



Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química

El sorgo, una opción en la producción de jarabes dextrinizados.

Tesis en opción al título de Ingeniero Químico.

Autor: Javier Medina Macola

Tutores: MSc. William Ortiz Fernández.

MSc. Leyanis Rodríguez Rodríguez

Consultante: Dra. Irenia Gallardo Aguilar

Cienfuegos, 2015



Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por este trabajo y por quien soy:

*A mi madre que es mi luz e inspiración, sin su amor ningún logro de
mi vida sería un triunfo*

*A mi padre quien ha sido mi ejemplo a seguir pues ya somos dos
ingenieros químicos en la familia*

*A Alexander que más que un padrastro has sido un amigo, gracias por
todo el apoyo y consejos que me das*

*A toda mi familia, que han sido parte de la formación del hombre que
soy*

*A mis amigos Claudia, Luis Ernesto, Marco, Iván, Hairon, por cada
consejo, cada palabra, cada silencio, cada momento a su lado es
especial, este título también es gracias a ustedes*

*A mi amiga y madrina Neilys, gracias pues has sido sencillamente
especial, no existen palabras para describir tu ayuda*

*A mi novia Yailín, gracias mi amor por estar a mi lado, ser tú y
permitirme ser yo, gracias por tu amor y por soportar a este regalo*

A mis suegros Alina y Moisés que han sido una familia para mí

*A mis tutores Leyanis y William, su forma de ser y sus conocimientos
hicieron posible esta tesis, no pude tener mejores tutores*

*A todos mis profesores, gracias por toda la enseñanza en estos cinco
años*

*A Irania, Margarita, Claudia Niebla por acogerme en Santa Clara y
ayudarme cada vez que lo necesité*

*A Liván, Julián, Arnaldo, Yoanet, Yamila, Yani.....y todos mis
compañeros de aula, gracias por contar con ustedes los cinco años,
sepan que pueden contar conmigo la vida entera*

A todo el que de una forma u otra tuvo que ver con este título

GRACIAS.



Dedicatoria

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hijo Fabián, a mi abuelita Hortensia, mi tía Marisol, mis primos Rachel y Félix Daniel, son ustedes el motivo por el cual late mi corazón y la inspiración para que Javier Medina Macola no se rinda nunca.



Resumen

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue la producción de jarabes dextrinizados mediante hidrólisis enzimática, aplicando la enzima α -amilasa sobre soluciones de almidón de sorgo con densidades de 12 y 15°Be. La variable respuesta fue el equivalente de dextrosa en cada jarabe obtenido (ED) utilizando el método de Eynon-Lane modificado. Se utilizó un diseño factorial completo para la organización de los experimentos. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico STATGRAPHICS. Centurion. XV, versión 15.2.14. Los productos obtenidos fueron jarabes dextrinizados con un equivalente dextrosa entre 13.97 y 29.61 % luego de la licuefacción, (valores que se encuentran dentro de los establecidos para estos tipos de jarabes), los que pueden ser utilizados por sus propiedades funcionales como jarabes intermedios o como materia prima para diferentes procesos de la industria agroalimentaria. Lo anterior permite establecer una pauta para el aprovechamiento del sorgo como materia prima no convencional en la obtención de productos a partir del almidón.

Palabras clave: Almidón, Equivalente Dextrosa, Enzimas, Hidrólisis.



Summary

ABSTRACT

The main objective of this work was the production of dextrinized syrups by enzymatic hydrolysis, using the α -amylase enzyme on sorghum starch solutions with densities of 12 and 15 °Be. The response variable was the dextrose equivalent in each syrup obtained (ED) using the Eynon-Lane method modified. A full factorial design for the organization of the experiments was used. Data were analyzed with statistical package STATGRAPHICS. Centurion. XV, version 2.15.14. The products obtained were syrups with dextrose equivalent dextrinized between 13.97 and 29.61% after liquefaction, (values that are in the ranges established for such syrups), which can be used for their functional properties as intermediates or as syrups raw material for various processes in the food industry. This allows you to set a pattern for the use of sorghum as feedstock in unconventional obtaining products from starch.

Keywords: Starch, Dextrose Equivalent, Enzymes, Hydrolysis.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

<i>Introducción</i>	1
<i>Capítulo 1: Revisión bibliográfica</i>	5
1.1 El sorgo.	5
1.2 El Almidón	6
1.2.1 Estructura y composición.	7
1.2.2 Uso de los almidones.	9
1.2.3 Fuentes convencionales de almidón.	10
1.2.4 Fuentes no convencionales de almidón.	11
1.3 Jarabes producidos a partir de almidón	12
1.3.1 Procedimientos clásicos y tendencias actuales para la obtención de jarabes a partir de Almidón. ...	14
1.3.1.1 Hidrólisis ácida del almidón.....	14
1.3.1.2 Hidrolisis enzimática del almidón.	14
1.3.1.3 Tendencias actuales.	15
1.4 Método de obtención de jarabes dextrinizados.	17
1.4.1 La dextrina.	17
1.4.1.1 Otros tipos de dextrina.	18
1.4.1.2 Usos y aplicaciones de las dextrinas.	19
1.5 Escalado.	19
1.5.1 Principios del escalado.	21
1.5.1.1 Principios de similitud.	23
<i>Capítulo 2: Materiales y métodos</i>	27
2.1 Caracterización de la UEB Glucosa Cienfuegos	27
2.2 Materiales, Equipos y Reactivos	29
2.3 Descripción del proceso.	29
2.4 Materia prima empleada en la obtención del jarabe dextrinizado	30
2.5 Estudio de la hidrólisis enzimática del almidón del sorgo	30
2.5.1 Diseño Experimental.....	30
2.5.2 Desarrollo experimental de la hidrólisis enzimática del almidón del sorgo.....	31

2.6 Determinaciones realizadas.	32
2.6.1 Determinación de pH	32
2.6.2 Determinación del Brix. (Método refractométrico)	32
2.6.3 Determinación del equivalente de dextrosa (ED)	33
2.7 Metodología para el escalado de la hidrólisis enzimática del almidón.	36
2.7.1 Parámetros más usados para el escalado de sistemas de mezclado.	37
2.7.2 Escalado del reactor tipo tanque agitado.	38
Capítulo 3: Análisis de los resultados	40
3.1 Caracterización de la Materia Prima (Almidón de sorgo)	40
3.2 Análisis de los resultados experimentales	42
3.2 Diseño y escalado de equipos	46
3.2.1.1 Selección del tipo de reactor.	47
3.2.1.2 Selección del medio de suministro de calor.	48
3.2.1.3 Selección del tipo de agitador	49
3.3 Escalado del reactor tipo tanque agitado.	50
3.3.1 Metodología de escalado.	51
3.3.1.1 Criterio P/V constante.	52
3.3.1.2. Criterio $N \cdot D_i$ constante.	53
3.3.1.3 Consecuencias del criterio sobre P/V.	53
3.3.2 Resultados del escalado y análisis de las consecuencias sobre el prototipo.	54
3.4 Dimensionamiento de la chaqueta del reactor prototipo.	54
Conclusiones	59
Recomendaciones	61
Bibliografía	63
Anexos.	71

The background of the page is a light gray gradient. It features several glowing blue lines that curve and intersect across the middle section. A faint, larger circular pattern is visible in the upper right quadrant. The overall aesthetic is clean and modern.

Introducción

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La industria de alimentos representa un sector económico importante a nivel mundial. Dentro de los insumos relacionados con dicha industria se encuentran los edulcorantes que son utilizados como aditivos para la preparación de formulaciones alimenticias. En el proceso de obtención de los mismos, en primer lugar se acondiciona el almidón, para ser hidrolizado por vía ácida o enzimática, obteniéndose un jarabe dextrinizado que constituye la base para la producción industrial de los demás jarabes es decir maltosados, glucosados y fructosados.

El almidón es un polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, constituido por amilosa y amilopectina. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del mismo constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual y tiene múltiples aplicaciones en los alimentos, que incluyen espesantes, estabilizadores, adhesivos, gelificantes, etc.,(Bustos Vázquez, Gómez Aldapa, Tellez Luis, Jonguitd Pratt, Trejo Ramírez, Ochoa Martínez, Castro Rosas., 2010).

El maíz se ha considerado tradicionalmente como una de las fuentes principales de su obtención, por su bajo costo de producción y alto rendimiento; aunque también se puede extraer de otros cereales ya sea por molienda seca o molienda húmeda. Desde los años 50 el sorgo se ha visto como una alternativa para substituir al maíz en la producción de almidón ya que ambos tienen propiedades viscoamilográficas casi idénticas, además de que el sorgo presenta grandes ventajas agronómicas con respecto al maíz pues es más resistente a la sequía y a las altas temperaturas, además de que constituye un cultivo de rotación por su aporte al suelo de niveles significativos de materia orgánica reduciendo así el uso de fertilizantes nitrogenados.

Sin embargo las propuestas tecnológicas utilizadas en el país no contemplan su utilización en la producción de almidón, el cual es susceptible de ser convertido mediante hidrólisis enzimática en jarabes dextrinizados altamente demandados tanto en la industria alimenticia como en la farmacéutica, por lo que se plantea el siguiente problema a resolver por este trabajo:

Problema de Investigación

En la Empresa Glucosa de Cienfuegos no se ha contemplado la obtención de jarabes dextrinizados como base del resto de los jarabes a partir de almidón de amplio uso en la Industria Alimenticia y menos con el uso de una materia prima de producción nacional como el sorgo, siendo hoy el maíz una materia prima muy inestable que no cubre las necesidades de producción anual de la planta.

Objetivo General

- Proponer una tecnología de producción de jarabes dextrinizados a partir de almidón de sorgo, mediante la determinación de los parámetros que influyen en su obtención a nivel de laboratorio.

Objetivos específicos

- Establecer los aspectos generales de la obtención de edulcorantes a partir de almidón a través de la búsqueda bibliográfica de la temática en estudio.
- Determinar el proceso de obtención de jarabes dextrinizados que se adecua más a las condiciones actuales de la empresa.
- Determinar los parámetros de trabajo a nivel de laboratorio que permiten obtener concentraciones de dextrosa características para este tipo de jarabes.
- Proponer la tecnología de obtención de jarabes dextrinizados a partir del diseño y escalado de las etapas estudiadas a nivel de laboratorio.

Hipótesis de la Investigación

Es posible la obtención de jarabes dextrinizados a partir del almidón de sorgo, si se ajustan los parámetros de obtención de los mismos mediante el estudio de las etapas fundamentales del proceso.

Beneficios esperados

Esperamos obtener jarabes dextrinizados a partir de la hidrolisis enzimática del almidón de sorgo con un equivalente de dextrosa (ED) entre 15 y 25 %, siguiendo el diseño de experimento que proponemos usando técnicas obtenidas en la bibliografía estudiada y obtener a partir de métodos de escalado una tecnología adecuada para la producción de estos jarabes a escala piloto.



Capitule 1

CAPITULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 El sorgo.

El sorgo (*Sorghum* spp) es un género de unas 20 especies de gramíneas oriundas de las regiones tropicales y subtropicales de África oriental. Se cultivan en su zona de origen, Europa, América y Asia como cereal para consumo humano, animal, en la producción de forrajes y para la elaboración de bebidas alcohólicas y escobas. Su resistencia a la sequía y al calor lo hace un cultivo importante en regiones áridas, y es uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo.

El sorgo tiene una fisiología vegetal (metabolismo de las "C-4") similar a la del maíz, aunque con un sistema radicular más extenso y ramificado, de características fibrosas y hasta 12 dm de profundidad. El tallo es cilíndrico, de 1 a 3 m de altura, con una inflorescencia terminal en forma de espiga compuesta por flores bisexuales. Contiene además una cariósida de alrededor de 4 mm de diámetro y una altura total de la planta de alrededor de 1 a 2 m, de las que se obtienen semillas de aproximadamente 3 mm, esféricas y oblongas, de color negro, rojizo, amarillento y blanco (Watson L, Dallwitz MJ., 2008).

Este cereal es también uno de los recomendados para el uso en pacientes con enfermedad celiaca ya que es reportado en la literatura como free gluten. Además de poseer propiedades antidiarreicas, astringentes y homeostáticas por la presencia de metabolitos que le confieren esas propiedades (Clayton, W.D., Harman, K.T. and Williamson, H., 2006).

Desde un punto de vista industrial, estas plantas presentan características interesantes tanto para la obtención de alcohol que se produce por fermentación de su azúcar como para la producción de edulcorantes alimenticios (sirope de Maíz y Sorgo).

El almidón es el principal carbohidrato y componente del sorgo, constituye aproximadamente el 79 % del peso del grano seco. Presenta gránulos esféricos de tamaño que oscila entre 5 a 20 μm de diámetro. Está compuesto de 70-80 % de amilopectina y 20-30 % de amilosa, siendo influenciada esta relación por factores ambientales y

genéticos (Bustos Vázquez, Gómez Aldapa, Tellez Luis, Jonguitd Pratt, Trejo Ramírez, Ochoa Martínez, Castro Rosas., 2010).

La ventaja de utilizar sorgo es que es una materia prima más barata y de alta disponibilidad en el país. La conversión de sorgo a almidón y jarabes podría ahorrar maíz, que es más esencial en la nutrición directa. Sin embargo, los almidones de los sorgos, especialmente los regulares y heterocerosos, mostraron menor susceptibilidad al ataque enzimático, por lo que se sugiere ajustar o incrementar la concentración de enzimas si se desea llegar a tener la misma eficiencia de producción de jarabe observada con el almidón de maíz (Sergio O. Serna Saldívar, 2013).

Desde los años 50 el sorgo se ha visto como una alternativa para substituir al maíz en la producción de almidón. Sin embargo, el grano de sorgo presenta varias desventajas, como son la presencia de endospermo periférico que actúa como una barrera contra la penetración de la solución de remojo, una matriz proteica más dura y entrecruzada que rodea los gránulos de almidón y la contaminación del almidón con pigmentos fenólicos presentes en el pericarpio, testa y tejido de la aleurona. Varios investigadores han encontrado que el sorgo rinde aproximadamente 10% menos almidón que el maíz suave dentado y han demostrado que con el uso de enzimas proteolíticas y degradadoras de fibra se puede bajar significativamente el requerimiento de remojo en SO₂ (dióxido de azufre) sin sacrificar rendimientos de almidón. Una vez refinado el almidón de sorgo se puede usar intercambiamente con el de maíz porque ambos tienen propiedades viscoamilográficas casi idénticas. (Sergio O. Serna Saldívar, 2013).

1.2 El Almidón

El almidón es un polisacárido que se encuentra como fuente de reserva energética en frutos, semillas de leguminosas, cereales, tubérculos, entre otros y está constituido por amilosa y amilopectina. La cantidad de almidón presente en estas fuentes difiere. En el caso de las frutas verdes o inmaduras (plátano o mango) puede representar del 40-70 %, en las leguminosas (frijol, chícharo, haba) del 25-50 % y en tubérculos (papa o yuca, por ejemplo) del 60-90 % de su peso seco (Lajolo Franco, M., 2006). Proporciona el 70-80 % de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Tanto el almidón como los

productos de su hidrólisis constituyen la mayor parte de los carbohidratos digestibles de la dieta habitual (Bustos Vázquez, Gómez Aldapa, Tellez Luis, Jonguitd Pratt, Trejo Ramírez, Ochoa Martínez, Castro Rosas., 2010).

1.2.1 Estructura y composición.

Morfológicamente el almidón se encuentra en agregados esféricos, ovoides, irregulares o poligonales, a los cuales se les denomina gránulos y cuyo tamaño va de los 0,5 a 100 μm (Tabla 1). Tanto la forma como el tamaño de los gránulos de almidón dependerán de la fuente de donde se obtiene.

Tabla 1.1: Contenido, tamaño y forma del almidón de diferentes (Lajolo Franco, M., 2006).

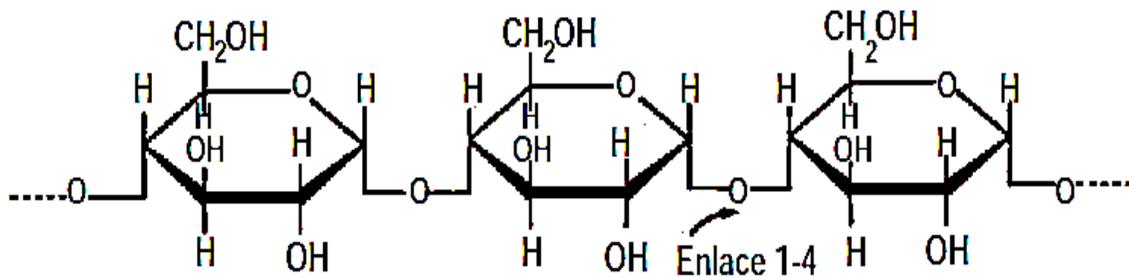
Fuente	Almidón (% base seca)	Tamaño (μm)	Forma
Amaranto	65,2	1 - 3	Esférico poligonal
Plátano	44 - 77,5	10 - 40	Elipsoidal
Mango	21 - 60	8 - 20	Elipsoidal
Avena	41,5 - 43,3	19 - 24	Poligonal irregular
Papa	65 - 85	15 - 100	Elipsoidal
Cebada	65	2 - 25	Esférico ovalado
Sorgo	65	20 - 40	Ovalado
Arroz	64,6 - 88	3 - 8	Poliédrico poligonal

El almidón está constituido principalmente de dos polisacáridos que son la amilosa y la amilopectina, encontrándose también en menor cantidad contaminantes como proteínas,

lípidos y minerales. La proporción en la que se encuentra cada uno de los polisacáridos mencionados se rige por la genética de la fuente utilizada para su extracción, lo cual influye en sus propiedades funcionales (Badui-Dergal, S., 2006).

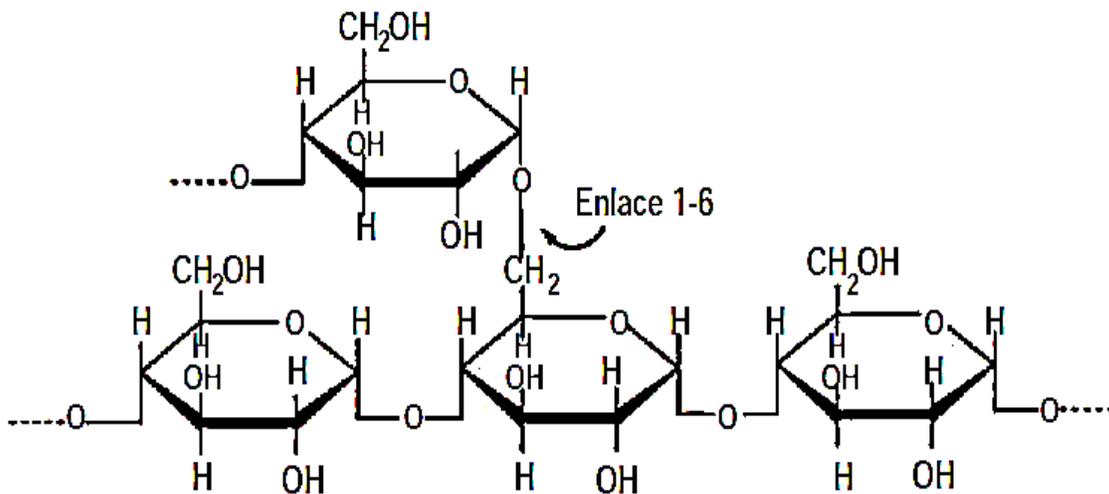
La amilosa es una α -D-(1,4)-glucana constituida de 200 hasta 2,500 unidades repetitivas de α -maltosa, que forman cadenas lineales (Figura 1.1). Este polisacárido puede adquirir una conformación tridimensional helicoidal, en donde cada vuelta consta de seis moléculas de glucosa (Badui-Dergal, S., 2006).

Figura 1.1: Estructura química de la amilosa.



En lo referente a la amilopectina, ésta presenta ramificaciones con enlaces α -D-(1,6) localizadas cada 15 - 25 unidades de glucosa (Figura 1.2). Las cadenas formadas pueden contar de 10,000 a 20,000 unidades, es decir, son significativamente más grandes en comparación con las de amilosa (Badui-Dergal, S., 2006).

Figura 1.2: Estructura química de la amilopectina.



1.2.2 Uso de los almidones.

En las últimas décadas el almidón ha sido utilizado para cuatro propósitos generales:

1. Alimentación humana: el almidón puede hidrolizarse a glucosa aportando en la dieta 4 calorías/g. Las fuentes más utilizadas para este fin son el maíz que constituye aproximadamente el 83 % de la producción mundial de almidón, seguido del trigo con un 7 %, papa con el 6 % y tapioca con el 4 % (Fleche, G., 1985).

2. Alimentación animal: los almidones se han utilizado como alternativa para satisfacer los niveles de carbohidratos no estructurales y los requerimientos energéticos en la alimentación de ganado. La mayoría de los suplementos y los concentrados para rumiantes están formulados con almidones de rápida degradación (Fernando Martínez Bustos, 2009).

3. Aplicaciones industriales no alimentarias: cerca del 80 % del almidón suministrado a la industria es usado como pegamento en la fabricación de papel y cartón para unir los componentes que forman la fibra celulósica, el papel y rellenos, evitando de este modo el desprendimiento superficial de las fibras, mejorando la resistencia contra la humedad y brindando así una textura lisa. En la industria textil se emplea para aumentar el brillo y peso de la tela, así como para mejorar la textura y la calidad del estampado, además de restaurar la apariencia y cuerpo de las prendas de vestir cuando son almidonadas. En la industria farmacéutica se usa como agente ligante del ingrediente activo en tabletas. Para la industria cosmética se emplea en la elaboración de polvos faciales, como mejorador de viscosidad y vehículo para sustancias semilíquidas como cremas (Richard. R. Hahn, 1970).

4. Aditivo alimenticio: el almidón es utilizado para impartir diversas características funcionales y tecnológicas a los alimentos procesados (Tabla 1.2), por ejemplo, como espesante para incrementar la viscosidad de los productos, emulsificante para formar o mantener una emulsión (mezcla de líquidos inmiscibles) uniforme en el producto, para absorber humedad y evitar el apelmazamiento, como aglutinante para la adhesión de los componentes, como estabilizante para mantener una dispersión uniforme de dos o más

sustancias, edulcorante proporcionando un sabor dulce a los productos y finalmente, para conferir textura a los alimentos procesados (Richard. R. Hahn, 1970).

Tabla 1.2: Usos del almidón en la industria alimentaria. (Cruz, A. E., 2010).

Uso	Ejemplo
Espesante	Aderezos
Emulsificante	Margarina
Agente protector contra la humedad	Caramelos
Aglutinante	Harinas
Estabilizador	Sopas
Edulcorante	Caramelos
Agente espolvoreante	Gomas dulces

Debido a la importancia que tiene el uso del almidón en la industria alimentaria, papelera, textil, farmacéutica y cosmética, entre otras; durante los últimos cincuenta años, los avances en tecnología enfocada a los almidones han sido enormes. Esto se ha reflejado en los procesos de separación, extracción y producción de almidón, por ejemplo, se han desarrollado equipos que requieren un mínimo en el consumo de energía y de agua, así como una reducción en las cargas de efluentes. También se ha logrado un aumento en el rendimiento final de los almidones.

1.2.3 Fuentes convencionales de almidón.

Se les llama fuentes convencionales de almidón a los cultivos de los que comúnmente se obtiene dicho producto; entre los más importantes podemos encontrar maíz, trigo, arroz y papa; cuyas ventajas tecnológicas se resumen en la Tabla 1.3.

Las fuentes convencionales tienen la desventaja de ser utilizadas directamente como alimentos, por lo que su precio de venta es mayor y su disponibilidad está en riesgo. Tal es el caso del maíz, cuyo consumo para la producción de etanol ha reducido la cantidad

disponible del cultivo para la alimentación e incrementado su precio en el mercado (Knowles, 2012).

En nuestro país el maíz, es un cereal importado por lo que genera una dependencia del mercado internacional y por ende de la fluctuación en el precio del mismo.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta son las características físico-químicas y funcionales del almidón las cuales van a depender de la fuente de donde sea obtenido éste. Por lo que el sector industrial busca fuentes potenciales de almidón que ofrezcan mayores beneficios.

Tabla 1.3: Fuentes de almidón convencionales y sus ventajas tecnológicas. (Cruz, A. E., 2010) (Bello-Pérez L. A, González-Soto R. A. y Vargas-Torres, F., 2006).

Fuente	País/Continentes	Ventajas
Maíz	América África Europa	Formación de geles claros y cohesivos. Posee una gran blancura
Papa	Noreste de Europa Países Bajos	Alta capacidad de gelificación Viscosidad decreciente con agitación y calentamiento constante Excelente formación de película flexible y fuerza de adhesión
Arroz	China India	Formación de geles opacos Bajo contenido de amilosa
Trigo	Estados Unidos Canadá Australia	Alto contenido de lípidos y glucosaminoglicanos

1.2.4 Fuentes no convencionales de almidón.

En los últimos años se han llevado a cabo diferentes estudios utilizando fuentes poco comunes de almidón, entre ellos podemos encontrar la extracción así como la caracterización físico-química y funcional de almidones de makal (*Xanthosomayucatanensis*), camote (*Ipomea batata*), yuca (*ManihotesculentaCrantz*) y el sagú (*Maranthaarundinacea*), cultivadas en el estado de Yucatán, México. También se

reportó el análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame (*Dioscoreaalata*) y yuca (*Manihotesculenta*) cultivados en Colombia (Hernández-Medina et al., 2008). También se ha obtenido almidón a partir del banano verde (*Musa Sapiantum* variedad *Cavendish*) según lo reportado por (Cruz, A. E., 2010). Por último, (Bello-Pérez L. A, González-Soto R. A. y Vargas-Torres, F., 2006) obtuvieron harina y almidón a partir de ñampí (*Colocasia esculenta*) cultivada en Costa Rica.

1.3 Jarabes producidos a partir de almidón.

Mediante la hidrólisis ácida, enzimática o una combinación de ésta, el almidón puede reducirse total o parcialmente a su monómero. En el ámbito industrial se pueden obtener dos tipos distintos de productos: los cristalizables y los no cristalizables. En el primer grupo se encuentran los productos con muy alto grado de hidrólisis del almidón, es decir, glucosa, oligosacáridos con bajo peso molecular, dextrosas cristalizadas, productos de alto grado de división de la amilosa y la amilopectina. En el segundo grupo están los productos de la hidrólisis intermedia del almidón, como son los jarabes y maltodextrinas, estos productos no son cristalizables generalmente contienen dextrosa, maltosa y oligosacáridos. (Wiley-Blackwell, 2011)

La ventaja de los jarabes es su alta versatilidad: dextrinizados, maltosados, glucosados, fructosados y más nichos de mercado ya que están compitiendo fuertemente con el azúcar de caña.

En el proceso de obtención de jarabes, en primer lugar se acondiciona el almidón, utilizándose una lechada del mismo, la cual se le trata con ácido o bien con una enzima llamada alfa amilasa, el proceso se llama licuefacción donde se obtiene una rápida disminución de la viscosidad en virtud de una hidrólisis parcial. En esta etapa se produce un jarabe dextrinizado con un grado ED entre (15 - 25) %, este tipo de jarabes no cristalizan y se emplean como agentes espesantes y estabilizadores en un gran número de alimentos. Son la base para la producción industrial de todos los otros jarabes.

Uno de los métodos para la degradación de almidón a dextrinas puede ser mediante la enzima α amilasa, endoenzima que hidroliza enlaces glucosídicos α 1-4 al azar,

conociéndose por esta razón como enzima tijera y que generalmente muestra una efectividad óptima de trabajo en un rango de pH que puede variar entre 5,5 - 7,10 (Sergio O. Serna Saldívar, 2013).

A partir de las dextrinas de la etapa anterior se completa la hidrólisis total del almidón a glucosa, para obtener otros jarabes. En la digestibilidad de almidones como materia prima, muchos factores como el tamaño de partícula, relación de amilosa - amilopectina, extensión de la asociación molecular entre los componentes del almidón, grado de cristalinidad, longitud de la cadena de amilosa y presencia de complejos lípidos - amilosa, juegan un papel importante en la degradación hidrolítica.

Se le llama jarabes glucosados a hidrolizados a partir de un ED de 20 (aunque éstos tengan muy bajos contenidos de glucosa). A menudo se incurre en el error de pensar que dicho jarabe contiene 20 % de glucosa, pero de acuerdo con la definición, debe entenderse como un jarabe que presenta un poder reductor similar al de una solución con 20% de glucosa.

Desarrollos biotecnológicos, específicamente en el área de la tecnología enzimática, han hecho posible la producción a gran escala de jarabes maltosados, que empiezan a ganar terreno en la industria alimentaria (Dr. Enrique Durán Páramo., 2007).

Los jarabes de maltosa son producto de la hidrólisis ácido-enzimática o enzimática-enzimática del almidón. Para numerosas aplicaciones es deseable una mayor proporción de maltosa, según la composición de los azúcares que conforman principalmente a los jarabes de maltosa.

Los jarabes de alta maltosa tienen baja higroscopicidad y presentan cierta resistencia a la cristalización, además debido a su bajo contenido de glucosa no tiende a oscurecerse lo cual es muy ventajoso en la manufactura de caramelos duros. Los jarabes de alta conversión tienen alto contenido de azúcares fermentables. Tienen gran poder edulcorante y además conceden propiedades de textura y consistencia que suelen ser muy aprovechables. Por su parte los jarabes de altísimo contenido de maltosa son productos intermedios en lo que respecta a la síntesis de maltitol, el cual es producido por hidrogenación a partir de la maltosa cristalizada. En general los jarabes maltosados son

utilizados en la industria cervecera, confitería y en la elaboración de panes y enlatados. Estos jarabes también pueden ser usados como estabilizadores y además en la formulación de alimentos congelados, donde controlan la formación de hielo.

Si se desea obtener un jarabe más dulce, se puede realizar una isomerización del jarabe de glucosa a jarabe de fructosa mediante la enzima glucosa isomerasa. Los jarabes de fructosa son más dulces en comparación con los jarabes de glucosa. Ya que la glucosa tiene un dulzor relativo a sacarosa de 70 %, mientras que el dulzor de la fructosa es de 180 %, es decir la fructosa es 1,8 veces más dulce que la sacarosa (Montilla, 2008).

1.3.1 Procedimientos clásicos y tendencias actuales para la obtención de jarabes a partir de Almidón.

1.3.1.1 Hidrólisis ácida del almidón

Cuando una suspensión de almidón en agua se calienta con ácido a una temperatura superior a la requerida para la gelatinización, tiene lugar una hidrólisis rápida con la ruptura al azar de los enlaces α -1,4 y α -1,6. En este proceso ocurren numerosas reacciones anexas a la hidrólisis de los enlaces del almidón para niveles mayores a 55 % equivalentes a dextrosa (ED). Una de esas reacciones es la descomposición del hidroximetilfurfural en ácido levulínico y ácido fórmico, sin embargo este compuesto puede también polimerizarse en compuestos que se cree que intervienen en la formación de color. Por otro lado la naturaleza al azar de la hidrólisis ácida limita su utilidad como un medio de obtención de cualquier producto de baja conversión o de un material apropiado para futuras conversiones. Para valores de ED menores a 30 %, no pueden ser fraccionadas lo suficiente para evitar la retrogradación (Montilla, 2008).

1.3.1.2 Hidrolisis enzimática del almidón.

La hidrolisis enzimática del almidón o conversión a jarabe glucosado generalmente está representado en 2 etapas: licuefacción y sacarificación. La licuefacción se presenta cuando se emplea la enzima α -amilasa, cortando las cadenas de los polímeros amilosa y amilopectina en cadenas de tamaño regular, dando como resultado dextrinas, maltosa,

maltotriosa y maltopentosa. Para la producción de glucosa, se requiere de una segunda etapa consecutiva a la licuefacción denominada sacarificación, adicionando la enzima amiloglucosidasa (AMG) dando como principal producto la glucosa (Cruz, A. E., 2010).

1.3.1.3 Tendencias actuales.

Las enzimas son catalizadores biológicos (proteínas), entre sus características se encuentra la capacidad de acelerar ciertas reacciones químicas. Su importancia ha ido en aumento en los últimos años, ya que están presentes en procesos industriales destinados a la producción de fármacos, aditivos, detergentes, bebidas, por mencionar algunos casos. Recientemente se emplean en industrias tales como la cervecera, alimenticia, farmacéutica entre otras (Dr. Enrique Durán Páramo., 2007), garantizando una mayor aceptabilidad de los productos que cuando se utiliza ácido en su elaboración.

Existe un gran número de enzimas comerciales entre las cuales se encuentran las siguientes:

Alfa amilasa

El proceso de conversión de almidón a dextrinas con esta enzima se le conoce como licuefacción (reducción en viscosidad). Produce jarabes con 15-25 % ED. La mayoría de las enzimas α -amilasa trabajan óptimamente a pH de 5,5 -7. Las α -amilasas usadas hoy en día son termoestables (trabajan de 85 a 95° C aunque resisten temperaturas de 130° C. (Sergio O. Serna Saldívar, 2013). La α -amilasa, también conocida como α -1,4 glucanohidrolasa; es una glucanasa endoactiva que cataliza la hidrólisis al azar de los enlaces α -(1,4) glicosídicos de la región central de las cadenas de amilosa y amilopectina excepto en las proximidades de los puntos de ramificación. Está reportado que la velocidad de hidrólisis es más lenta en los enlaces cercanos a los puntos de ramificación (Van Der Maarel, Marc J.E.C, 2012). La hidrólisis de la amilopectina por esta enzima produce glucosa, maltosa y una serie de dextrinas que contienen enlaces ramificados conformados por 4 o más residuos de moléculas de glucosa que presentan enlaces α -1,6 provenientes de las uniones glucosídicas de la estructura original. Los productos

obtenidos en mayor concentración son maltosa, maltotriosa y maltopentosa, hidrolizando completamente la maltohexosa (Cheetham P, 2013).

Amiloglucosidasa

Clasificada como una exoenzima denominada industrialmente como enzima sacarificante. La amiloglucosidasa hidroliza tanto a los enlaces α 1-4 y α 1-6. Por lo tanto convierte las dextrinas prácticamente a 100% glucosa o dextrosa. Trabaja óptimamente a valores de pH entre 4 y 4,5 y una temperatura de 55 - 60° C. Típicamente las amiloglucosidas son producidas de cepas genéticamente modificadas de *Aspergillus*.

Beta-amilasa

La β -amilasa es clasificada como una exoenzima. Ataca preferentemente a dextrinas por el lado no reductor liberando principalmente moléculas de maltosa. Por esta razón a esta enzima se le conoce como complementaria de la alfa amilasa. La β -amilasa acciona cuando se encuentra con un enlace glucosídico α 1-6. La mayoría de las β -amilasas trabajan óptimamente a valores de pH entre 5 y 5,5 y a temperaturas de 55 - 60° C.

Glucosa Isomerasa

Cataliza la conversión de glucosa a fructosa y por lo tanto son fundamentales para producir jarabes fructosados. Es producida intracelularmente por ciertas especies de microorganismos como los Actinoplanes y Streptomyces. La Glucosa Isomerasa es usada inmovilizada en celulosa DEAE o alúmina. Trabaja óptimamente a 60° C y a un rango de pH de 7,5 - 8,5. El magnesio es utilizado para atrapar al calcio residual que baja la actividad catalítica de la enzima. También el aire u oxígeno es removido para minimizar la pérdida de actividad enzimática.

Pululanasa

Su nombre deriva de enzima brincadora o desramificadora ya que hidroliza a los enlaces glicosídicos α 1-6. Son utilizadas para alcanzar mejores conversiones en producción de jarabes maltosados y glucosados. Hay pululanasa regulares y termoestables obtenidas de *Klebsiella aerogenes* *Bacillus acidopullulyticus* del hongo *Trichoderma*. Trabajan óptimamente a valores de pH y temperatura de 4 a 7,5 y 50 a 65° C, respectivamente.

1.4 Método de obtención de jarabes dextrinizados.

Técnicamente, los jarabes dextrinizados son productos de la degradación parcial del almidón, obtenidas por medio de temperatura y/o catalizadores, en un mecanismo de conversión que involucra procesos de ruptura hidrolítica, reorganización de moléculas y repolimerización. La dextrina tiene la misma fórmula empírica del almidón original $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde en el almidón el valor de n es completamente largo pero en las dextrinas decrece progresivamente con la degradación del almidón. La dextrina es considerada químicamente un polímero intermedio entre el almidón y la dextrosa, se presenta como un sólido amorfo color crema hasta marrón, soluble en agua fría e insoluble en alcohol (Aristizábal, J., F. Moreno. y G. Basto, 2011).

El origen del almidón es muy importante para la manufactura de dextrinas, ya que de esto depende su calidad y sus propiedades. El almidón de yuca ha sido reconocido como la materia prima más adecuada para la producción de dextrinas de alta calidad, seguido del almidón de maíz y el de sorgo. El proceso de producción de dextrinas es esencialmente el mismo para todos los almidones, pero la facilidad de conversión cambia con el tipo de almidón y su calidad. Cualquier almidón puede ser utilizado para la producción de dextrinas, sin embargo la conversión se favorece para variedades de alto contenido de amilopectina debido al alto número de cadenas ramificadas (Aristizábal, J., F. Moreno. y G. Basto, 2011).

1.4.1 La dextrina.

Las dextrinas son un grupo de oligosacáridos de poco peso molecular producidas por la hidrólisis del almidón. Tienen la misma fórmula general que los polisacáridos pero son de una longitud de cadena más corta. La producción industrial es realizada generalmente por la hidrólisis ácida del almidón. Las dextrinas son solubles en agua, sólidos de color blanco hasta levemente amarillo, ópticamente activos. Analíticamente, las dextrinas se pueden detectar con la solución de yodo, dando una coloración roja. (Swinkels. J.J.M, 2013).

1.4.1.1 Otros tipos de dextrina.

Maltodextrina

La maltodextrina es un almidón de cadena corta de azúcar, base de gelatina híbrido, que se utiliza como un aditivo alimentario. Se produce también por hidrólisis enzimática a partir de almidón gelatinizado y se encuentra por lo general en forma de polvo secado por pulverización higroscópica de color blanco cremoso. La maltodextrina es fácilmente digerible, que se absorbe tan rápidamente como la glucosa, y podría bien ser moderadamente dulce, teniendo un especial uso para la industria farmacéutica en la preparación de jarabes. La maltodextrina puede derivarse de cualquier almidón. En los EE.UU. este almidón es generalmente el maíz, en otras partes, por ejemplo en Europa, es comúnmente cebada o trigo, esto es importante para los que padecen de celiaquía, puesto que la maltodextrina derivada del trigo o cebada puede contener solo rastros del gluten, aunque según la European Food Safety Authority (EFSA), las maltodextrinas procedentes del trigo no son seguras para los celíacos, ya que ellos no pueden consumir absolutamente nada de TACC (Trigo, Avena, Cebada, Centeno)

Ciclodextrina

Las dextrinas cíclicas son conocidas como ciclodextrinas. Se forman por la degradación enzimática del almidón por ciertas bacterias, por ejemplo, *Bacillus macerans*. Las ciclodextrinas tienen estructuras toroidales formadas por residuos de glucosa.

- Amilodextrina es una dextrina lineal o amilosa de cadena corta que puede ser producida por hidrólisis enzimática de los alfa-1,6 enlaces glucosídicos o desramificante amilopectina. La Amilodextrina colorea azul con yodo.
- Límite de dextrina es el polímero restante producida por hidrólisis enzimática de amilopectina con la beta amilasa, que no se puede hidrolizar la alfa-1, 6 carbonos en los puntos de ramificación.
- Límite de dextrina es un corto de amilopectina ramificada encadenado siendo producido por hidrólisis de amilopectina con alfa amilasa.

- Dextrina cíclica altamente ramificada es una dextrina producida a partir de la rotura enzimática de la amilopectina en racimos y utilizando la enzima de ramificación para formar grandes cadenas cíclicas (Kennedy, H.M. y A.C. Fischer Jr., 2010).

1.4.1.2 Usos y aplicaciones de las dextrinas.

Las dextrinas se utilizan como pegamentos solubles en agua, como agentes de espesamiento en la transformación de los alimentos y como agentes aglutinantes en productos farmacéuticos. También se usan comúnmente en la industria del papel, fabricación de corrugado como adhesivo, la industria textil y como un aditivo orgánico en las fundiciones de hierro, además, en la fabricación de colorantes, resinas, abrasivos especiales, tintas, acuarelas y productos exotérmicos.

En pirotecnia se agregan a las fórmulas de fuegos de colores, para que solidifiquen como gránulos o “estrellas.” Las ciclodextrinas encuentran uso adicional en química analítica como matriz para la separación de sustancias hidrofóbicas, y como excipientes en formulaciones farmacéuticas. No todas las formas de dextrina son digeribles, y la dextrina indigerible se utiliza a veces en suplementos de fibra dietética. (Sergio O. Serna Saldívar, 2013).

1.5 Escalado.

Casi todos los datos y experiencias obtenidas durante el desarrollo de procesos en Ingeniería Química son recogidos a partir del trabajo en escalas pequeñas. Esta información puede ser utilizada para el diseño de plantas a gran escala con la debida modificación de los datos a partir de los cálculos (ecuaciones, relaciones), puesto que los equipos cambian su forma y geometría de la escala pequeña a la escala grande. Esta modificación en la terminología científica se conoce como escalado. (Himmelblau, David M, 1976).

Así pues, Viera (Viera Bertrán, Rene, Santiago Soler Pérez, 1991) plantea, que el escalado es el método de diseño más antiguo que existe y corrobora que este consiste en el desarrollo de una secuencia de trabajos experimentales en los que el sistema

reaccionante se somete a estudios en aparatos de dimensiones cada vez mayores, cuando en dos etapas sucesivas se reproducen resultados satisfactorios, se considera que se puede proceder al diseño del reactor a escala industrial sin mayores riesgos, siempre que el cambio de escala se encuentre dentro de los límites tolerables.

El problema del escalado está, en encontrar precisamente el factor que involucra la razón de las dimensiones lineales del modelo y el prototipo. El uso de estas correlaciones ha demostrado que son aplicables solo para hacer el escalado superior pero no muy grande. (Ju, L. K., Chase, G. G, 1992).

La verdad sobre el escaldado es casi imposible encontrar, pues la verdadera similitud no existe; es necesario combinar diferentes técnicas que van desde el análisis matemático hasta la comparación de las correlaciones existentes de los resultados obtenidos del modo experimental cuando se realiza un intento de escalado. (Novack, Joseph; Lynn, Robert O.; Harrington, Edwing, 1962).

Para proceder al diseño por escalado, es de suma importancia que el cambio de escala sea el mayor posible, ya que el costo de los experimentos es directamente proporcional al tamaño de los aparatos. Sin embargo el factor de escala a utilizar depende en gran medida de la naturaleza del sistema reaccionante y del conocimiento que se tenga del mismo (Villanueva Ramos G., 2010). En realidad en el campo de los reactores químicos cualquier información basada solamente en el tipo de reactor debe tomarse con cierta cautela, así pues con las reservas señaladas, se puede considerar que los cambios de una instalación experimental a otra de cinco a diez veces mayor, se encuentra dentro de los límites utilizados en la práctica. (Viera Bertrán, Rene, Santiago Soler Pérez, 1991). Generalmente los procesos de escalado comprenden un estudio detallado de las variables de proceso en uno o más niveles de operación seguidos por la proyección de estos datos, o los resultados optimizados de estos datos, para los niveles de producción de esta planta. El efecto de escalado es estudiado frecuentemente sobre cada variable independiente de proceso para permitir una proyección razonable de los datos. El costo, el tiempo, la mano de obra requerida y el equipamiento usado, aumentan apreciablemente según:

a) se incrementa el tamaño de las operaciones desde el laboratorio hasta los niveles comerciales de operación

b) se incrementa el número de variables independientes y/o dependientes.

Las investigaciones más recientes han sido encaminadas a determinar la distribución del tiempo de residencia, los modelos de flujo y temperatura, así como los perfiles de velocidad y concentración en el equipo y su influencia sobre la velocidad del proceso.

1.5.1 Principios del escalado.

A continuación tomando en consideración lo reportado por (Cárdenas, 1996), se realiza un análisis de los principios fundamentales a tener en cuenta en el desarrollo del procedimiento a seguir para el escalado de tanques agitados que de acuerdo con Trambauze (Trambauze, Pierre, 1979) consta de los siguientes pasos:

➤ Definición del problema de mezclado

- Definir la clase de mezclado y determinar el resultado deseado
- Establecer los requerimientos del ciclo de mezclado
- Caracterizar todos los fluidos (componentes iniciales, intermedios y productos finales)

➤ Determinar una solución aproximada mediante:

- La identificación y determinación aproximada del tamaño del equipo comercial que debe ser usado.
- El scaling down o escalado inverso al equipo de tamaño piloto

➤ Realizar las pruebas mediante corridas de los experimentos evaluando los resultados. Repetir si es necesario.

➤ Definir los requerimientos de escalado de los equipos de mayor tamaño.

Los problemas del escalado más comunes en reacciones complejas en fase simple son:

- Cambios en la temperatura pueden afectar la selectividad y el rendimiento.

- Cambios en el coeficiente de transferencia de calor pueden afectar el perfil de temperatura y la degradación de los productos.
- Cambios en la relación área de transferencia de calor / volumen, alteran el potencial de eliminación del calor y puede traer como consecuencia situaciones de peligro.
- La ecuación general del escalado entre dos sistemas similarmente geométricos de diámetros D_1 y D_2 es:

$$R = D_2/D_1 = [(P/V)_2/(P/V)_1]^{1/(3m - 1)} = [N_2/N_1]^{1/(m - 1)} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

P/V: es la potencia por unidad de volumen y N: es la velocidad de agitación.

El coeficiente m ha sido extensamente estudiado llegando a una serie de recomendaciones de carácter general que a continuación se resumen según Tabla 1.4 (Trambauze, Pierre, 1979) en función de los resultados del proceso:

Tabla 1.4: Coeficiente m según el resultado del proceso

Resultados del proceso	Exponente m
Igual movimiento del fluido (mezclado)	0
Igual suspensión de sólidos (dilución de sólidos)	1/4
Igual transferencia de masa (dispersión)	1/3
Igual movimiento superficial (efecto superficial)	1/2
Igual tiempo de mezclado	1

1.5.1.1 Principios de similitud.

Walas (Walas, Stanley M, 1965) reporta que para desarrollar el escalado de equipos es necesario tener en cuenta principios de similitud. Así considera que en Ingeniería Química existen tres tipos fundamentales, estos son:

- Similitud mecánica
- Similitud térmica
- Similitud química

La última no es de gran importancia en los procesos de escalado.

La similitud mecánica requiere de similitud geométrica, cinemática y dinámica. En los trabajos de Ingeniería Química, los sistemas en los cuales hay similitud mecánica, están sujetos a formas, movimientos y fuerzas similares. La similitud térmica está definida para sistemas en los cuales existe un flujo de calor y una temperatura determinada.

La similitud geométrica requiere que los sistemas tengan la misma forma geométrica.

La similitud cinemática requiere que la velocidad de flujo de los fluidos en los dos sistemas tenga una razón constante y un punto correspondiente. La similitud dinámica requiere que las formas creadas o impuestas por el fluido al sistema tengan una razón constante, así como un punto correspondiente en el sistema.

En principio la similitud geométrica es fácil de ejecutar, simplemente porque se basa en un modelo al cual se le conoce su forma y geometría, parámetros que en el prototipo deben ser similares, especialmente si la razón de escalado es grande, es prácticamente imposible.

La similitud dinámica puede llevarse a cabo cuando los sistemas tienen similitud geométrica y cinemática, y cuando ciertas fuerzas son semejantes en ambos sistemas. En la Ingeniería Química las fuerzas que actúan sobre los fluidos y sus movimientos son de gran interés, debido a ello la similitud dinámica incluye fuerzas tales como: fuerzas viscosas y fuerzas de tensión superficial; y para equipos usados en transferencia de calor

incluye variables tales como: calor específico, temperatura y conductividad térmica. (Walas, Stanley M, 1965).

El principio incluye las relaciones entre sistemas de diferentes tamaños. Para el escalado de un reactor químico la similitud es representada por grupos adimensionales que caracterizan los fenómenos del proceso y permanecen constantes durante el escalado.

La similitud química conduce a varias conclusiones interesantes, según Walas (Walas, Stanley M, 1965), parece ser que para todos los tipos de reacciones las temperaturas o los perfiles de temperatura tiempo deben ser los mismos en las instalaciones grandes que en las pequeñas. En los sistemas homogéneos, los tiempos de reacción y las concentraciones iniciales deben ser los mismos; en los sistemas heterogéneos, el producto del tiempo de reacción por el área de interfase de la unidad de volumen del reactor ha de ser el mismo para ambas.

En general no puede alcanzarse simultáneamente la semejanza dinámica y la química; por ejemplo, si se conservan los tiempos de reacción no puede mantenerse el módulo de Reynold, que contiene la velocidad másica o la lineal.

El análisis dimensional de reactores químicos fue iniciado por Damköhler y continuado y ampliado después por otros investigadores. (Robert H. Perry, Don Green, 1984).

Sin embargo, si el proceso es complejo, es imposible mantener los valores numéricos de los grupos adimensionales constantes. Por lo tanto el mejor compromiso posible es adaptar por peso el efecto particular de cada grupo y realizar experimentos en modelos reales o en modelos de escala intermedia.

Walas (Walas, Stanley M, 1965) coincide con Perry (Robert H. Perry, Don Green, 1984) y señala, que los grupos adimensionales se derivan de las leyes de conservación de la masa y la energía del sistema en reacción química.

Así para el sistema de reacción homogénea se asume que el modelo y el prototipo se comparan por la siguiente relación:

$$R' = \lambda R$$

Ecuación 1.2

Donde λ es el factor de escala y R es el radio.

Se asume además que todas las propiedades físicas: capacidad calorífica (Cp), densidad (ρ), viscosidad (μ), etc., deben mantenerse iguales en ambos reactores.

Aplicando los grupos adimensionales a la ecuación anterior se obtienen las siguientes relaciones:

$$L' = \lambda L \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$T' = \lambda - 2/3T \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$\mu' = \lambda\mu \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$r' = \lambda - 2r \quad \text{Ecuación 1.6}$$

$$e - b/T' = \lambda - 2e - b/T \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde: L- longitud del reactor, T- temperatura, μ - viscosidad, r- velocidad de reacción

En estas ecuaciones (') se refiere al prototipo.

La ecuación [1.4] es importante cuando la transferencia de calor es significativa. La ecuación [1.7] fue obtenida a partir de la ecuación de Arrhenius y tanto la ecuación [1.5] como la ecuación [1.6] implican que en un reactor modelo, la velocidad de flujo y la de reacción deben ser mucho más altas que en el prototipo.



Capitolo 2

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización de la UEB Glucosa Cienfuegos

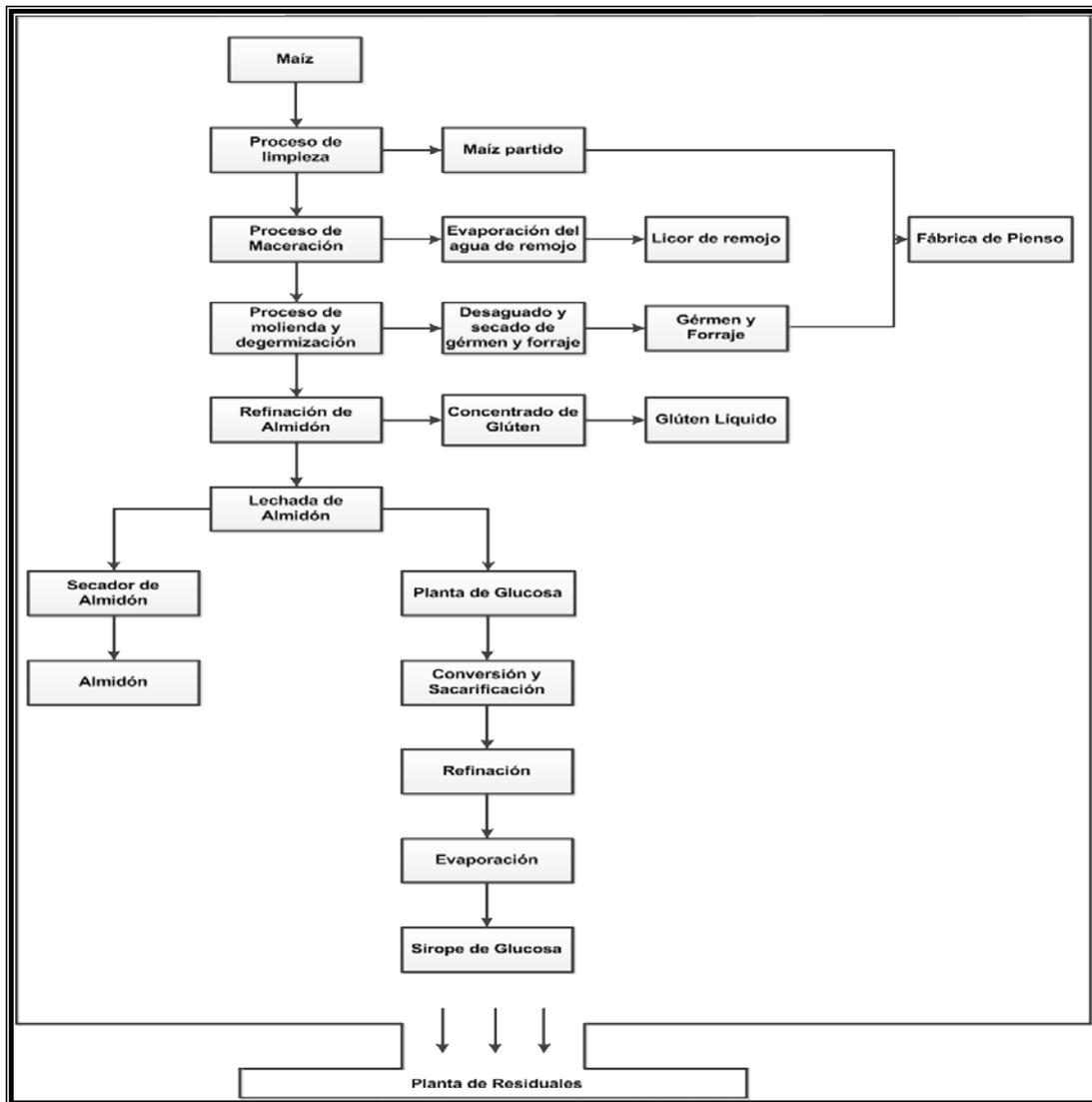
La UEB Glucosa Cienfuegos perteneciente a la empresa LABIOFAM Cienfuegos, es única de su tipo en el país y se encuentra localizada en la Zona Industrial # 2 del Reparto Pueblo Griffó, en la provincia de Cienfuegos, exactamente en la periferia noreste de la ciudad cabecera. Limita al norte con la Empresa DIVEP, al este con la Fábrica de hielo, Almacenes de Productos Frescos y con la Línea de Ron HRL, por el oeste con la Carpintería en Blanco y el Taller de Ómnibus Escolares y al sur con el asentamiento poblacional de Pueblo Griffó.

Esta UEB antiguamente Empresa de la industria alimenticia, se puso en marcha en 1981 luego de un periodo inversionista que duró 6 años, con una tecnología perteneciente al área capitalista, fundamentalmente a la firma Alfa – Laval de procedencia sueca y a la DDS Kroyer de Dinamarca. La misma se construyó con el objetivo de producir diariamente 90 toneladas de Sirope de Glucosa, 9 toneladas de Gluten, 7 toneladas de Germen, 19 toneladas de Agua de Remojo y 21,5 toneladas de Forraje. (ALFA-LAVAR, 1980). Estas producciones no se han podido alcanzar en los años que lleva de puesta en marcha, siendo la causa fundamental la falta de maíz, materia prima importada, desde Canadá, Argentina, África del Sur, Argelia y en los últimos años desde EEUU, falta de piezas de repuesto y de un mantenimiento adecuado por lo que actualmente después de más de 30 años de explotación cuenta con una capacidad instalada de un 50 % con respecto a la de diseño, produciendo diariamente 15 toneladas de Almidón de Maíz, los Siropes de Glucosa dependen de la producción a realizar, para la Glucosa Ácida 30 toneladas y Glucosa Enzimática 25 toneladas.

El proceso tecnológico de la UEB Glucosa Cienfuegos se encuentra dividido en tres plantas: la Planta de producción de almidón, la Planta de producción de sirope de glucosa y la Planta de mezclas secas. Además de contar con un sistema de facilidades auxiliares comunes a todas las plantas como son: el sistema de generación de vapor, que dispone de dos calderas de tubos de fuego con una capacidad de 8 y 12 toneladas de vapor por hora respectivamente. El abasto de agua potable se realiza mediante un complejo de cisternas

con una capacidad de almacenamiento de 4 500 m³ y un tanque elevado desde el cual por gravedad se abastece la industria. Así como una planta de tratamiento de residuales, donde se procesan los residuales líquidos generados en el proceso industrial más los albañales que desde su concepción inicial no responde a las características de la fábrica provocando esto que el resultado del tratamiento de los residuales líquidos sea ineficiente. En la Figura 2.1 se muestra el Proceso tecnológico de la Fábrica de Almidón y Glucosa.

Figura 2.1: Proceso tecnológico de la Fábrica de Almidón y Glucosa. UEB Glucosa Cienfuegos.



2.2 Materiales, Equipos y Reactivos.

Balanza digital, Vaceo, Alemania.

Baño de agua (BWS-17, SEIWA RIKO CO, LTD). Alemania.

Manta de calentamiento (J.P. selecta, SA, CE). Alemania.

Enzima BIALFA-T (FOOD GRADE THERMOSTABLE ALPHA AMYLASE). BIOCON, Española.SA.

Fehling I: Solución de sulfato de cobre: Se pesan exactamente 69,2800 g de sulfato de cobre pentahidratado y se trasvasan cuantitativamente a un matraz aforado de 1 litro, se enrasa con agua destilada.

Fehling II: Solución alcalina de tartrato de potasio y sodio: Se disuelven en agua 346 g de tartrato de potasio y sodio tetrahidratado y 100 g de hidróxido de sodio. Se trasvasan cuantitativamente a un matraz aforado de 1 litro y se enrasa.

Indicador Azul de Metileno: 2,5g de Azul de Metileno en 250 ml de H₂O destilada.

2.3 Descripción del proceso.

Se desarrolla el proceso de obtención de jarabes dextrinizados teniendo en cuenta las condiciones de operación de cada una de las variables que influyen en el mismo. Primeramente se le adiciona HCl (0,01N) a la suspensión de almidón preparada a 12 y 15° Be según diseño experimental, con el fin de ajustar el pH en un rango de 5,5 - 7 que es el rango óptimo al que trabajan las α -amilasa (Según se refiere en el epígrafe 1.3.1.3. del Capítulo 1). Se eleva la temperatura hasta alcanzar los 60° C en una Manta de calentamiento; se añade la enzima BIALFA-T dosificadas en 0,4 y 1 ml/L, con el fin de licuificar la suspensión. Posteriormente se pasa al baño de agua donde se eleva la temperatura del medio de calentamiento hasta alcanzar los 90°C y se mantiene este valor constante por un tiempo determinado de acuerdo al diseño experimental, luego se enfría a temperatura ambiente obteniéndose de esta forma el jarabe dextrinizado.

2.4 Materia prima empleada en la obtención del jarabe dextrinizado

La materia prima que se emplea en la investigación es el almidón obtenido a partir del sorgo CIAP-R-132 en la molienda húmeda a escala industrial, en la UEB Glucosa Cienfuegos.

A partir de este almidón obtenido se prepararon las muestras para el proceso de obtención de los jarabes Dextrinizados a nivel de laboratorio.

2.5 Estudio de la hidrólisis enzimática del almidón del sorgo.

2.5.1 Diseño Experimental

Para el estudio del proceso de hidrólisis enzimática se utilizó un diseño factorial completo 2^K con replica, con vistas a minimizar el tiempo de experimentación y los recursos en el laboratorio, teniendo en cuenta las variables independientes: densidad de suspensión, dosis de enzima y tiempo de reacción, y como variable dependiente la concentración de dextrosa (ED). Se utiliza para ello la enzima BIALFA-T que es una alfa amilasa termoestable. La prueba estadística se aplicó a los valores obtenidos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en su orden de ocurrencia de acuerdo a los datos; usando el software STATGRAPHICS. Centurion.XV, versión 15.2.14.

Tabla 2.1: Niveles de cada una de las variables.

Variables	Niveles	
	Alto (1)	Bajo (-1)
Densidad (X_1)	15°Be	12°Be
Dosis de enzima (X_2)	1 ml/L	0,4 ml/L
Tiempo de reacción (X_3)	60 min	30 min

Los rangos de las variables dependientes fueron tomados según los parámetros que se usan en la fábrica para procesar el almidón de maíz en correlación con la bibliografía estudiada, específicamente (Sergio O. Serna Saldívar, 2013), variando moderadamente la técnica de manera empírica a nivel de laboratorio con vistas a obtener los resultados esperados.

Tabla 2.2: Matriz experimental

N⁰	X₁	X₂	X₃
1	1	-1	1
2	1	1	-1
3	-1	-1	1
4	1	1	1
5	-1	-1	-1
6	1	-1	-1
7	-1	1	-1
8	-1	1	1
9	-1	1	-1
10	1	-1	1
11	-1	-1	-1
12	-1	-1	1
13	1	-1	-1
14	1	1	1
15	1	1	-1
16	-1	1	1

2.5.2 Desarrollo experimental de la hidrólisis enzimática del almidón del sorgo

En los experimentos 2, 4, 6, y 8 del diseño experimental, se obtuvo la densidad de 12° Be pesando 150 gramos de almidón de sorgo en un beaker de 600 ml, y enrazando con agua destilada hasta 500 ml, mientras que en los experimentos 1, 3, 5 y 7 se logró la densidad de 15° Be disolviendo 196 g enrazados con la misma cantidad de agua, luego se ajustó el pH a 6,8 con HCl (0.01N), posteriormente se pasa la lechada a una manta de

calentamiento llevándola a una temperatura de 60° C con agitación constante, lográndose un mezclado perfecto y la homogenización de la suspensión, inmediatamente se añadió la dosis de enzima BIALFA-T correspondiente a cada experimento y se colocó en el Baño María a 90° C por 30 y 60 minutos siguiendo el diseño, transcurrido este tiempo enfriamos a temperatura ambiente, filtramos y tomamos muestras entre 22 y 24 gramos a las cuales se le determinó el Brix (°Bx) y la concentración de dextrosa (ED), estos experimentos se realizaron por duplicado.

2.6 Determinaciones realizadas.

2.6.1 Determinación de pH

Siguiendo las indicaciones de la NC90-13-13:80. Aseguramiento Metrológico de pH. Reglas generales para efectuar mediciones de pH, se mide el pH de la solución, asegurándose antes de hacer la lectura que el valor indicado sea constante.

2.6.2 Determinación del Brix. (Método refractométrico)

Este método se utiliza como método fundamental para la determinación de los sólidos disueltos contenidos en el sirope de glucosa, utilizando un refractómetro con escala Brix.

Procedimiento:

Se extiende la muestra en el prisma del refractómetro mediante una varilla de cristal con policía, se espera unos minutos para que la Temperatura se estabilice en los prismas y se realiza la lectura siguiendo las instrucciones del fabricante, tan pronto como la temperatura se haya estabilizado y las lecturas sean constante (3 minutos aproximadamente). Se limpian y secan las superficies de los prismas inmediatamente. Se realizarán 3 determinaciones Y se promediarán las lecturas obtenidas.

Expresión de los resultados. Método para los cálculos.

Para una medición realizada a una temperatura diferente a 20° C.

$$\% \text{ materia seca} = L + C \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

L promedio de las lecturas del refractómetro.

C corrección de temperatura

Aproximación de los resultados: Los resultados se dan aproximados hasta la décima.

2.6.3 Determinación del equivalente de dextrosa (ED)

Fundamento del método: Los azúcares del tipo aldosa tienen acción reductora frente a ciertos grupos metálicos, por lo que puede determinarse mediante una modificación del método de Eynon y Lane, donde las moléculas de dextrosa, maltosa, etc., presentes en la muestra reducen el sulfato de cobre en un sistema de tartrato en medio alcalino bajo condiciones contratadas, dando un precipitado rojo de óxido cuproso. El resultado se expresa como dextrosa y se calcula como por ciento de la materia seca. Para obtener resultados precisos, es absolutamente indispensable seguir detalladamente las indicaciones del procedimiento.

Reacciones: Cuando se mezclan cantidades equivalentes de la solución de Fehling I y Fehling II, se forma un complejo soluble de color azul profundo de Tartrato de cobre, que es considerado frecuentemente como una solución de óxido de cobre.

Se mezcla un volumen exactamente medido de solución de Fehling I con igual volumen de Fehling II, añadiendo siempre la II sobre la I, Inmediatamente antes de usarse se valora de la siguiente manera: se pesan exactamente 1,2500 g de dextrosa desecada, se transfiere cuantitativamente a un matraz aforado de 250 ml, se enrasa con agua y se mezcla. Se valora la solución de Fehling según se indica a continuación en el procedimiento, pero utilizando esta solución en lugar de la solución de muestra y añadiendo inicialmente 23,5 ml. Si el reactivo ha sido cuidadosamente preparado, la valoración consumirá 24,10 ml. De no ser así deberá ajustarse la solución de Fehling I añadiendo agua o sulfato de cobre según sea el caso hasta que se emplee exactamente esta cantidad en la valoración.

Aunque está demostrado que la solución mezclada de reactivo de Fehling puede mantenerse en buen estado hasta por una semana, es relativamente inestable, por lo que, si el reactivo no va a usarse con mucha frecuencia, es mejor mezclarlo en el momento de su uso, empleando 12,5 ml de cada solución, medidos con bureta.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

- Pipeta bulbo central de 25 ml.
- Frasco cónico c/t de 250 ml.
- Bureta graduada de 50 ml.
- Plancha eléctrica o mechero de gas.
- Cronómetro.

Procedimiento:

Preparación de la porción de ensayo: Se determina el contenido de sustancia seca a la muestra y se anota. Se pesa con una precisión de (+ -) 0,1 mg una cantidad adecuada de muestra, calculada según la fórmula siguiente;

$$pesomuestra = \frac{12500}{E \times S} \qquad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

E ED esperado

S Sustancia seca de la muestra, en por ciento.

Se transfiere cuantitativamente a un matraz aforado de 250 ml y se enrasa con agua.

Determinación:

Se llena una bureta con la solución de la muestra. Se pipetea 25 ml exactos de solución de Fehling en un frasco cónico de 250 ml y se añaden algunos ebullidores. Se adiciona la solución de la muestra hasta 0,6 ml antes de punto final esperado (determinado mediante una valoración preliminar). Se calienta sobre un mechero de gas (u hornilla eléctrica preferentemente), graduado de forma tal que el punto de ebullición se alcance a los 2 minutos. Al comenzar la ebullición se pone en marcha un cronómetro y se deja hervir moderadamente por 2 minutos, rápidamente se añaden 2 gotas de indicador de azul de metileno y 2 de la solución de muestra. Se espera 5 segundos y se observa la coloración de la solución. Se continúa añadiendo 2 gotas de la muestra a intervalos de 5-10 segundos hasta obtener que el color azul desaparezca y el líquido sobrenadante quede incoloro

sobre el precipitado rojo. La valoración deberá completarse en 60 segundos, de manera que el tiempo total de ebullición desde que se puso en marcha el cronómetro sea de 3 minutos.

En ningún momento durante la valoración deberá agitarse el frasco cónico o retirarse de la fuente de calor. El punto final podrá apreciarse mejor si la valoración se realiza frente a un fondo blanco y con buen alumbrado artificial.

Expresión de los resultados:

Método para los cálculos

El contenido de azúcares reductores de la muestra expresada como dextrosa se calcula por la fórmula siguiente:

$$\% \text{Azúcares reductores} = \frac{25 \times f}{m \times a} \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

f factor que aparece en la tabla del Anexo 1

m masa de la muestra inicial pesada en gramos

a volumen de muestra diluida consumido en la valoración, en mililitros.

El equivalente de dextrosa se calcula por la fórmula siguiente:

$$ED = \frac{250 \times f \times 10}{m \times a \times s} \qquad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

f factor que aparece en la tabla del Anexo 1.

m masa de la muestra inicial pesada, en g.

a volumen de muestra diluida consumido en la valoración, en ml.

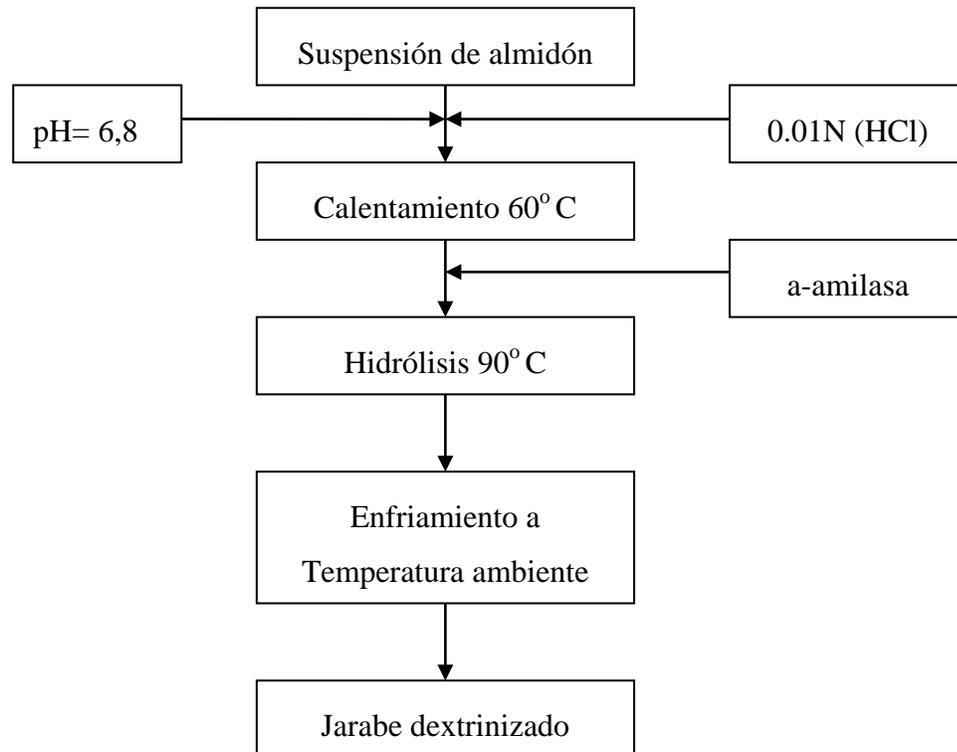
s contenido de sustancia seca de la muestra inicial, en por ciento.

Aproximación de los resultados: Los resultados se dan aproximados hasta la centésima.

2.7 Metodología para el escalado de la hidrólisis enzimática del almidón.

A partir de los resultados experimentales se definen las etapas que conforman el proceso de obtención de jarabes dextrinizados a partir de almidón de sorgo y se confecciona el Diagrama de Bloque que a continuación se muestran:

Figura 2.2: Diagrama de Bloque



En este proceso la etapa más importante es la hidrólisis enzimática, (Cañizares Domínguez, Tania, 1997) plantea, que cuando se procede al escalado de un reactor discontinuo (equipo donde se lleva a cabo dicha etapa), si se está seguro de que el problema de la transferencia de calor y el mezclado son solubles, no debe existir dificultad para desarrollar el mismo, por lo cual no es necesario la determinación de la cinética ni del mecanismo de reacción. Así mismo el tiempo de reacción en el reactor de mayor escala tiene que ser el mismo que en el de menor escala. Esta simple regla de escalado depende del grado de mezclado y de la transferencia de calor. Para un buen escalado, la velocidad e intensidad de mezclado, así como la capacidad de intercambio de calor deben ser los mismos en ambas escalas, lo cual no siempre es posible lograr.

En sistemas en los cuales la transferencia de calor y el mezclado juegan un papel muy importante se adoptan reglas que contemplan ambos efectos. Según (Iván Leandro Rodríguez Rico y Gabriel Blázquez García, 2010); existen varias formas de relacionar el diámetro del agitador D con la velocidad de agitación N como aparece en la tabla que a continuación se muestra.

Tabla 2.3: Reglas y relaciones de escalado para reactores discontinuos.

Regla de escalado	h'/h	Observaciones
1.Similitud dinámica (número de Reynold constante Re)	D'/D	Poco usado
2.Tipo de agitador y velocidad de agitación constante	$(D'/D)^{1-a}$	$a = 0,67$
3.Coeficiente constante	1	$N'/N = (D'/D)^{2-(1/a)}$
4. Flujo de calor por unidad de volumen constante.	D'/D	$N'/N = (D'/D)^{\frac{(2a-2)}{a}}$
5.Potencia por unidad de volumen constante	$(D'/D)^{1,33a-1}$	Poco cambio en el coeficiente h , $a=0,67$

Donde h'/h es la relación de los coeficientes de transferencia de calor entre el prototipo y el modelo respectivamente.

(') se refiere a los parámetros del prototipo.

2.7.1 Parámetros más usados para el escalado de sistemas de mezclado.

(Shuici, Arthur et al. 1965) Plantean que los parámetros más importantes a considerar en el escalado de los sistemas de mezclado son los que se reportan a continuación.

Tabla 2.4: Parámetros más usados para el escalado de sistemas de mezclado.

Parámetros	Ecuación
Potencia / volumen	$\frac{(P * N^3 * D^5)}{V}$
Torque / volumen	$\frac{(N^2 * D^5)}{V}$
Número de Reynold	$\frac{(N * D^2 * \rho)}{\mu}$
Número de Froude	$\frac{(N^2 * D)}{g}$
Flujo	$N_a * N * D * \rho$
Número de Weber	$\frac{(\rho * N^2 * D^3)}{\sigma}$
Número de mezclado	N
Velocidad de cizallamiento	$\pi * N * D$

2.7.2 Escalado del reactor tipo tanque agitado.

(Attilio Bissio, Robert L. Kabel., 1985) sugieren razones de escalado y escalas de operación en laboratorios, plantas pilotos y unidades comerciales; lo que no cumple necesariamente con la idea general de un cambio de escala de 5 a 10 veces en las dimensiones como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.5: Relaciones entre escala de operación y razón de escalado para el sistema en cuestión.

Sistema	Escala de operación		Razón de escalado	
	Laboratorio	Planta Piloto	Laboratorio a Planta Piloto	Planta Piloto a Comercial
Reactantes líquidos Productos sólidos o líquidos viscosos	0,005-0,2	1-20	20-200	20-200



CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Caracterización de la Materia Prima (Almidón de sorgo)

Mediante análisis bromatológico, se cuantificó la composición del producto resultante, luego de ser secado y molido. Claramente el mayor porcentaje de esta harina corresponde a almidón, siendo la humedad y otros índices numéricos quienes representan un porcentaje menor en la harina. A continuación se presenta el resultado bromatológico realizado al almidón de sorgo (CIAP-R-132):

Tabla 2.1: Análisis Bromatológico almidón de sorgo.

Tipo de Alimento	Almidón de Sorgo
Análisis %	Resultado
Almidón %	71,3
Fibra %	28,7
Proteína %	0,34
Cenizas %	1,98
Humedad	11,0
Grasa %	3,61

Para esta harina se observa que el porcentaje de almidón y de fibra es de 71,3 % y 28,7 % respectivamente; valor superior al reportado por (Iván Leandro Rodríguez Rico y Gabriel Blázquez García, 2010), obtenido a nivel de laboratorio. En nuestro caso dicha harina fue obtenida por una molienda humedad a escala industrial, donde existe una mayor selectividad en el proceso a la hora de la separación.

Por otro lado los valores de proteína 0,34 %, Grasa 3,61 %, respectivamente son superiores a los reportados en las normas internacionales para los alimentos, como el CODEX 2012, resultado que pueden estar dado por la no inclusión de la etapa de determinación en el proceso de extracción del almidón, etapa que elimina el germen del cereal, parte donde se encuentra la grasa del mismo, por lo que puede ser el responsable del valor obtenido. Para el caso de la proteína no es muy grande la diferencia en cuanto al valor numérico, siendo el valor 0,22 % de grasa reportado por (Ji, Y., Seetharaman, K.

and White, P. J., 2004) y corroborado más tarde por (Wiebe N, PadwalR,Field C, Marks S, Jacobs R, Tonelli M, 2011) con un valor de 0,27 % respectivamente.

Por su parte el valor de humedad residual es de un 11,0 %, lo cual se acepta pues está dentro de los límites establecidos para los polvos de esta naturaleza. Según (NTE INEN 1513, 2004).

Se determinó el contenido de cenizas totales, utilizando para ello el almidón de sorgo obtenido mediante la molienda húmeda a nivel industrial, obteniéndose un valor de 2,0 % que se encuentra dentro de los límites establecidos por (Kusumoto IT, Nakabayashi T, Kida H, Miyashiro H, Hattori M, Namba T, et al., 1960).

Por lo general, las cenizas totales se componen de carbonatos, fosfatos, sulfatos, silicatos y sílice, (Enríquez Flores A, Prieto Vela E, De los Ríos Martínez E, Ruiz Reyes G., 2009). El contenido de cenizas totales es importante e indica, en cierta medida, el cuidado que se ha tenido en la preparación de la muestra.

En el caso en estudio se tuvo especial cuidado en la selección y tratamiento del cereal, lavando con agua Sulfurosa y eliminando toda la materia extraña. Existen referentes en la literatura de este parámetro para el cereal en estudio reportado por (Sergio O. Serna Saldívar, 2013).

Tabla 3.2: Análisis de cenizas.

Análisis	Resultado
Cenizas totales	1,98
Cenizas solubles en H ₂ O	0,198
Cenizas insolubles en HCl	0,224

Adicionalmente se determinó el contenido de cenizas solubles en agua, utilizando las cenizas totales obtenidas en el apartado anterior, obteniendo un valor de 0,198 %.

El valor de las cenizas insolubles en ácido clorhídrico en la tabla anterior, indica el porcentaje que presenta la especie, en este caso el cereal, representado por el contenido de material inorgánico extraño (tierra, arena) obteniendo un valor de 0,224 %. Estas cenizas suelen componerse sobre todo de sílice; y una cantidad elevada de estas, indican

contaminación con productos térreos (Ochamendi E. Durand., 1992), no correspondiéndose con nuestro caso.

A partir de este almidón obtenido se prepararon las muestras para el proceso de obtención de los jarabes dextrinizados a nivel de laboratorio.

3.2 Análisis de los resultados experimentales

La hidrólisis del almidón es la principal etapa del proceso ya que en ella se obtienen las características deseadas del jarabe dextrinizado. De acuerdo al diseño experimental se llevaron a cabo 8 corridas con una réplica cada uno dando como resultado 16 experimentos los que se muestran a continuación en la tabla 3.3:

Tabla 3.3: Resultados de la etapa de hidrólisis de almidón.

Nº	Densidad de la suspensión (°Be)	Dosis de BIALFA-T (ml)	Tiempo de reacción (min)	Brix (°Bx)	ED (%)
1	15	0,2	60	29,5	15,504
2	15	0,5	30	21	15,721
3	12	0,2	60	22	22,197
4	15	0,5	60	29,5	17,710
5	12	0,2	30	24	17,257
6	15	0,2	30	21	13,974
7	12	0,5	30	22,1	22,882
8	12	0,5	60	23	29,608
9	12	0,5	30	22,5	21,100
10	15	0,2	60	30	16,249
11	12	0,2	30	24,5	19,486
12	12	0,2	60	24	23,499
13	15	0,2	30	21	14,500
14	15	0,5	60	29	18,510
15	15	0,5	30	21	17,199
16	12	0,5	60	24	28,800

Ver más datos experimentales en Anexo 2.

Los valores de pH para todas las muestras fueron ajustados en un rango 5,5-7.

Los valores de Brix medidos estuvieron entre 21 y 30

El análisis del diseño realizado para el equivalente de dextrosa (ED), muestra en la tabla 3.4 las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones, además del error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo y por ultimo el factor de inflación de varianza (V.I.F.) que debe ser igual a 1 para todos los factores para un diseño perfectamente ortogonal, ya que factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Tabla 3.4: Efectos estimados para ED (%).

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	19,6375	0,24492	
A:Densidad suspensión	-6,935	0,489841	1,0
B:Dosis de enzima	3,6075	0,489841	1,0
C:Tiempo de reacción	3,745	0,489841	1,0
AB	-1,3775	0,489841	1,0
AC	-2,1	0,489841	1,0
BC	0,6875	0,489841	1,0
Bloque	0,5625	0,489841	1,0

Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia se muestra en el Diagrama de Pareto. Figura 3.1.

Figura 3.1: Diagrama de Pareto

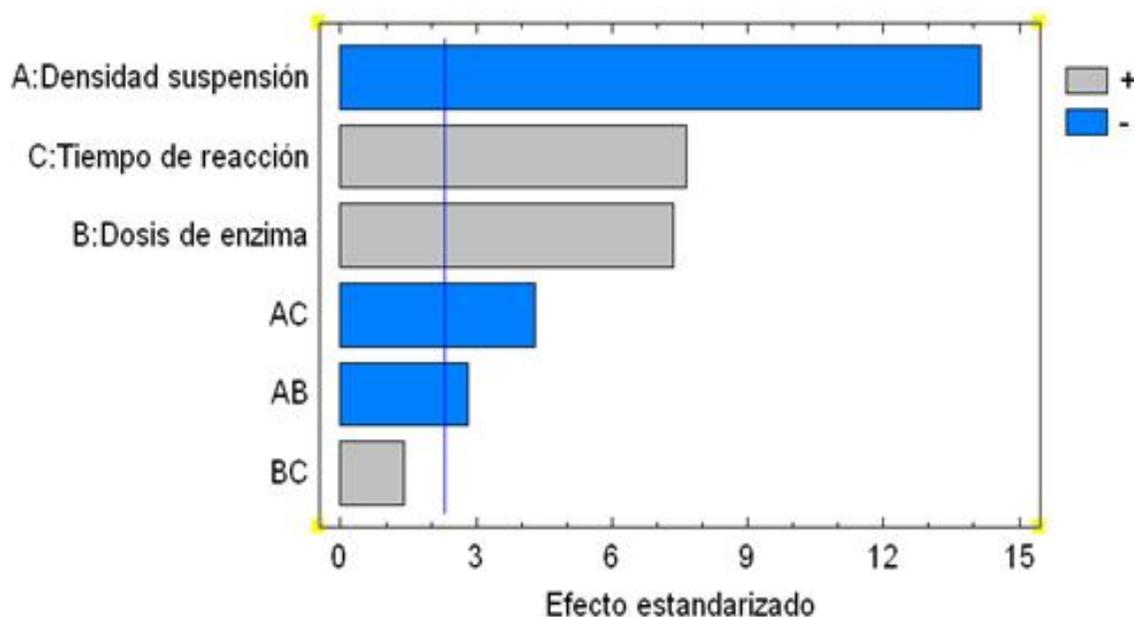


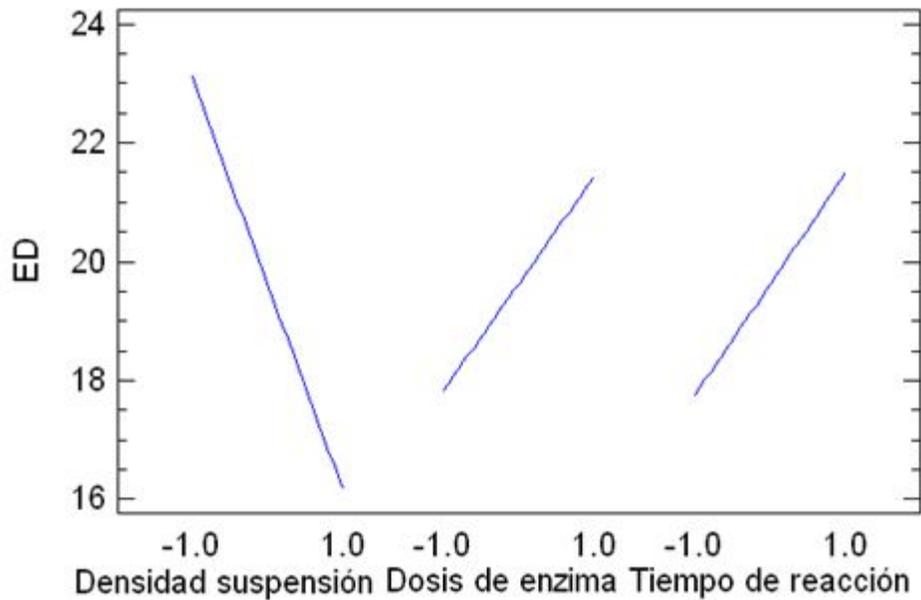
Tabla 3.5: Análisis de Varianza para ED

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Densidad suspensión	192,377	1	192,377	200,44	0,0000
B:Dosis de enzima	52,0562	1	52,0562	54,24	0,0001
C:Tiempo de reacción	56,1001	1	56,1001	58,45	0,0001
AB	7,59003	1	7,59003	7,91	0,0228
AC	17,64	1	17,64	18,38	0,0027
BC	1,89063	1	1,89063	1,97	0,1981
bloques	1,26563	1	1,26563	1,32	0,2840
Error total	7,6782	8	0,959775		
Total (corr.)	336,598	15			

En el análisis de varianza para los ED se observa que menos la interacción dosis de enzima- tiempo los demás efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0% y por tanto influyen en la variable respuesta, corroborando lo que se aprecia en el Diagrama de

Pareto al igual que en la gráfica de efectos principales (Figura 3.2) donde se evidencia que la mayor influencia la ejerce la densidad de la suspensión, pero de forma negativa, es decir los mejores valores de ED se obtienen para el menor Be; el tiempo de reacción y la dosis de enzima son las variables que más influyen de forma positiva y tienen un comportamiento similar estadísticamente sobre los azúcares reductores, lo que explica que una combinación de estos dos factores no sea significativa en el proceso.

Figura 3.2: Gráfica de los efectos principales



La ecuación del modelo ajustado para ED despreciando la interacción dosis de enzima-tiempo es:

$$ED = 19,6375 - 3,4675 * \text{Densidad suspensión} + 1,80375 * \text{Dosis de enzima} + 1,8725 * \text{Tiempo de reacción} - 0,68875 * \text{Densidad suspensión} * \text{Dosis de enzima} - 1,05 * \text{Densidad suspensión} * \text{Tiempo de reacción}$$

Para un $R^2 = 97,15\%$

En la tabla 3.6 se muestra la combinación de los niveles de los factores analizados, que maximiza el valor de ED sobre la región indicada, obteniéndose un valor óptimo de 28,52 %, adecuado para este tipo de jarabes por lo que se demuestra que es correcta la región analizada.

Tabla 3.6: Óptimos de cada nivel

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Densidad suspensión	-1,0	1,0	-1,0
Dosis de enzima	-1,0	1,0	1,0
Tiempo de reacción	-1,0	1,0	1,0

3.2 Diseño y escalado de equipos

Una vez determinadas las condiciones óptimas de operación para el desarrollo del proceso de obtención de jarabes dextrinizados a partir del almidón de sorgo desarrollado a escala de laboratorio, es preciso realizar el diseño de equipos a mayor escala, previa selección de los mismos de acuerdo con las características del proceso.

3.2.1 Selección preliminar del equipamiento para llevar a cabo el proceso de obtención de jarabes dextrinizados.

A partir del estudio experimental llevado a cabo para el proceso de obtención de jarabes dextrinizados teniendo en cuenta las condiciones de operación de cada una de las variables que influyen en el mismo, quedó definido que para desarrollar el proceso a escala piloto, se requiere de un recipiente con agitación empleando vapor como medio de calentamiento, o lo que es lo mismo un reactor, constituyendo este el equipo más importante dentro del proceso.

3.2.1.1 Selección del tipo de reactor.

Tabla 3.7: Base de datos para la selección del tipo de reactor a utilizar en el proceso de obtención de jarabes dextrinizados.

Aspectos a considerar	Reactor tanque agitado	Reactor tubular
Técnicos y tecnológicos	1) Necesita de un agitador 2) Es perfectamente agitado 3) Trabaja a condiciones finales, la composición es la misma en cada punto del reactor 4) Menor transferencia de calor 5) Necesita mayor tiempo para la uniformidad de la temperatura 6) Trabaja a presiones moderadas 7) Puede tener operación continua o discontinua	1) El flujo de fluido es ordenado 2) Puede haber mezclado radial del fluido pero no longitudinal 3) Tiempo de residencia igual para todos los elementos del fluido 4) Mayor uniformidad en el calentamiento 5) Trabaja a altas presiones 6) Mayor transferencia de calor 7) Operación continua
Espaciales	Su construcción es más fácil	Son más difíciles de construir
Económicos	Cuando trabaja en operación discontinua el costo de operación es más elevado que cuando trabaja en operación continúa.	Mayor costo de construcción y mantenimiento.

(Warren Mc Cabe, Julián C. Smith., 1990), plantean que cuando se trabaja en procesos a pequeñas escalas de forma discontinua, se utilizan reactores de tipo tanque agitado. Por consiguiente, tomando en consideración la forma en que se desarrolla el proceso de obtención de jarabes dextrinizados y los resultados alcanzados que se reportan en el capítulo anterior, se infiere la selección de un reactor de este tipo.

3.2.1.2 Selección del medio de suministro de calor.

Tabla 3.8: Base de datos para la selección del medio de suministro de calor.

Criterios	Tipo de Equipos	
	Chaqueta	Serpentín
Consumos de energía	–	Altos
Área de transferencia de calor	Mayor	Menor
Costo de Fabricación	Mayor	Menor
Mantenimiento	Difícil	Fácil
Fluidos de intercambio	Aceites, vapor, agua	Vapor, agua

Se selecciona la chaqueta como medio de calentamiento, para llevar a cabo la etapa de hidrolisis y garantizar así que en el sistema la reacción de hidrólisis enzimática con la BIALFA-T se produzca a la temperatura necesaria (90^0 C); pues a pesar de tener un costo de fabricación mayor y ser de difícil mantenimiento, los tanques enchaquetados son los más efectivos en cuanto al área de transferencia de calor, sin importar el alto costo de las chaquetas frente a su gran eficiencia. (Ulrich G. D., 1985).

3.2.1.3 Selección del tipo de agitador

Tabla 3.9: Base de datos para la selección del tipo de agitador a utilizar en el proceso de obtención de jarabes dextrinizados.

		Tipo de agitador	
Aspectos	Índices	Placas	Hélice
Técnicos y Tecnológicos.	Aplicaciones	Se usan para viscosidades menores de 50 cP o cuando la intensidad de agitación requerida es pequeña y se necesita intensificar las operaciones de intercambio de calor.	Se usan para viscosidades menores de 4000 cP o cuando se agitan volúmenes grandes de líquidos (en el orden de 1500 m ³) o cuando se debe mantener en suspensión partículas sólidas pesadas.
	Velocidad	Iguales o menores de 150 r.p.m.	Altas velocidades en el orden de los 250 a los 1000 rpm.
	Tipo de flujo	Aseguran un flujo tangencial y radial. No provocan corrientes verticales.	Aseguran un flujo axial y provocan gran turbulencia e intensas corrientes verticales.
	Suspensiones	Bajo contenido de sólidos.	Hasta 50% masa de sólidos.
	Facilidad de construcción.	Son sencillos en su estructura.	Estructura complicada
Datos económicos	Costo de construcción.	Bajo	Bajo
	Consumo de energía	Gasto energético pequeño en comparación con otros tipos	Consumen poca energía

Se selecciona un agitador de hélice, teniendo en cuenta las propiedades de la mezcla que se va a agitar: su viscosidad y densidad y los requerimientos del proceso. Estos agitadores utilizan un flujo axial y provocan gran turbulencia, es decir: producen un movimiento de la mezcla en todo el recipiente actuando como una bomba que succiona el líquido a lo largo de su eje antes de la reenviarlo al fondo. El líquido entonces es elevado a lo largo de las paredes y una vez en la parte superior del recipiente es succionado hacia el centro antes de descender. Giran a altas velocidades, entre 250 y 1000 r.p.m., lo que provoca una agitación vigorosa en los tanques (Donald Q. Kern, 1999).

3.3 Escalado del reactor tipo tanque agitado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado en el epígrafe 2.7.2 se escalará el proceso a una capacidad de 20 veces mayor que la utilizada a escala de laboratorio.

Sobre la base del estudio realizado en el reactor de 0,6 litro se comienza el escalado del equipo. Según (Attilio Bissio, Robert L. Kabel., 1985), el criterio de escalado más usado para procesos controlados por carga y en los que la tarea fundamental es el mezclado de los líquidos, es el de potencia por unidad de volumen constante; sin embargo en el proceso en cuestión es necesario considerar además el criterio de velocidad en la punta del agitador constante ($N \cdot D_i$ cte.).

En la siguiente tabla se muestran los datos del reactor modelo, adquiridos a partir de pruebas realizadas a escala de laboratorio.

Tabla 3.10: Datos del modelo obtenidos en pruebas de laboratorio.

Volumen total (Vt)	0,6 L
Volumen efectivo (v)	0,5 L
Diámetro del reactor (Dt)	0,06 m
Diámetro del impelente (Di)	0,042 m
Velocidad de agitación (N)	280 rpm
Altura total del tanque (Ht)	0,125 m
Altura de llenado del tanque (h)	0,105 m
Reynolds (Re)	8973,5
Potencia del agitador (P)	$1,45 \times 10^{-5}$ W

De la tabla 3.8 tenemos que:

$$D_i = 0,7D_t \quad \text{Ecuación. 3.1}$$

$$h = 0,84H_t \quad \text{Ecuación. 3.2}$$

$$Re = \frac{N \cdot D_i^2 \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación. 3.3}$$

$\mu = 1 \times 10^{-6}$ Pa \times s. (Daniel Felipe Quintero Novoa y Jeferson Armando Ramírez Rueda, 2013).

$$P = N_p * \rho * N^3 * D^5 \quad \text{Ecuación. 3.4}$$

Para el cálculo de la potencia fue necesario convertir la densidad de °Be (unidad con la cual se trabajó en el laboratorio) a kg/m³, empleando para ello la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{145}{145 - ^\circ Be} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

(Iván Leandro Rodríguez Rico y Gabriel Blázquez García, 2010)

$$\rho = 1,09 \text{ kg/m}^3$$

3.3.1 Metodología de escalado.

Partiendo de los criterios P/V y N*Di constantes y de que existirá similitud geométrica entre el modelo y el prototipo se desarrolla la siguiente metodología de escalado.

Tabla 3.11: Criterio de similitud geométrica.

	Datos	Ecuaciones utilizadas
Modelo	V= 0.6L Ht=2,083Dt Di=0,7Dt	$V = \left(\frac{\pi * D_t^2}{4}\right) * H_t (Ec.3.6)$
Prototipo	V'=12L Ht' = 2,083Dt' Di' =0,7Dt'	$V' = \left(\frac{\pi * D_t'^2}{4}\right) * H_t' (Ec.3.7)$

Dividiendo (3.6)/(3.7) y sustituyendo en ambas ecuaciones la relación:

$$Dt = 1,429 \times Di \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Se llega a la expresión:

$$Di = 0,311 \times Di' \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Que constituye la expresión matemática de la similitud geométrica.

3.3.1.1 Criterio P/V constante.

Para desarrollar este criterio se tiene en cuenta que:

$$(P/V)' = (P/V) = (N^3 * Di^2)' = (N^3 * Di^2) \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Si se despeja la velocidad de agitación (N) del prototipo, la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$N^3 = \frac{N^3 * Di^2}{Di^2} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Luego se sustituye en la (Ecuación 3.11) la expresión $Di' = 3,215 * Di$, quedando finalmente la expresión del criterio:

$$N' = 0,236N \quad \text{Ecuación 3.12}$$

3.3.1.2. Criterio $N \cdot D_i$ constante.

En este criterio se tiene en cuenta que:

$$N' \cdot D_i' = N \cdot D_i \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Además se considera que el Re de mezclado no es constante y como $Re = \frac{N \cdot D_i^2 \cdot \rho}{\mu}$, se procede a desarrollar la expresión del Re para el prototipo, quedando de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Re' &= (N' \cdot D_i'^2 \cdot \rho) / \mu = (N' \cdot D_i' \cdot D_i' \cdot \rho) / \mu = (N' \cdot 3,215 \cdot D_i \cdot D_i' \cdot \rho) / \mu \\ &= (3,215 \cdot N \cdot D_i^2 \cdot \rho) / \mu \end{aligned}$$

Del análisis anterior se llega a la expresión del criterio:

$$Re' = 3,215 \cdot Re \quad \text{Ecuación 3.14}$$

3.3.1.3 Consecuencias del criterio sobre P/V .

Para el prototipo la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$\left(\frac{P}{V}\right)' = N^{3'} \cdot D_i'^2 = N' \cdot D_i' \cdot N' \cdot D_i' \cdot N' \quad \text{Ecuación 3.15}$$

(Iván Leandro Rodríguez Rico y Gabriel Blázquez García, 2010).

Considerando el criterio $N \cdot D_i$ constante y haciendo las sustituciones pertinentes, la *Ecuación 3.15* se transforma a:

$$\left(\frac{P}{V}\right)' = 0,311 \cdot \left(\frac{P}{V}\right) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

3.3.1.4 Consecuencias del criterio sobre N .

$$N' \cdot D_i' = N \cdot D_i \quad \text{Ecuación 3.17}$$

$$N' \cdot 3,215 \cdot D_i = N \cdot D_i \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$N' = 0,311 \cdot N \quad \text{Ecuación 3.19}$$

3.3.2 Resultados del escalado y análisis de las consecuencias sobre el prototipo.

Tabla 3.12: Consecuencias del escalado sobre otros parámetros.

Parámetros	Modelo 0.6 L	(P/V)'	(N*Di)'
P	$1,45 \times 10^{-5}$ W	$3,42 \times 10^{-6}$ W	-
(P/V)	$2,42 \times 10^{-5}$ W/L	$2,42 \times 10^{-5}$ W/L	-
N	280 rpm	66,08 rpm	87,08 rpm
Di	0,042 m	-	0,135 m
N*Di	0,196 m/s	-	0,196 m/s

De acuerdo al criterio de similitud geométrica se mantendrá la relación H/D constante para las dos escalas.

Tabla 3.13: Datos del prototipo.

Volumen total (Vt')	12 L
Volumen efectivo (V')	10 L
Diámetro del reactor (Dt')	0,193 m
Diámetro del impelente	0,135 m
Altura total del tanque (Ht')	0,402 m
Altura de llenado del tanque (h')	0,338 m
Temperatura del sistema de reacción (Tr')	90 °C
Área de transferencia de calor (Atc)	0.039 m ²
Reynold (Re)	28 850

3.4 Dimensionamiento de la chaqueta del reactor prototipo.

- Cálculo de la masa de vapor de calentamiento de la chaqueta: (m_{vapor})

A partir del Balance de Energía:

$$Q_g = Q_c \quad \text{Ecuación 3.20}$$

$$[mC_p(\Delta t)]_m = (m\lambda)_{\text{vapor}} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Donde:

$m_m = 3$ kg: Masa de la mezcla a calentar.

$C_{p_m} = 0,9 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$: Capacidad Calorífica de la mezcla. (Depto. de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 2008)

$\Delta t_{tm} = 60^\circ \text{C}$: Diferencia de temperatura de la mezcla.

$\lambda = 539,6 \text{ kcal/kg}$: Calor latente de vaporización a 120°C . (Depto. de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 1986)

Entonces:

$$m_{\text{vapor}} = 0,3 \text{ kg}$$

- Diámetro de la camisa: (D_{cam})

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$D_{cam} = D_r + 2L \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Donde:

$D_r = 0,193 \text{ m}$: Diámetro del recipiente y $L = 0,402 \text{ m}$: Altura del recipiente

$$D_{cam} = 0,997 \text{ m}$$

- Cálculo del Área física de transferencia de calor: (A_f)

$$A_f = A_b + AL = \frac{\pi D_r^2}{4} + \pi D_r h \quad \text{Ecuación 3.23}$$

$h = 0,338 \text{ m}$: Altura de llenado del tanque.

$$A_f = 0,234 \text{ m}^2$$

- Cálculo del calor necesario para calentar la mezcla a 90°C como requerimiento del proceso:

$$Q_g = [m C_p (\Delta t)]_m$$

$$Q_g = 162 \text{ Kcal}$$

- Cálculo del coeficiente pelicular de transferencia de calor: (h_j)

A partir de la siguiente ecuación:

$$h_j = j \times \frac{k}{D_j} \times \left(C_p \times \frac{\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Donde:

$k_{\text{vidrio}} = 0,465 \text{ BTU/hpie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$: Conductividad térmica del vidrio

$D_j = 0,193 \text{ m} = 0,633 \text{ pie}$: Diámetro interior del recipiente.

$C_{p_m} = 0,9 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} = 0,9 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$: Capacidad Calorífica de la mezcla.

$$(\mu/\mu_w)^{0.14} = 1$$

$\mu = 1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \times \text{s} = 2,42 \times 10^{-3} \text{ lb/pie h}$: Viscosidad de la mezcla

$j = 140$: Factor de transferencia de calor dependiente de Re_j (Reynold modificado) (Donald Q. Kern, 1999)

$$Re_j = \frac{L^2 N \rho}{\mu}; \text{ L: longitud en pie del impelente; N: número de rpm} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

$$Re_j = 6504$$

Entonces:

$$h_j = 17,21 \text{ BTU/hpie}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

- Cálculo del Coeficiente total de transferencia de calor limpio: (U_c)

$$U_c = h_j \times \frac{h_{oi}}{h_j + h_{oi}} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Donde:

$$h_{oi} = 1500 \text{ BTU/pie}^2 \text{ h } ^\circ\text{F} \text{ (Donald Q. Kern, 1999)}$$

Por tanto:

$$U_c = 17,01 \text{ BTU/} ^\circ\text{F h pie}^2 = 83,05 \text{ kcal/ m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

Cálculo del Coeficiente total de transferencia de calor sucio: (U_D) (76)

$$U_D = U_c \times h_d / (U_c + h_d)$$

Donde:

$R_d = 0,001$: Factor de obstrucción.

$$h_d = 1/R_d$$

$$U_D = 76,68 \text{ kcal/}^{\circ}\text{C h m}^2$$

- Cálculo del área de transferencia de calor

$$Q = U_D \times A \times \Delta T$$

$$\Delta T = \text{MLDT Para } \Delta t_1 = 90^{\circ}\text{C y } \Delta t_2 = 30^{\circ}\text{C:}$$

$$\text{MLDT} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2,3 \log(\Delta t_2 / \Delta t_1)}$$

$$\text{MLDT} = \Delta T = 54,68^{\circ}\text{C}$$

$$A = \frac{Q}{U_D \times \Delta T}$$

$$A = A_{tc} = 0,039 \text{ m}^2$$

Como puede observarse, de acuerdo con los resultados, el área física ($A_f = 0,234 \text{ m}^2$) es mayor que el área de transferencia de calor ($A_{tc} = 0,039 \text{ m}^2$), lo que justifica la colocación de la chaqueta.

Atendiendo a que en el proceso de jarabes dextrinizados ocurre a una temperatura relativamente alta (90°C), se propone que el reactor sea de vidrio termoresistente, (fluorsilicatos). El agitador, como también va a estar en contacto con este medio se recomienda que sea de Teflón.



Conclusiones

CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio de forma general de los procesos de obtención de edulcorantes a partir de almidón mediante búsqueda bibliográfica estableciendo la región de estudio de las variables que más influyen en el proceso de obtención de jarabes dextrinizados a partir de maíz, de forma particular.
2. Se comprobó que la región de estudio analizada para cada una de las variables estudiadas, tomando como patrón los jarabes obtenidos a partir del almidón de maíz, es adecuada, ya que se obtienen resultados similares en cuanto a calidad para los jarabes obtenidos de almidón de sorgo, demostrándose que los mismos pueden sustituir al obtenido a partir de almidón de maíz.
3. Se determinó a nivel de laboratorio los parámetros óptimos de las variables estudiadas para la etapa de hidrólisis obteniéndose como resultado una densidad de la suspensión de 12⁰ Be, una dosis de enzima de 1 ml/L de solución y un tiempo de reacción de 60 min.
4. Se propone la tecnología de obtención de jarabes dextrinizados a partir de almidón de sorgo a través del diseño y escalado de la etapa hidrólisis enzimática.

The background of the slide is a light gray gradient. It features several glowing blue lines that curve and intersect across the frame. A prominent circular pattern is visible in the upper right quadrant, with a bright white point at its center. The overall aesthetic is clean and modern.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Continuar el estudio con otros niveles de las variables que den resultados similares y contribuyan a ahorros en el proceso.
2. Realizar el estudio cinético del proceso de dextrinización por hidrólisis enzimática, para lograr un escalado más preciso de la etapa
3. Realizar un estudio de factibilidad económica del proceso, con vistas a valorar el cambio de materia prima en la UEB Glucosa de Cienfuegos para de esta forma incrementar la producción y contribuir con el Plan de Reducción de Importaciones de los Lineamientos del Partido Comunista de Cuba.



Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, J., F. Moreno. y G. Basto. (2011). Estudio de una nueva técnica e implementación de una línea piloto de proceso para la obtención de dextrinas a partir de almidón de yuca.
- Attilio Bissio, Robert L. Kabel. (1985). Conversion from laboratory scale test to successful commercial size desing. En *Scaleup of chemical processes* (p. p. 698). New York.
- Badui-Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (cuarta edición.).
- Balagopalan, C. y G. Padmaja. (1988). Cassava in Food. Feed and Industry, p. 138.
- Bello-Pérez L. A, González-Soto R. A. y Vargas-Torres, F. (2006). Extrusión de almidones de fuentes no convencionales para la producción de almidón resistente. *Agrociencia*.
- Bustos Vázquez, Gómez Aldapa, Tellez Luis, JonguitdPratt, Trejo Ramírez, Ochoa Martínez, Castro Rosas. (2010). Caracterización del Almidón de dos variedades de Sorgo del Estado de Tamaulipas.XII.
- Cañizares Domínguez, Tania. (1997). *Aplicación del análisis de proceso al escaldo del reactor G-0*. UCLV, Villa Clara.
- Cárdenas, Y. (1996). *Estudio preliminar de la etapa de blanqueo de la cera refinada de caña de azúcar*. Universidad Central de Las Villas.
- Chang, Y. H., Lin, J. H., & Lii, C. Y. (2014). Effect of ethanol concentration onthe physicochemical properties of waxy corn starch treated by hydrochloricacid.

Carbohydrate Polymers, p. 57, 89 - 96.

Cheetham P. (2013). Productos obtenidos a partir de la licuefacción del Almidón.

Clayton, W.D., Harman, K.T. and Williamson, H. (2006). GrassBase - The Online World
Grass Flora.

Cruz, A. E. (2010). *Extracción de almidón del banano verde (Musa Sapientum variedad Cavendish)*. Universidad de San Carlos de Guatemala., Guatemala.

Daniel Felipe Quintero Novoa y Jeferson Armando Ramírez Rueda. (2013, enero).
Estudio del mecanismo de gelatinización del almidón de yuca. Universidad de
Los Andes, Colombia.

Depto. de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. (1986).
Tablas de vapor de agua. Recuperado a partir de 1-
[http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion
3/Tablas_de_vapor_de_agua.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Tablas_de_vapor_de_agua.pdf)

Depto. de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. (2008).
Propiedades físico-químicas de Almidones de Sorgo. Recuperado a partir de
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/223156/MODULO_EXE/leccin_23.html

Donald Q. Kern. (1999). *Procesos de transferencia de calor* (Trigésima primera
reimpresión.). México: Compañía editorial continental, s.a. de c.v. México.

Dr. Enrique Durán Páramo. (2007). Producción de edulcorantes por bioconversión.

Enríquez Flores A, Prieto Vela E, De los Ríos Martínez E, Ruiz Reyes G. (2009).
Determinación de índices numéricos en harina de banano y almidones

- modificados. *Rev Med Vallejana*, p. 50-64.
- Fernando Martínez Bustos. (2009). Esteres de Almidon derivatizados y/o convertidos mediante extrusión termoplástica. Instituto Politécnico Nacional, DF.
- Fleche, G. (1985). *Chemical modification and degradation In: Starch Conversion Technology*.
- Hernández-Medina et al. (2008). Caracterización físico-química del almidón de yuca.
- Hestrin S, Feingold DS. (251d. C.). β -Fructofuranosidade (invertase) from yeast. En *Methods in Enzymology 1*. 2010.
- Himmelblau, David M. (1976). *Análisis y simulación de procesos*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Iván Leandro Rodríguez Rico y Gabriel Blázquez García. (2010). *Escalado de Reactores químicos y biológicos*.
- Ji, Y., Seetharaman, K. and White, P. J. (2004). *Optimizing a small scale corn starch extraction method for use in the laboratory. Cereal Chemistry*.
- Ju, L. K., Chase, G. G. (1992). Improve scaleup strategies of bioreactors. *Bioprocess Engineering Journal*, p. 49-53.
- Kennedy, H.M. y A.C. Fischer Jr. (2010). Starch and Dextrins in prepared Adhesives.
- Knowles. (2012). Fuentes no convencionales del Almidón.
- Kusumoto IT, Nakabayashi T, Kida H, Miyashiro H, Hattori M, Namba T, et al. (1960). *Screening of various plant extracts used in ayurvedic medicine for inhibitory*

- effects on human immunodeficiency virus type 1 (HIV-1) protease. Phytotherapy Res.* (Vol. volumen 9).
- Lajolo Franco, M. (2006). *Carbohidratos en alimentos regionales Iberoamericanos* (primera edición.). Brasil: Editorial de Universidad de Sao Paulo.
- Lampen, J. O. (2011). Yeast and Neurosporainvertases. En «*The Enzymes*» (3^a ed. Vol V., pp. pp. 291-305.). New York, USA: Academic Press.
- M. A. Qadeer. (2007). *Kinetic characterization of extracellular amylase from a derepressed mutant of bacillus licheniformis. Applied biochemistry and biotechnology.* (Vol. 141).
- Montilla, L. D. G. (2008). *Obtención de jarabe de maltosa a partir del germen de maíz desgrasado.* Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- Norman, B. (1980). «New developments in starch syrup technology». En *Enzymes and Food Processing* (pp. p. 28 - 50). Londres: Birch, G., Blakebrough, N. y Parker, K. Applied Science Publishers LTD.
- Novack, Joseph; Lynn, Robert O.; Harrington, Edwing. (1962, febrero). Process scaleup by sequential experimentation and mathematical optimization. *Revista Chemical Engineering.*
- NTE INEN 1513. (2004). Granos y cereales. Determinación del contenido de humedad.
- Ochamendi E. Durand. (1992). *Normas Ramales de alimentos# 309 (NEIAL2306:11:1990) «Cereales. Métodos de ensayo».* La Habana.
- Park, S.H., Bean, S.R., Wilson, J.D. and Schober, T.J. (2006). Rapid isolation of sorghum

- and other cereal starches using sonication. *Cereal Chemistry*.
- Richard. R. Hahn. (1970). Usos del sorgo granífero en la alimentación humana y otros.
- Robert H. Perry, Don Green. (1984). *Chemical Engineers Handbook* (sexta edición., Vol. tomo 1).
- Roy L., Bemiller, James N. y Paschall, Eugene F. Starch. (1984). *Chemistry and Technology*, (2^a edition.). Orlando (Florida): Academic Press.
- Sergio O. Serna Saldívar. (2013). *Bioconversión de Almidones en Jarabes Dextrinizados, Maltosados, Glucosados y Fructosados*. Presentado en Quinto Simposio Internacional de Innovación y Desarrollo de Alimentos, Montevideo, Uruguay.
- Small, J. C. (2010). A method for the preparation of soluble starch. *Journal of American Chemical Society*, p. 41, 113–120.
- Swinkels. J.J.M. (2013). *Properties, modifications and applications of starches. Industrial starch chemistry by AVEBE*. Veendam.
- Thomson N.H., y col. (2013). Real-time imaging of enzymatic degradation of starch granules by atomic force microscopy.
- Trambauze, Pierre. (1979, septiembre). Filosofía del escalado. *Revista Chemical Engineering*.
- Ulrich G. D. (1985). *Diseño y Economía de los procesos de Ingeniería Química*.
- Van Der Maarel, Marc J.E.C. (2012). Hidrólisis enzimática del almidón de maíz.
- Viera Bertrán, Rene, Santiago Soler Pérez. (1991). *Diseño y análisis de reactores*

- químicos* (Vol. tomo 1). La Habana.
- Villanueva Ramos G. (2010). "*Aspectos Fundamentales acerca de las operaciones de extracción*". Universidad Central de Las Villas.
- Walas, Stanley M. (1965). *Cinética de las reacciones químicas*. Editorial Pueblo y Educación.
- Warren Mc Cabe, Julián C. Smith. (1990). *Operaciones básicas de la ingeniería química* (Edición Revolucionaria., Vol. tomo 1). La Habana.
- Watson L, Dallwitz MJ. (2008). *The Grass Genera of the World*.
- Wiebe N, PadwalR,Field C, Marks S, Jacobs R, Tonelli M. (2011). A system aticre view of the effect of sweet enersongly cemic response and clinically relevant outcomes.
- Wiley-Blackwell. (2011, septiembre). *Glucose Syrups: Technology and Applications*.



ANEXOS.**Anexo 1**

ml of sugar solution required	For 25 ml of Fehling's solutions
	Dextrosa factor
15	120,2
16	120,2
17	120,2
18	120,2
19	120,3
20	120,3
21	120,3
22	120,4
23	120,4
24	120,5
25	120,5
26	120,6
27	120,6
28	120,7
29	120,7
30	120,8
31	120,8
32	120,8
33	120,9
34	120,9
35	121
36	121
37	121,1
38	121,2
39	121,2
40	121,2
41	121,3
42	121,4
43	121,4
44	121,5
45	121,5
46	121,6
47	121,6
48	121,7
49	121,7
50	121,8

Anexo 2

Número de experimento	peso muestra(g)	mezcla consumida (ml)	Factor de Dextrosa	Brix (°Bx)	ED
1	22,631	25,5	120,6	29,5	17,71011 48
2	22,082	20	120,3	23	29,60802 23
3	22,75	29	120,7	29,5	15,50407 51
4	22,068	28	120,7	22	22,19747 58
5	23,001	40	121,5	21	15,72136 62
6	22,081	27	120,6	22,1	22,88297 79
7	23,001	45	121,5	21	13,97454 77
8	22,248	32,8	120,9	24	17,25799 14

Número de experimento	peso muestra(g)	mezcla consumida (ml)	Factor de Dextrosa	Brix (°Bx)	ED
1	23,403	24	120,6	29	18,51000 53
2	22,9	19	120,3	24	28,80085 04
3	22,906	27	120,6	30	16,24998 79
4	23,204	23	120,4	24	23,49982 14
5	23,988	35	121,3	21	17,19964 29
6	22,699	28	120,7	22,5	21,10085 26
7	22,167	45	121,5	21	14,50031 9
8	22,573	28	120,7	24,5	19,48650 18