

**PROPUESTA DE UN ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DE JARABES DE  
GLUCOSA CLARIFICADOS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA.**

**ADRIANA ISABELLA CAROLINA ARDILA AYALA  
ASTRID LORENA RAMIREZ RAMIREZ**



**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA  
2016**

**PROPUESTA DE UN ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DE JARABES DE  
GLUCOSA CLARIFICADOS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA.**

**ADRIANA ISABELLA CAROLINA ARDILA AYALA  
ASTRID LORENA RAMIREZ RAMIREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniera Química**

**Director  
Dr. Carlos Jesús Muvdi Nova**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA**

**2016**

*A Dios por ser el motor de mi vida, por nunca desampararme.*

*A mi mami Adriana por hacer de mí una mejor persona, por aguantar todos mis berrinches, por su voz de aliento cuando me sentía decaída, por apoyarme en lo bueno y en lo malo.*

*A mis Nonitos, por ser mis angelitos de la guarda en la tierra como en el cielo, por consentirme y demostrarme el valor del amor verdadero.*

*A mi tía Toto, tía Roció, tío Iván y tío Sergio porque Dios no pudo poner en mi vida mejores personas para hacer de mí lo que hoy soy, gracias por tantas demostraciones de amor.*

*A Nico por demostrarme su cariño sincero y por ser como mi hermanito, deseo que seas grande y alcances todos tus sueños.*

*A la familia Gelvez Lizarazo, por permitirme entrar a su familia, por apoyarme en instantes difíciles y brindarme su cariño.*

*A Lore por ser la mejor compañía para este proyecto, por darme su voz de aliento siempre, por ser mi confidente y demostrarme el valor de la amistad.*

*Y como no dedicarle esto al Amor de mi vida, a mi futuro esposo Mauricio Gelvez quien a lo largo de estos nueve años me ha enseñado que juntos podremos lograr todo lo que nos proponemos y que de la mano de Dios alcanzaremos nuestros objetivos.*

*Isabella Ardila*

*A Dios por darme la oportunidad de tener la mejor familia y buscar cada día un nuevo horizonte.*

*A mis Padres Martha y Alberto, a mis hermanos Vannesa y Jesús por ser el motor de mi vida, ustedes hacen posible lograr cada meta propuesta.*

*A Isabella por mostrarme que el mundo se puede conquistar y solo depende de las ganas que tenga de hacerlo.*

*Lorena Ramírez*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, por transmitir todos los conocimientos en el área de ingeniería química a través de su personal docente, además de la formación integral adquirida.

Agradecimientos especiales a nuestro director el profesor Ph.D. M.Sc. Carlos Jesús Muvdi Nova por su constante motivación, apoyo y guía.

A Promitec Santander S.A.S. por permitir el uso de sus instalaciones, al Qco. Loufrantz por su excelente disposición para el desarrollo de cada etapa presente en este trabajo.

Al grupo de investigación CICTA, por centrar las bases de investigación en nuestras vidas, en especial al Ing. Carlos Muñoz por su constante apoyo.

Al Ingeniero M.Sc. Oscar Mauricio Gelvez Lizarazo, por sus aportes al conocimiento y por su invaluable dedicación en el desarrollo de este proyecto

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. METODOLOGÍA .....	21
1.1. FASE 1: DEFINIR LAS OPERACIONES UNITARIAS NO CONVENCIONALES PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE JARABES DE GLUCOSA A PARTIR DE ALMIDÓN. ....	22
1.2. FASE 2: EVALUACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN A ESCALA LABORATORIO CON LAS OPERACIONES UNITARIAS SELECCIONADAS.....	22
1.3. FASE 3: PROPUESTA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA PROMITEC SANTANDER S.A.S. ....	23
1.4. MATERIALES, MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DE CUANTIFICACIÓN. ..	23
1.4.1. Materiales, insumos y equipos.....	23
1.4.2. Métodos de cuantificación y de análisis.....	24
2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
2.1. ESTUDIO DEL PROCESO DE HIDRÓLISIS INTEGRANDO EL PROTOCOLO ESTABLECIDO POR LA EMPRESA PROMITEC SANTANDER S.A.S .....	26
2.2. ESTUDIO DE LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN INTEGRANDO TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS.....	28
2.3. ESTUDIO DE LA ETAPA DE CONCENTRACIÓN IMPLEMENTANDO LA TÉCNICA DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE AL VACÍO. ....	35
3. CONCLUSIONES .....	42
4. RECOMENDACIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resumen de cambios en la planta de producción de Promitec S.A.S .....	27
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica hidrolizados de glucosa a 40%p/p. ....	28
Tabla 3. Características de los tanques del evaporador de película descendente.	41
Tabla 4. Características de los equipos usados en el evaporador de película descendente. ....	41

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cuadro Metodológico.....	21
Figura 2. Esquema de Producción de jarabe clarificado a partir de almidón de yuca .....	25
Figura 3. Reactores planta de producción Promitec Santander S.A.S.....	26
Figura 4. Permeabilidad en el tiempo durante la filtración de hidrolizados de glucosa 40% p/p utilizando membranas de 0,2 $\mu\text{m}$ , $\Delta\text{P}$ de 1,5 bar y 9 h de filtración, caudal de alimentación 2400 L/h .....	29
Figura 5. Volumen de permeado producido en la etapa de clarificación. Hidrolizado de glucosa 40% p/p utilizando membranas de 0,2 $\mu\text{m}$ , $\Delta\text{P}$ de 1,5 bar y 9 h de filtración, caudal de alimentación 2400 L/h. ....	30
Figura 6. Contenido de azúcares en a) filtrado y b) retenido, obtenidos durante la etapa de clarificación para $\Delta\text{P}$ de 1,5 bar, 40% p/p almidón, caudal de alimentación 2400 L/h. Tiempo 9 h para membranas de 0,2 $\mu\text{m}$ . ....	31
Figura 7. Turbidez de hidrolizados de glucosa obtenidos durante la etapa de clarificación a 40% p/p, $\Delta\text{P}$ 1,5 bar, caudal de alimentación 2400 L/h. Tiempo de filtración de 9 h utilizando membranas de 0,2 $\mu\text{m}$ .....	32
Figura 8. Diseño equipo de clarificación a) estructura externa b) corte longitudinal del módulo y c) disco de soporte para la 100 membranas Monocanal de 0,01 m de diámetro externo, 0,2 $\mu\text{m}$ de diámetro de poro y longitud de 1,2 m. ....	33
Figura 9. Dimensiones (cm) a) tapa y b) disco de soporte de las membranas del equipo de clarificación.....	34
Figura 10. Dimensiones (cm) a) estructura externa y b) carcasa del equipo de clarificación. ....	34
Figura 11. Contenido de azúcares del jarabe de glucosa por ciclo de evaporación realizado en el evaporador de película descendente al vacío,	

para 50 °Brix. $\Delta P$ 200 mbar. Temperatura de pared 70 °C. Caudal de alimentación 6 L/h.....	36
Figura 12. Jarabe de glucosa obtenido de: a) etapa de clarificación b) etapa de evaporación. ....	37
Figura 13. Sistema de evaporación de película descendente al vacío, a) diagrama de flujo de proceso y c) estructura de soporte para el evaporador. ....	38
Figura 14. Vista de corte longitudinal con a) dimensiones y b) en 3D, cara superior con c) dimensiones y d) en 3D del sistema de distribución del evaporador de película descendente al vacío.....	39
Figura 15. Dimensiones a) tapa y b) cuerpo del tanque de almacenamiento transitorio del jarabe de glucosa obtenido del evaporador de película descendente. ....	40

## RESUMEN

**TÍTULO:** “PROPUESTA DE UN ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA CLARIFICADOS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA”.\*

**AUTORES:** Adriana Isabella Carolina Ardila Ayala - Astrid Lorena Ramírez Ramírez\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Jarabes de Glucosa, Hidrólisis, Clarificación, Evaporación.

### DESCRIPCIÓN:

El proyecto titulado “Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa, obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales” con código 1102-5022-7720, Colciencias-UIS-Promitec Santander S.A.S, fue planteado, con el objetivo de mejorar el proceso productivo de la empresa. La UIS a través del grupo CICTA, propone un esquema de producción de jarabes de glucosa clarificados a partir de almidón de yuca.

El esquema de producción se compone de tres etapas, la primera de ellas es el proceso de hidrólisis, realizado mediante el protocolo establecido por la empresa. La segunda etapa presenta la integración del proceso de clarificación con la tecnología de membranas, propuesta por Díaz y Ramos (2015). Finalmente en la etapa de concentración, un análisis DOFA permitió seleccionar la técnica de evaporación de película descendente al vacío, estudiada por Muñoz y Solano (2014).

El esquema de producción propuesto fue evaluado a escala laboratorio, haciendo uso de 3 plantas piloto para cada etapa específica. La concentración de entrada fue de 40% p/v de almidón de yuca. En la etapa de hidrólisis se obtuvo un jarabe de 59,1% ED. En la etapa de clarificación se obtuvo un rendimiento del 41,6%, con una disminución del 97% de la turbidez. En la etapa de concentración se obtuvo un jarabe de 72 °Brix con un factor de concentración de 1,14.

Finalmente los resultados presentados llevaron a realizar un diagnóstico del estado de la planta de producción, planteando algunas mejoras, entre las cuales están el diseño y cotización de nuevos equipos para integrarlos al proceso de producción.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova.

## ABSTRACT

**TITLE:** "PROPOSAL FOR A PRODUCTION SCHEDULE CLARIFIED GLUCOSE SYRUP FROM CASSAVA STARCH".\*

**AUTHORS:** Adriana Isabella Carolina Ardila Ayala - Astrid Lorena Ramírez Ramírez\*\*.

**KEYWORDS:** Glucose syrup, Hydrolysis, Clarification, Evaporation.

### DESCRIPTION:

The project entitled "Increasing the productivity of concentrated glucose syrups, obtained from cassava starch hydrolysates by unconventional methods" 1102-5022-7720 code Colciencias Santander-UIS-Promitec SAS was raised, with aim of improving the production process of the company. The UIS through CICTA group proposes a production scheme glucose syrups clarified from cassava starch.

The production scheme comprises three stages, the first is the hydrolysis process, performed using the protocol established by the company. The second stage in the integration process of clarification with membrane technology proposed by Diaz and Ramos (2015). Finally in the concentration step, a SWOT analysis allowed to select the technique falling film evaporation under vacuum, studied by Muñoz and Solano (2014).

The production scheme proposed was evaluated at laboratory scale, using three pilot plants for each specific stage. The inlet concentration was 40% w / v cassava starch. In the hydrolysis step syrup ED 59.1% was obtained. In the clarification stage a yield of 41.6% was obtained, with a decrease of 97% in turbidity. In the concentration step syrup 72 ° Brix with a concentration factor of 1.14 was obtained.

Finally, the presented results led to diagnose the state of the production plant, raising some improvements, which are designed and the price of new equipment to be integrated into the production process.

---

\* Work degree

\*\* Faculty: of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director. Carlos Jesús Muvdi Novaz

## INTRODUCCIÓN

La producción de jarabes de glucosa, en los últimos años ha estado fundamentada en el procesamiento de almidón. El maíz es la principal fuente de almidón actualmente utilizada, a partir de la cual se obtiene un 85% del almidón ofrecido comercialmente (Johnson, 2009). Sin embargo, el aumento en la demanda de almidón, ha propiciado la búsqueda de diferentes fuentes de obtención, encontrando en la yuca la mejor alternativa, debido a que presenta un 87,67% de almidón en base seca, por encima de alimentos como la papa (76,05%), el plátano (75,60%) y el maíz (71,70%) (Arias *et al.*, 2006).

La ruptura de los enlaces glucosídicos presentes en el almidón son la base fundamental en el proceso de obtención de jarabes de glucosa. Este fin se puede lograr mediante enzimas o ácidos en condiciones específicas de operación, proceso conocido como hidrólisis. El rendimiento de la hidrólisis se cuantifica al medir la conversión de almidón en glucosa mediante el Equivalente en Dextrosa o %ED. Los jarabes de glucosa que se obtienen por hidrólisis ácida del almidón, tienen un rendimiento entre 35-45 %ED y los obtenidos por hidrólisis enzimática tienen un rendimiento de 95 %ED.

La Promotora de investigación en Biotecnología de Santander Promitec Santander S.A.S., es una compañía del grupo empresarial Promisión, ubicada en el kilómetro 3 vía Palenque-Café Madrid, manzana C bodega 2 del Parque industrial de Bucaramanga, dedicada principalmente a la producción de jarabes de maltodextrina, glucosa y fructosa por medio de hidrolisis enzimática del almidón de yuca.

La empresa Promitec Santander S.A.S. producía jarabes de glucosa mediante hidrólisis de almidón de yuca por vía enzimática, a través de dos etapas, licuefacción y sacarificación. En la licuefacción, el almidón, por la acción de  $\alpha$ -amilasas, se hidroliza dando lugar a una solución de dextrinas con un %ED entre 15-20%. Por otra parte, la sacarificación, utiliza glucoamilasas que transforman las dextrinas en azúcares de bajo peso molecular (glucosa y maltosa). Al finalizar la hidrólisis, los jarabes contienen entre 93-96 %ED (Acevedo & Parra, 2013). En los últimos años, Promitec Santander S.A.S. integró estas dos etapas en una.

Después de la hidrólisis continúa la etapa de clarificación, con el fin de remover impurezas y material no hidrolizado del jarabe (Leaes *et al.*, 2013). Este proceso tradicionalmente se realiza mediante filtros prensa o filtros rotatorios al vacío, específicamente para hidrolizados con una concentración entre 10-20% p/p (Acevedo & Parra, 2013). Finalmente, se procede a la etapa de evaporación, permitiendo la eliminación de agua del producto, estabilizando y facilitando el almacenamiento y transporte del jarabe. Para el caso de la empresa Promitec Santander S.A.S. esta etapa era realizada al vacío en un hervidor clásico, con un elevado gasto energético y altos tiempos de procesamiento, afectando el costo del proceso y la calidad del producto (Rodríguez & Sandoval, 2011).<sup>1</sup>

El proyecto titulado “*Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales*” código 1102-5022-7720 Colciencias- UIS-Promitec Santander S.A.S, fue planteado con el objetivo de proponer estrategias que permitan mejorar el proceso productivo de la empresa, y en especial la etapa de evaporación. La UIS a través del grupo CICTA ha desarrollado diferentes trabajos de investigación, ampliando el alcance del proyecto y haciendo énfasis en cada una de las etapas

---

<sup>1</sup> RODRIGUEZ, Sonia Rocío, y SANDOVAL Julie Tatiana. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. BUCARAMANGA: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniera Química Universidad Industrial de Santander, 2011.

del proceso de producción del jarabe de glucosa, utilizando almidón y harina de yuca como materia prima. Partiendo de la hidrólisis, la clarificación y la concentración, como etapas en la producción de jarabes de glucosa, se presenta a continuación el resumen de las investigaciones realizadas por el grupo CICTA-UIS para cada etapa del proceso.

Los trabajos de investigación en la etapa de hidrólisis se centraron en el estudio de la harina de yuca como alternativa de materia prima con gran potencial. Campos y Aguilar (2014)<sup>2</sup> estudiaron la influencia de la molienda como pretratamiento a la harina de yuca con el fin de mejorar las características fisicoquímicas de los hidrolizados. Los resultados del anterior trabajo presentan una disminución significativa de la viscosidad en los hidrolizados de harina de yuca entre 10-40% p/v (harina/agua), después de 1 h de molienda, además de obtenerse hidrolizados con %ED superiores al 80%. Igualmente, las características de estos hidrolizados permitieron explorar su uso en otras aplicaciones diferentes a los jarabes de glucosa. Es así como Vargas y Prada (2015) estudiaron la formulación de un bloque multinutricional para caprinos, realizando hidrólisis con harina de yuca para obtener hidrolizados de glucosa y maltodextrinas, sustancias involucradas en la formulación del bloque. Es importante mencionar que dichos hidrolizados obtenidos presentan características interesantes como materia prima para la formulación de productos pecuarios.

En la etapa de clarificación se realizaron varias investigaciones como la elaborada por Amaya (2013)<sup>3</sup>, donde se propone la aplicación de la técnica de ultrafiltración de flujo cruzado con cartucho de membranas planas de poliéster de 10 kDa y una

---

<sup>2</sup> CAMPOS PUENTES, Lizeth Nathalie, y AGUILAR PATIÑO Orlando A. Estudio de la molienda como pretratamiento de harina de yuca integral para su uso en el proceso de obtención de jarabes de glucosa. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

<sup>3</sup> AMAYA, Fernando Andrés. Estudio del proceso de producción de hidrolizados de almidón de yuca integrando tecnología membranaria. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

superficie de membrana de 0,5 m<sup>2</sup> de la marca Millipore®. La filtración obtenida en dicho trabajo fue de aproximadamente 58 L/m<sup>2</sup>h, con una retención de la enzima superior al 98,5% con una concentración entre 8-10 °Brix; una presión transmembranaria (PTM) de 0,5 y 1 bar; caudal de alimentación de 3 y 6 L/min. El trabajo de grado de Contreras (2014) implementó un módulo de ultrafiltración de flujo cruzado, para dar uso a la membrana espiralada Millipore Helicón SS50 CDUF050LG de celulosa regenerada, adquirida por Promitec Santander S.A.S en el 2006. Las membranas utilizadas tienen un tamaño de poro entre 0,001-0,05 µm y se trabajaron con PTM entre 0-7 bar, alcanzando un flujo de permeado de 1,7 L/min para hidrolizados de 10 °Brix y de 0,7 L/min a 20 °Brix, logrando remover el 90% de la turbidez del hidrolizado. La temperatura máxima de operación de las membranas utilizadas en los trabajos anteriores es 50 °C, esto disminuye el interés de este tipo de membranas para esta aplicación ya que se imposibilita su uso a las temperaturas de hidrólisis (70-80 °C), además se presenta disminución de la permeabilidad y caída de presión dentro del módulo, para concentraciones elevadas, lo que disminuye su productividad.

Acevedo y Parra (2013)<sup>4</sup> propusieron un sistema de micro y ultrafiltración con tecnología de membranas cerámicas monocanal de α-alumina TAMI®, obteniendo buenos resultados para un diámetro de poro de 0,2 µm, temperatura de hidrólisis de 80 °C y una PTM de 1,5 bar para hidrolizados preparados con una mezcla de almidón/agua de 30 y 40% p/v. Los autores concluyen que las membranas cerámicas presentan características favorables para los hidrolizados de almidón de yuca (como resistencia química, térmica y mecánica, baja colmatación y alta selectividad), sin embargo el diámetro de poro de la membrana puede afectar las características del permeado obtenido.

---

<sup>4</sup> ACEVEDO, María Victoria , y PARRA Carlos Omar. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

Díaz y Ramos (2015) <sup>5</sup>, basados en el trabajo presentado anteriormente, propusieron un módulo de tecnología con membranas cerámicas tubulares monocanal de marca TAMI InsideCeram® de 1,2 m de longitud, para la producción en continuo de hidrolizados; con diámetro de poro de 50 kDa (superficie membranaria 0,132 m<sup>2</sup>) y 0,2 μm (superficie membranaria 0,00307 m<sup>2</sup>), una PTM de 1,5 bar, una temperatura de operación de 75 °C; para hidrolizados preparados con una mezcla de almidón/agua de 20% p/v. En los resultados se obtuvo menos pérdida de permeabilidad con la membrana de 0,2 μm en comparación con la de 50 kDa (entre 8,4%-21% y 11,9%-35,5% respectivamente), permeabilidad promedio de estabilización para la membrana de 50 kDa de 10,1 kg/m<sup>2</sup>h y 146,5 kg/m<sup>2</sup>h para la membrana de 0,2 μm, con una disminución de la turbidez del 97%.

Para la etapa de concentración se estudiaron diferentes métodos no convencionales. Entre los procesos de concentración estudiados por el grupo CICTA-UIS se encuentra la ósmosis inversa (OI), proceso donde el gradiente de concentración es la fuerza impulsora; Rodríguez y Sandoval (2011) realizaron el proceso de OI en módulos de membranas orgánicas Filmtec (2 m<sup>2</sup>) para retirar el agua de los jarabes de glucosa concentrando desde 10 °Brix hasta 25 °Brix, separando 2/3 del volumen inicial en 18 min con una presión de 37,5 bar y una temperatura de 35,5 °C; concluyendo que esta técnica se puede utilizar como una etapa de pre-concentración llegando a un límite de concentración cuando se iguala la presión del proceso con la presión osmótica (no mayor a 30 °Brix).

Martínez y Peñaranda (2013) <sup>6</sup> realizaron un estudio de la evaporación osmótica (EO) para concentrar hidrolizados de almidón de yuca, utilizando membranas

---

<sup>5</sup> DÍAZ, Gloria Lizeth, y RAMOS Dietmar José. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2015.

<sup>6</sup> MARTÍNEZ, Javier Camilo, y PEÑARANDA. Alba Lucia Planteamiento de un modelo matemático para la evaluación de la evaporación osmótica como método de concentración de hidrolizados de

hidrófobas de fibra hueca marca liqui-cel® y salmuera como fase extractiva, para la extracción del agua de la solución. Durante las pruebas, se concentraron soluciones de 10 °Brix hasta 32 °Brix, alcanzando un flux de permeado de 1,5 kg/m<sup>2</sup>h, con una temperatura de 40 °C. Inicialmente, con esta técnica se obtiene un mayor flujo de permeado inicial (concentrando a una mayor velocidad), sin embargo, en el tiempo se presenta una disminución en este flujo hasta detenerse, debido al aumento en el contenido de agua en la salmuera (ocasionado por el vapor de agua que atraviesa la membrana).

Otra de las técnicas estudiadas fue destilación con membranas (DM). Existen diferentes categorías de DM de las cuales se estudiaron destilación con membranas al vacío (VMD) y destilación de membranas con gas de arrastre (SGMD) por su mayor potencial de aplicación en la industria (Alkudhiri *et al.*, 2012). La técnica de VMD se realiza en condiciones de vacío, para facilitar el paso del componente volátil hacia el permeado. En la técnica de SGMD se hace pasar un gas de arrastre inerte por el lado del permeado, arrastrando el vapor de agua que atraviesa la membrana. En los resultados presentados por Calderón y Sánchez (2015) utilizando la técnica SGMD, se obtuvieron flux de permeado de 0,0396 kg/m<sup>2</sup>h utilizando soluciones con 10 °Brix; es decir 38 veces menor al obtenido con EO. Es importante mencionar que las técnicas DM, a diferencia de la EO, no tiene las limitaciones relacionadas con la utilización de una fase extractiva (salmuera). Con respecto a la OI, permite trabajar con presiones  $\leq 1$  bar, diferente de la OI que utiliza presiones entre 15-35 bar.

Finalmente, se encuentra la técnica de evaporación de película ascendente y descendente. En la evaporación de película ascendente, el líquido a concentrar entra por la parte inferior, éste asciende por las paredes de los tubos a causa del vapor que se genera al entrar en contacto con las paredes calientes de los tubos.

---

almidón de yuca. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

Rodríguez y Sandoval (2011)<sup>7</sup> compararon la técnica de evaporación de película ascendente con la técnica de evaporación tradicional, se evaluaron presiones de 100-200 mbar, temperaturas de 105-115 °C. Durante las pruebas se concentraron soluciones de 25 °Brix hasta 65 °Brix, la solución debió pasar por el evaporador tres veces (debido a la longitud de éste, 1m), obteniendo como resultado un factor de concentración de 1,5; un consumo de 150 veces menor comparada con la técnica de evaporación tradicional, a su vez encontraron que con esta técnica se presenta un mayor impacto sobre la calidad del producto (color), debido a un mayor ensuciamiento de la superficie de calentamiento.

Por otro lado, en la evaporación de película descendente, el líquido entra por la parte superior del sistema y fluye hacia abajo por acción de la gravedad, al interior de los tubos calentados por lo general con vapor de agua (McCabe *et al.*, 1991). Muñoz y Solano (2014)<sup>8</sup> construyeron un piloto de evaporación de película descendente al vacío, que trabaja con temperaturas del tubo de evaporador hasta os 350 °C, presiones de vacío hasta los 100 mbar, temperaturas de alimentación hasta 80 °C. Los resultados de las pruebas realizadas para la implementación del equipo arrojaron un factor de concentración de 1,28, obteniendo jarabes de concentración final de 51 °Brix a partir de hidrolizados de 40 °Brix, con una longitud de tubo de 1,4 m. Esta técnica no presentó ensuciamiento de la superficie de calentamiento durante las pruebas, superando con ello a la evaporación de película ascendente, en términos de calidad de los jarabes obtenidos.

En este proyecto se propuso un esquema de producción de jarabes de glucosa clarificados a partir de almidón de yuca, basado en los requerimientos y

---

<sup>7</sup> RODRIGUEZ, Sonia Rocío, y SANDOVAL Julie Tatiana. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis del almidón de yuca: etapas de preconcentración y concentración. BUCARAMANGA: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniera Química Universidad Industrial de Santander, 2011.

<sup>8</sup> MUÑOZ, Carlos Julián, y SOLANO Richard José. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

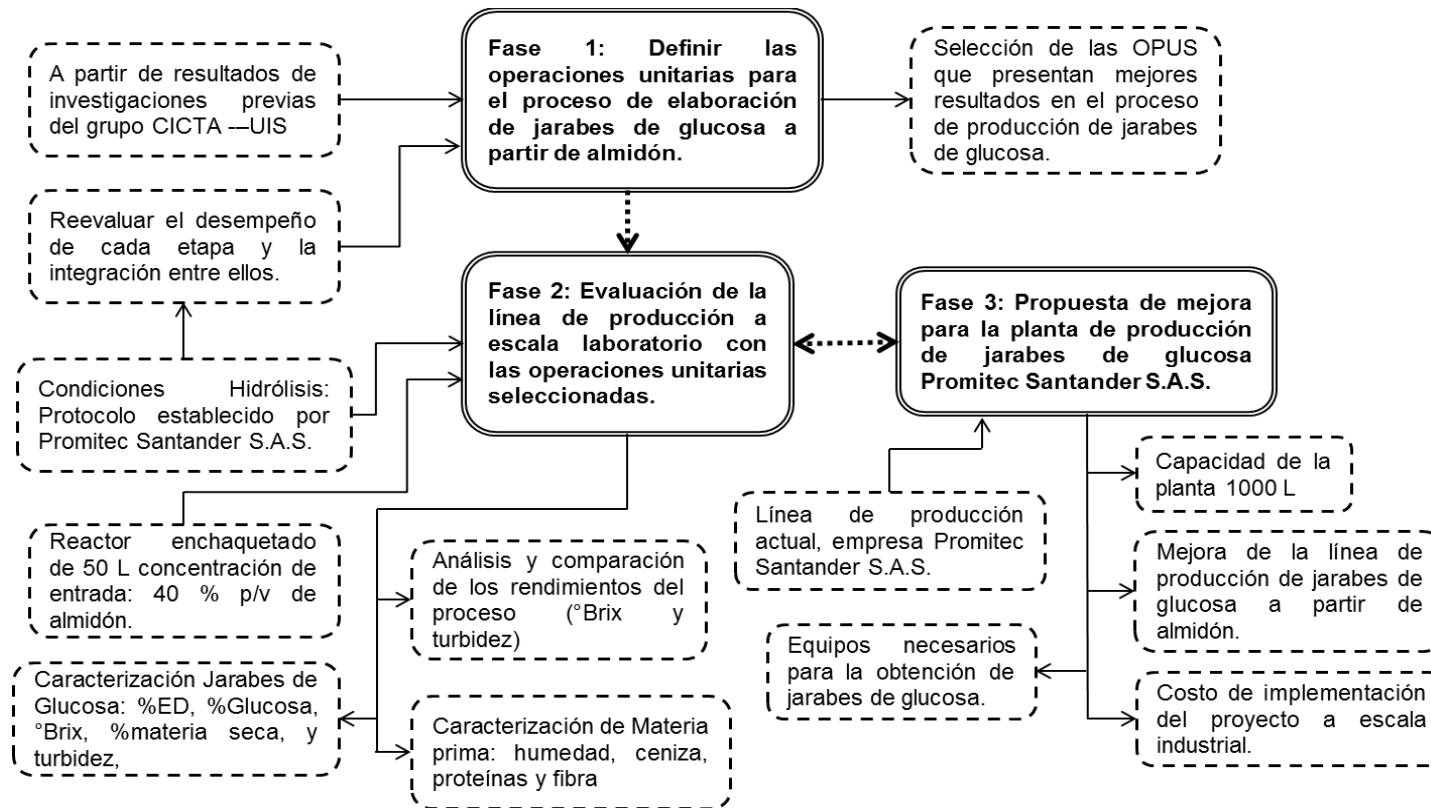
necesidades de Promitec Santander S.A.S; se evaluó a escala laboratorio las etapas propuestas, con el fin de corroborar la integración de éstas dentro del proceso, se presentaron las especificaciones para la construcción de los equipos a nivel industrial y los costos de los equipos a implementar.

En el marco de este proyecto se planteó una metodología similar para la producción de jarabes de glucosa con harina de yuca como materia prima alternativa, sin embargo por extensión y para mejorar la comprensión de los resultados presentados, sólo se reportarán los hallazgos con almidón de yuca.

# 1. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra el cuadro metodológico utilizado en este trabajo, donde se presentan las fases desarrolladas durante este proyecto de investigación.

**Figura 1. Cuadro Metodológico.**



### **1.1. FASE 1: DEFINIR LAS OPERACIONES UNITARIAS NO CONVENCIONALES PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE JARABES DE GLUCOSA A PARTIR DE ALMIDÓN.**

La etapa de hidrólisis fue realizada a partir del protocolo establecido por Promitec Santander S.A.S. Posteriormente, la etapa de clarificación de los hidrolizados se basó en la investigación realizada por Díaz y Ramos (2015). Finalmente, para la etapa de concentración del hidrolizado, se realizó un análisis DOFA a partir de los trabajos desarrollados por el grupo CICTA-UIS en el marco del proyecto Colciencias UIS Promitec Santander S.A.S (Rodriguez & Sandoval, 2011), (Martínez & Peñaranda, 2013), (Muñoz & Solano, 2014) (Calderón & Sánchez, 2015), donde se determinaron las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, seleccionando el mejor método de concentración. A partir de este análisis se planteó un esquema de producción donde se compararon los resultados de las investigaciones realizadas por el grupo y se seleccionaron las operaciones unitarias requeridas.

### **1.2. FASE 2: EVALUACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN A ESCALA LABORATORIO CON LAS OPERACIONES UNITARIAS SELECCIONADAS.**

En la primera etapa, la hidrólisis de almidón se realizó a 40% p/p por duplicado. El objetivo de estas pruebas fue replicar las condiciones establecidas por Promitec Santander S.A.S. y obtener solución para las etapas de tratamiento posteriores. Se elaboraron 50 L de hidrolizado de glucosa en un reactor enchaquetado de la planta piloto de la empresa Promitec Santander S.A.S. Para la etapa de clarificación se utilizó el piloto de tecnología de membranas construido por Díaz y Ramos (2015), con un caudal de alimentación de 2400L/h, temperatura de alimentación de 80 °C,  $\Delta P$  transmembrana entre 1-1,5 bar durante 9 h, por duplicado. En la etapa de concentración se utilizó el piloto de evaporación de

película descendente al vacío construido por Muñoz y Solano (2014),<sup>1</sup> con una presión de 200 mbar, temperatura de tubo de 70 °C, y una temperatura de alimentación en un rango de 63-68 °C. Los jarabes de glucosa se caracterizaron en °Brix, %ED, % Glucosa, % materia seca y turbidez.

### **1.3. FASE 3: PROPUESTA DE MEJORA PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA PROMITEC SANTANDER S.A.S.**

La principal línea de producción de Promitec Santander S.A.S. está diseñada para la obtención de jarabes de glucosa (hasta 60 °Brix) y maltodextrinas a partir de almidón, por medio de hidrólisis enzimática y concentración. Para el desarrollo de esta fase se partió del montaje de la línea de producción a escala laboratorio, establecida en la fase anterior, se planteó un diagnóstico, análisis y una propuesta de mejoras a realizar y de los equipos a incluir en el proceso.

### **1.4. MATERIALES, MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DE CUANTIFICACIÓN.**

**1.4.1. Materiales, insumos y equipos.** Almidón de yuca INDIYUCA (contenido almidón 99,7% p/p en base seca), enzimas Liquozyme supra 2.2x y Dextrozyme GA suministradas por Novozymes, NaClO 15%p/v y NaOH en escamas distribuidos por Suquim Ltda y en pellets marca Merck®, membranas cerámicas tubulares monocanal TAMI InsideCeram®, bomba centrífuga marca Pedrollo, rallador metálico, estufa, pH-metro Hanna HI 991001, refractómetro de mano Fisher N°1396470C de 0 a 90%, baño termostataado Lauda® Alpha RA 24 WWR Scientific Products, molino de bolas cerámico Paul O. Abbe, turbidímetro HACH

---

<sup>1</sup> MUÑOZ, Carlos Julián, y SOLANO Richard José. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

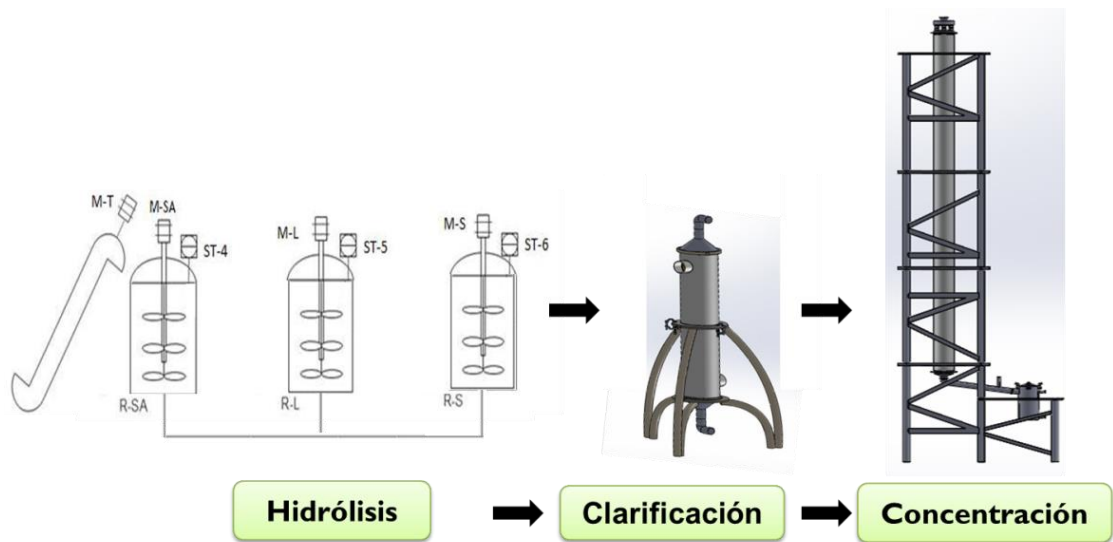
2100Q y planta piloto para hidrólisis compuesta por tres reactores con capacidad de 50 L localizada en Promitec Santander S.A.S.

**1.4.2. Métodos de cuantificación y de análisis.** Análisis de humedad por el método indirecto (A.O.A.C 925,10, 1990), ceniza por método directo (A.O.A.C 923,03, 1990), proteína (A.O.A.C 920,87), almidón (NTC 267), %ED por el método Lane y Eynon (Maresco y Sansón, 2008) y el método DNS (ácido dinitrosalicílico) (Miller, 1959) y glucosa por el método enzimático colorimétrico establecido por Trinder (1969), turbidez usando turbidímetro y un patrón estándar de referencia USEPA 180.1.

## 2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El esquema de producción propuesto para la producción de jarabe clarificado a partir de almidón de yuca está compuesto de tres etapas como se puede observar en la Figura 2.

**Figura 2. Esquema de Producción de jarabe clarificado a partir de almidón de yuca**



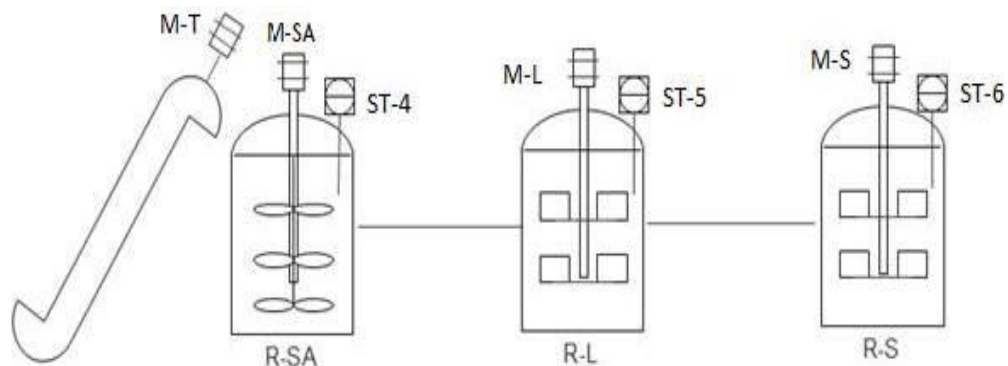
Los resultados obtenidos de las Fases I, II y III se presentan simultáneamente manteniendo el orden del proceso de producción (hidrólisis, clarificación y evaporación) con la finalidad de facilitar su lectura y comprensión.

## 2.1. ESTUDIO DEL PROCESO DE HIDRÓLISIS INTEGRANDO EL PROTOCOLO ESTABLECIDO POR LA EMPRESA PROMITEC SANTANDER S.A.S

- Diagnóstico de los equipos utilizados para la etapa de hidrólisis de la planta de producción.

La empresa Promitec Santander S.A.S cuenta con tres reactores construidos en acero inoxidable, con capacidad de 960 L cada uno y sistemas de calentamiento mediante serpentín (88 cm de diámetro de 10 espiras). Sin embargo, para el proceso de elaboración de jarabes de glucosa se encuentra en funcionamiento solamente uno de ellos, específicamente el reactor R-SA que cuenta con un agitador RIBBON BLENDER, adecuado para fluidos viscosos como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3. Reactores planta de producción Promitec Santander S.A.S.**



Los reactores R-L y R-S, antiguamente utilizados para las etapas de licuefacción y de sacarificación, respectivamente, cuentan con agitadores de doble turbina. Estos reactores además se encuentran conectados entre sí, a causa del protocolo de producción establecido inicialmente en la empresa. El ingreso de la materia prima a estos reactores se hace utilizando un transportador tipo tornillo sin fin.

- Propuesta para la producción de jarabes de glucosa clarificada

Debido a las características de los agitadores de doble turbina, ubicados en los reactores R-L y R-S, no se recomiendan su uso para el procesamiento de jarabes altamente viscosos, en su lugar se utilizan agitadores helicoidales.

A partir de lo mencionado anteriormente se propone instalar agitadores helicoidales RIBBON BLENDER en los reactores R-L y R-S, buscando obtener características de funcionamiento similares de estos agitadores con respecto al existente en el reactor R-SA (Tabla1). La finalidad de este cambio es permitir a cada reactor trabajar de forma independiente, triplicando con ello la producción de jarabes de glucosa. No se realizará modificación de los motores pues sus características les permiten seguir siendo utilizados con el tipo de agitador propuesto.

**Tabla 1. Resumen de cambios en la planta de producción de Promitec S.A.S**

<b>HALLAZGOS</b>	<b>PROPUESTA</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>
En los reactores R-L y R-S tienen agitadores doble turbina	Instalar agitadores helicoidales	Los agitadores que se encuentran instalados no son propicios para sistemas que trabajan con fluidos viscosos.
Los reactores de la planta R-L y R-S están sin uso debido a los cambios realizados en el proceso por la patente.	Independizar cada reactor utilizando el sistema de alimentación existente (tornillo sin fin).	Aumentar la producción de jarabes de glucosa y maltodextrinas utilizando los reactores ya existentes en la planta.

La cotización de las modificaciones propuestas para la planta de producción de jarabes de glucosa en Promitec Santander S.A.S fue realizada en empresas del departamento, sumando un total de \$5'600.000 Cop, ejecutable en 20 días.

## 2.2. ESTUDIO DE LA ETAPA DE CLARIFICACIÓN INTEGRANDO TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS.

- Antecedentes de los equipos utilizados para la etapa de clarificación.

La empresa Promitec Santander S.A.S cuenta con un módulo de ultrafiltración de flujo cruzado con membrana espiralada, la cual no puede trabajarse con soluciones a concentraciones mayores a 20 °Brix, debido a la súbita caída en la presión dada la viscosidad de la solución. Contreras (2014) concluyó que con este módulo se pueden obtener hidrolizados clarificados de glucosa de excelente calidad a 20 °Brix, con una turbidez de 18 NTU.

- Estudio experimental de la clarificación en la producción de hidrolizados de almidón de yuca.

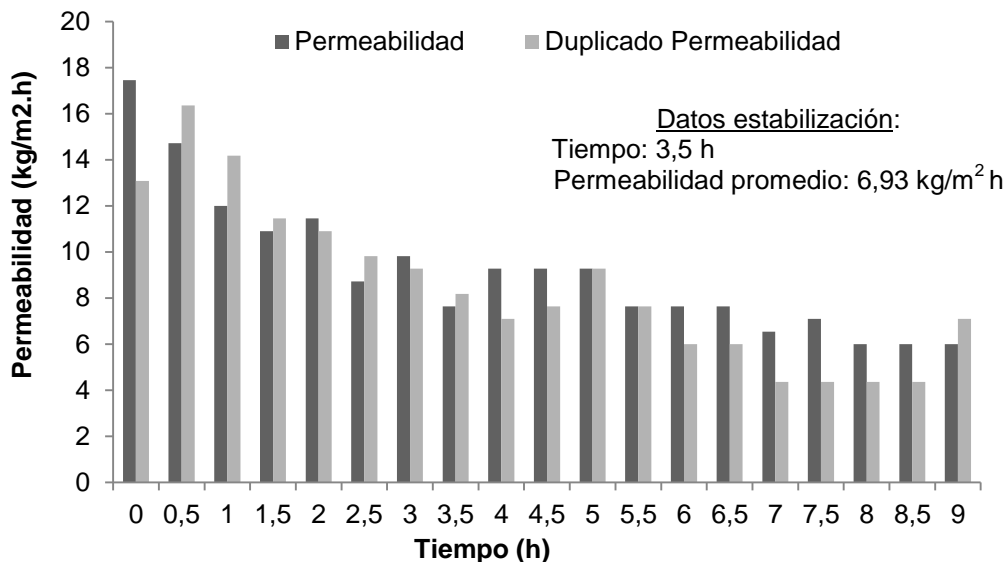
Las pruebas para la etapa de clarificación se realizaron en el equipo de tecnología membranaria construido por Díaz y Ramos (2015), se filtraron 50 L de hidrolizado de glucosa elaborados en la etapa anterior. Las características fisicoquímicas de estos hidrolizados se resumen en la Tabla 2 . En ella se observa un %ED de 59,1%, lo que indica que el hidrolizado obtenido es de glucosa (se considera hidrolizado de glucosa, a aquellos con %ED mayor a 40% (Baks *et al.*, 2008).

**Tabla 2. Caracterización fisicoquímica hidrolizados de glucosa a 40%p/p.**

Muestra	Glucosa (% sobre materia seca)	Densidad (g/mL)	°Brix	Materia Seca (%)	%ED
Hidrolizado de Glucosa 40% p/p a partir de almidón	63,99	1,21	42	24,92	59,1

En la Figura 4 se muestra la curva de permeabilidad obtenida en la etapa de clarificación utilizando membranas de  $\alpha$ -alúmina TAMI de  $0,2 \mu\text{m}$ , evidenciando una disminución de la permeabilidad (cercana al 50%), con una tendencia de estabilización en  $6,93 \text{ kg/m}^2\text{h}$  después de 3,5 h. Esta disminución se debe al ensuciamiento normal de las membranas durante la filtración de los hidrolizados (Zapata, 2009). Las pruebas experimentales permitieron establecer el protocolo de limpieza de las membranas utilizadas para recuperar su permeabilidad, utilizando un lavado con solución de NaOH al 1% por 30 min con adición de NaClO al 1%, por 30 min más y finalizando con un lavado con agua hasta pH neutro.

**Figura 4. Permeabilidad en el tiempo durante la filtración de hidrolizados de glucosa 40% p/p utilizando membranas de  $0,2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\text{P}$  de 1,5 bar y 9 h de filtración, caudal de alimentación 2400 L/h .**

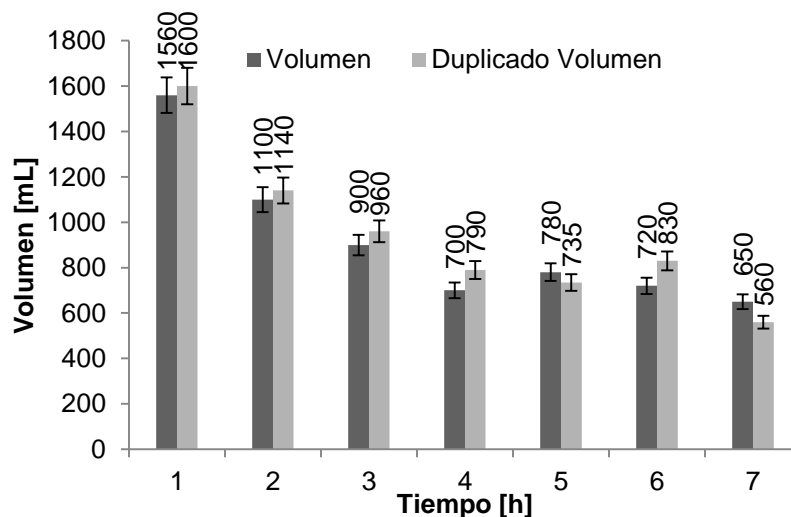


En la Figura 5, se puede observar el volumen de líquido recolectado en cada filtración, cuyo valor disminuye con la permeabilidad en el tiempo. El volumen promedio de filtrado obtenido en las dos pruebas realizadas fue de  $0,860 \pm 0,005 \text{ L}$  por hora. Durante cada prueba se alimentaron 18 L de hidrolizado de glucosa. Al

final de cada prueba en el tanque de retenido quedaban aproximadamente 5 L de hidrolizado. Los resultados revelaron que el rendimiento de esta etapa fue de 41,6%, obteniendo un jarabe de 63 °Brix.

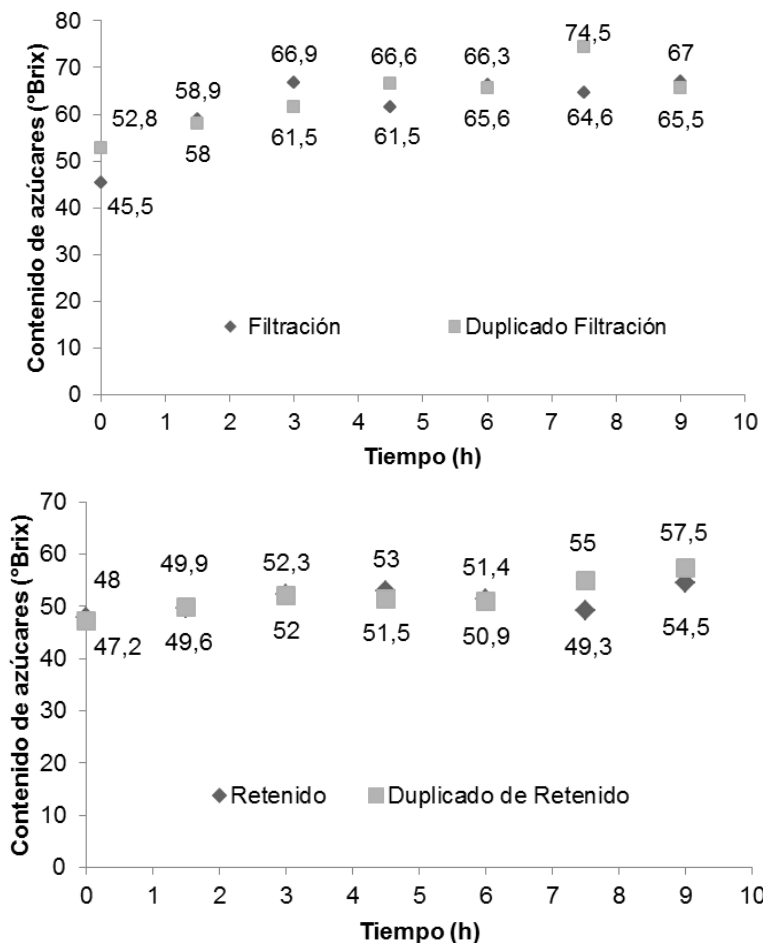
En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de °Brix para la etapa de clarificación. En ella se observa el aumento de la concentración del filtrado con respecto al retenido, debido a la evaporación del agua presente en el hidrolizado filtrado durante su salida del piloto. Este fenómeno se presenta debido a la formación de una capa de hidrolizado sobre la capa externa de la membrana (sección de filtrado en el módulo), simulando una evaporación de película descendente. Sin embargo, a escala industrial normalmente este evento no se presentaría ya que esta sección del módulo membranario estará inundada con hidrolizado filtrado (para compensar diferencias de presión a lo largo del módulo).

**Figura 5. Volumen de permeado producido en la etapa de clarificación. Hidrolizado de glucosa 40% p/p utilizando membranas de 0,2 µm, ΔP de 1,5 bar y 9 h de filtración, caudal de alimentación 2400 L/h.**

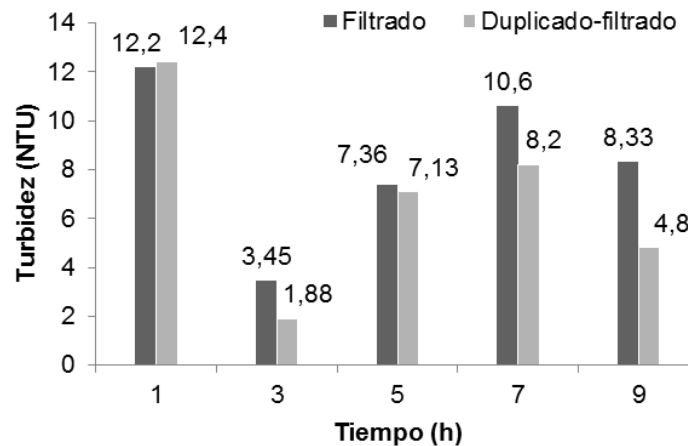


Finalmente, los resultados de turbidez del jarabe de glucosa filtrado se presentan en la Figura 7, observándose una turbidez promedio de 7,63 NTU para los filtrados obtenidos. La turbidez para el jarabe retenido superó el rango de detección del equipo (turbidez > 800 NTU); evidenciando una disminución en más del 97% la turbidez del jarabe, lo que muestra la efectividad del proceso de filtración.

**Figura 6. Contenido de azúcares en a) filtrado y b) retenido, obtenidos durante la etapa de clarificación para  $\Delta P$  de 1,5 bar, 40% p/p almidón, caudal de alimentación 2400 L/h. Tiempo 9 h para membranas de 0,2  $\mu\text{m}$ .**



**Figura 7. Turbidez de hidrolizados de glucosa obtenidos durante la etapa de clarificación a 40% p/p,  $\Delta P$  1,5 bar, caudal de alimentación 2400 L/h. Tiempo de filtración de 9 h utilizando membranas de 0,2  $\mu\text{m}$ .**



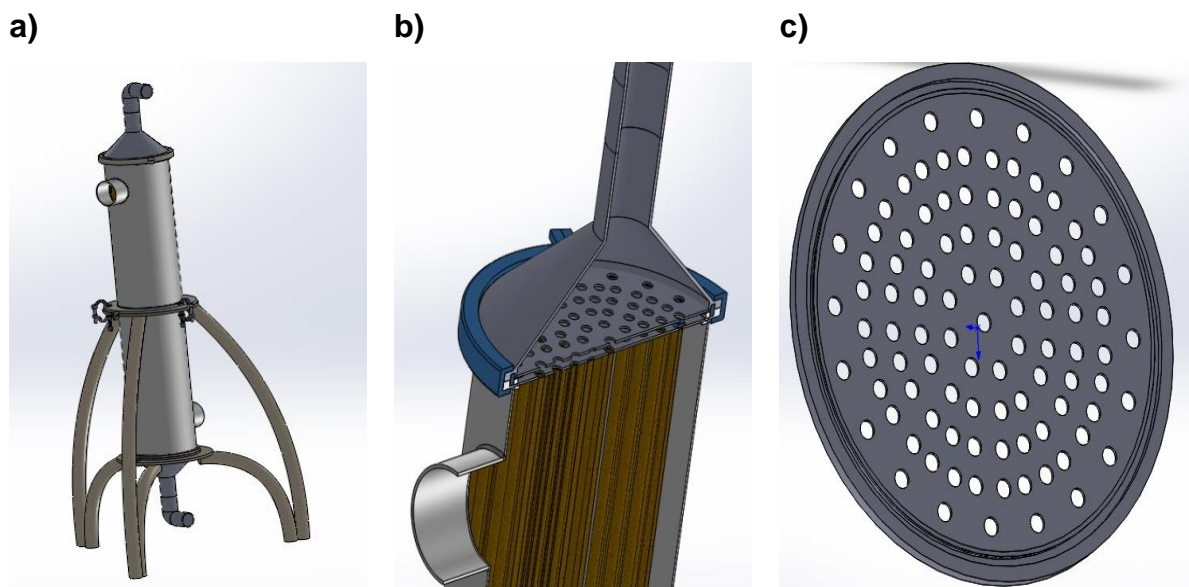
- Propuesta para la producción de jarabes de glucosa clarificada

El esquema de producción de Promitec Santander S.A.S requiere 120 L de hidrolizado clarificado para productos de consumo humano, por lo que se propone procesar 300 L de hidrolizado durante 7 h con un lavado intermedio de las membranas. Los 180 L restantes (retenido) integrarían las formulaciones encaminadas a consumo pecuario.

En base a los resultados experimentales, la cantidad de membranas necesarias para clarificar este volumen sería de 100 membranas tipo monocanal de 0,01 m de diámetro externo, 0,2  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro y longitud de 1,2 m. La Figura 8 muestra el diseño realizado en SOLIDWORKS® 2015, basándose en las características del piloto de tecnología de membranas elaborado por Díaz y Ramos (2015). En las Figura 9 y Figura 10 se pueden observar las especificaciones de la tapa del equipo, del disco de soporte de las membranas, a su vez se puede ver el detalle de la carcasa y estructura externa del equipo de tecnología de membranas propuesto.

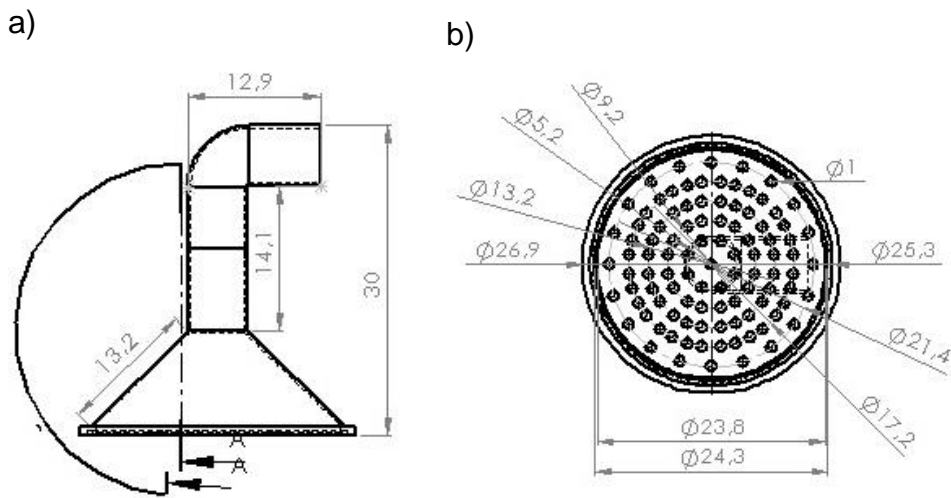
El valor cotizado para este equipo por una empresa santandereana es de \$13'577.000 Cop. Además, el monto de inversión para las membranas al día 06 de Enero de 2016 es aproximadamente de \$50'610,000 Cop. Sin embargo, existen membranas multicanal (8 canales) de 0,025 m de diámetro externo, que podrían reemplazar las membranas utilizadas en las pruebas de laboratorio, reduciendo el costo del equipo a \$9'750.000 Cop, así como el costo de las membranas a \$12'720.000 Cop. Es importante mencionar que para el cálculo con las membranas multicanal (opción más económica) se consideró que las permeabilidades en términos de flux son las mismas, aspecto que no necesariamente se cumple, debido al cambio de la geometría de la superficie filtrante. Se recomienda realizar pruebas experimentales que permitan comprobar esta hipótesis.

**Figura 8. Diseño equipo de clarificación a) estructura externa b) corte longitudinal del módulo y c) disco de soporte para la 100 membranas Monocanal de 0,01 m de diámetro externo, 0,2  $\mu$ m de diámetro de poro y longitud de 1,2 m.**



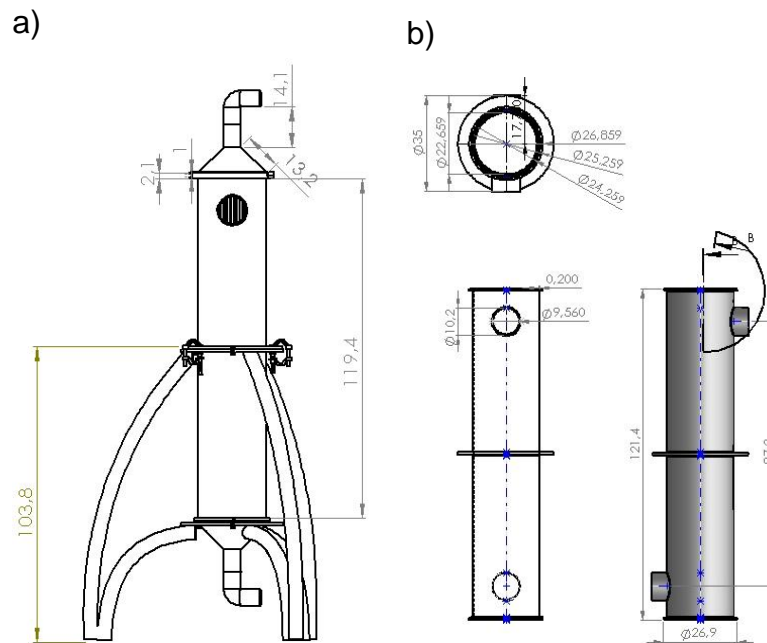
Fuente: Imágenes tomadas de SOLIDWORKS® 2015.

**Figura 9. Dimensiones (cm) a) tapa y b) disco de soporte de las membranas del equipo de clarificación.**



Fuente: Imágenes tomadas de SOLIDWORKS® 2015.

**Figura 10. Dimensiones (cm) a) estructura externa y b) carcasa del equipo de clarificación.**



Fuente: Imágenes tomadas de SOLIDWORKS® 2015

### **2.3. ESTUDIO DE LA ETAPA DE CONCENTRACIÓN IMPLEMENTANDO LA TÉCNICA DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE AL VACÍO.**

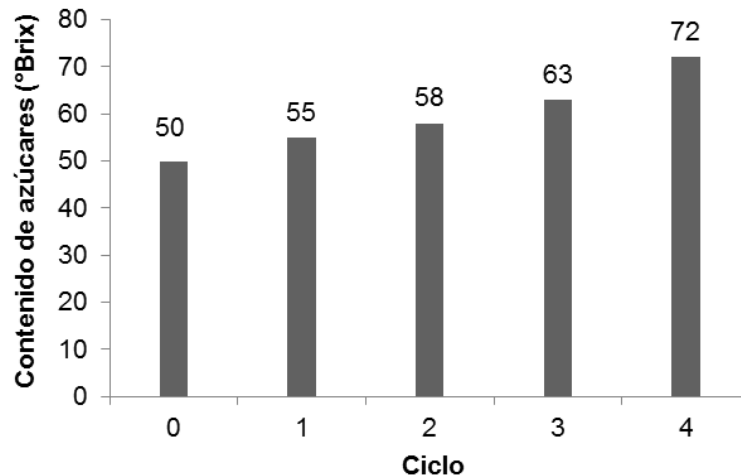
- Diagnóstico de la etapa de evaporación en Promitec Santander S.A.S. Anteriormente, Promitec Santander S.A.S. contaba con un evaporador enchaquetado de superficie raspada en vacío, tipo marmita, con altos consumos energéticos, debido a la baja eficiencia en la transferencia de energía. Lo anterior implicaba tiempos de proceso de 10 a 12 h, obteniendo una concentración final de 60 °Brix. Este aspecto fue el punto de partida del proyecto de Colciencias del cual hace parte el presente trabajo de grado.

- Pruebas experimentales para la concentración de hidrolizados de yuca. En esta etapa, se realizaron pruebas usando el piloto de evaporación de película descendente al vacío construido por Muñoz y Solano (2014), con una presión de 200 mbar, temperatura de tubo de 70 °C, caudal de alimentación promedio de 6 L/h y una temperatura de alimentación en un rango de 63-68 °C; estos valores se fijaron de acuerdo al punto de ebullición de la solución a esta presión. Para esta prueba se concentraron los hidrolizados clarificados obtenidos de la etapa anterior. Debido a la longitud del piloto (escala de laboratorio) se hizo necesario realizar varios ciclos de evaporación para alcanzar los °Brix deseados.

La Figura 11 muestra el contenido de azúcar por cada ciclo de evaporación. En ella se observa un aumento promedio de 5,5 °Brix en el jarabe por cada ciclo, obteniendo al final un jarabe con concentración de 72 °Brix; y un factor de concentración de 1,14. Los resultados obtenidos por Muñoz y Solano (2014) muestran un factor de concentración 1,28; utilizando jarabes de glucosa con un aumento entre 8-11 °Brix a una temperatura de pared entre 200-300 °C, una presión de 200 mbar. Anaya y Bueno (2015) reportan un factor de concentración de 1,13, utilizando jarabes de 40 °Brix, una temperatura de pared de 80 °C, una presión de 300 mbar. Al comparar estos resultados se encuentra que el factor de

concentración obtenido está dentro de los rangos de los trabajos anteriormente citados.

**Figura 11. Contenido de azúcares del jarabe de glucosa por ciclo de evaporación realizado en el evaporador de película descendente al vacío, para 50 °Brix.  $\Delta P$  200 mbar. Temperatura de pared 70 °C. Caudal de alimentación 6 L/h.**



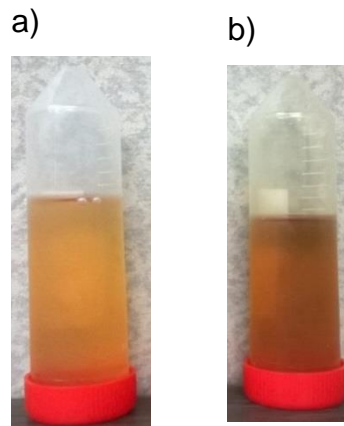
En la Figura 12 se puede observar el jarabe clarificado alimentado al evaporador a 50 °Brix y el jarabe obtenido al final de la prueba de concentración a 72 °Brix (después de 4 ciclos). El cambio de color que se observa se debe al aumento de la concentración del jarabe. Es importante mencionar que durante las pruebas no se evidenció ensuciamiento de la superficie del intercambiador por caramelización del producto sobre esta superficie caliente del evaporador.

- Propuesta para la evaporación en la producción de jarabes de glucosa.

El diseño propuesto para el evaporador de película descendente se hizo de acuerdo al piloto elaborado por Muñoz y Solano (2014). Un caudal de 250 L/h fue establecido, debido a la capacidad de 960 L que tienen los reactores de la planta, para una duración de 4 h de proceso. Existe la posibilidad que una fracción de la alimentación provenga de la etapa de clarificación, ésta deberá alimentarse antes

del hidrolizado no clarificado, evitando el enturbiamiento del jarabe clarificado con material insoluble proveniente del hidrolizado no clarificado.

**Figura 12. Jarabe de glucosa obtenido de: a) etapa de clarificación b) etapa de evaporación.**



Una de las características relevantes para el diseño de este equipo, es la longitud de la pared del evaporador, debido a que el grado de concentración que se alcanzaría a la salida del evaporador depende de ésta. Para el escalado del equipo se utilizó la simulación establecida por Benavides (2016) donde se pudo obtener la longitud de la pared del evaporador requerida. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron: temperatura de pared (90 °C), temperatura de alimentación (80 °C), caudal de alimentación por tubo de intercambio (0,4 L/min), diámetro del tubo interno (1 ½”) y concentración de entrada del jarabe de glucosa (40 °Brix). La simulación dio como resultado requerimientos de 11 tubos de intercambio de 7 m de longitud (valor ubicado dentro de los utilizados para este tipo de equipo; 3,63-9,75 m (Geankoplis, 1998)<sup>1</sup>, para una concentración final del jarabe a la salida de 71 °Brix.

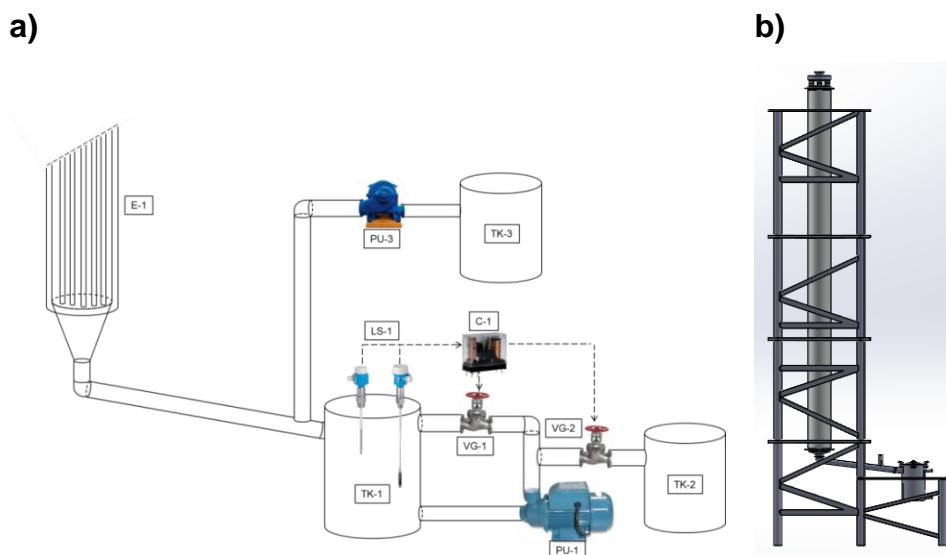
Para el dimensionamiento de este equipo se decidió utilizar medidas dentro de los rangos típicos para este tipo de evaporador: diámetro tubos de intercambio (entre

<sup>1</sup> GEANKOPLIS, C. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera. México: Cecsca, 1998.

1 – 2”) (Geankoplis, 1998)<sup>1</sup> y longitud de tubos de fácil adquisición comercial; esto con el fin de reducir costos de elaboración por mano de obra y materiales. De lo anterior, se estableció un diámetro de 1 ½” y longitud de 6 m para los tubos del de intercambio del evaporador.

En la Figura13a) se observa el diagrama de flujo del evaporador de película descendente al vacío. El evaporador estará conectado al TK-1 por medio de una tubería inclinada, donde el jarabe se separará del vapor de agua generado. El TK-1 tendrá un sensor de nivel capacitivo y estará conectado a un sistema de recirculación (bomba de tornillo PU-1 y 2 válvulas eléctricas). El vapor de agua se condensará por medio de una bomba de vacío de anillo de agua (PU-3), que estará conectada al TK-3 (tanque de recirculación de agua). Finalmente, el jarabe de glucosa concentrado será recolectado en el TK- 2. En la Figura 13b) se muestra el diseño de la planta en 3D para el proceso de evaporación, el cual fue elaborado en SOLIDWORKS® 2015.

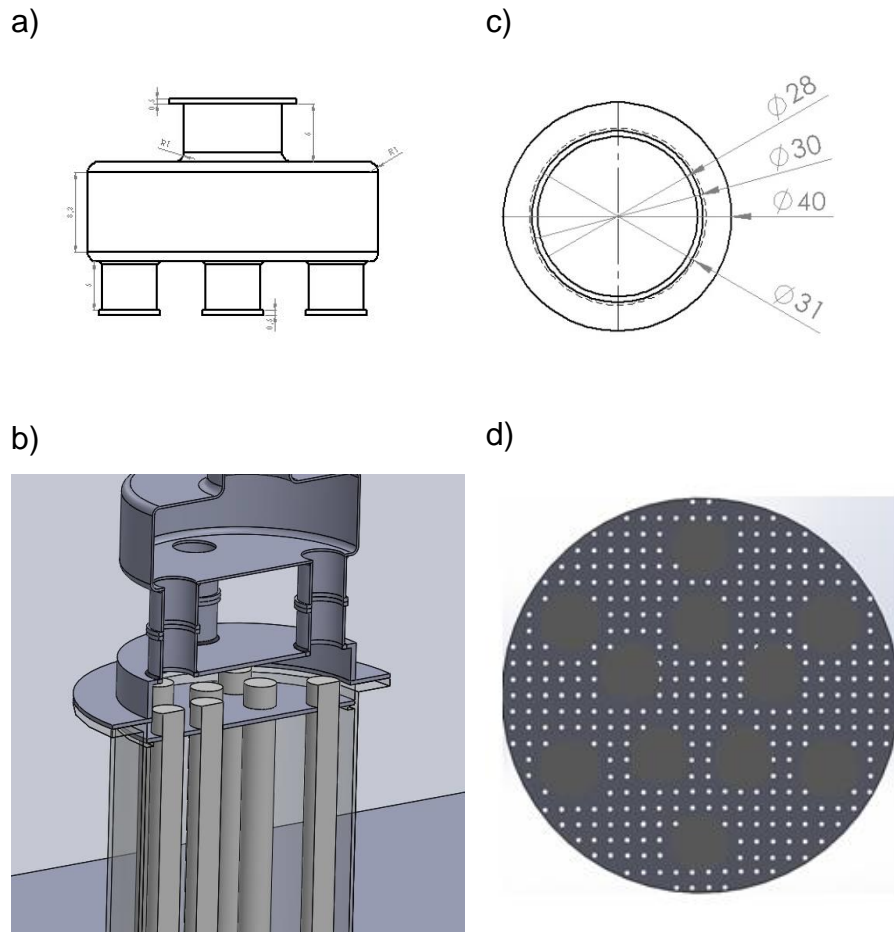
**Figura 13. Sistema de evaporación de película descendente al vacío, a) diagrama de flujo de proceso y c) estructura de soporte para el evaporador.**



<sup>1</sup> Ibid

Para el evaporador de película descendente se propone una alimentación con tubería de 4" que tendrá un sistema de distribución de 4 canales de 2" c/u, los cuales enviarán al hidrolizado sobre un disco perforado (perforaciones de 3 mm), el cual asegurará la distribución del hidrolizado en los 11 tubos de intercambio que se encuentran ubicados al interior del equipo. La Figura 14 muestra las especificaciones para el sistema de distribución además de la vista en 3D del corte longitudinal.

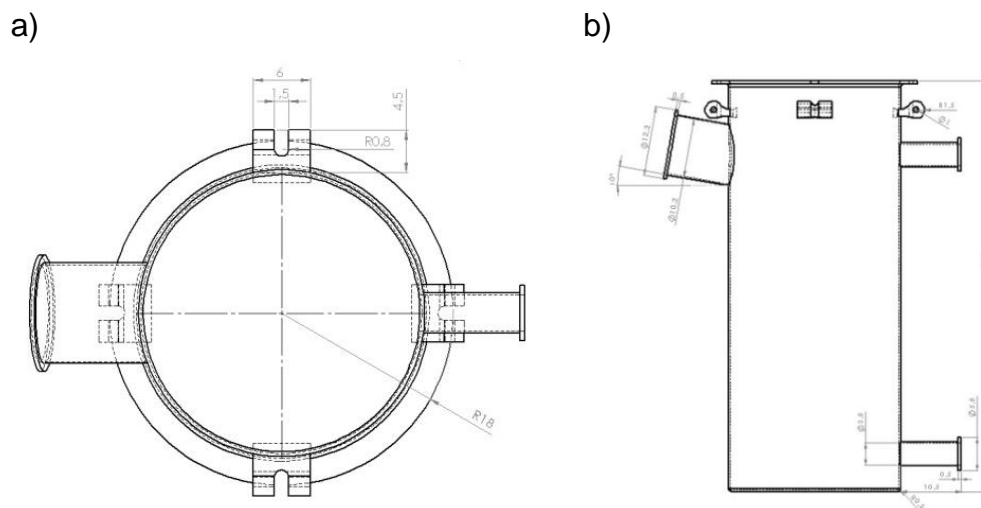
**Figura 14. Vista de corte longitudinal con a) dimensiones y b) en 3D, cara superior con c) dimensiones y d) en 3D del sistema de distribución del evaporador de película descendente al vacío.**



La salida del jarabe concentrado estará acoplada a un sistema de recuperación de concentrado transitorio. Este sistema de recuperación de concentrado estará compuesto de un tanque de almacenamiento transitorio de capacidad de 50 L, dos válvulas solenoides (on-off) conectadas a sensores de nivel tipo capacitivo que mantendrán el nivel del líquido entre 20-40 L (evitando así el vaciado total o reboce del tanque). Una bomba de desplazamiento positivo de tornillos conectada a este tanque permitirá la recuperación en continuo del concentrado sin perder el vacío dentro del sistema. La Figura 15 muestra las especificaciones para el tanque de almacenamiento transitorio de jarabe de glucosa.

El vacío del sistema será asegurado por una bomba de vacío de anillo de agua conectada a un taque. Se recomienda un sistema de almacenamiento de agua de 1 m<sup>3</sup> que permita recircular el agua a la bomba para su adecuado funcionamiento, con el fin de disminuir consumo de agua y con ello el impacto ambiental del proceso. El valor cotizado para este equipo por una empresa santandereana es de \$16'000.000 Cop.

**Figura 15. Dimensiones a) tapa y b) cuerpo del tanque de almacenamiento transitorio del jarabe de glucosa obtenido del evaporador de película descendente.**



Los equipos utilizados en el sistema de evaporación de película descendente se detallan en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No encuentra el origen de la referencia..**

**Tabla 3. Características de los tanques del evaporador de película descendente.**

<b>Equipo</b>	<b>Material</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Conexión</b>
TK-1 (Tanque de concentrado)	Acero Inoxidable	71	30	Tipo Clamp, 4" y 1,5"
TK-3(Tanque del Agua)	Acero Inoxidable	2000	800	Tipo clamp,1,5"

**Tabla 4. Características de los equipos usados en el evaporador de película descendente.**

<b>Equipo</b>	<b>Potencia(Hp)</b>	<b>Voltaje (v)</b>	<b>Marca</b>	<b>Costo</b>
Bomba centrifuga	1	110-220	IGM	\$491,000
PU-1 (Bomba de tronillo)	3	220-440	NETZSCHT	\$11'848,588
PU-3 (Bomba de anillo de agua)	5	220-380-440	NASH	\$19'021,869

### 3. CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos por el grupo CICTA-UIS, se seleccionó la evaporación de película descendente como método más conveniente para la concentración de hidrolizados de almidón de yuca, por su disminución del consumo energético e impacto sobre la calidad del producto. Igualmente, al proceso se adicionó una etapa de clarificación con membranas de microfiltración cerámicas de las que se reportan un remoción de 97% de la turbidez del hidrolizado, mejorando las características del producto.
- Se evaluó el esquema de producción a escala laboratorio de jarabe de glucosa clarificado a partir de almidón de yuca. En la etapa de hidrólisis, se obtuvieron hidrolizados de almidón de yuca con 59,1 %ED. Durante la clarificación, se obtuvieron hidrolizados clarificados con turbidez promedio de 7,43 NTU y un rendimiento de 41,6%. Las membranas cerámicas utilizadas presentaron una permeabilidad promedio de estabilización de 6,93 kg/m<sup>2</sup>h y buena respuesta a los protocolos de limpieza establecidos, evidenciando una fácil recuperación de su permeabilidad inicial. Finalmente, en la etapa de concentración se obtuvieron jarabes de glucosa de 72 °Brix sin ningún cambio notable de su apariencia (esencialmente su color). El evaporador utilizado trabajó con un factor de concentración de 1,14 y no presentó ensuciamiento sobre la superficie de calentamiento
- A partir de lo encontrado experimentalmente y de visitas realizadas a la empresa Promitec Santander S.A.S, se plantearon mejoras en los equipos existentes en la empresa para la etapa de hidrólisis, se determinaron las especificaciones para la construcción de los equipos para una capacidad de procesamiento de 1000 L: Equipo de clarificación (100 membranas con

diámetro interno de 0,01 m y de 1,2 m de longitud, carcasa de 26,9 cm de diámetro y 1,21 m de largo), Evaporador de película descendente (11 tubos internos de 1 ½" y de 6 m de longitud). Los diseños fueron realizados en SOLIDWORKS® y el costo de construcción fue determinado a través de reuniones con empresas del sector.

- A partir de este trabajo de grado y gracias al convenio Colciencias-UIS-Promitec S.A.S. se logró proponer y evaluar a escala de laboratorio, un esquema de producción de jarabes clarificados de glucosa a partir de almidón, permitiendo a la empresa comenzar a implementar algunas de las mejoras propuestas en su esquema de producción.

#### **4. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar estudios utilizando membranas multicanal para el módulo de tecnología de membranas con el objetivo de determinar la permeabilidad utilizando hidrolizados de almidón.

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, María Victoria, y Carlos Omar Parra. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

AMAYA, Fernando Andrés. Estudio del proceso de producción de hidrolizados de almidón de yuca integrando tecnología membranaria. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

ANAYA, Camilo Andrés, y SOLVEY BUENO Paula. Simulación de la evaporación de película descendente al vacío y con gas de arrastre utilizando redes neuronales. Bucaramanga-UIS: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2015.

ARISTIZABAL, Jhoanna. y SÁNCHEZ, Teresa. «Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca.» Boletín de servicios agrícolas de la FAO, nº 163 (2007): PP. 33-36. 49-57.

AYA ARIAS, W. A., PINEDA, J., SANCHEZ, O. & CARDONA ALZARATE, C., 2006. Análisis comparativo de diferentes materias primas amiláceas para la obtención de alcohol carburante. Memorias del congreso Colombiano de Ingeniería Química, pp. ISSN: 1692-925X.

BAKS, Tim, Frans H.J HAPPEN, Anja E.M JANSSEN, y Remko M BOOM. «Towards an optimal process for gelatinisation and hydrolysis of highly

concentrated starch–water mixtures with alpha-amylase from *B. licheniformis*.» *Journal of Cereal Science* 47, nº 2 (2008): 214-225.

CALDERÓN, Kendry Ximena, y Lina Paola Sánchez. Estudio de la destilación con membranas al vacío y con gas de arrastre para la concentración de hidrolizados de almidón de yuca. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2015.

CAMPOS PUENTES, Lizeth Nathalie, y Orlando A Aguilar Patiño. Estudio de la molienda como pretratamiento de harina de yuca integral para su uso en el proceso de obtención de jarabes de glucosa. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

CONTRERAS, Jose Said. Estudio de la implementación de un proceso de ultrafiltración en la etapa de clarificación de jarabes de glucosa y maltodextrinas. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

DÍAZ, Gloria Lizeth, y RAMOS Dietmar José. Estudio del proceso de producción en continuo de hidrolizados de almidón de yuca integrando hidrólisis enzimática y clarificación con tecnología de membranas. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2015.

GEANKOPLIS, C. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera. México: Cecsca, 1998.

JOHNSON, N R. G. PADMAJA, S.N.Morthy. «Comparative production of glucose and high fructose syrup from cassava and sweet potato roots by direct conversion techniques.» *Elsevier* 10, nº 4 (2009): PP. 616-620.

LEAES, ELOISA X, et al. "Ultrasound-assisted enzymatic hidroylisis of cassava waste to obtain fermentable sugars." Elsevier 115 (2013): 1-6.

MARTÍNEZ, Javier Camilo, y PEÑARANDA Alba Lucia. Planteamiento de un modelo matemático para la evaluación de la evaporación osmótica como método de concentración de hidrolizados de almidón de yuca. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2013.

MCCABE, Warren L, SMITH Julian C, y HARRIOTT. Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. Séptima. Ciudad de México: Mc Graw Hill, 1991.

MILLER, Gail Lorentz. «Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar .» Analytical Chemistry 31, nº 3 (1959): 426-428.

MUÑOZ, Carlos Julián, y SOLANO Richard José. Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2014.

RODRIGUEZ, Sonia Rocío, y SANDOVAL Julie Tatiana. Obtención de jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis del almidon de yuca: etapas de preconcentración y concentración. BUCARAMANGA: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniera Química Universidad Industrial de Santander, 2011.

TRINDER, P. «Determination of blood glucose using and oxidaseperoxidase system with non-carcinogenin chromogen.» Journal Clinical Pathoogy 22, nº 2 (1969): 158-161.

VARGAS, Lizeth Viviana, y PRADA Viviana Marcela. Estudio de la formulación de un bloque multinutricional (BM) dirigido a la alimentación de caprinos para la empresa Promitec Santander S.A.S. Bucaramanga: Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Químico Universidad Industrial de Santander, 2015.

ZAPATA, J E. Efecto de la limpieza química en la permeabilidad de membranas cerámicas en la Ultrafiltración. Granada: Tesis doctoral, Instituto de Biotecnología Univesidad de Granada. , 2009.