

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS "CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ"

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



*TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO*

*Título del Proyecto: Obtención de jarabes glucosados de sorgo
como sustratos de la producción de etanol.*

Autor: Yamila Rodríguez Cueto.

Tutor: M sc. Ing. Fernando Lorenzo Sarria Quezada.

M sc. Ing. William Ortiz Fernández.

Consultante: Dra. Irenia Gallardo Aguilar.

Cienfuegos, 2015

P e n s a m i e n t o

“ Para realizar una investigación son necesaria dos cosas: una de ellas es persistencia infatigable; la otra, habilidad para desechar algo en lo que se ha invertido mucho sudor y muchas ideas. ”

A l b e r t E i n s t e i n .

Agradecimientos

- ♠ *A Fernando Lorenzo Sarría Quesada por haber confiado en mí en la realización de esta investigación, cuando muchas personas no lo creían posible.*
- ♠ *A William Ortiz Fernández por haberme levantado el ánimo en cada fallido de los experimentos.*
- ♠ *A Irenia Gallardo Aguilar por dedicarme su tiempo incondicionalmente y dotarme de sus conocimientos.*
- ♠ *A Margarita por su amistad y colaboración en los resultados obtenidos.*
- ♠ *A mis padres por la educación y el amor que me han brindado siempre.*
- ♠ *A mi hermano por tolerar mis reclamos.*
- ♠ *A mis abuelos, tíos, primos por confiar en mí.*
- ♠ *A mi amiga del alma Sailyn por aguantar mi mal genio y sobre todo apoyarme en todos los experimentos.*
- ♠ *A mi novio Livan y a mi suegra por darme todo su amor y su apoyo incondicional.*
- ♠ *A Mardey, Marbely, Tere, Samaidy, Leidy, Daily, Mayelín, Didier y Nene por haber sido conmigo de oro.*
- ♠ *A todos mis compañeros de aula en especial a Yanay, Yani y Neilys que contribuyeron a mi formación profesional.*
- ♠ *A las tripas Diana, Lisandra, La Turi, Danita, Yoanete por la convivencia durante cinco años.*
- ♠ *A los totumas por estar presentes en todos los momentos de fiesta y de estudio.*
- ♠ *A Medina por enseñarme hacer los Equivalentes de Dextrosas por el método de Eynon y Lane.*

♠ *A Claudia, Isis, Yeni y Fermín por enseñarme a trabajar en los laboratorios.*

♠ *A Rocío y Pepe por su hospitalidad.*

♠ *A Mirta, Santa, Yasmany y a todas las muchachitas del laboratorio de glucosa.*

♠ *A todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a mi formación profesional.*

A todos

Muchas Gracias.

D e d i c a t o r i a

A m i s p a d r e s y a m i h e r m a n o

A t o d a m i f a m i l i a .

R e s u m e n

En el presente trabajo se realizó un estudio preliminar para la obtención de jarabes a partir de almidón de sorgo, como respuesta a la necesidad de estudiar otras materias primas como sustratos de la producción de etanol por vía fermentativa. A partir del análisis bibliográfico sobre el proceso de obtención de alcohol y las materias primas utilizadas, se logran los valores óptimos de los parámetros para los jarabes prestando particular atención a los cereales y a los métodos de sacarificación de los mismos.

En la realización de los experimentos se utilizó el sorgo CIAP 132-R el cual en su estudio arroja resultados similares al almidón de maíz siendo los óptimos para la etapa de licuefacción 36.8°Bx , 53.8°Bx , para la etapa de sacarificación y 51.6°Bx para los jarabes.

Los estudios de fermentación arrojaron valores adecuados para la obtención de etanol mediante destilación para lo cual se hace un diseño para un escalado a planta piloto, resultando un alcohol de 60°GL de grado técnico según las normas cubanas.

Palabras claves: jarabes, licuefacción, sacarificación, sorgo, alcohol.

A b s t r a c t

In this paper a preliminary study to obtain syrups are made from sorghum starch, in response to the need to study other raw materials as substrates for the production of ethanol by fermentation. From the literature review on the process of obtaining alcohol and the raw materials used, the optimal values of the parameters syrups particular attention to cereal and saccharification methods thereof are achieved. CIAP sorghum was used in conducting the experiments 132-R which in its study shows similar results to corn starch being optimal for the liquefaction stage 0BX 36.8, 53.8 0BX, for saccharification stage and 51.6 for 0BX syrups. The fermentation studies yielded values appropriate for obtaining ethanol by distillation for which a design is made for a pilot plant scale, resulting alcohol 60 or GL technical grade according to Cuban standards.

Keywords: syrups, liquefaction, saccharification, sorghum, alcohol.

Introducción	1
Capítulo I: Revisión Bibliográfica.	3
1.1 Sorgo.	3
1.2.1 Orígenes cultivo y usos del sorgo	4
1.2 Materias primas para la producción de alcohol etílico.	9
1.2.1 Cereales como sustratos en la producción de alcohol.	12
1.3 Almidón de Sorgo.	13
1.3.1 Hidrólisis ácida de almidón de sorgo.	14
1.3.2 Hidrólisis enzimática de almidón de sorgo.	15
1.3.3 Métodos actuales de almidón de sorgo.	15
1.4 Fermentación alcohólica.	16
1.4.1 Mecanismos físico - químico de la fermentación alcohólica.	17
1.5 Destilación.	21
1.5.1 Etanol.	23
1.5.1 Usos del etanol.	25
Conclusiones Parciales	26
Capítulo II: Análisis experimental.	28
2.1 Generalidades.	28
2.2 Caracterización de la UEB Glucosa Cienfuegos.	28
2.3 Variables y niveles utilizados en los experimentos.	30
2.3.1 Desarrollo Experimental.	30
2.3.2 Técnica general seguida para el desarrollo de los experimentos.	31
2.3.3 Mediciones realizadas a las muestras en todo el proceso.	33
Conclusiones Parciales.	40

Capítulo III: Análisis de los resultados.....	41
3.1 Generalidades.....	41
3.2 Resultados obtenidos.....	41
3.2.1 Comportamiento del brix en la etapa de licuefacción.....	41
3.2.2 Comportamiento del equivalente de dextrosa (ED).....	44
3.3 Resultados del comportamiento del Brix y los Equivalentes de Dextrosa.....	45
3.4 Resultados de la fermentación.....	47
Tabla 3.5 Comportamiento de la fermentación.....	47
3.5 Caracterización del alcohol obtenido.....	48
3.5.1 Análisis del alcohol producto.....	49
3.6 Diseño de la columna.....	49
Conclusiones Parciales.....	52
Conclusiones Generales.....	53
Recomendaciones.....	54
Referencias bibliográficas.....	55
Anexos.....	59

Introducción.

En las últimas décadas, el etanol ha alcanzado notable desarrollo como fuente alternativa de energía, teniendo un cambio sensible a partir de 1973 debido al aumento súbito de los precios del petróleo causados por la crisis energética, los métodos atractivos de fermentación para su obtención y las nuevas materias primas estudiadas para su producción con carácter renovable, donde continúa siendo la más atractiva la caña de azúcar.

Existe una tendencia a la búsqueda de nuevas materias primas para la producción de etanol, que no sean las tradicionales a partir de jugos de la caña de azúcar, de remolacha y de maíz; por el auge que está alcanzando el mismo, no solo en los usos tradicionales para la producción de bebidas, como disolvente orgánico y en las últimas décadas como combustible ecológico.

Actualmente la demanda de alcohol es superior a las posibilidades de suministro y la materia prima tradicionalmente empleada, la miel final de caña, cada día es más cotizada debido al incremento de las producciones biotecnológicas. Resultado de vital importancia es incrementar los niveles de producción a fin de satisfacer dicha demanda. Un aumento de la eficiencia global de producción de etanol tanto técnica como económica solo puede lograrse a través de las producciones integradas de azúcar-etanol o mediante la búsqueda de otras materias primas para su producción como biomásas celulósicas tales como plantas herbáceas y leñosas, residuos agrícolas y forestales, otros como el sorgo, papa, trigo, frutas, desechos vegetales y una gran parte de los residuos municipales e industriales.

El sorgo es un cereal que contiene muchas propiedades beneficiosas. Se ha demostrado nacional e internacionalmente, que su cultivo es económicamente rentable, basado en su bajo costo de producción, dada sus características de rusticidad, resistencia a la sequía, la realización de varias cosechas o cortes, así como la no utilización de productos químicos, en el control de elementos nocivos, con lo cual se protege el medio ambiente, que lo convierte en uno de los cereales más consumidos en las zonas subdesarrolladas, además de que está en gran desarrollo como cultivo en nuestro país.

El empleo de este como material amiláceo en la producción de bioetanol, si bien aparece reportado en la literatura, se publican escasos trabajos que permitan conocer de su

tecnología y por otro lado, sólo se reporta el empleo de la malta de cebada, hongos o enzimas industriales como agente sacarificante de los almidones, es por ello que en el presente trabajo se plantea como:

Problema Científico

El empleo de los jarabes de sorgo como sustratos amiláceos para la producción de etanol no está debidamente estudiado para su utilización a escala industrial.

Objetivo General

Evaluar los procesos tecnológicos para la obtención de jarabes glucosados de almidón de sorgo en la UEB Glucosa Cienfuegos como sustratos de la producción de etanol.

Objetivos Específicos

1. Realizar estudio bibliográfico acerca de los sustratos y vías de obtención de etanol de cereales.
2. Efectuar estudios de los procesos de hidrólisis y fermentación de almidones de sorgo.
3. Proponer diseño de columna de destilación para escalado de planta piloto.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica.

1.1 Sorgo.

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cultivos más antiguos y actualmente uno de los cereales de mayor importancia en el mundo **Serna- Saldívar, S. (2010)**. Es conocido con varios nombres: Mijo Grande, Maíz de Guinea en África Occidental, Kafir en África Austral, Duro en el Sudán, Mtama en África Oriental, Iowar en la India y Kaoliang en China **Duke, J. (1983)**.

De todos los cereales, el sorgo es el quinto más producido en el mundo con 56 millones de toneladas métricas en el 2009 **FAO STAT. (2011)**, siendo Estados Unidos, India, México y Nigeria los principales países productores. Estos países juntos aportan aproximadamente la mitad de la producción mundial.

Es muy eficiente en ambientes cálidos y con intensidad luminosa alta, como los prevalecientes en regiones semiáridas **Rooney, L., & Serna-Saldívar. (2000)**. De acuerdo a **J.N.R Taylor, & Schober T.J. (2006)**, es el mejor cereal en términos de resistencia a la sequía. Perteneció a las plantas C₄, las cuales forman compuestos de cuatro carbonos, haciéndola más eficiente en el uso del agua, bióxido de carbono y nutrientes. **Serna-Saldívar, S. (2010)** plantea que podrían ser las “plantas del futuro” debido a la cada vez más escasa agua disponible para irrigación y al ser más alto el nivel de CO₂ presente en el ambiente.

Existe un gran número de variedades, las cuales pueden ser clasificadas en tres grandes grupos: sorgo grano, forrajero y dulce. Recientemente se creó una nueva categoría de sorgo denominado de alta biomasa. Este sorgo, a diferencia del sorgo dulce y forrajero, está conceptualizado para producir altos rendimientos de biomasa fibrosa y ser principalmente canalizado a la producción de bioetanol de segunda generación. **Blade. (2010)**.

Cada uno de los grupos de sorgo se pueden a su vez dividir por características aún más específicas, de acuerdo al color y grosor, las cuales se encuentran controladas genéticamente y forman parte de la enorme diversidad de genotipos resguardados en la Colección Internacional de Sorgo en la India (World Sorghum Collection) con 37,904

accesiones de 91 países, la cual se estima que representa alrededor del 80 % de variabilidad presente en el sorgo **ICRISAT. (2011)**. La composición química general del grano de sorgo se muestra en la Fig. 1.

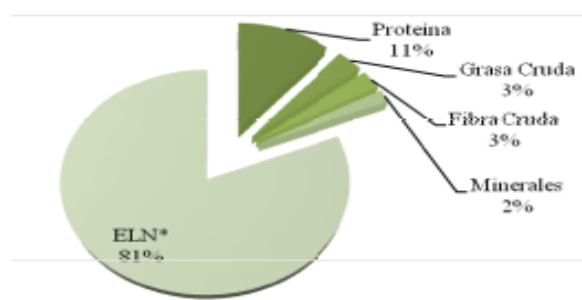


Fig. 1. Composición química promedio del grano de sorgo. Modificado de Serna-Saldivar (2010). *ELN = extracto libre de nitrógeno que da una indicación de los carbohidratos no fibrosos.

El grano de sorgo está constituido básicamente por proteínas, lípidos, carbohidratos, vitaminas, minerales y polifenoles, en porcentajes variables según genotipo y ambiente:

Almidón: el contenido medio de almidón es del 64,00 % siendo la temperatura de gelatinización entre 68 /78 °C. La relación de amilosa y amilopectina es de 20/80 respectivamente. Contiene pequeñas cantidades de mono, disacáridos y oligosacáridos.

Proteínas: comparado con otros cereales, el contenido proteico es menor y está entre 8-12 % , siendo deficiente en lisina, no posee gluten.

Lípidos: tiene un bajo contenido de lípidos 3,7 % , los ácidos grasos que aporta son poliinsaturados.

Vitaminas: contiene vitaminas del grupo B , en especial niacina.

Minerales: contiene zinc, calcio, magnesio, sodio y potasio. Mayor concentración zinc.

1.2.1 Orígenes cultivo y usos del sorgo .

El sorgo es un cultivo de condiciones precarias y de bajos insumos, lo que lo hace altamente rentable, con un impacto mínimo sobre el medio ambiente. **Saucedo, O . (2006)**.

Su origen ha sido discutido a través de los años, ya que los primeros informes muestran que

el sorgo existió en la India en el siglo I D.C. Esculturas que lo describen se hallaron en ruinas Sirias de 700 años A. C. Sin embargo, el sorgo quizás sea originario de África Central -Etiopía o Sudán-, pues es allí donde se encuentra la mayor variedad de tipos. Esta diversidad disminuye hacia el norte de África y Asia. Existen sin embargo, ciertas evidencias de que surgió en forma independiente tanto en África como en la India. Las especies silvestres encontradas en África Central y el Este no son aconsejables para usar en la agricultura actual, pero los fitogenetistas continúan buscándolos para crear nuevos germoplasmas, con el objetivo de incorporarlos dentro de las líneas genéticas actuales. Se introdujo como cultivo doméstico en Europa aproximadamente hacia el año 60 D.C pero nunca se extendió mucho en este continente. Las primeras semillas probablemente se llevaron al hemisferio Occidental en barcos de esclavos procedentes de África. En América llegó en el siglo XVIII y se considera que muchas especies distintas se cultivan de forma esporádica por toda la región. Los sorgos actuales son híbridos de esas introducciones o de mutantes que han aparecido. **Ozuna Y. (2008).**

Los primeros sorgos dejaban mucho que desear como cultivo granífero. Eran muy altos y, por lo tanto, susceptibles al vuelco y difíciles de cosechar, además maduraban muy tardíamente. Los tipos Kafir y Milo fueron seleccionados como productores de granos por los primeros colonos en las grandes planicies debido a que su tolerancia a la sequía es mayor que la de maíz.

Con el advenimiento de las máquinas cosechadoras se hicieron selecciones a partir de los materiales originales, obteniendo tipos más precoces y algo más bajos. Sin embargo, fue la combinación de distintos tipos de sorgo, iniciada por John B. Seiglinger de Oklahoma, lo que hizo posible cultivarlos utilizando la cosecha mecanizada.

El desarrollo posterior de los tipos precoces, así como de variedades resistentes a enfermedades e insectos, junto con el mejoramiento de otras prácticas de producción, estableció firmemente el sorgo granífero como un importante cultivo. Como resultado de las investigaciones de Quinby y Stephens de Texas, los híbridos se hicieron realidad hacia

1950 y actualmente los rendimientos alcanzan a más de 13,440 kg/ha en los sorgos graníferos híbridos.

La siembra de este cultivo ha traído consigo numerosas ventajas ya que se desarrolla bien en terrenos alcalinos, sobre todo las variedades azucaradas que exigen la presencia en el suelo de carbonato cálcico, lo que aumenta el contenido en sacarosa de tallos y hojas.

Su facultad de entrar en reposo vegetativo cuando falta el agua, hace que tolere mejor la sequía y el exceso de humedad que la mayoría de los cereales, creciendo bien bajo una amplia gama de condiciones en el suelo. **Saucedo, O. (2008).**

Responde favorablemente a la irrigación, lográndose excelentes resultados bajo riego. Requiere un mínimo de 250 mm durante su ciclo para llegar a producir grano y pueden obtenerse buenos rendimientos con 350 mm, dependiendo del ciclo del híbrido elegido y las condiciones ambientales. El consumo de nitrógeno del cultivo y la temporaria inmovilización del mismo provocada por el aporte de rastrojo, pierde toda importancia si en la rotación suceden al mismo, especies leguminosas.

Las posturas de alfalfa o cultivos como maní o soja son excelentes antecesoros para lograr mejores rendimientos. En la conservación de los suelos aporta materia orgánica, eficiencia en el uso y conservación del agua, mejora las condiciones físicas y químicas, disminuye los riesgos de la erosión, favorece a otros cultivos en las rotaciones. **Sánchez, M. (2003)**

A pesar de ser utilizado en la alimentación humana y animal de muchos países, su uso no se ha extendido en nuestro medio **Cabello, R., Alemán, L., & Canet, R. (2003), Aguirres Arenas, J. E. P., & Chanez Villasana, A. (2005).** El consumo mundial de sorgo para la alimentación humana se ha mantenido estancado durante los últimos 35 años en contraste con el consumo alimentario total de todos los cereales, que ha subido considerablemente a lo largo del mismo período. Este estancamiento se ha verificado pese a que bajo el aspecto nutricional el sorgo es competitivo en comparación con otros cereales, sobre todo al ser considerado en muchos países como un grano de categoría inferior y utilizarse de la misma manera que el maíz, ya que la composición es semejante, e incluso más rica en proteína, la

harina que se puede extraer es de sabor agradable de fácil digestión y muy semejante a la del trigo. En algunos países del mundo, el sorgo cocido toma un aspecto agradable, constituyendo así un alimento semejante al arroz. El consumo de sorgo per-cápita es elevado en países o en algunas regiones de esos países donde el clima no permite la producción económica de otros cereales y donde los ingresos per-cápita son relativamente bajos. **FAO. Roma (1995)**

Como alimento el valor nutritivo del grano de sorgo es alto. El grano tiene más proteína y grasa que el maíz, pero es más bajo en vitamina A. Para consumo humano es usado principalmente en África, en particular Etiopía y Somalia, y en la India y China, donde es ingrediente para la preparación de diversos platos tradicionales o de la gastronomía típica como tortillas, panes con y sin levadura, gachas y cuscús o se usa el grano entero y descascarado cocido en presentación semejante al arroz para acompañar con carne y verduras. Forma parte de la dieta básica de millones de personas en China y se utiliza en la preparación de alimentos balanceados. **Carter, P. (2009).**

La elaboración de cerveza representa un área de la industria de bebidas y alimentos donde el sorgo tiene una participación más activa. Las cervezas elaboradas en África empleando este cereal son más fuertes y más amargas debido a la alta concentración de antocianógenos que el sorgo confieren al producto final. También son más oscuras. Algunas variedades de sorgo de color más ligero serían altamente deseables para producir buenas cervezas en el mundo occidental. **Borneo, R. (2008).**

El sorgo se emplea en la alimentación animal como ingrediente principal de dietas para porcinos, aves y bovinos engordados en corral. Estados Unidos, México, Japón, Argentina, los territorios que fueron de la desaparecida Unión Soviética y Venezuela, son países que absorben conjuntamente más del 80 por ciento de la utilización mundial de sorgo en forma de pienso.

Este grano no solo se utiliza en la alimentación de los animales, sino también para fines industriales; en este aspecto tiene los mismos usos que el maíz. Se destaca en la producción de almidón, dextrosa, miel de dextrosa, aceites comestibles y bebidas; en la elaboración de

cervezas, bebidas locales y materias colorantes, cosméticos, papel, productos farmacéuticos, confituras, mezcla en café y cárnicos, entre otras. Además las panículas se emplean para la confección de escobas o se queman para obtener cenizas ricas en potasio. Es usado en la producción de biodiesel, siendo con el maíz, el trigo y la cebada de los mejores candidatos. De los tallos de esta planta se pueden obtener otros productos, como jarabes y azúcares. La producción de etanol constituye una fuente alternativa para la obtención de energía a partir de este cultivo. La harina de sorgo no tiene gluten, pero es más blanca y nutritiva que la del mijo; con ella se fabrican tortas y galletas, que sirven de base en la alimentación humana, ya sea sola o asociada al maíz o al mijo. En la India, China y algunas regiones de África, el sorgo constituye un elemento muy importante. El grano se come quebrándolo y cocinándolo en la misma forma que el arroz, o moliéndolo para obtener harina y elaborar pan sin levadura. **Altmann, R. (2004), Fernández, O. (2004).**

Todas estas aplicaciones del sorgo en la alimentación humana por sus importantes aportes nutricionales también tienen un papel fundamental como es el caso de adultos y niños con padecimiento celíaco ya que son elaborados con el fin de mejorar su dieta.

Otro uso comestible de la harina de sorgo granífero es en el procesamiento de la carne como aglutinante para embutidos, también se obtuvo dextrosa cristalina y jalea de glucosa comestible de productos de cereal molido seco. **Hahn, R. (2007).**

Puede dar una mayor estabilidad oxidativa debido a su composición de ácidos grasos. Representa una fuente nueva e inesperada de compuestos para combatir el cáncer, como los fenoles y taninos, con aceptable capacidad para eliminar los subproductos de los dañinos radicales libres.

El sorgo azucarado contiene en el tallo un jugo dulce, y se cultiva para obtener jarabes y como planta forrajera. Los llamados sorgos de hierba, como el sorgo sudanés y los híbridos de éste con el sorgo azucarado y con el de grano, se cultivan como plantas de forraje y pasto. El potencial del sorgo azucarado como cultivo para obtener energía produce hasta 7 000 litros de alcohol etílico por hectárea **TECNI- FENALCE. (2001).**

1.2 Materias primas para la producción de alcohol etílico.

Los sustratos son componentes del medio capaz de sustentar el crecimiento de microorganismos o la producción de metabolitos secundarios. La función del medio nutriente es idéntica a la de los medios de reacción química, es decir, proporcionar los componentes químicos necesarios y en las proporciones adecuadas para que la reacción ocurra. En adición, debe asegurar los componentes que garanticen el crecimiento de los microorganismos en todas sus facetas, en la forma más accesible, o sea, en medio líquido. Solo en casos especiales se usan medios con nutrientes sólidos o gaseosos. Además de los componentes esenciales, como fuente de carbono y de energía y nitrógeno, el medio debe contener otros muchos nutrientes que se requieren para la propagación de las células microbianas.

Para la producción de alcohol han sido utilizadas diferentes fuentes de carbono como materia prima (materiales biológicos), las cuales deben poder ser transformadas con facilidad en azúcar fermentable, almidón o celulosa.

Su uso práctico estará determinado por el rendimiento en alcohol, por su costo y el tipo de microorganismo que se utilice. **Abreu, R. (2005)**

La utilización de una u otra materia prima varía de un país a otro. Varios autores coincidieron en definir tres tipos de materias primas para la producción de etanol, las cuales son:

- Materiales portadores de azúcares simples (tales como en las cañas de azúcar y sorgo dulce, melazas, etc.) los cuales contienen carbohidratos como fuentes de azúcares.
- Almidones (tales como la yuca, maíz, grano de sorgo, papa, etc.) los cuales contienen carbohidratos en formas de almidón como fuente de azúcares.
- Celulosas (tales como la madera, residuos agrícolas, etc.) cuyos carbohidratos se encuentran en formas más complejas. **Blanco, G. (1982), Horri, J. (1979).**

Desde el punto de vista de la fermentación pueden agruparse:

a) Directamente Fermentables

b) Indirectamente Fermentables

De acuerdo con esas categorías, las primeras (directamente fermentables) no requieren de transformación previa en hidratos de carbono, como sucede con la sacarosa, la glucosa y la fructuosa. En el caso de las fuentes indirectamente fermentables sí es necesario realizar la conversión previa en carbohidratos, para someterlas luego a fermentación con el objetivo de que puedan ser asimiladas por la levadura alcohólica, tal es el caso de los almidones y la celulosa.

Las principales fuentes de carbohidratos de acuerdo con esos criterios son:

Directamente Fermentables.

Glucosa: Pulpa de Frutas.

Fructosa: Pulpa de Frutas.

Sacarosa: Caña de Azúcar, Remolacha Azucarera, Sorgo Sacarino (tallos).

Indirectamente Fermentables.

Almidón: Yuca, Maíz, Camote, Papa, Granos de Cereales, Tubérculos, Bananos.

Celulosa: Madera, Bagazo y Paja de Caña, Cáscaras de Maní, Tusa de Maíz, Paja de Arroz, Palma.

Aunque todas esas fuentes de carbohidratos puedan ser fermentadas, deben considerarse inicialmente aquellas que presentan alta concentración de ese componente en la materia prima, para lo cual debe a su vez presentar alta productividad agrícola (t/ha), rendimientos de alcohol y rentabilidad (\$/litro).

Tanto el almidón como la celulosa deben en primera instancia ser convertidos en azúcares fermentables antes de ser sometidos a la fermentación alcohólica; la transformación de la celulosa es en este caso un proceso químico mucho más difícil.

En la tabla 1.1 aparecen algunas de estas materias primas y sus rendimientos alcohólicos.

Tabla 1.1 Comparación del rendimiento alcohólico en diversos cultivos.

Cultivo	Rendimiento alcohólico (L/ton)	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	Productividad de alcohol (L/ha)
Caña	70	70	4900
Yuca	180	20	3600
Sorgo Azucarado	86	35	3010
Trigo	340	1,5	510
Trigo (alto rendimiento)	350	3,0	1050
Maíz	370	6,0	2220
Cebada	250	2,5	625
Papas	11	25	2750
Arroz	430	2,5	1075
Uvas	130	25	3250
Boniatos	125	15	1875

Abreu, R. (2005)

Los indicadores de la tabla 1.1 nos muestran como la mejor variedad de cultivo para la producción de alcohol es el sorgo azucarado, ayudado por otras particularidades de la planta.

Este cultivo requiere un tercio del agua que consume la caña de azúcar, y su período de crecimiento es lo suficientemente corto como para permitir cosecharlo dos veces al año. La facilidad de la forma en que se siembra puede presentar ventajas sobre otros cultivos, como la caña de azúcar, que se propaga a partir de estaquillas del tallo, el sorgo se siembran las semillas y basta con 4.5 kilogramos por hectárea, en comparación con las 4 500 a 6 000 estaquillas de caña de azúcar. El potencial del sorgo azucarado como cultivo para obtener energía, es muy alto ya que se puede llegar a producir hasta 6000 litros de alcohol etílico por hectárea en un año.

1.2.1 Cereales como sustratos en la producción de alcohol.

En nuestro ambiente la forma de consumo de los cereales es muy variada; bollería, pasteles, pastas, copos o cereales expandidos; pero también sirven como materia prima para industrias de bebidas alcohólicas como la cerveza o el whisky. <http://www.botanical-online.com/cereales.htm>.

El etanol producido a partir de cereales y frutas es quizás el producto más antiguo obtenido por la biotecnología tradicional, ya que el consumo y producción de bebidas alcohólicas data de hace más de 8 mil años **Serna-Saldívar, S. (2010).**

A continuación se muestra una tabla donde se puede comparar la composición del sorgo con otros cereales empleados en la producción de alcohol, donde los contenidos de las diferentes partes constitutivas son similares a los cereales más empleados para este proceso y donde el almidón que es la masa fundamental para la conversión a azúcares fermentables es superior al del maíz, que es el cereal más empleado.

Tabla 1.2 Composición de diferentes cereales.

Contenidos	Trigo	Maíz	Cebada	Avena	Sorgo
Humedad %	10,0	15,0	10,6	9,8	10,6
Almidón %	68,6	67,0	66,0	57,1	69,3
Proteína %	14,3	10,2	13,0	12,0	12,5
Grasa %	1,9	4,3	2,1	5,1	3,4
Fibra %	3,4	2,3	5,6	12,4	2,2
Cenizas %	1,8	1,2	2,7	3,6	2,0

Rodríguez, J.R. (2000)

El sorgo empleado para la producción de etanol se reporta a partir de la década de los 80 del siglo pasado, sin embargo no aparecen muchos datos de la tecnología empleada, ni de rendimientos como aparecen para el caso del maíz y la cebada.

Existen ya en el mundo plantas donde se produce alcohol a partir de sorgo. En Costa Rica se reporta el uso de sorgo granero en la producción de alcohol carburante y alimento animal. **Altman, R. (2004).**

En la zona de Capurro, Montevideo se encuentra instalada una planta que elabora algunas bebidas alcohólicas y recepción de aguardientes de caña y alcohol potable de la destilería de Paysandú para proceder a su corte, añejamiento y posterior comercialización, donde las principales materias primas son cereales tales como el maíz y sorgo, vinos y flemas de orujo **ANCAP.(2004).**

La cebada permite la elaboración de bebidas alcohólicas como la cerveza. Se obtiene la malta, que se usa como sustituto del café o en la producción del whisky o el vino de cerveza que se elabora hirviendo agua con cebada para producir agua de cebada que posteriormente se mezcla con vino y otros ingredientes (limón, azúcar y borraja).

1.3 Almidón de Sorgo.

Desde los años 50 el sorgo se ha visto como una alternativa para sustituir 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 SO_2 (dióxido de azufre) sin sacrificar rendimientos de almidón.

El método de obtención del almidón es la molienda húmeda, la cual es una técnica que permite separar algunas de las partes del grano en sus constituyentes químicos. Cuando se realiza, se obtienen almidones y otros productos (aceites, alimento para el ganado como piensos, harinas de gluten o tortas de germen y productos de la hidrólisis del almidón como la glucosa).

1.3.1 Hidrólisis ácida de almidón de sorgo.

Los cereales, hortalizas y otros materiales amiláceos se pueden sacarificar empleando ácidos como el HCl o el H_2SO_4 .

En general, los productos a convertir se maceran o muelen, se mezclan con una cantidad determinada de agua acidulada y se tratan con vapor a presión.

Tras la sacarificación los mostos se ajustan al pH conveniente para la fermentación, con NH_4OH , NaOH , Na_2CO_3 o CaCO_3 . El uso del NH_4OH es particularmente conveniente, puesto que el amoníaco puede actuar como fuente de nitrógeno para las levaduras. Si se emplea H_2SO_4 para la conversión del almidón y se neutraliza subsiguientemente con CaCO_3 , el CaSO_4 precipitado se puede separar del mosto por sedimentación y filtración o por simple filtración.

Se ha investigado la sacarificación de diversas masas de cereales con HCl . Los rendimientos máximos de etanol de los cereales sacarificados con ácidos, son, en promedio, algo menores que los que se obtienen en la sacarificación con malta.

1.3.2 Hidrólisis enzimática de almidón de sorgo.

Con la hidrólisis enzimática, como bien lo indica su nombre se realiza la conversión de los carbohidratos presentes en el material almidáceo a través de las enzimas. Durante el proceso de fabricación de alcohol o cerveza, se transforma el almidón que contienen los granos, en maltosa, glucosa, maltotriosa, etc., azúcares monosacáridos que luego serán eliminados durante el proceso de fermentación. Sin embargo, los granos como tal no contienen las enzimas necesarias que harían falta para poder llevar a cabo esta transformación del almidón, por lo que se deben tratar previamente y transformarlos en malta, para conseguir así una actividad enzimática adecuada que la lleve a cabo.

Como se aprecia en la bibliografía consultada se reportan diferentes métodos tanto para la hidrólisis con tratamiento ácido como por tratamiento enzimático, o combinados, que son las más efectivas parece indicar, en dependencia del cereal que se utilice, como materia prima, por tanto para el estudio de una materia prima nueva, poco reportada como el sorgo, hay que ir adaptando los métodos reportados a las condiciones de esta materia prima, por lo que se impone una caracterización de la misma.

1.3.3 Métodos actuales de almidón de sorgo.

Hay tres elementos importantes en el grano de cereal; el germen que es la parte viva que se desarrolla hasta formar una nueva planta, el endospermo, que contiene el almidón que da la energía necesaria para iniciar el crecimiento, y el pericarpio, que encierra el germen y el endospermo. La elaboración supone la separación parcial de estos elementos o su modificación, o ambas cosas. Todavía se suelen emplear varios métodos tradicionales de elaboración, especialmente en aquellas partes de los trópicos semiáridos donde se cultiva el sorgo fundamentalmente para su consumo por el hombre. En cierto grado, los métodos que se emplean se han desarrollado para conseguir que los alimentos tradicionales se adecuen a los gustos locales y son los idóneos en el ámbito familiar. Las técnicas tradicionales que se usan comúnmente comprenden el descortezamiento, el malteado, la fermentación, el tostado, el exfoliado y la molienda.

En la actualidad, no existe un método específico para aislamiento de almidón de sorgo. La metodología más empleada es la técnica de la molienda húmeda, aunque los procedimientos requieren largos períodos de tiempo (24-96 horas) para completar el proceso de remojo para aflojar el núcleo.

1.4 Fermentación alcohólica.

La fermentación alcohólica se puede considerar (desde una perspectiva humana) como un proceso bioquímico para la obtención de etanol, que por otras vías se ha obtenido gracias a procedimientos químicos industriales, como por ejemplo mediante la reacción de oxidación de eteno. La finalidad de la fermentación etílica (desde una perspectiva microbiana) es la obtención de energía para la supervivencia de los organismos unicelulares anaeróbicos. Las bebidas alcohólicas se producen a partir de diferentes sustratos, dependiendo de la región geográfica y sus riquezas. Las materias primas pueden ser azúcares simples como los presentes en el jugo de uva, o de alto peso molecular, como el almidón de los granos de cebada. Existen dos tipos de bebidas alcohólicas, las que se obtienen directamente por fermentación de los diferentes sustratos y las destiladas, producidas por destilación del producto de fermentación. El proceso principal por el cual se transforma el mosto en vino es la fermentación alcohólica, la cual consiste en la transformación de azúcares en alcohol etílico y anhídrido carbónico. La fermentación alcohólica es la base de la vinificación, sin embargo, su importancia no radica únicamente en la obtención de etanol a partir de los azúcares, sino que además durante el proceso fermentativo se van a formar una gran cantidad de productos secundarios que influyen en la calidad y tipicidad del vino.

La fermentación industrial típica es esencialmente un proceso que se produce en un recipiente llamado fermentador o en general, biorreactor, mediante el cual determinados sustratos que componen el medio de cultivo (levaduras) son transformadas mediante la reacción microbiana en metabolitos y biomasa. Estos contenedores son herméticos y permiten retirar mediante canalizaciones apropiadas el dióxido de carbono resultante. Durante el proceso los microorganismos van aumentando de concentración en el transcurso

de la reacción al mismo tiempo que el medio va modificando sus propiedades químicas y se forman productos nuevos como consecuencia de las reacciones anabólicas.

La fermentación alcohólica con la emisión de ciertas cantidades de etanol se produce de forma espontánea en la naturaleza siempre que se encuentre un azúcar y una atmósfera pobre de oxígeno, es por esta razón que ocurre espontáneamente en el interior de algunas frutas que se puede decir sufren un proceso de maduración anaeróbica.

Las fermentaciones específicas son manipuladas por el hombre con el objetivo de obtener el etanol para ciertas bebidas. Para ello se emplean principalmente los azúcares de las frutas, los cereales y de la leche.

Durante la fermentación alcohólica se obtienen los siguientes productos:

- ❖ 60 – 92 % alcohol.
- ❖ 1,5 - 1,0 % biomasa.
- ❖ 1,9 – 9 % glicerol.
- ❖ 0,4 – 1,5 % ácidos orgánicos.
- ❖ 0,1 – 0,7 % aceite de fusel.
- ❖ 0,02 – 30 % sin fermentar.

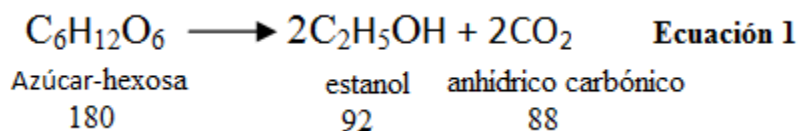
Para favorecer la producción de etanol se recomienda:

- ❖ Mantener la levadura activa evitando el stress.
- ❖ Tener una buena viabilidad.
- ❖ Identificar y controlar los factores estresantes inherentes al proceso (alcohol, ácido, temperatura, contaminación bacteriana).

1.4.1 Mecanismos físico - químico de la fermentación alcohólica.

En el proceso de obtención de etanol a partir de sustancias amiláceas una de las etapas de mayor importancia es la fermentación, precedida por la hidrólisis en estos casos donde se transformará el azúcar en alcohol, desprendiéndose dióxido de carbono, dependiendo la productividad del proceso de la eficiencia de dicha etapa. **De Lucas, J. (1994).**

El mecanismo de la fermentación fue cuantificado por primera vez por Gay Lussac, basándose en la estequiometría de la conversión de una hexosa en etanol y anhídrido carbónico, como lo muestra la ecuación (1).



Por consiguiente, 100 kg. de azúcar-hexosa = 51.1 kilos de etanol + 48.9 kg. de anhídrido carbónico. El rendimiento teórico de 51.1 % por peso se denomina coeficiente de Gay Lussac y representa el dato básico en eficiencia de conversión. La etapa siguiente en el entendimiento del mecanismo fue hecha por Luis Pasteur y su experimentación de hace cerca de un siglo representa un análisis decisivo en la ciencia microbiológica.

Una apariencia más grande de productos comparada con el azúcar original se debe al oxígeno (del aire) y a los nutrientes procedentes de una fuente externa que es necesaria para el crecimiento celular. Por tanto, el coeficiente de Pasteur de aproximadamente 94.7 % del rendimiento teórico °GL de (Gay Lussac) se considera la máxima posible producción de etanol que puede ser alcanzada por fermentación.

Sin embargo, el coeficiente de Pasteur puede ser sobrepasado por la reutilización de las levaduras, o cuando el crecimiento pueda ser llevado a cabo a partir de carbohidratos no naturalmente fermentables hasta etanol. En la práctica comercial, en la que no se utiliza un sustrato ideal, las eficiencias de conversión mantenidas durante un período razonable de tiempo se encuentran normalmente en la región del 90 % °GL. La concentración típica de productos por 100 g de glucosa fermentada a etanol mediante levaduras se presenta en la tabla 1.3.

Las propiedades específicas de las levaduras, como la tolerancia a altas concentraciones de alcohol y CO₂, el crecimiento rápido y la capacidad de fermentación reducen el número de microorganismos adecuados viables para la operación a escala industrial a un número pequeño.

Tabla 1.3 Concentraciones media de producto por 100 g de glucosa fermentada en un proceso de producción de etanol que utiliza levaduras.

Producto	Variación en la concentración (g por 100g de glucosa fermentada)
Etanol	45-49
Anhídrido carbónico	43-47
Glicerol	2-5
Succinato	0.5-1.5
Alcoholes superiores	0.2-0.6
Butilenglicol	0-1.4
Materia celular	0.7-1.7

Fabelo, J. (1999)

En la fermentación se emplean tanto procesos continuos como discontinuos y muchos de estos incorporan alguna forma de reciclaje. Además de reducir el tiempo de fermentación, el ciclo de reciclaje reduce la cantidad de sustrato que se convierte en materia celular. En los procesos discontinuos de Melle-Boinot que han encontrado amplia aplicación, las células recuperadas después de la fermentación son recicladas al fermentador en el que se ha añadido sustrato fresco. Operaciones con niveles de levadura por encima de 15 kg. de materia prima seca por m^3 son comunes, con tiempos de fermentación típicamente de entre 8-18 h, dependiendo de la cepa de levadura, la naturaleza del sustrato y la temperatura de operación. **Mathewson, S. (1980).**

Son normales productividades del orden de 10-20 kg. de etanol m^3/h (basado en un volumen operativo efectivo); frecuentemente se han descrito productividades mucho más altas en sistemas de laboratorio pero estas siempre están relacionadas con sustratos ideales y dejan de considerar muchos factores esenciales como la eficiente conversión del azúcar y la instalación barata y de confianza. En comparación, los métodos discontinuos convencionales alcanzan normalmente productividades de solamente 1.5-3 kg de etanol m^3/h . Sin embargo, una alta productividad sin relación con la eficiencia de rendimiento

expresada como coeficiente de Gay Lussac carece de significado. En términos económicos, una reducción en los residuos puede ser bastante más beneficiosa que un aumento en rapidez. El tiempo real exigido para fermentar una masa varía con el material que se está fermentando, el pH, la temperatura, y otros factores. Puede tardar de uno a cuatro días.

Para medir la eficiencia del proceso fermentativo se emplean varios indicadores, los mismos se muestran a continuación en las ecuaciones (2), (3), (4) y (5). **Fabelo, J. (1999).**

Rendimiento alcohol-sustrato

$$Y \frac{P}{S} \% = \frac{{}^0GL \times V}{100 \times \text{kg de almidón}} \text{ Ecuación 2}$$

Eficiencia de la fermentación

$$\text{Efic.Ferm} = \frac{\text{Alc. prod}}{\text{Alc. Teórico}} \times 100 \text{ Ecuación 3}$$

Productividad

$$\text{PROD} = \frac{GL \times 10}{\text{T tiempo de Ferm.}} \left(\frac{g}{L-h} \right) \text{ Ecuación 4}$$

Eficiencia de fermentación sobre la base de la planta

$$\text{Efic.Ferm.base - planta} = \frac{\text{Alc. prod}}{\text{Alc. Teórico Carb.usados}} \times 100 \text{ Ecuación 5}$$

Se sabe que la fermentación está completa o ha culminado cuando la masa deja de burbujear y la levadura se endurece yendo al fondo del fermentador. A estas alturas, el licor fermentado es conocido como fermento o cerveza y está listo para ser destilado.

1.5 Destilación.

En el proceso de obtención de alcohol etílico una de las operaciones unitarias más importantes es la operación de destilación, fundamentalmente para la separación de la inmensa cantidad de componentes que acompañan la mezcla obtenida en la fermentación y obtener una mezcla líquida lo más homogénea y con el mayor nivel de pureza posible.

Esta operación, dentro de las llamadas operaciones de separación tiene como objetivo general la separación de esos componentes, basado en las diferencias de sus presiones de vapor a una temperatura dada, o dicho en otras palabras, es la separación física de la mezcla en dos o más fracciones que tienen distintos puntos de ebullición o volatilidades diferentes. La separación en esta operación depende de la distribución de los componentes en las dos fases, lo que distribuidos en proporciones diferentes. La fase de vapor estará siempre enriquecida en él o los componentes de menor punto de ebullición o más volátiles, mientras que la fase líquida se enriquece o tiene en menor proporción a los menos volátiles. **Bitter, R. (1993), Kister, H. (1985), Ulrich, G. (1986), González E. (2006).**

Las ventajas del método de destilación son su simplicidad, baja inversión de capital y bajo potencial de riesgo. La separación directa, que es posible generalmente mediante este tipo de proceso, o sea la que permite obtener productos puros que no requieran un proceso posterior, ha hecho de la destilación una de las más importantes operaciones con transferencia de masa. Como aspecto negativo se señala su baja eficiencia termodinámica, siendo muy elevados sus costos por conceptos de energía necesaria. **Treybal. (1981) R. E.**

Esta operación puede conducirse:

- ❖ según la naturaleza del flujo de las fases: periódica o discontinua y continua.
- ❖ según el método de operación: Simple sin reflujo y con reflujo.
- ❖ según el método de contacto entre las fases: por etapas (columnas de platos) y por contacto continuo (columnas rellenas).
- ❖ según el número de componentes que contenga la mezcla entrante destilación binaria y destilación multicomponente.

La forma más generalizada de conducir esta operación en la industria es de forma continua, con reflujo para lograr el enriquecimiento de los productos en los diferentes componentes y

en cualquiera de las columnas mencionadas, aunque en esta operación para el proceso de producción de etanol se prefieren las columnas de platos y se consideran las mezclas binarias de etanol-agua por los bajos contenidos de los otros componentes que conforman la mezcla.

El punto de ebullición de las mezclas de agua y etanol en el equipo donde se realiza la concentración, se eleva a medida que el líquido se empobrece en alcohol. Los vapores que se producen por ebullición de estos líquidos, son más ricos en alcohol que la dilución de que proceden. En esto se basan los procedimientos de concentración y purificación, los cuales se efectúan normalmente y de forma tradicional mediante la utilización de columnas destiladoras y rectificadoras, casi siempre en número de tres como mínimo, hasta obtener una mezcla cercana al punto de azeotropía **Bitter, R. (1993)**.

En la destilación alcohólica el líquido que se destila es el vino fermentado, del cual generalmente se recogen tres destilados. El primero denominado alcoholes de cabeza, son compuestos de punto de ebullición bajos, tales como aldehídos y ésteres, a continuación los alcoholes de buen gusto, constituidos principalmente por alcohol etílico, al final obtenemos los alcoholes de punto de ebullición alto, constituidos en su mayoría por los alcoholes superiores, el alcohol amílico, propílico etc. **Posada, E. (1988); Blanco Carracedo, G. (1991)**.

En virtud de que el alcohol tiene una presión de vapor mayor que la del agua, si se evapora una mezcla hidroalcohólica llevándola a ebullición durante un tiempo determinado y posteriormente se recogen sus vapores condensados, se obtiene un líquido más rico en alcohol que el original, lo cual es una destilación simple. Cuando se repite este proceso para lograr el grado alcohólico deseado se tiene entonces una destilación fraccionada.

Cuando se desea obtener el etanol en una forma más concentrada que su punto de azeotropía, como es el alcohol absoluto se emplean otros métodos especiales de destilación como son la destilación azeotrópica y destilación extractiva como métodos tradicionales o la pervaporación y los tamices moleculares como métodos más modernos **González, E. (2006), Stefan Sommer. (2000)**.

Una columna de destilación en su forma más simple está formada generalmente por una concha o carcasa cilíndrica, un condensador y un rehervidor. En el interior de la carcasa se

suele disponer el relleno o los platos para lograr una mayor superficie de contacto entre las fases, permitiendo de esta forma que la separación se lleve a cabo de la mejor manera posible y se aumente la eficacia de la misma.

El rehervidor proporciona la energía necesaria para llevar a cabo la separación y formar la fase de vapor a la columna y el condensador enfría el vapor para condensarlo, y proporcionar la fase líquida, mientras que el acumulador de reflujo, almacena el vapor condensado para introducir una parte de éste de nuevo a la columna como reflujo.

La alimentación se suele introducir en una de las etapas intermedias y a partir de ahí se divide la columna en una sección de rectificación o enriquecimiento y en una sección de agotamiento.

1.5.1 Etanol.

El etanol, C_2H_5OH , usualmente llamado alcohol de etilo es un compuesto ternario, se compone de carbono, oxígeno, e hidrógeno y su composición centesimal es, 52.15 % de carbono, 34.33 % de oxígeno, y 13.12 % de hidrógeno, su grupo funcional es el hidroxilo unido directamente a un carbono. El mismo es el segundo miembro de la serie de alcoholes alifáticos, es considerado como uno de los más antiguos productos orgánicos conocidos.

Colectivo de autores. (2000).

En cuanto a sus características físicas puede ser descrito como un líquido incoloro, con un olor agradable, es completamente miscible en agua y solventes orgánicos, es muy higroscópico. Sus propiedades fundamentales son:

- ❖ Punto de ebullición ($^{\circ}C$) -----78.4.
- ❖ Densidad (g/cm^3) -----0.7851.
- ❖ Índice de refracción (N^{20}) -----1.3633.
- ❖ Viscosidad a 20 $^{\circ}C$ (Cp) -----0.0122.
- ❖ Tensión superficial (dyn/cm) -----22.3.
- ❖ Calor específico (cal/g $^{\circ}C$) -----0.581.
- ❖ Calor de evaporación (cal/g) ----- 204.

Este puede ser nombrado de diferentes formas en función de las características que definen su calidad y sus propiedades organolépticas, por consiguiente se denominará como: Alcohol Absoluto, Alcohol Extrafino, Alcohol Fino y Alcohol Técnico. En la tabla 1.4 aparece los valores máximos (*) o mínimos (**) de los parámetros que definen la calidad del etanol, de acuerdo al nivel de impurezas que este posee **Norma Cubana N 0 06-22. (1987) (Migoya, M. (2000).**

El etanol normalmente se comercializa de forma hidratada (de 95 a 96 % volumen) o anhidrido (mayor de 99 % volumen).

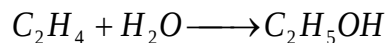
Este se puede obtener por dos vías:

- ❖ Síntesis.
- ❖ Fermentación.

Para usos industriales se prefiere el primer sistema, debido a la pureza, que puede alcanzar valores de 99,9 %.

Para otros usos (alimentación, perfumería, farmacia) tiene más ventajas el segundo. En su uso como carburante, que requiere una pureza de 99,5 %, se entra de lleno en el dominio de la fermentación.

En el primer caso se utilizan los más diversos procesos de síntesis, algunos de ellos ya muy conocidos, como la reacción de hidratación del etileno con vapor o como se le conoce industrialmente catálisis del etileno:



o mediante hidrocarbonilación de metanol o conversión de gas de síntesis. **Blancos Carracedo, G. (1991); ICIDCA. (1980), Celso Sturió, (1988).**

En el segundo método cualquier producto que contenga azúcares o hidratos de carbono fácilmente transformables en azúcar fermentable, almidón o celulosa por ejemplo, pueden servir de material de partida desde el punto de vista estrictamente teórico. Para que en la práctica se utilicen es imprescindible considerar su rendimiento y su costo.

Para obtener etanol libre de agua se aplica la destilación azeotrópica en una mezcla con benceno o ciclohexano. De estas mezclas se destila a temperaturas más bajas el azeótropo, formado por el disolvente auxiliar con el agua, mientras que el etanol se queda retenido. Otro método de purificación muy utilizado actualmente es la absorción física mediante tamices moleculares. A escala de laboratorio también se pueden utilizar desecantes como el magnesio, que reacciona con el agua formando hidrógeno y óxido de magnesio. (<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia29/HTML/articulo07.htm>).

Su toxicología puede afectar significativamente al sistema nervioso central, provocando estados de euforia, desinhibición, mareos, somnolencia, confusión, ilusiones (como ver doble o que todo se mueve de forma espontánea). Al mismo tiempo, baja los reflejos. Con concentraciones más altas ralentiza los movimientos, impide la coordinación correcta de los miembros, pérdida temporal de la visión, etc. En ciertos casos se produce un incremento en la irritabilidad del sujeto intoxicado como también en la agresividad; en otra cierta cantidad de individuos se ve afectada la zona que controla los impulsos, volviéndose impulsivamente descontrolados y frenéticos. Finalmente, conduce al coma y puede provocar muerte.

1.5.1 Usos del etanol.

Como combustible sirve de fuente de calor en estufas, su combustión es inodora y sin humo. Quemado en lámparas incandescentes brinda 3 veces y media más luz que el mismo volumen de petróleo quemado en una buena lámpara. En las mezclas con otros combustibles para producir energía. www.distillationgroup.com/distill Albornas. (2005).

Usos generales.

En el hogar para limpieza, lavado y otros muchos usos, en hospitales es necesario para lavados y antiséptico, en laboratorios químicos es la sustancia más utilizada después del agua, como materia prima en la industria química, en procesos de deshidratación en la producción de éter, etileno, dicloroetano. En la fabricación de ésteres (acetato de etilo). En los procesos de oxidación en la producción de ácido acético, vinagre, acetaldehído,

cloroformo. En el procesos de etilación en la producción de etilamina, dietilamina, acepio fenetidina. Reaccionando con halógenos formando bromuro de etilo, antipirina, ioduro de etilo. (Aguero Torres. (1988).

Como disolvente.

En la fabricación de tintes y colorantes para confitería. En los procesos de cristalización en la producción de dinitro benceno, ácido oxálico, acónito, etc. En la limpieza de piezas de cuchillería, joyería, relojería, tejidos, etc. En la fabricación de barnices a partir de gomas y resinas. Disolviendo el jabón para producir diferentes tipos de aceites. En la obtención de aceites esenciales. Para aclarar y diluir recubrimientos de aeroplano, esmaltes, pulimentos para metales, barnices para metal y madera.

Como se ha podido observar en lo expuesto anteriormente, los usos del etanol son disímiles y abarcan una gran cantidad de empleos, de ahí que su demanda sea actualmente muy alta, al igual que su costo de producción, lo que conlleva a un elevado precio del producto en la actualidad. El costo de producción se ve grandemente afectado por el costo de las materias primas que se utilizan en cada proceso de obtención de bioetanol en particular. Esto implica que reduciendo el costo de producción, pudiera ser más rentable este proceso y más competitivo el precio de su producto final. Campo, F. (2005).

Para el estudio de una materia prima nueva, poco reportada, para la producción de etanol, como el sorgo, hay que ir adaptando los métodos reportados en la literatura para otros cereales, a las condiciones de esta materia prima, por lo que se impone un estudio detallado de la misma.

Conclusiones Parciales

1. El sorgo como alimento humano, y como sustrato de producción de etanol ha sido poco estudiado, a pesar de las enormes ventajas que posee.

2. Los procesos industriales para la extracción de almidón de sorgo, son perfectamente adaptable, para la obtención de etanol.
3. Es imprescindible realizar la caracterización del etanol producido a partir de sorgo y los residuos del proceso.

Capítulo II: Análisis experimental.

2.1 Generalidades.

En la investigación se toman como punto de partida una caracterización general de la UEB Glucosa Cienfuegos, así como los resultados obtenidos en trabajos anteriores de donde se emplea el sorgo, por las ventajas que se señalan para este cultivo, además de que tiene características muy similares a las de otros cereales empleados para la producción de etanol.

La necesidad de buscar alternativas más avanzadas para enriquecer el proceso ha hecho que se utilicen nuevas materias prima para minimizar gastos y optimizar las producciones.

El diseño de experimento que se expone se sustenta en los estudios que actualmente se realizan sobre el sorgo partiendo de su similitud desde el punto de vista viscoamilográfico que permite la obtención de varios productos o surtidos como los jarabes glucosados.

El almidón de sorgo empleado para este estudio es el sorgo rojo CIAP 132-R con las características que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características del almidón de Sorgo Rojo CIAP 132-R.

Especificaciones	Valores
Proteínas	3,3 %
Cenizas	0,32 %
Humedad	11,43
Temperatura de Gelatinización	78 ° C

2.2 Caracterización de la UEB Glucosa Cienfuegos.

La UEB Glucosa Cienfuegos es parte integrante de la Empresa Labiofam Cienfuegos perteneciendo al Grupo Empresarial Labiofam subordinada al Ministerio de la Agricultura, se encuentra situada en la Zona Industrial # 2 del Reparto Pueblo Griffo, en la provincia de Cienfuegos, exactamente en la periferia noreste de la ciudad cabecera. Delimita al norte con

la Empresa DIVEP, al este con la Fábrica de hielo, Almacenes de Productos Frescos y con la Línea de Ron Havana Rum Liqueor (HRL), por el oeste con la Carpintería en Blanco y el Taller de Ómnibus Escolares y al sur con el asentamiento poblacional de Pueblo Griffo.

Esta entidad es única de su tipo en el país, realizó su puesta en marcha en 1981 después de un período inversionista que duró 6 años, con tecnología, ALFA-LAVAL de procedencia sueca y DDS Kroyer de Dinamarca.

Su capacidad nominal fue concebida para 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-LAVAL, 1980), cifras que no se han alcanzado en todo el decursar de la fábrica motivado por falta de importaciones de la materia prima fundamental, deterioro de los equipos, carencia de mantenimiento y piezas de repuesto, provocando un desaprovechamiento de la capacidad instalada que hoy solo se aprovecha un 38 por ciento.

El proceso tecnológico actual de la UEB Glucosa Cienfuegos lo conforman las plantas de las producciones fundamentales Almidón y Glucosa así como las instalaciones de producciones alternativas planta de mezclas secas, planta para producción de siropes para refrescos, planta de producción de concentrados proteicos para la alimentación animal, la producción de VIMANG.

Además cuenta 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.

2.3 Variables y niveles utilizados en los experimentos.

En este trabajo se recomienda realizar el procesos de producción de etanol a partir del jarabe glucosado obtenido de almidón de sorgo, desarrollando un diseño de experimento factorial compuesto en pantalla del tipo 2^k donde k sería el número de variables independientes para dos niveles, realizándose 4 experimentos con 4 réplicas, conformando un total de 8 experimentos.

2.3.1 Desarrollo Experimental.

El desarrollo experimental consta de un proceso fundamental

1. Producción de jarabes sorgo empleando la combinación de enzima (α -amilasa y amiloglucosidasa).

Las variables independientes tomada para los experimentos fueron la concentración de la enzima α -amilasa y la concentración de la enzima amiloglucosidasa. En la tabla 2.2 se muestran las variables con sus respectivos niveles.

Tabla 2.2 Variables y niveles a estudiar en el diseño.

Variables	Niveles
Concentración de α -amilasa (X_1)	0,06-0,16 % p/p
Concentración de amiloglucosidasa (X_2)	0,375 – 0,5 % p/p

Los niveles de la variable concentración de α -amilasa y la concentración de amiloglucosidasa fueron seleccionados sobre la base de los mejores resultados obtenidos, en los trabajos precedentes y teniendo en cuenta experimentos reportados en la literatura para otros cereales. Los experimentos programados, así como los niveles de trabajo aparecen reflejados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Programación del diseño de experimento.

Experimento	Concentración de α -amilasa (mL)	Concentración de amiloglucosidasa (mL)
1 (+ -)	0,29	0,68
2 (- -)	0,11	0,68
3 (- +)	0,11	0,91
4 (+ +)	0,29	0,91
5 (+ -)	0,29	0,68
6 (- -)	0,11	0,68
7 (- +)	0,11	0,91
8 (+ +)	0,29	0,91

2.3.2 Técnica general seguida para el desarrollo de los experimentos.

La metodología seguida para el desarrollo de los experimentos consta de las siguientes etapas:

1. Hidrólisis del almidón enzimática
2. Sacarificación enzimática.
3. Filtración con carbón activado.
4. Fermentación.
5. Filtración.
6. Destilación.

Hidrólisis del almidón enzimática: Basados en las condiciones operacionales de la UEB Glucosa Cienfuegos en aras de optimizar el proceso fue necesario hacerle una modificación a la metodología descrita por Serna para la obtención de jarabes glucosados, quedando conformado el siguiente procedimiento:

Se realiza una suspensión de almidón 35 % almidón –agua destilada. Esta lechada formada se le ajusta pH hasta 6.5 debido a que el rango de acción de la enzima α -amilasa es de 5,5 a 7 **Novozymes. (2007)** y se pone en una plancha con un agitador mecánico hasta que

alcance la temperatura de gelatinización para añadir la dosis de enzima α -amilasa que corresponda en dependencia de la matriz experimental. Posteriormente se mantiene en agitación constante dejando actuar la enzima durante 2 h a 90 °C. Luego de pasado el tiempo establecido, se deja enfriar la suspensión hasta temperatura ambiente con el fin de ajustar el pH a 4.5 **Paredes Ruíz, R., & Chumbe Vásquez, J. (2001)** para la segunda enzima, pues este es el pH óptimo de la amiloglucosidasa y para inactivar la α -amilasa que es term oestable.

Sacarificación enzimática: Después de ajustado el pH al almidón licuado se calienta la muestra hasta 60 °C, para añadir la dosis de enzima amiloglucosidasa (AMG) en dependencia de la matriz experimental. Seguidamente se colocaran en las zarandas durante 48 horas a una temperatura de 60 °C. Culminado el tiempo, se somete la suspensión a un calentamiento hasta 95 °C durante 5 minutos para inactivar la enzima.

Filtración con carbón activado: Una vez inactivada culmina la etapa de obtención de los jarabes, por lo que se hace necesario llevar a cabo una etapa de filtración para separar el material sólido (residuo) del líquido (jarabe). Esta etapa se realiza al vacío, permitiendo obtener de esta manera el sustrato que será fermentado para obtener los alcoholes.

Fermentación: Los jarabes obtenidos en la anterior etapa poseen Brix y Azúcares reductores totales (ART) superiores a los establecidos para la *Saccharomyces Cerevisiae* que es la levadura que se utiliza, por lo que se realiza un balance de ART y se determina el volumen de agua a añadir para obtener ART de 150 g/L y entre 15 y 22 Brix. Luego de realizada la dilución se procede a activar la levadura (3 g/L). Después de activada se añade a la dilución al igual que el Sulfato de Amonio (3 g/L), Fosfato de Amonio (3 g/L) y Urea (3 g/L), siendo estos los nutrientes empleados, Posteriormente se aérea durante 30 minutos buscando el e crecimiento de las levaduras, pasado el tiempo de aereación se tapan los fermentadores y se deja hasta que culmine la fermentación, se asume como criterio de culminación cuando el Brix se mantiene constante durante dos lecturas seguidas. Ya concluida esta etapa y los azúcares fermentables transformados en alcohol etílico y dióxido de carbono, se mide el grado alcohólico de cada fermento por el método picnométrico y se analiza si es necesario realizar la destilación.

Filtración o Colado: EL fermento se filtra separando el licor claro y residuo sólido. El residuo sólido puede ser utilizado como alimento animal si se somete a un proceso de lavado y secado debido a su pH ácido y así se elimina un residual sólido que contaminaría el medio ambiente. (Alemán, 2007). Al fermento o batición se le determina el grado alcohólico de acuerdo a la muestra establecida para ello.

Destilación: El alcohol producido en la fermentación es separado del mosto por destilación fraccionada en una columna de cristal de 8 platos con cazoletas de burbujeo. Se obtiene el destilado, al cual se le mide el grado alcohólico por picnometría o alcoholímetro y por cromatografía se determina la calidad del alcohol obtenido en una primera y única destilación.

2.3.3 Mediciones realizadas a las muestras en todo el proceso.

Determinación de la proteína bruta (Método de Kjeldahl). NC.86-05:1984. Cereales.

Harinas. Determinación de proteínas.

El método consiste en mineralizar la muestra con ácido sulfúrico concentrado y alcalinizar con hidróxido de sodio. El amoníaco liberado es arrastrado por destilación y recogido sobre ácido bórico. La posterior valoración con HCl permite el cálculo de la cantidad inicialmente presente de proteína en la muestra.

Procedimiento:

Digestión.

1. Pesar alrededor de un gramo de muestra perfectamente molida y homogenizada en un papel exento de nitrógeno e introducirlo en un tubo de digestión.
2. Añadir al tubo con muestra 10 g de catalizador kjeldahl, 25 mL de ácido sulfúrico al 96 % (d=1,84), y algunos gránulo de piedra pómez tratada.
3. Colocar los tubos de digestión con las muestras en Bloc-digestión con el colector de humos funcionando.
4. Realizar la digestión a una temperatura entre 350-420 °C y un tiempo que puede variar entre 1 y 2 horas.

Al finalizar el líquido obtenido es de un color verde transparente.

1. Dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente.
2. Evitar la precipitación agitando de vez en cuando.
3. Dosificar lentamente 50 mL de agua destilada en cada tubo de muestra
4. Dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente.
5. Si cristaliza agitar o calentar ligeramente.

Destilación.

1. Dosificar 50 mL de ácido bórico en un erlenmeyer, y algunas gotas de indicador mixto.
Colocar el erlenmeyer en la alargadera del refrigerante teniendo la precaución de que esta quede sumergida dentro del ácido bórico.
2. Situados el tubo de muestra y el erlenmeyer con el ácido bórico, dosificar unos 50 mL de hidróxido de sodio.
3. Iniciar la destilación.

La destilación debe prolongarse el suficiente tiempo para que se destilen un mínimo de 150 mL, aproximadamente de 5 a 10 minutos.

Ensayo en blanco.

Después de la destilación de una muestra realizar un ensayo en blanco, aplicando el método descrito, pero utilizando 5 mL de agua destilada.

Valoración.

Valorar con ácido clorhídrico 0,25 N el destilado obtenido, hasta que la solución retorne de verde a violeta. Calcular la cantidad de nitrógeno detectado.

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{1,4 \times N \times (V_1 - V_0)}{P}$$

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrógeno} \times F$$

siendo:

P: Peso en gramo de la muestra.

V₁: Volumen de H₂SO₄ consumido en la valoración de la muestra (mL).

N: Normalidad del H₂SO₄.

V₀: Volumen consumido en la valoración del blanco (mL).

F: Factor de conversión para pasar de contenido en nitrógeno a contenido en proteínas.

Para la proteína bruta acostumbra a usarse un valor de 6,25. Para mayor exactitud,

distinguiendo la calidad de proteína según la naturaleza de la muestra, pueden emplearse otros factores de conversión.

Determinación de la ceniza NC-ISO 2171:2001. Cereales y productos de cereales molidos.

Este método se utiliza para la determinación del contenido de ceniza en el almidón nativo y modificado. Las pequeñas cantidades de sales inorgánicas que contiene el almidón se determinan gravimétricamente, luego de incinerar la parte orgánica en una mufla, previa carbonización.

Procedimiento:

Se pesan (5 ± 0.1) g de la muestra en un crisol previamente tratado a 525°C durante 20 minutos enfriado y tarado.

Se calienta suavemente en una plancha eléctrica o un mechero de gas hasta que esté completamente carbonizado. Se coloca en una mufla a 525°C hasta que esté libre de carbón (2 horas suelen ser suficientes). Se enfría en desecadora y se pesa.

Expresión de los resultados.

Método para los cálculos: El contenido de ceniza se calcula por la fórmula siguiente:

$$\% \text{ ceniza} = \frac{C \times 100}{M}$$

donde:

C - masa de la ceniza, en g.

M - masa de la muestra, en g.

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

Determinación de pH. Método potenciométrico.

El término pH es la forma de expresar la mayor o menor acidez de una solución en función de la actividad de los iones hidrógeno. La determinación se basa en medir el cambio en la concentración hidrogeniónica mediante una variación en el voltaje detectado por los electrodos del equipo. (M A C U, 1986).

Expresión de resultados

La lectura anotada es el valor del pH de la muestra.

Determinación del Brix (Método refractómetro).

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

Expresión de resultados

La lectura anotada es el valor que corresponde al °Bx de la muestra, expresado en porcentaje.

Determinación de la temperatura de Gelatinización. Técnica usada (Grace, 1977).

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría; cuando se calientan en solución a temperaturas altas alcanzan una temperatura específica en la cual se inicia el hinchamiento de los gránulos. Esta temperatura es llamada temperatura de gelatinización.

Procedimiento:

1. Pesar 10 g de almidón en base seca (bs) disolver en agua destilada y completar a 100 mL.
2. Calentar agua en un vaso de precipitado de 250 mL a 85 °C.
3. Tomar 50 mL de la suspensión en un vaso de precipitado de 100 mL.
4. Introducir el vaso de precipitado con la muestra en el agua a 85 °C.
5. Agitar con el termómetro constantemente la suspensión de almidón hasta que se forma una pasta y la temperatura permanezca estable por unos segundos.
6. Leer la temperatura de gelatinización.

Cálculos e interpretación de los resultados

La temperatura de gelatinización se lee directamente en el termómetro.

Determinación de la humedad.

La determinación de la humedad por este método se basa en la diferencia de pesadas después de estar expuesta la muestra a la deshidratación. (MACU, 1986).

Procedimiento:

1. Se pesan aproximadamente 5 g de la muestra que se va a analizar y se introducen en una mufla previamente tarada.
2. Se coloca la mufla en una estufa a 100 ° C durante 1 h.
3. Se coloca la muestra en la desecadora para que se enfríe, y luego se pesa.
4. El procedimiento se repite hasta que el peso sea constante.

Cada determinación de humedad debe realizarse con una réplica.

Expresión de los resultados:

$$\text{Humedad (\%)} = (A - B)/C$$

donde:

A – Peso de la mufla, más el peso de la muestra.

B – Peso constante

C – Peso de la muestra exactamente.

Determinación de Azúcares Reductores Totales (ART en g/L).

Este se basa en la relación lineal que existe entre la absorbancia y la concentración según la ley de Lambert - Beer, siendo la absorbancia medida proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra.

Procedimiento:

1. Se añade a un tubo de ensayo 1 mL del sobrenadante centrifugado y se añaden 2 mL de la solución de reactivo 3,5 – Dinitrosalicílico mezclando bien.
2. Se colocan los tubos de ensayo en baño de agua hirviendo durante 5 minutos, extrayéndose posteriormente y dejándose enfriar hasta temperatura ambiente.

3. Se enrasan todos los tubos de ensayo hasta 10 mL con agua destilada y se lee en el espectrofotocolorímetro a 540 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria. (Herrera A. 1989).

Determinación del equivalente de dextrosa (ED).

Este método se utiliza para la determinación del contenido de azúcares reductores de todos los hidrolizados de almidón y siropes de glucosa preparados mediante conversión ácida, enzimática o la combinación de ambas.

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 del punto final esperado (determinado mediante una valoración preliminar). Se calienta sobre un mechero de gas (ó plancha 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 añade 2 gotas de indicador de azul de metileno y 2 de la solución de muestra. Se espera 5 segundos y se observa una 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.

Método para los cálculos.

El contenido de azúcares reductores de las muestras expresadas como dextrosa se calcula por la fórmula siguiente:

$$\% \text{ azúcares reductores} = \frac{25 \times f}{m \times a}$$

donde:

f : factor (**A n e x o A**)

m : masa de la muestra inicial pesada, en g.

a : volumen de muestra diluida consumido en la valoración, en mL.

El equivalente de dextrosa se calcula por la fórmula siguiente:

$$ED = \frac{250 \times f \times 10}{m \times a \times s}$$

donde:

f: factor

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.

Los resultados se dan aproximados hasta la centésima.

Determinación de la concentración de Etanol.

Método Picnométrico

Se toman 100 mL de fermento, más 50 mL de agua destilada y ambos son adicionados a un balón, se calienta y se hace que la mezcla ebulle, a través de un condensador, se recoge un volumen de 50 mL de destilado en un matraz de 100 mL y se enrasa con agua destilada. Con este producto se procede a realizar los análisis de medición del grado alcohólico que consiste en realizar un conjunto de pesadas al picnómetro, vacío, con agua destilada y hervida, y con el destilado. Entonces a través de la fórmula se obtiene la gravedad específica y con ese valor se va a la tabla Determinación del alcohol en volumen y en peso por ciento según K. W indish, a 15 °C donde se obtiene el valor del grado °GL. (**A n e x o B**).

Todo el procedimiento se realizó a 15 °C pues a esa temperatura es a la que viene referido el valor del grado alcohólico.

$$S = 0.99913(C - A) / (B - A)$$

S - gravedad relativa

A - peso del picnómetro vacío

B - peso del picnómetro con el agua destilada y hervida

C - peso del picnómetro con el destilado

Conclusiones Parciales.

1. El diseño de experimento seleccionado, fija los parámetros de concentración de las enzimas como variables independientes, a partir de resultados de su estudio en otros cereales.
2. Las técnicas analíticas empleadas permiten realizar una caracterización de los sustratos y el producto final.
3. La metodología aplicada para el desarrollo de los experimentos en 4 etapas, constituye la base para el escalado industrial del proceso de obtención de etanol a partir del sorgo.
4. Las propiedades viscoamilográficas del almidón de sorgo, permiten la aplicación de técnicas analíticas de determinación de parámetros similares a otros cereales como el maíz, cebada y otros.
5. El estudio detallado del sorgo como materia prima para la producción de etanol, permitirá la adecuación de método y etapas del proceso productivo para la optimización de costo y rendimientos.
6. El diseño de columnas de destilación para pequeños volúmenes, mediante la ecuación de HETP, es satisfactorio utilizando altas relaciones de reflujo.

Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.1 Generalidades.

En este capítulo se muestran los resultados de la etapa de obtención de jarabes glucosados, destacando en ello la influencia de las concentraciones de las enzimas sobre el comportamiento del Brix (Bx), y el Equivalente de Dextrosa (ED).

Auxiliándose del software Statgraphic se realiza el análisis de la interacción entre las diferentes variables y se obtienen los modelos que describen el comportamiento en esta etapa.

3.2 Resultados obtenidos.

3.2.1 Comportamiento del brix en la etapa de licuefacción.

Los resultados de los brix durante la etapa de licuefacción se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Determinaciones de Bx en la etapa de licuefacción.

Etapa de licuefacción		
Experimentos	Brix 1 h	Brix 2 h
1	27,3	37,7
2	25,9	29,6
3	25	27,6
4	27,7	36,8
5	27,5	36,9
6	25,4	33,1
7	25,5	29,5
8	29,4	35

Los valores medios del brix para esta etapa reportado por la literatura oscilan entre 31-35 ° Bx, se observa que los experimentos 6 y 8 son los más cercanos a los estándares reportados, no siendo así para los restantes.

Las condiciones en las que se realizan los experimentos en el laboratorio propician que ocurra evaporación, lo que trae como consecuencia que haya mayor concentración de

sólidos, desvariando de esta manera el brix. A escala industrial esto no sucede producto a que la lechada de almidón entra al convertidor con un Baumé de 17-17,5 que equivale a 31-35 ° Bx y se mantiene constante las dos horas del proceso.

En la misma secuencia del proceso en la que se desarrollan los experimentos que coinciden con las etapas del flujo tecnológico se muestran los resultados en la etapa de sacarificación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Determinaciones de Bx en la etapa de sacarificación.

Etapa de sacarificación		
Experimentos	Brix 24 h	Brix 48 h
1	48,5	52
2	44,1	46,4
3	44	48
4	47,5	53,8
5	48	52,1
6	44,3	46,8
7	44,5	49
8	47,8	54

Los experimentos 1, 4, 5, 8 muestran valores similares a los reportados, aún cuando las condiciones en el laboratorio no replican totalmente las condiciones de agitación y régimen isotérmico del proceso industrial.

Los jarabes obtenidos además de cumplir todas las especificaciones desde el punto de vista visual muestran valores de brix en el intervalo óptimo para su utilización en próximas etapas, ya sea evaporación o fermentación según se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Determinaciones de Bx en los jarabes.

Jarabes	
Experimentos	Brix
1	50,5
2	43,5
3	45,6
4	51,6
5	50,9
6	44,3
7	47,4
8	52,8

En la figura 3.1 y 3.2 se evidencian el comportamiento del Brix para cada experimento, analizándose las etapas de licuefacción, sacarificación y jarabe.

El experimento 4 con 0,29 mL de Termamyl y 0,91 mL de AMG muestra los mejores resultados corroborado por la réplica, experimento 8, aspecto que define estas variables como las óptimas para su aplicación en el escalado industrial.

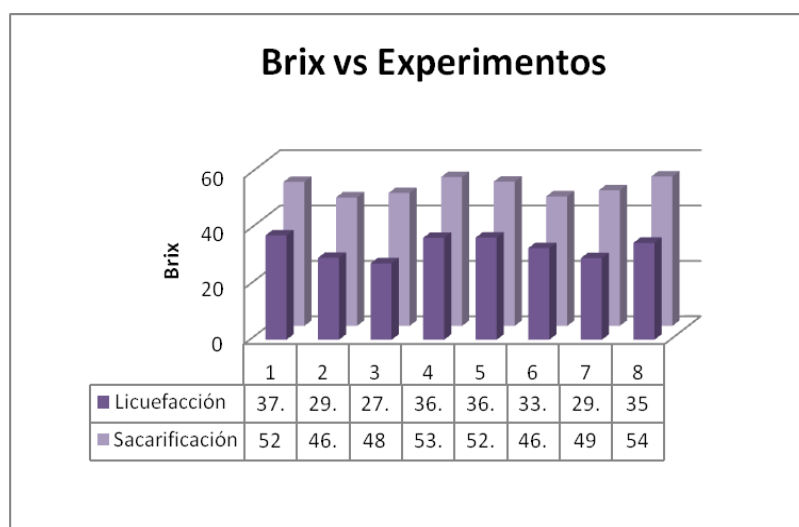


Fig. 3.1 Comportamiento del Brix en las etapas de licuefacción y sacarificación.

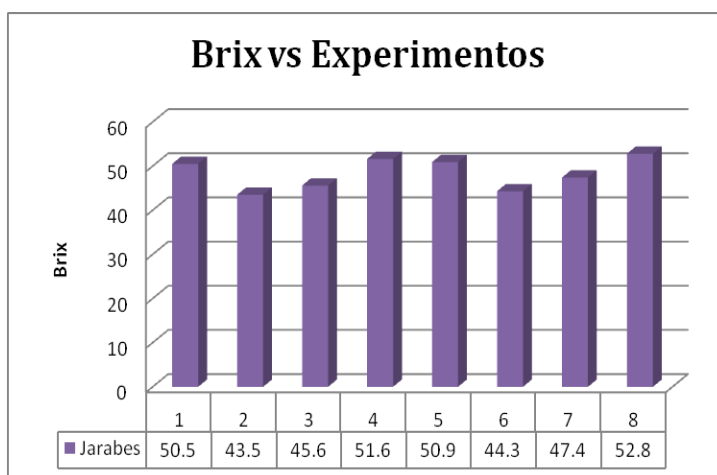


Fig. 3.2 Com portam iento del Brix en el jarabe obtenido .

Como se puede apreciar ambas figuras reflejan el comportamiento del brix en cada etapa donde se observa el aumento del brix de la etapa de licuefacción a la de sacarificación, diferente a lo que sucede en el proceso industrial que para una misma etapa el brix se mantiene constante.

3.2.2 Com portam iento del equivalente de dextrosa (ED).

Unos de los parámetros fundamentales que indican la capacidad fermentecibles del jarabe es el ED cuyos resultados se encuentran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Determinación de Equivalente de Dextrosa.

Experimentos	Peso de la muestra (g)	mL consumidos	Factor	Brix	ED
1	4,6	17,7	120,2	50,5	73,1
2	4,5	19,8	120,3	43,5	77,6
3	4,6	17,9	120,2	45,6	80,0
4	4,6	17,7	120,2	51,6	71,52
5	4,6	17,5	120,2	50,9	73,34
6	4,4	19,6	120,3	44,3	78,72
7	4,5	17,6	120,2	47,4	80,05
8	4,5	16,8	120,2	52,8	75,28

Los valores obtenidos en los experimentos son inferiores a los valores patrones de los procesos industriales motivados por las iguales condiciones del laboratorio explicadas en las etapas de licuefacción y sacarificación. Los experimentos 3 y 7 muestran resultados semejantes al proceso industrial.

3.3 Resultados del comportamiento del Brix y los Equivalentes de Dextrosa.

Al realizar el procesamiento estadístico de las variables respuesta brix y equivalentes de dextrosa de los jarabes obtenidos según el software STATGRAPHICS CENTURION XVII puede apreciarse un comportamiento similar en estas variables:

El modelo de regresión obtenido para el brix como variable respuesta fue:

$$\text{Brix} = 48,2238 + 3,02375 * \text{Termamil} + 1,12625 * \text{AMG} - 0,17375 * \text{Termamil} * \text{AMG}$$

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 97,3479 \%$

Según la tabla ANOVA del anexo y el diagrama de Pareto puede apreciarse que ambas variables independientes tienen un efecto significativo positivo en el brix, en cambio sus interacciones influyen negativamente, debido a que en todo el proceso estas actúan por separado.

En la aplicabilidad de este modelo para el escalado industrial es importante definir el tiempo de trabajo de la alfamilsa y su concentración al igual que la AMG pues determinan de manera significativa los valores e intervalo óptimo para el brix.

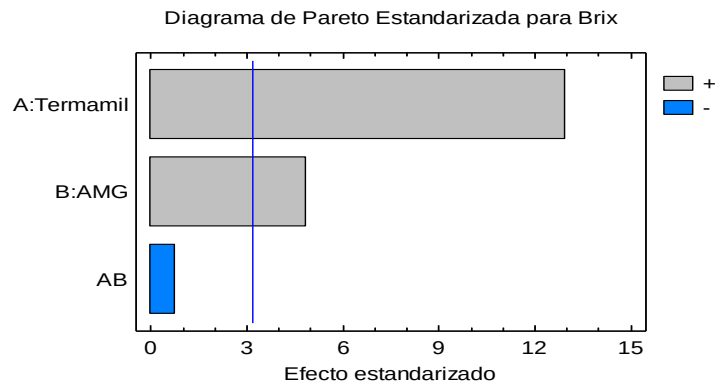


Fig.3.2 Com portamiento del Brix obtenido en el análisis estadístico .

El m odelo de regresión obtenido para ED como variable respuesta fue:

$$ED = 76.2025 - 2.895 * Termamil + 0.52 * AMG - 0.4225 * Termamil * AMG$$

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 94.415 \%$

Aunque mantiene una correlación alta, que corrobora la utilización de cada enzima según la etapa que se define, la alfaamilasa en una primera etapa para la ruptura de la cadena larga del almidón y por ende con una acción positiva sobre el ED dentro de rangos permisibles hasta su inhabilitación que comienza a influir la AMG en la etapa de sacarificación con incrementos progresivos del ED.

A nivel de proceso es necesario entonces optimizar los valores de las concentraciones para mantener los valores operacionales que el proceso demanda.

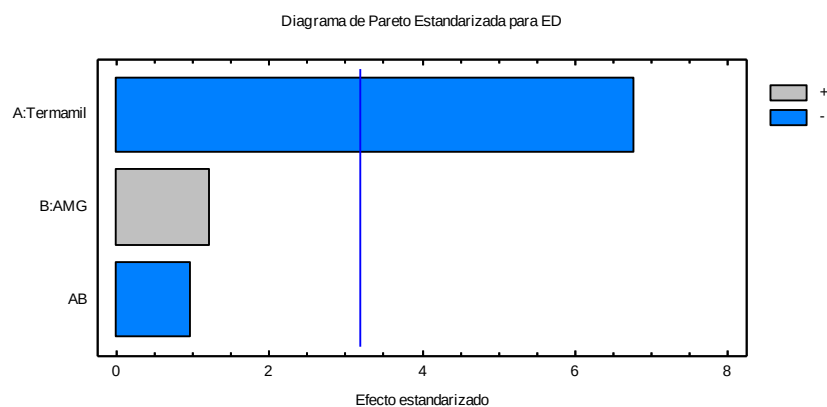


Fig.3.3 Comportamiento del ED obtenido en el análisis estadístico .

3.4 Resultados de la fermentación .

Tabla 3.5 Comportamiento de la fermentación .

Exp .	Jarabes		Fermentación				
	Brix	ED	Brix final	Tiempo de fermento	° G L	Rendimiento (L /kg)	Productividad (g/L -h)
1	50,5	73,08	8	32	5,20	0,027	1,63
2	43,5	77,59	8,2	32	5,0	0,021	1,56
3	45,6	80,03	7,3	32	6,34	0,032	1,98
4	51,6	71,53	7,6	32	8,81	0,042	2,75
5	50,9	73,34	8,8	32	8,6	0,047	2,68
6	44,3	78,72	7,0	32	6,79	0,038	2,12
7	47,4	80,5	7,5	32	10,09	0,039	3,15
8	52,8	75,28	6,4	32	7,65	0,035	2,39

3.5 Caracterización del alcohol obtenido.

Se tomó la mejor muestra en grado alcohólico 10,09 y se destiló en una columna de cristal de laboratorio de 8 platos con cazoleta de burbujeo. Se extrajo una muestra de cabeza de 15 mL y el alcohol centro en dos fracciones. La muestra de cabeza y la primera de alcohol destilado fueron caracterizadas por cromatografía de gases en el Centro de Investigaciones Agropecuarias de la UCLV obteniéndose los resultados de la tabla 3.6.

El equipo para el análisis del alcohol fue un cromatógrafo de gases PYE-Serie 304, equipado de una columna empacada de vidrio de 2,5 m x 5 mm d.i con Carbopack B.

Los reactivos estándares usados son de alta pureza superior al 99 %, de firmas productoras con Sistemas de Gestión de la Calidad acreditados según las normas ISO, con certificado de pureza y libre de otras impurezas de congéneres del etanol, comprobada en una prueba de dilución analizada por cromatografía de gases en similares condiciones de análisis que para las muestras. El agua usada cumple con la NC-ISO-3696:2003.

La metodología empleada para la caracterización de las muestras es la empleada para la determinación de la calidad de las bebidas alcohólicas destiladas, aguardientes y alcohol etílico por cromatografía gaseosa. NC 508:2007

Tabla 3.6 Caracterización del alcohol por cromatografía de gases.

Muestra	° G L	Acetaldehído m g/100 m l a a	Acet Etilo m g/100 m l a a	Metanol m g/100 m l a a	Propanol m g/100 m l a a	Isoamílico m g/100 m l a a
Cabezas	80	309	50,8	5,6	0	0
La destilada	60	51,56	94,92	3,69	2,95	0

3.5.1 Análisis del alcohol producto.

En los análisis cromatográficos realizados a la muestra se observa que los componentes encontrados coinciden con los que acompañan al etanol obtenido a partir de malazas es decir acetaldehídos, acetato de etilo, propanol, isoamílico y metanol en menor cuantía. En las cabezas separadas a la muestra aparecen en mayor proporción el acetaldehído y el acetato de etilo, lo cual es lógico debido a que son las impurezas más volátiles que acompañan al etanol, sin embargo el acetato de etilo aparece en mayor cuantía en el alcohol centro lo que indica que no se extrajo la suficiente proporción de cabezas debido a que este es una impureza presente en los alcoholes obtenidos por fermentación, que es inversamente proporcional al grado alcohólico y se dificulta más su extracción, al igual que el metanol que es una impureza híbrida, que se comporta como cabeza o cola y es directamente proporcional al grado alcohólico. Por otro lado el grado alcohólico obtenido de 60 ° G L se corresponde con una flem a o aguardiente, sin rectificar, solamente destilado, sin embargo por las impurezas se corresponde con un alcohol técnico. Según **(Anexo E)**.

3.6 Diseño de la columna.

Para el alcohol técnico obtenido se propone el diseño de una columna de destilación para pequeña escala. El método de cálculo usado para determinar la altura de empaque (Z) que debía llevar la columna para lograr la separación deseada fue el de HEPT, para ello es necesario determinar el número de platos teóricos (N_{pt}), para la separación fijada por cualesquiera de los métodos de la literatura, para con este número y la HEPT determinar Z por:

$$Z = N_{pt} * HEPT$$

Para el cálculo del HEPT se utilizó una expresión como una aproximación o prueba, ya que es utilizada para el estudio de mezclas de hidrocarburos y para la evaluación de columnas. La expresión fue llevada al sistema internacional y quedó como:

$$HETP = \frac{d_t}{M_G} \times \left[44,94 \times (G')^{0,2} + \frac{2,96 \times 10^{-3} \times G'}{HP \times D \times \left(\frac{L'}{\mu_L} \right)^{0,75} \times \left(\frac{\mu_L}{\rho \times D} \right)^{0,5}} \right]$$

donde:

HEPT: altura teórica del plato (m).

dt: diámetro de la torre en m.

M: masa molecular del vapor y el líquido.

G' y L': Flujos mássicos superficiales del vapor y el líquido, en kg/s-m².

P: presión absoluta en atm.

D: difusividad, m²/s.

μ: Viscosidad del líquido, en Pa*s.

ρL: densidad del líquido, kg/m³.

HP: 16 (α * mL / ρL).

α: volatilidad relativa de la solución

Para un fermento de 7 °GL (5 %) obtenidos en el laboratorio, y considerando líquido saturado se tiene para el diseño de la columna los siguientes resultados.

Para una caldera de 20 L y asumiendo 4 horas de trabajo se tiene:

- ❖ Flujo de alimentación: 5 L/h.
- ❖ Composición alimentación vapor: 5 % masa de etanol (7 °GL de líquido de acuerdo a resultados experimentales).
- ❖ Composición en destilado: 65 % masa de etanol (70 °GL).
- ❖ Relación de reflujo: 11. Se necesitan altas relaciones de reflujo para obtener altos grados alcohólicos de un fermento.
- ❖ Diámetro de la columna: 0,0508 m (2 pulg.).
- ❖ Empaque anillos cerámicos: 9.5 x 9.5 x 1,5 mm (3/8 pulg.).

Se determinó el número de etapas teóricas por el método de McCabe-Thiele ($m=3$ etapas) y en la zona de agotamiento según la ecuación, donde m es el calculado por McCabe.

$$N_p - m = \frac{\log \left[\frac{x_m - x_w / \alpha (1 - \bar{A}) + \bar{A}}{x_w - x_w / \alpha} \right]}{\log 1/\bar{A}}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.7:

Tabla 3.7 Resultados obtenidos para el diseño.

Parámetros	Sección	Sección
	enriquecedora	empobrecedora
Flujo líquido kg/sm^2	3,9	8,76
Flujo vapor kg/sm^2	0,75	0,54
Área (m^2)	0,0014	0,0014
Volatilidad relativa	2,33	11,6
HEPT (m)	0,30	0,22
Número etapas teóricas	5,75	3,75
Altura de empaque (m)	1,22	0,40

De esta forma resultó una columna de dos m de altura de empaque. El equipo completo consta de la columna empacada con anillos rasching de porcelana, pudiéndose alimentar en dos formas: líquido y vapor, dos calderas de 20 L de capacidad cada una; de estas, una de ellas es la propia de la columna y la otra es la empleada para alimentación cuando se hace en forma de vapor. Un condensador, un sistema de reflujo por gravedad, accesorios (válvulas, termómetros y resistencias eléctricas de 2,5 kW).

Conclusiones Parciales

1-Los valores de Brix obtenidos en las etapas de licuefacción y sacarificación refieren cifras semejantes a los parámetros del proceso industrial.

2-La ecuación de la HEPT se ajusta perfectamente para el diseño de columnas de pequeños y medianos flujos de alimentación.

3-Los modelos obtenidos para cada una de las variables describen con alta linealidad la interacción con los factores con coeficientes de determinación superiores a 90 %.

Conclusiones Generales.

- 1- El proceso de producción de la UEB Glucosa permite la obtención de jarabes glucosados a partir de sorgo, sin significativos cambios tecnológicos corroborando lo reportado en la bibliografía que aporta el estudio.
- 2- Los jarabes obtenidos de sorgo presentan valores similares a los jarabes nativos de maíz lo cual permite aplicar procesos industriales de obtención idénticos.
- 3- Los modelos estadísticos describen con alta linealidad la interacción de las variables y los factores seleccionados en el diseño.
- 4- La ecuación de la HEPT se ajusta perfectamente para el diseño de columnas de pequeños y medianos flujos de alimentación.
- 4- El alcohol obtenido responde a especificaciones de grado técnico según norma establecida.

Recomendaciones.

- 1- Realizar evaluación técnico –económico para el escalado industrial de la producción de jarabes glucosados del sorgo.
- 2- Proponer el escalado a nivel de planta piloto para evaluar la obtención de etanol a partir del sorgo.

Referencias bibliográficas.

- Abreu, R. (2005). *Alcohol orgánico: otra alternativa de diversificación*.
- Agüero Torres. (1988). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. México D.F.
- Aguirres Arenas, J. E. P..., & Chanez Villasana, A. (2005). *Evaluación de los patrones alimentarios y la nutrición en cuatro comunidades rurales*.
- Albernas, C. (2005). *Diseño de equipos para el proceso de reformatión de bioetanol con vapor*.
- Alemán, L. (2007). *Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo*.
- Altmann, R. (2004). *Uso de sorgo ganadero en la producción de alcohol carburante y alimento natural en Costa Rica*.
- ANCAP. (2004). *Destilería Capuro*.
- Bitter, R. (1993). "Distillation some new data", *Chemical Engineering*.
- Blade. (2010). Managing High-Biomass Sorghum as a dedicated an Energy Crop. Retrieved from <http://www.bladeenergy.com/Bladepdf/BladeSorghumMgmtGuide2010.pdf>
- Blanco Carracedo, G. (1991). *La producción de alcohol a partir de la industria azucarera y sus posibilidades*. La Habana: Científico-Técnico ICIDCA.
- Blanco, G. (1982). *La producción de alcohol a partir de la industria azucarera y sus posibilidades*.
- Blancos Carracedos, G. (1991). *La producción de alcohol a partir de la industria azucarera y sus posibilidades*. La Habana: Científico-Técnico ICIDCA.
- Borneo, R. (2008). *Química, ciencia y tecnología de los cereales. Cereales en el mundo: Sorgo*.

Cabello, R., Alemán, L., & Canet, R. (2003). *Guía técnica para la producción de sorgo* (*Sorghum bicolor* L. Moench). Ministerio de la Agricultura. La Habana.

Campo, F. (2005). *Evaluación técnico-económica de la introducción de biocarburantes en España a partir de cultivos energéticos*. Pontificios Comillas, Madrid.

Carter, P. (2009). *Sorghum Milo*. UTC. Madison, ED T.

Celso Sturion, a. (1988). *Tecnología de la producción de alcohol por fermentación*. México. D.F.

Cereales como sustrato en la producción de alcohol. (n.d.). Retrieved from <http://www.botanical-online.com/cereales.tm>

Colectivo de autores. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*.

De Lucas, J. (1994). *Fermentación Alcohólicas*.

Duke, J. (1983). *Sorghum X almum Parodi*. *Handbook of energy crops*. Retrieved from <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke-energy/Sorghum-Xalmum.htm>

Fabelo, J. (1999). *Estudio de etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos*. UCLV, Santa Clara.

FAO. Roma. (1995). El sorgo y el mijo en la nutrición humana. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/t0818s/t0818s00.htm>

FAOSTAT. (2011). Retrieved from <http://faostat.fao.org/>

Fernández, O. (2004). *Alcohol a partir de sorgo dulce. Sacarificación y fermentación*. Comunicaciones científicas y tecnológicas.

Ficha internacional de seguridad química del etanol. (n.d.). Retrieved from <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Fi>

- cheros/0a100/nspn0044.pdfetanol
- González, E. (2006). *Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria de procesos químicos, fermentativos y farmacéuticos*. Cuba.
- HANH, R. (2007). *Usos del sorgo granífero en la alimentación humana y otros*.
- Herrera, A. (1989). *Manual de prácticas de laboratorio de microbiología actual*.
- Horri, J. (1979). *Biotechnology Bioengineering Symposium Biotechnology*.
- ICIDCA. (1980). *Los derivados de la caña de azúcar* (ICIDCA.). La Habana: Científico-Técnico ICIDCA.
- ICRISAT Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. (2015, February 20). Retrieved February 20, 2015, from <http://www.icrisat.org/crop-sorghumgenebank.htm>
- J.N.R Taylor, & Schober T.J. (2006). *Novel food and non food uses for sorghum and millets*. *Journal for Cereal Science* 44.
- Kister, H. (1985). "Complex Multicomponent Distillation". *Chemical Engineering*.
- MACU. (1986). *Producción de alcohol y levaduras*.
- Mathewson, S. (1980). *The Manual of the Home and Farm Production of Alcohol Fuel* J.A.
- Migoya, M. (2000). *Estudio preliminar de factibilidad técnica y económica para la instalación de una mini destilería de alcohol D en el CAI Panchito Gómez Toro utilizando jugo de los filtros*.
- Norma Cubana N006-22. (1987).
- Obtención de etanol. (n.d.). Retrieved from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energía/Energía29/TML/artículo07.htm>
- Ozuna, Y. (2008). *Obtención de maltina a partir de sorgo malteado para niños Celíacos*.

Posada, E. (n.d.). *Consideraciones técnicas en las destilerías*. 1988: Tecnología Azucarera.

Rodríguez, J. R. (2000). *Alternativas para la obtención de alcohol de alta pureza*. UCLV.

Cuba.

Rooney, L., & Serna -Saldívar. (2000). *Sorghum. Handbook of Cereal Science and*

Technology. New York, USA.

Sánchez, M. (2003). *Cultivo de sorgo granífero*.

Saucedo, O. (2006). *Utilización del Sorgo (Sorghum bicolor, Moench) en la alimentación de los niños celíacos*.

Saucedo, O. (2008). *Empleo del sorgo en la alimentación animal y humana*. Universidad Central de las Villas. Villa Clara, Cuba.

Serna -Saldívar, S. (2010). *Cereales Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. CRC Press. Boca Raton, FL.

Stefan Sommer. (n.d.). *"Pervaporation: Simulation of Hybrid Processes" IVT RWTH Aachen*. 2000.

The distillation Group Inc. (2002). Retrieved from www.distillationgroup.com/distill.atm
Distillation

TECNI – FENALCE. (2001). EL SORGO DULCE EN CHINA. *Número 10 Año 3 Agosto de 2001*.

Treybal. (n.d.). *Mass Transfer Operations (Revolutionary)*.

Ulrich, G. (1986). *Procesos de ingeniería química*. Revolucionaria.

A n e x o s .

A n e x o A

M é t o d o E y n o n y L a n e . T a b l a d e d e x t r o s a .

mL de solución de azúcar requerido.	Factor de dextrosa. *		mL de solución de azúcar requerido.	Factor de dextrosa. *	
	Para 10 mL de solución de Fehling.	Para 25 mL de solución de Fehling.		Para 10 mL de solución de Fehling.	Para 25 mL de solución de Fehling.
15	49,1	120,2	23	49,7	120,4
16	49,2	120,2	24	49,8	120,5
17	49,3	120,2	25	49,8	120,5
18	49,3	120,2	26	49,9	120,6
19	49,4	120,3	27	49,9	120,6
20	49,5	120,3	28	50,0	120,7
21	49,5	120,3	29	50,0	120,7
22	49,6	120,4	30	50,1	120,8

* m g d e d e x t r o s a c o r r e s p o n d i e n t e a 10 y 25 m L r e s p e c t i v a m e n t e d e s o l u c i ó n F e h l i n g .

Tabla para determinación del grado alcohólico por picnometría.

TABLE 1. (Continued)

[illegible]

Anexo C : Análisis estadístico del diseño experimental del jarabe. (⁰Bx).

Análisis de Varianza para Brix

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Termamil	73,1445	1	73,1445	167,82	0,0010
B:AMG	10,1475	1	10,1475	23,28	0,0170
AB	0,241513	1	0,241513	0,55	0,5106
bloques	1,43651	1	1,43651	3,30	0,1671
Error total	1,30754	3	0,435846		
Total (corr.)	86,2776	7			

R-cuadrada = 98,4845 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,3479 por ciento

Error estándar del est. = 0,660186

Error absoluto medio = 0,32625

Estadístico Durbin-Watson = 2,58299 (P=0,6867)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,30359

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Brix en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98,4845 % de la variabilidad en Brix. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 97,3479 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,660186. El error medio absoluto (MAE) de 0,32625 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

Anexo D: Análisis estadístico del diseño experimental del jarabe. (ED).

Análisis de Varianza para ED

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Termamil	67.0482	1	67.0482	45.97	0.0066
B:AMG	2.1632	1	2.1632	1.48	0.3103
AB	1.42805	1	1.42805	0.98	0.3954
bloques	3.3282	1	3.3282	2.28	0.2281
Error total	4.3755	3	1.4585		
Total (corr.)	78.3432	7			

R-cuadrada = 94.415 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 90.2262 por ciento

Error estándar del est. = 1.20768

Error absoluto medio = 0.615

Estadístico Durbin-Watson = 1.98519 (P=0.4055)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.16621

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de ED en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0 % .

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 94.415 % de la variabilidad en ED. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 90.2262 % . El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1.20768. El error medio absoluto (MAE) de 0.615 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0 % , no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0 % .

Anexo E: Normas de calidad para los alcoholes.

Especificaciones	Alcohol superfino	Alcohol fino		Alcohol técnico		Alcohol Absoluto
		A	B	A	B	
Grado alcohólico a 15°C (°GL)	96.3 **	96	95.5	95	93	99.5-99.8
Tiempo de permanganato (min)	40 **	25	25	5	2	-
Acidez total (mg ácido acético/L a. a)	15 *	16	30	30	22	-
Aldehídos (mg acetaldehído/L a. a)	8*	12	20	30	-	-
Alcoholes superiores (mg/l a. a)	4*	55	40	150	-	-
ésteres totales (mg acetato de etilo/l a. a)	20*	35	35	100	60.85	-