concentrado ingresa en una corriente que se une a un Mixing para ser mezclado con el HCl que neutralizara el PH de aquí pasa a la plantilla 2 Como Licor Concentrado2.

Plantilla 2 Obtención Lignina – Decanting



S-101 Licor Concentrado2

The screenshot shows the Stream S-101 (INPUT --> P-1) window. The window displays the composition of the stream, including a table with columns for Ingredient Name, Comp?, Flowrate (kg/batch), Mass Comp. (%), and Concentration (g/L). The table shows one ingredient, LicorConcentra2, with a flowrate of 0.37734 kg/batch, a mass composition of 100.0000%, and a concentration of 815.86871 g/L. The window also shows options for setting ingredient flows or mass composition, and a section for total flowrates and units.

Ingredient Name	Comp?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
LicorConcentra2	<input type="checkbox"/>	0.37734	100.0000	815.86871

Composition Edit Mode: Set Ingredient Flows Set Mass Composition

Total Flowrates: Auto-Adjust

Mass Flow: 0.3773 kg/batch

Set Vol. Flow: 0.4625 L/batch

Temperature: 25.0 °C

Pressure: 1.013 bar

Enthalpy: 0.01 kW-h/batch

Units: Mass | kg | Vol | L | Composition | % | Conc | g/L | Enthalpy | kW-h

Time Reference for Flows: Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT) | h

Buttons: Aceptar, Cancelar, Ayuda

por esta corriente ingresa una mezcla con el licor concentrad2 que es obtenido en la plantilla anterior

Ejecución del Decanting

DECANT-1 (Decanting) in P-1

Oper.Cond's | Mat.Balance | Labor, etc. | Description | Batch Sheet | Scheduling

Split % to Top Phase Bottom Phase

Component	Ki	Split %
Ethyl Alcohol	10000,000	0,00
HCl(aq)	10000,000	0,00
Lignina (aq)	0,000	100,00
Water	32,956	0,01

Show Components With Flow All

Del proceso de Decanting se obtienen 2 salidas la S-102 Producto Liquido el cual es neutralizado al final del proceso y S-103 Lignina (aq)

S-102 Producto Liquido

Stream S-102 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. | Physical State | Env.Properties | Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,32834	87,5281	706,343717
2	HCl(aq)	0,00007	0,0174	0,140223
3	Water	0,04672	12,4545	100,506974

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

✓ Aceptar | ✗ Cancelar | ? Ayuda

S-103 Lignina (aq)

Stream S-103 (P-1 --> P-2)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Lignina (aq)	0,00220	99,7884	1438,312853
2	Water	0,00000	0,2116	3,049737

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Corriente que conecta a un Tray Drying en el cual se ejecuta el secado de la lignina a obtener.

Ejecución del secado

DRY-1 (Tray Drying) in P-2

Oper.Cond's Utilities Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Volatile Component Evaporation

Calculated Based on Final LOD Set by User

Component	Volatile?	Evaporation (%)
Lignina (aq)	<input type="checkbox"/>	0,0000
Water	<input checked="" type="checkbox"/>	100,0000

Show Components With Flow All

Initial LOD % Final LOD %

Evaporation Rate kg/m2-h

Final Solids Temp. °C

Wet Cake Depth mm

Max Wet Cake Depth mm

Gas Sweep During Drying

Gas Sweep During Drying

Inlet Stream

Flowrate specification

Relative wt gas / wt evaporated

Absolute (STD) L/h

Pressure bar Set by User

Duration

Setup Time min

Drying Time

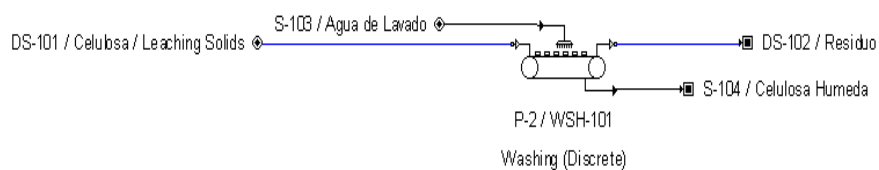
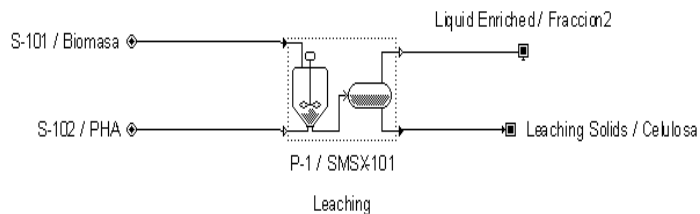
Set by User h

Calculated Based on Specific Evaporation Rate

Apéndice D

Resultados Emitidos SuperPro Designer®

Obtención de Celulosa_1



Fuente: Software SuperPro Designer (<https://www.intelligen.com/download/>)

Resultados emitidos por Leaching:

Leaching Solids.

Stream Sólido (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data (Liquid/Solid Phase)

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Cellulose	0.00234	76.9882	930.772267
2	H2O2	0.00001	0.4736	5.726147
3	Hemicellulose	0.00049	16.1926	195.765125
4	Lignin	0.00014	4.6264	55.932765
5	NaOH	0.00001	0.2456	2.969113
6	Water	0.00004	1.4735	17.814680

Liquid/Solid Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Resultados emitidos por Liquid Enriched.

Stream Liquido (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	H2O2	0,05355	20,6007	234,968521
2	Hemicellulose	0,00935	3,5982	41,040288
3	Lignin	0,00267	1,0281	11,725770
4	NaOH	0,02777	10,6819	121,835530
5	Water	0,16661	64,0912	731,013178

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Resultados emitidos por Washing (Discrete):

Wash Output

Stream S-104 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Cellulose	0,00234	2,2969	22,927653
2	Water	0,09947	97,7031	975,272587

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Discret Output

Stream DS-102 (P-2 --> OUTPUT)

Entity Composition, etc. Density Comments

Composition

	Component	Mass %
1	H2O2	2,0581
2	Hemicellulose	70,3668
3	Lignin	20,1046
4	NaOH	1,0673
5	Water	6,4033

Mass Flow

0,0007 kg/batch

Batch Time Avg (per RCT) Source Cycle Destination Cycle

h

Units Enthalpy kW-h

Temperature 25,0 °C

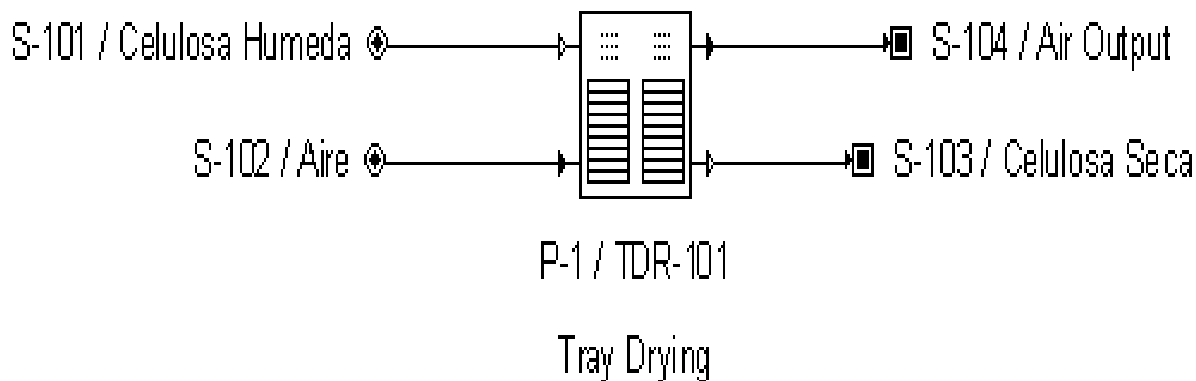
Pressure 1,01 bar

Enthalpy 0,000 kW-h/batch

✓ Aceptar ✗ Cancelar ? Ayuda

Resultados emitidos por Tray Drying:

Obtencion de Celulosa_2



Resultados emitidos por Air Output

Stream S-104 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Water	0,09936	100,0000	0,619806

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Resultado Celulosa Seca

Stream S-103 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Celulosa extraí	0,00234	100,0000	1425,547649

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch

Volumetric Flow L/batch

Temperature °C

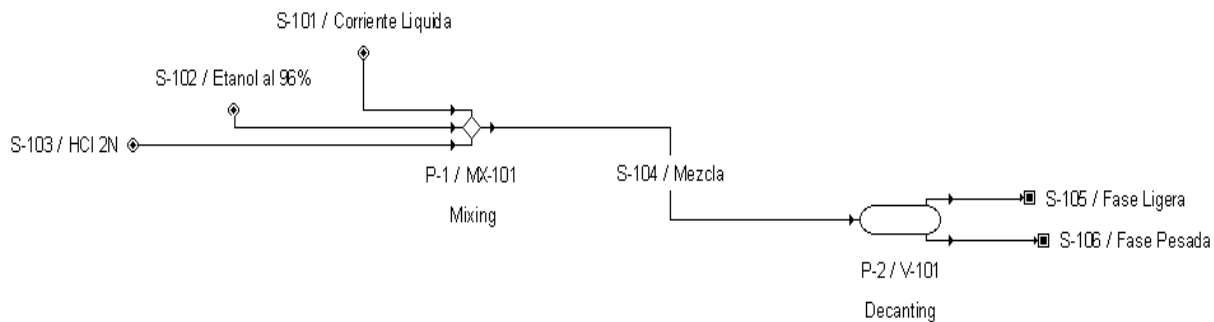
Pressure bar

Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Obtencion de Hemicelulosa_1



Resultado emitido por el Mixing

Stream S-104 (P-1 --> P-2)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0.56728	58.6579	518.101800
2	H2O2	0.04945	5.1130	45.161339
3	HCl(aq)	0.00973	1.0066	8.890945
4	Hemicelulosa	0.00864	0.8931	7.888059
5	Lignina	0.00247	0.2552	2.253825
6	NaOH(aq)	0.02564	2.6512	23.417112
7	Water	0.30389	31.4231	277.547529

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Aceptar Cancelar Ayuda

Salidas del Decanting

Fase Ligera

Stream S-105 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,49408	99,5056	783,768717
2	Lignina	0,00245	0,4944	3,893938

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Aceptar Cancelar Ayuda

Fase Pesada

Stream S-106 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	H2O2	0,04945	12,5402	134,252621
2	HCl(aq)	0,00973	2,4688	26,430409
3	Hemicelulosa	0,00864	2,1903	23,449095
4	Lignina	0,00001	0,0033	0,035418
5	NaOH(aq)	0,02564	6,5024	69,612832
6	Water	0,30084	76,2949	816,794275

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

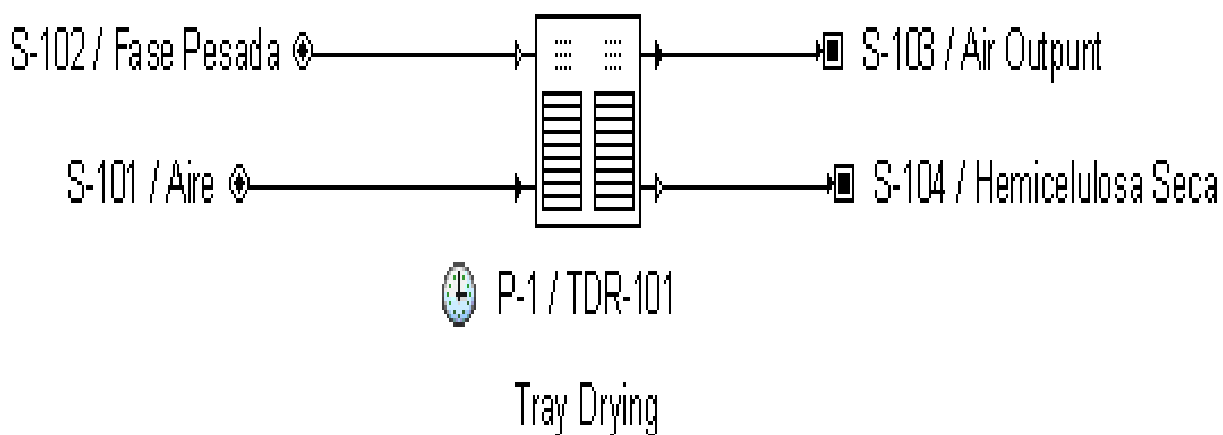
Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Aceptar Cancelar Ayuda

Obtencion de Hemicelulosa_2



Resultados Hemicelulosa Seca

Stream S-104 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/h)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Hemicelulosa	0.00518	100.0000	1425.547649

Total Flowrates

Mass Flow kg/h

Volumetric Flow L/h

Temperature °C

Pressure bar

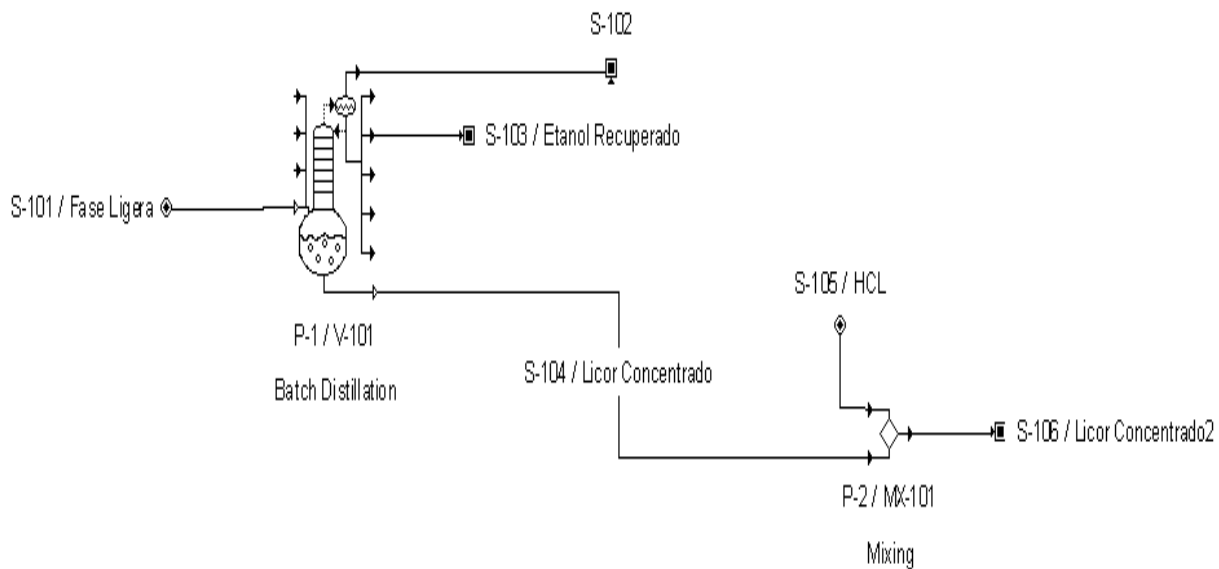
Enthalpy kW-h/h

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Average

Aceptar Cancelar Ayuda

Obtención de Ligninas_1



Resultados emitidos por Distillatte Fractions / Etanol Recuperado

Stream S-103 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,13446	100,0000	768,053830

Total Flowrates

Mass Flow 0,1345 kg/batch

Volumetric Flow 0,1751 L/batch

Temperature 45,0 °C

Pressure 1,013 bar

Enthalpy 0,00 kW-h/batch

Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per PCT) h

Aceptar Cancelar Ayuda

Resultados emitidos por el Mixing

Stream S-106 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,33637	90,6415	727,330101
2	HCl(aq)	0,00090	0,2416	1,938757
3	Lignina (aq)	0,00217	0,5840	4,686154
4	Water	0,03167	8,5329	68,470178

Total Flowrates

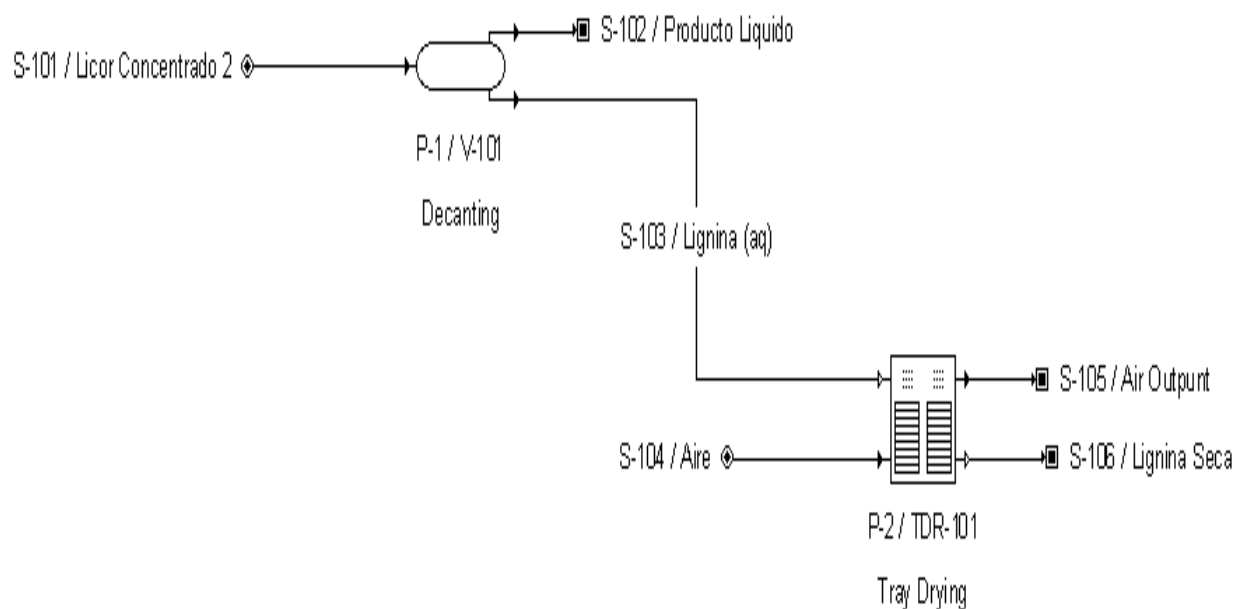
Mass Flow kg/batch
 Volumetric Flow L/batch

Temperature °C
 Pressure bar
 Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Obtención de Ligninas_2



Resultado Producto Liquido Neutralizado

Stream S-102 (P-1 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Ethyl Alcohol	0,32834	87,5281	706,343717
2	HCl(aq)	0,00007	0,0174	0,140223
3	Water	0,04672	12,4545	100,506974

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch
 Volumetric Flow L/batch

Temperature °C
 Pressure bar
 Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Aceptar Cancelar Ayuda

Resultado Lignina Seca

Stream S-106 (P-2 --> OUTPUT)

Composition, etc. Physical State Env.Properties Comments

Stream Contents Total Liquid/Solid Vapor

Composition Data

	Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1	Lignina (aq)	0,00220	100,0000	1425,547649

Total Flowrates

Mass Flow kg/batch
 Volumetric Flow L/batch

Temperature °C
 Pressure bar
 Enthalpy kW-h/batch

Units Mass Vol. Composition Conc. Enthalpy

Time Reference for Flows Batch Source Cycle Destination Cycle Time Avg (per RCT)

Aceptar Cancelar Ayuda