UNIVERSIDAD CENRAL" MARTA ABREU"DE LAS VILLAS

FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA

Trabajo de Diploma

Título: Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo"

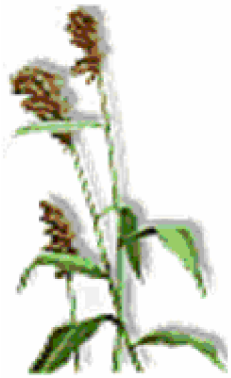
Autor: Lenier Alemán Hurtado.
Tutoras: Dra. Irenia Gallardo Aguilar.
Ing. Leyanis Rodríguez Rodríguez.

2006-2007
"Año 49 de la Revolución"

PENSAMIENTO

¨ 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. ¨

Albert Einstein.



DEDICATORIA

Todo mi esfuerzo y dedicación en este trabajo es insignificante, comparado con el amor y cariño que me han brindado, pero aún así se los dedico:

A mis padres,
a mi hermano y
a mi novia.

AGRADECIMIENTOS

♥*A Irenia Gallardo Aguiar, por su dedicación, y brindarme en todo momento su amistad.*

♥*A mis padres, por la educación, por el amor que me brindan siempre, gracias por existir.*

♥*A mi hermano, por ser mi inspiración, mi ejemplo a seguir, gracias por poner siempre el listón bien alto.*

♥*A Yanelis, por soportar mis caprichos y brindarme su amor.*

♥*A toda mi familia, por apoyarme y confiar en mi.*

♥*A mis compañeros y amigos, en especial a Feyt, Elvis, Alex y a las muchachitas, por haber compartido juntos tan buenos momentos.*

♥*A Gretel y Yoan por haber compartido tantos trabajos voluntarios.*

♥*A Luís por su tiempo.*

♥*A Reina y Oscar por el asesoramiento en la estadística.*

♥*A Margarita, por ser un eslabón importante en la realización de este trabajo.*

♥*A Eduardo, Zamora y Randy, por su ayuda desinteresada.*

♥*A Nelsy, Iraida e Inocencia, por su colaboración.*

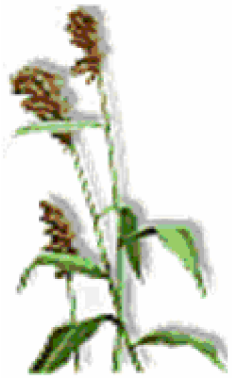
♥*A Mollineda y los compañeros del CIAP.*

♥*A todos las personas que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo y a mi formación profesional.*

♥*A la Revolución, por haberme dado la posibilidad de llegar hasta aquí.*

A todos

muchas gracias.

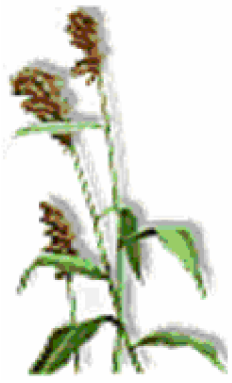


RESUMEN

Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio preliminar para la obtención de alcohol a partir de sorgo, como respuesta a la necesidad de estudiar otras materias primas para la obtención de alcohol por vía fermentativa, ya que se evidencia una crisis en el sector de los combustibles fósiles, por la incertidumbre de su desaparición. Para ello primeramente se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre el proceso de obtención de alcohol por vía fermentativa para las diferentes materias primas utilizadas, prestando particular atención a los cereales y a los métodos de sacarificación de los mismos. En la realización de los experimentos se utilizó la variedad de sorgo UDG-110, el cual fue germinado, para obtener una malta a partir del propio grano, para usarse como agente sacarifricante en la hidrólisis combinada con tratamiento ácido y enzimático. Durante el estudio de la hidrólisis se tuvieron en cuenta diferentes variables como son: la concentración de ácido, concentración de malta y presión. Los resultados reportaron que la variable independiente de mayor significación en todas las variables respuesta medidas, es la concentración de ácido, seguida por la concentración de la malta en la mezcla y con menor significación la parte de tratamiento a presión. Los resultados finales obtenidos son comparables con los obtenidos con malta de cebada de cervecería empleada como muestra patrón.

Palabras Claves: Sacarificación, hidrólisis, sorgo, alcohol, material amiláceo.

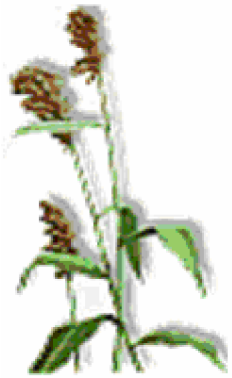


ABSTRACT

Abstract

Presently work was carried out a preliminary study for the obtaining of alcohol starting from sorghum, as answer to the necessity of studying other matters cousins for the obtaining of alcohol for fermentation route, since a crisis is evidenced in the sector of the fossil fuels, for the uncertainty of its disappearance. For it firstly was carried out a bibliographical revision on the process of obtaining of alcohol for fermentation route for the different matters used cousins, paying particular attention to the cereals and the methods of saccharification of the same ones. In the realization of the experiments the sorghum variety UDG-110 was used, which was germinated, to obtain a malt starting from the own grain, to be used as enzymatic agent in the hydrolysis combined with sour and enzymatic treatment. During the study of the hydrolysis they were kept in mind different variables as they are: the acid concentration, concentration of malt and pressure. The results reported that the independent variable of more significance in all the measured variable answer is the acid concentration, continued by the concentration of the malt in the mixture and with smaller significance the treatment part to pressure. The obtained final results are comparable with those obtained with malt of brewery barley used as sample pattern.

Key words: Saccharification, hydrolysis, sorghum, alcohol, amylases raw.



INDICE

Índice

	Pág.
Introducción	1
Capítulo I Revisión bibliográfica.	4
1.1 Alcohol Generalidades.	4
1.1.2 Usos de alcohol.	4
1.2 Sorgo	6
1.2.1 Origen histórico del sorgo	6
1.2.2 Ventajas de la siembra de sorgo	7
1.2.3 Usos del sorgo	8
1.3 Materias primas para la producción de alcohol.	9
1.4 Conversión de sustancias amiláceas.	12
1.5 Métodos para la sacarificación de materiales amiláceos.	14
1.5.1 Sacarificación ácida.	14
1.5.2 Sacarificación Enzimática.	15
1.5.3 Combinaciones.	21
1.6 Mecanismo de conversión en la fermentación.	23
1.7 Destilación.	26
1.6 Biocarburantes actuales.	27
1.6.1 Panorama Mundial.	29
1.6.2 Ventajas e inconvenientes del bioetanol como biocarburante.	32
1.6.3 Ventajas que proporciona en las gasolinas la adición de etanol.	34
1.7 Residuos de la producción de etanol.	35
1.7 DDGS (Destiler Drain Grain Soluble).	36
Conclusiones parciales.	
Capítulo II: Desarrollo experimental para la obtención de alcohol a partir de sorgo.	40
2.1. Influencia de diferentes variables en la hidrólisis del sorgo.	40
2.2. Técnica general seguida para el desarrollo de los experimentos.	42
2.3 Desarrollo de los experimentos.	44
2.4 Resultados.	50
2.5 Malteado del sorgo.	53
2.6 Obtención del residuo sólido o DDG.	57
2.7 Análisis de resultados.	59
Conclusiones parciales.	
Capítulo III: Diseño de una planta piloto para la producción de licores de sorgo como uno de los sustratos en la obtención de bioetanol.	66
3.1 Esquema tecnológico del proceso y funciones de las diferentes etapas.	66
3.1.1 Introducción	66
3.1.2 Esquema del proceso	67
3.1.3 Funciones y objetivos de las diferentes etapas	68
3.2 Selección de los equipos	71
3.3 Balances de materiales	73
3.3.1 Datos usados en los balances	73
3.3.2 Balances de masa	74

3.3.3 Balances de energía 75
3.4 Dimensionamiento de los equipos 79
3.5 Análisis económico 87
3.6 Análisis de resultados. 93
Conclusiones parciales 94
Conclusiones generales 95
Recomendaciones 96
Bibliografía 97
Anexos 100

INTRODUCCION

Introducción

No resulta nada difícil predecir que el petróleo siendo un combustible fósil de amplio uso y por tanto, potencialmente agotable, podría disminuir significativamente en mediano o largo plazo sus reservas naturales, debido al notable y significativo incremento del consumo mundial, elevando con ello sus precios a niveles imprevisibles como viene aconteciendo en los actuales momentos. Es por otra parte de todos conocido, el efectivo instrumento de dominio y manipulación política que significa el petróleo para las naciones que lo poseen, lo cual representa un peligro real y permanente de crisis que no debe obviarse y mucho menos descuidarse o desatenderse.

Esto reviste en la actualidad una gran preocupación e incertidumbre por las consecuencias desastrosas que generaría para muchos países subdesarrollados, que no disponen de reservas naturales propias de combustibles fósiles. Esta situación debe, por su importancia, trascendencia y actualidad, despertar el interés y la atención de los países potencialmente afectados, entre ellos los que no disponen de este recurso natural, sometiendo a revisión y estudio los recursos disponibles y sus necesidades energéticas.

Si el siglo XX se caracterizó por la importancia del sector petroquímico, en el siglo XXI, al producirse un declive de dicho sector, la biotecnología industrial y energética, se situará en una posición preferente como suministradora de productos industriales y energéticos rentables, novedosos y menos contaminantes, procurando diagnosticar y principalmente evaluar la viabilidad real de aprovechamiento de las fuentes alternativas de energía renovables en el plano nacional.

La biotecnología industrial es la aplicación de las herramientas de la biotecnología para buscar sustitutos naturales a los procesos químicos que se utilizan en la producción industrial. La utilización de biocatalizadores y microorganismos seleccionados o modificados genéticamente, permite optimizar los procesos productivos, disminuir el consumo energético y de materias primas, así como una menor producción de residuos.

La biotecnología energética se caracteriza por la utilización de las cosechas agrícolas y sus residuos como fuente de energía. El almidón de maíz, trigo u otros granos, los aceites vegetales de la colza o el girasol o los residuos urbanos, son utilizados para la producción de biocombustibles, mediante la acción de enzimas que aceleran los procesos y la fermentación por microorganismos.

La biotecnología industrial y energética en general y los biocombustibles en particular, permitirán la reconversión de extensiones agrícolas de cultivos alimentarios poco productivos, en cultivos energéticos o industriales o mediante rotación de cultivos, lo que supone un aliciente económico para algunas zonas rurales deprimidas en el mundo.**(Ruiz et al., 2006: 11 - 13)**

El empleo del sorgo 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:

Problemática científica:

El empleo de la malta de sorgo, como agente enzimático natural, combinado con ácidos a bajas concentraciones, en la sacarificación de almidón del propio sorgo, para la producción de bioetanol y como

Hipótesis:

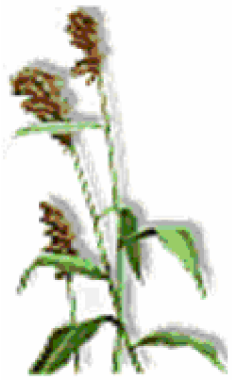
Es posible hidrolizar los almidones contenidos en el sorgo y convertirlos en bioetanol por tratamiento ácido –enzima a partir del malteado del propio sorgo.

Objetivo general:

Estudiar el proceso de biotransformación del almidón contenido en granos de sorgo, a bioetanol, mediante la hidrólisis y sacarificación empleando vía acido - enzima del sorgo malteado.

Objetivos específicos:

1. Realizar biblioteca personalizada sobre la temática de investigación.
2. Realizar experimentos sobre malteado de sorgo y su caracterización.
3. Estudiar la sacarificación de sorgo por vía acida –enzimática combinada, con malta de sorgo, analizando la influencia de otras variables en el proceso de producción de bioetanol.
4. Comparar la influencia de la malta de cebada en la sacarificación como agente enzimatico, con la malta de sorgo.
5. Confección del informe final de la investigación y defensa del mismo.



CAPITULO I

Capítulo I Revisión bibliográfica.

1.1 Alcohol Generalidades

La palabra alcohol proviene del árabe «al» (el) y «kohol» que significa (sutil).No se tienen referencias claras, pero se cree que el descubridor de este compuesto pudo haber sido el alquimista Arnaul de Villanova. En química se denomina alcohol a aquellos hidrocarburos saturados, o alcanos que contienen un grupo hidroxilo (OH) en sustitución de un átomo de hidrógeno enlazado de forma covalente, es un compuesto del cuerpo hipotético etilo con agua, o con la parte de agua que queda después de separado un átomo de hidrógeno (radical oxidrilo). En el alcohol entran tres componentes: Carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). La molécula de alcohol etílico está formada por 2 átomos de carbono y 5 átomos de hidrógeno formando el etilo. El alcohol etílico (C_2H_5OH), es un líquido incoloro, límpido y volátil, de olor etéreo y sabor picante.

Muchos alcoholes pueden ser creados por fermentación de frutas o granos con levadura, pero solamente el etanol es producido comercialmente de esta manera, principalmente como combustible y bebida. Otros alcoholes son generalmente producidos como derivados sintéticos del gas natural o del petróleo.

Los alcoholes tienen una gran gama de usos en la industria y en la ciencia, como solventes y combustibles. Por su baja toxicidad y disponibilidad para disolver sustancias no polares, el etanol es utilizado frecuentemente como solvente en fármacos, perfumes y en esencias, como versátiles intermediarios en la síntesis orgánica. El etanol y el metanol pueden hacerse combustir de una manera más limpia que la gasolina o el gasoil. **(Malpica, 2006)**

1.1.2 *Usos de alcohol.*

Como combustible

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.

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

Procesos de deshidratación en la producción de éter, etileno, dicloroetano.

En la fabricación de ésteres (acetato de etilo)

Procesos de oxidación en la producción de acido acético, vinagre, acetaldehído, cloroformo.

Procesos de etilación en la producción de etilamina, dietilamina, acepto fenetidina.

Reaccionando con halógenos formando bromuro de etilo, antipirina, ioduro de etilo.

Como disolvente

En la fabricación de tintes y colorantes para confitería.

En los procesos de cristalización en la producción de dinitro benceno, acido 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 fabricación de aceites esenciales.

Para aclarar y diluir recubrimientos de aeroplano, esmaltes, pulimentos para metales, barnices para metal y madera. **(Prescot, 1952)**

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)**

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.

1.2 Sorgo

Planta anual, originaria de la India, de la familia de las gramíneas, con cañas de dos a cuatro metros de altura, llenas de un tejido blanco, algo dulce y vellosas en los nudos; hojas lampiñas, ásperas en los bordes; flores en panoja floja, grande y derecha, o espesa, arracimada y colgante, y granos mayores que los cañamones, algo rojizos, blanquecinos o amarillos. Sirven estos para hacer pan y de alimento a las aves y toda la planta de pasto a las vacas y otros animales.

1.2.1 Origen histórico del sorgo

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 diversidad 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.

Los tipos salvajes encontrados en África Central y del Este no son aconsejables para usar en la agricultura actual, pero los fitogenetistas continúan buscándolos para crear nuevos germoplasmas, con el objetivo de incorporar características deseables dentro de las líneas genéticas actuales.

El sorgo como cultivo doméstico llegó a Europa aproximadamente hacia el año 60 d. C. pero nunca se extendió mucho en este continente. No se sabe cuándo se introdujo la planta por primera vez en América. Las primeras semillas probablemente se llevaron al hemisferio Occidental en barcos de esclavos procedentes de África.

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.

Pero el proceso más trascendental, sin embargo, aún no había llegado. 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.

1.2.2 Ventajas de la siembra de sorgo

- El sorgo tolera mejor la sequía y el exceso de humedad en el suelo que la mayoría de los cereales y crece bien bajo una amplia gama de condiciones en el suelo.
- 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 sorgo especies leguminosas como soja o maní. Si después de sorgo se siembran especies no leguminosas como trigo, maíz o girasol entre otras, deben ser adecuadamente fertilizadas.
- En la rotación conviene que el sorgo se ubique preferentemente después de especies leguminosas para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados. Por

ello, posturas de alfalfa o cultivos como maní o soja son excelentes antecesores.

Ventajas del Sorgo en la Conservación de los Suelos:

- Ø Aporte de Materia Orgánica.
- Ø Eficiencia en el uso y conservación del agua.
- Ø Aumento de Rendimientos.
- Ø Mejora las condiciones físicas y químicas.
- Ø Disminuye los riesgos de la erosión.
- Ø Favorece a otros cultivos en las rotaciones**. (Sánchez, 2003)**

1.2.3 Usos del sorgo

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

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 en la producción de alcohol y donde el almidón que es la masa fundamental para la conversión a azucares fermentables es superior al del maíz, que es el cereal más empleado.

Tabla I 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, 2000)

La Facultad de Agroindustrias, UNNE. Chaco, Argentina, se estudian las condiciones para obtener el mejor grado de hidrólisis del almidón del grano de sorgo usando las propias enzimas que se generan durante la germinación**.**

Con las enzimas propias del grano generadas durante la germinación, sólo se consigue hidrolizar aproximadamente el 20% del total de almidón del grano, posteriormente se procedió a tratar el sorgo con ácido. Para la sacarificación de los granos, se adoptó la combinación tiempo – temperatura – concentración, encontrándose que las mejores condiciones para la hidrólisis del almidón de los granos de sorgo son 60°C, 12 horas y con un 5 % de ácido ClH. La solución puede ser fermentada sin inconvenientes por levaduras. **(Fernández y Garros, 2004)**

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. **(Altmann, 2004)**

En la zona de Capurro, Montevideo se encuentra instalada la planta (ANCAP) 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)**

1.3 Materias primas para la producción de alcohol.

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, 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:

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

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 II aparecen algunas de estas materias primas y sus rendimientos alcohólicos.

En las destilerías el proceso de sacarificación es desarrollado en el sacarificador, que es un tanque dotado de dispositivos que favorecen el calentamiento, enfriamiento y agitación de la materia prima tratada. La complejidad en el diseño de este equipo depende del tipo de materia prima que procese. **(Rodríguez, 2000)**

Tabla II Comparación del rendimiento alcohólico en diversos cultivos.

CULTIVO	RDTO ALC (L/ton)	RDTO 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 redto)	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, 2005)

Los indicadores de la tabla II 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 periodo 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.

Las autoridades de planificación agrícola de China también consideran el sorgo bicolor un cultivo decisivo para el desarrollo agrícola sostenible de las zonas agrícolas áridas o de suelos salino-alcalinos. En la región de Huang Huai Hai y el noroeste de China, donde se calcula que la superficie total de tierras salino-alcalinas y salinas es mayor de 170.000 kilómetros cuadrados, la vegetación germina con grandes dificultades, crece lentamente y da malas cosechas, si éstas no se malogran por completo. Esta falta de desarrollo agrícola produce pobreza en muchas zonas rurales y es un peligro para la seguridad alimentaria de China a largo plazo.

Ahí es donde interviene la FAO. El Programa de cooperación técnica de la FAO está ayudando al Ministerio de Agricultura de China a establecer granjas experimentales en las provincias de Shandong y Shaanxi, a fin de demostrar y fomentar la producción de sorgo dulce, y utilizarlo en la ganadería y la industria de producción de alcohol. **(Polania, F)**

1.4 Conversión de sustancias amiláceas

La conversión de las sustancias amiláceas se conoce como sacarificación, la cual se puede realizar por medio de procesos ácidos (Sulfúrico y Clorhídrico) o preferentemente biológicos (Enzimas Amilolíticas). El proceso de desdoblamiento del almidón envuelve la hidrólisis ó sacarificación de los puntos de unión (enlaces) de las moléculas de glucosa produciendo una mezcla de maltosa y destrinas infermentables. **(Rodríguez, 2000)**

Partes que componen el almidón.

La amilosa: es la cadena recta de los almidones está constituido por varios cientos de unidades de glucosa unidas entre sí por enlaces 1-4, como se muestra en la figura 1.1, esta fracción es casi toda cuantitativamente hidrolizada a maltosa.

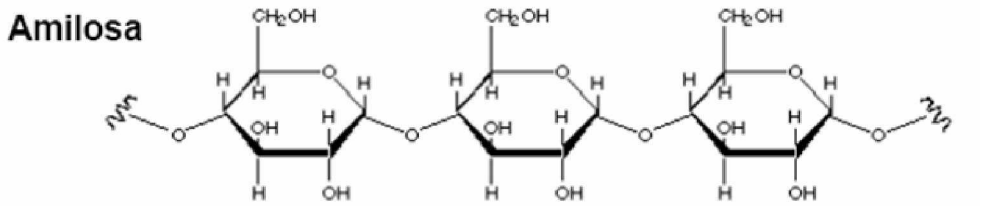


Fig. 1.1. Cadena de moléculas de glucosa que componen la amilosa

La amilopectina: es la cadena ramificada de peso molecular mucho más elevado y tiene de 10.000 a 100.000 unidades de glucosa. Los segmentos que se encuentran entre los puntos de ramificación tienen 17-25 unidades de glucosa con enlaces semejantes a los de la amilasa, como se muestra en la figura 1.2. Esta molécula es parcialmente hidrolizada, aunque pueden hidrolizarse en la etapa de fermentación**.**

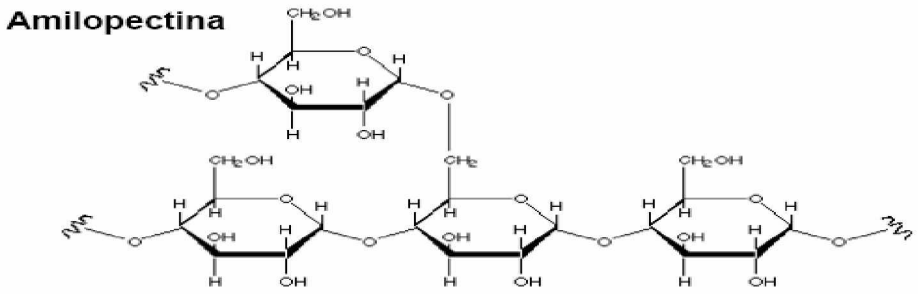


Fig. 1.2. Cadena de moléculas de glucosa que componen la amilopectina

La producción de etanol a partir de estos materiales generalmente incluye tres etapas fundamentales, Primero la conversión de carbohidratos en azúcares simples o asimilables por los microorganismos productores de alcohol, después la fermentación de estos azúcares a etanol y finalmente la separación del etanol y otros productos por destilación, como se muestra en la figura 1.3.

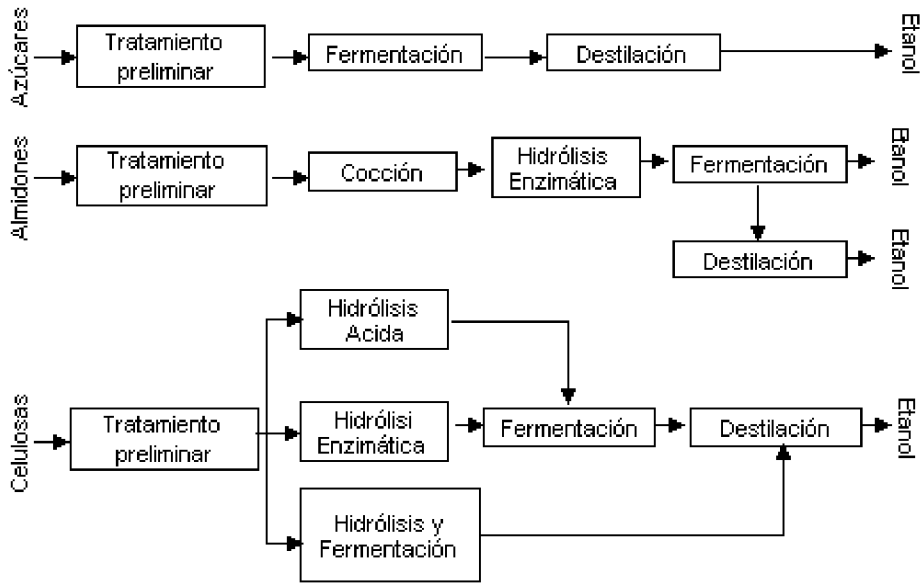


Fig. 1.3. Esquemas para la producción de etanol a partir de diferentes sustratos

1.5 Métodos para la sacarificación de materiales amiláceos

En general, los métodos para sacarificar materiales amiláceos implican el uso de preparaciones enzimáticas, ácidos diluidos, o una combinación de ambos. Entre las preparaciones enzimáticas que se pueden emplear se incluyen, la malta de origen cereal, y otras de origen microbiológico, productos derivados de mohos y bacterias, de las que son por ejemplo el salvado enmohecido y la amilasa de los mohos. Los ácidos diluidos, particularmente el HCL se pueden usar para convertir los cereales, patatas y otros materiales amiláceos. También se emplean variadas combinaciones de malta con salvado enmohecido u otras preparaciones enzimáticas, o combinaciones de acido con enzimas.

El método de conversión dependerá desde luego del uso que haya que dar al producto, de la disponibilidad de los agentes hidrolíticos y de su costo relativo. **(Prescot, 1952)**

1.5.1 Sacarificación ácida

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. Los rendimientos más altos de etanol a partir de maíz, se obtuvieron cuando la masa se calentó durante 2-3 h a una presión de vapor de 1.7 atm en presencia de HCl 0.1N.

1.5.2 Sacarificación Enzimática

Con la hidrólisis enzimática, como bien lo indica su nombre se realiza la conversión de los carbohidratos presentes en el material amiláceo a través de los 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 contiene 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.

Una de las enzimas muy empleada para este proceso es la malta producida por la germinación de los propios granos, donde la empleada tradicionalmente ha sido la malta de cebada.

Malta de granos utilizada como enzima: Los enzimas se pueden encontrar de forma industrial como se utilizan en la actualidad, pero se pueden obtener también debido a los cambios que ocurren en un grano germinado.

De ahí que se utilicen como agentes enzimáticos maltas de granos germinados como la cebada, el trigo, sorgo, centeno, etc.

El proceso de malteado consta de las siguientes etapas:

Selección: Esta etapa es fundamental para que el grano no llegue con una carga microbiana alta, no llegue ya en proceso de germinación, por lo que hay que controlar la humedad y la cantidad de proteínas.

Almacenaje: El grano es más estable seco y mantenido a baja temperatura. Si ha sido recolectado con un contenido de humedad superior al 15%, suele secarse. El proceso de secado tiene que llevarse a cabo de tal manera que permanezca viable la planta embrionaria contenida en cada grano, por lo tanto es necesario evitar el uso de temperaturas demasiado altas y para aumentar la desecación, se debe recurrir a aumentar la velocidad de flujo del aire y a un calentamiento gradual del mismo. Si el grano está húmedo es fácilmente atacado por insectos y hongos que causan su deterioro. El metabolismo de los insectos y el de los hongos, cuando se establecen, produce agua y eleva localmente la temperatura, lo que favorece la expansión de la infección.

Remojo: Típicamente las partidas de grano limpio se dejan caer a un tanque de remojo parcialmente lleno de agua, a unos 15 ºC. Muchos tanques de remojo son simples cilindros verticales con base cónica. El contenido del tanque se airea intensamente insuflando aire a través del agua de remojo mediante el uso de tuberías perforadas o por succión, consiguiendo así el 100% de aire. La mayor parte de los tanques de remojo son tanques verticales de poca altura y de fondo plano. Esto permite que el agua de remojo se puedan crear condiciones más aeróbicas. El contenido de agua de los granos aumenta rápidamente a partir de la inmersión, pero la velocidad del incremento del contenido del agua desciende luego de un modo progresivo. La velocidad de la rehumidificación es función de las condiciones en que haya crecido el grano, de la variedad de éste, del tamaño y de la temperatura del agua.

Está también considerablemente influida por el daño mecánico que hayan podido sufrir los granos durante el remojo. El remojo se interrumpe por drenaje a las 12 - 24 horas.

Cada grano permanece recubierto de una película de agua a través de la cual puede disolverse el oxígeno del aire del entorno. A esta condición se le conoce como descanso de aire. Cuando el grano se ha remojado, el agua penetra a través de la cascarilla y la cubierta del fruto y entra en el grano a través del micrópilo.

El embrión toma rápidamente agua, en cambio el endospermo se hidrata más lentamente, cualquier fractura sufrida por la cascarilla o las cubiertas del fruto y la semilla facilita el humedecimiento del endospermo o el embrión y, desde luego la fuga de sustancias solubles del endospermo. Éste constituye uno de los sumandos que dan cuenta de las pérdidas sufridas durante el malteado; otro es el representado por la respiración del embrión, que consume reservas de nutrientes, liberando energía, dióxido de carbono y agua. La respiración aumenta significativamente cuando el embrión se activa, lo que crea una demanda de oxígeno en el agua de remojo. En ausencia de oxígeno el embrión puede metabolizar anaeróbicamente las reservas, pero de un modo energéticamente poco eficaz, convirtiéndolas en dióxido de carbono y alcohol. A medida que la concentración de alcohol aumenta su toxicidad va creciendo, por lo que se hace necesario cambiar el agua de remojo cada cierto tiempo

Germinación de la cebada: El remojo suele completarse en un par de días; en las modernas técnicas de malteado los granos dan al término de las mismas muestras claras de que han comenzado a germinar, se transfieren entonces al equipo de germinación. En la mayor parte de los casos el contenido de humedad se halla en torno al 42% y permanece constante durante la etapa de germinación.

Los modernos equipos permiten la germinación en tres o cuatro días. El tipo de germinador más común es una caja de base rectangular o circular provista de un falso fondo perforado. Sobre el falso fondo se deposita un lecho de malta con una profundidad de 1 a 1,5 metros. A través del lecho y habitualmente de abajo a arriba se hace pasar una corriente de aire saturado de agua a unos 15 ºC, con lo que se asegura la disponibilidad de oxígeno por parte de los embriones, la eliminación del dióxido de carbono y el mantenimiento de una temperatura constante en todo el lecho.

Al objeto de evitar el enrasamiento, un volteador mecánico separa los granos en germinación lo que ayuda también a airear y mantener una temperatura uniforme.
A veces se emplea un recipiente único para el remojo y la germinación, evitando así la transferencia del grano, sin embargo con frecuencia los tanques de remojo se sitúan encima de los de germinación. Desde el punto de vista fisiológico existe una continuidad entre el remojo y la germinación.
El crecimiento embrionario se inicia durante el remojo y como las reservas de nutrientes inmediatamente disponibles son limitadas, resulta necesario movilizar las del endospermo. Por si sólo todo esto resultaría insuficiente para satisfacer las necesidades del embrión en crecimiento rápido. Se subvienen éstas mediante la movilización de la capa de aleurona que produce enzimas a partir bien de precursores complejos o bien de aminoácidos. Desencadenan esta movilización una o más hormonas vegetales llamadas giberelinas que son segregadas por el embrión y se difunden a la aleurona. La degradación enzimática del endospermo avanza, por tanto, del extremo embrionario del grano al extremo distal del mismo y de las capas externas a la interna. El debilitamiento físico de la estructura del endospermo y las degradaciones bioquímicas son conocidos en su conjunto con el término de "desagregación". Los granos malteados pueden por tanto clasificarse en subdesagregados, desagregados o sobre desagregados, según hasta donde haya avanzado esta desagregación enzimática.
Secado: El proceso de germinación es detenido desecando los granos de malta. En esta etapa se presentan distintas opciones; se puede obtener una malta poco desagregada (malta LAGER), más desagregada (ALE) para la producción de cerveza o malta muy desagregada para ser usada en destilerías o en la elaboración de vinagre. También puede elegir distintos procesos de secado; la deshidratación prolongada y a bajas temperaturas conduce a una malta clara, con gran contenido enzimático intacto, en tanto que una deshidratación rápida y a temperaturas altas rinde maltas oscuras, deficitarias en actividad enzimática.
Son numerosos los factores que afectan a la deshidratación del grano; cabe citar entre ellos:

- El volumen de aire que pasa a través del lecho del grano.
- La profundidad del lecho.

- El peso del agua a ser eliminado del lecho del grano.
- La temperatura del aire utilizado para la deshidratación.
- La humedad relativa del aire.
- El carácter higroscópico de la malta.

La deshidratación se comienza con temperaturas de 50 - 60ºC, que inicialmente calientan el secadero y el lecho del grano. Más adelante las capas superiores comienzan a deshidratarse y el contenido de agua en la cebada empieza a descender progresivamente desde el fondo a la superficie del lecho del grano. En esta etapa de deshidratación libre se extrae sin restricciones el agua de la cebada y por razones económicas se ajusta el flujo de aire de manera que su humedad relativa sea de 90 - 95 % en el aire del extremo de salida. Cuando se ha eliminado aproximadamente el 60% del agua, la deshidratación subsiguiente se ve dificultada por la naturaleza del agua residual. Llegado este punto de ruptura se sube la temperatura del aire de entrada y se reduce el flujo. La estabilidad térmica de las enzimas es ahora mayor que cuando la malta contenía un 45% de agua. Cuando el contenido de agua llegue a ser del 12%, toda el agua que permanece en el grano esta ligada, por lo que se sube la temperatura del aire de entrada a 65 - 75ºC y se reduce aún más la velocidad del flujo. La extracción del agua es lenta y por razones económicas se recircula gran parte del aire. Finalmente a una humedad de 5 - 8%, dependiendo de la variedad del grano, la temperatura del aire de entrada se eleva a 80 - 100ºC, hasta que se alcanza el color y la humedad requeridos. La maltas Lager típicas se secan hasta una humedad de 4.5%, pero las maltas Ale se deshidratan hasta un contenido de agua de un 2 - 3%.

El interés fundamental del malteador es obtener un grano que germine fácilmente y con uniformidad. La germinación uniforme o sincronizada es muy difícil si los granos no son de tamaño uniforme, entre otras cosas por que los de mayor tamaño se humedecen a un ritmo más lento que los pequeños.

Por otra parte, resulta necesario que los granos que van a ser malteados no hayan germinado antes de la recolección y que ninguno de los granos haya muerto a causa de haber secado el grano tras una recolección en circunstancias insatisfactorias. Lo que el malteador necesita es que en más del 98% de los

granos se observe la emergencia de la vaina de la raíz. El malteador quiere además, un contenido bajo en proteínas, entre el 9 y el 11.5 %. La idea de que menos contenido en almidón puede extenderse también a la cascarilla hace que el malteador busque un grano con un bajo contenido de proteínas y con poca cascarilla. Por último el malteador también busca que la malta se comporte adecuadamente en su uso posterior, ya sea en la fabricación de cerveza o de etanol, debe tener una dotación enzimática satisfactoria de manera que la extracción no plantee problemas. Por otro lado, es preciso que el mosto se separe fácilmente del grano agotado y este debe ser pobre en ciertas gomas llamadas betaglucanos. **(Hough, 1990)**

El malteado corresponde a las primeras etapas de la germinación y su objetivo es la germinación controlada mediante la cual se producen las enzimas –amilasa, beta-glucanasas y proteasas-que sirven para hidrolizar materiales de reserva.

La preparación del mosto consta de las etapas de infusión y de decocción con temperatura programada. En el proceso de maceración el objetivo es la preparación de un extracto con azucares fermentables, aminoácidos, vitaminas etc., a partir del grano malteado.

Bioquímica de la maceración

Almidón —(**α-amilasa**, **α-1,4**)→ **glucosa, maltosa, maltotriosa, dextrinas**

Almidón —(**β-amilasa**, **α-1,4**)→ **maltosa, dextrina**

Almidón —(**dextrinaza**, **α-1,6**)→ **dextrinas** (**α-1,4**)

Almidón —(**α-glucosidasa**, **α-1,4 terminales**)→ **glucosa**

En la tabla III aparecen reflejadas algunas de las enzimas comerciales, los microorganismos que transforman el efecto que producen.

Tabla III Enzimas comerciales

Enzima	Microrganismo	Efecto
Pullulanasa	Bacillus acidopullulycus, Termo acuáticos	desramificante
Amiloglucosidasa	Aspergillus Níger, Rhizopus niveus	aumenta la fermentabilidad
Endo- β-glucanasa	Bacillus subtilis	mejora la recuperación en el macerado y el filtrad
Proteasas	Aspergillus Níger, B. subtilis	impide el enturbiamiento por los poli fenoles/proteína
Glucosa oxidada	Aspergillus Níger	elimina O**2**, estabiliza el sabor
Acetolactato descarboxilasa	B. licheniformis	maduración, elimina diacetilo

(Bio-Cat.Inc, 2007).

1.5.3 Combinaciones

Los métodos combinados son aquellos que combinan en la sacarificación de las masas ambos tratamientos tanto el acido, como el enzimático y complementan en ocasiones la hidrólisis con la cocción presurizada. La acción combinada del ácido y la enzima trae consigo mejores rendimientos que los métodos ácido y enzimático por separado, también permite disminuir las concentraciones de enzima y ácido. Esto hace que disminuyan los costos de los insumos de las materias primas.

Por estas razones son métodos muy usados en la actualidad, para la conversión de materiales amiláceos.

Existe un gran número de métodos donde se combinan los tratamientos acido – enzimáticos, en ellos generalmente se comienza con el tratamiento acido el cual se ha comprobado que es muy eficiente en la primera etapa del fraccionamiento de la cadena de carbohidratos que componen el material amiláceo a tratar. Sin

embargo para aumentar la conversión de los almidones a azucares fermentecibles, la acción de los enzimas es muy conveniente. A continuación se exponen algunos de los métodos combinados recogidos por la bibliografía.

Método de Hao, Fulmer y Hundercofler: Se colocan en un erlenmeyer de 500ml 60g de harina de maíz y 300mlde HCl 0.04N, y se mezclan cuidadosamente. El almidón del maíz se gelatiniza calentando la mezcla (agitando de vez en cuando) con una llama pequeña o una plancha caliente.

La masa se coloca entonces en una autoclave y se trata con vapor a una presión de 1.4 atm durante 30 min. El pH de la masa cocida y esterilizada se ajusta a 4.5-5.0 con NaOH, $CaCO_3$ o Na_2CO_3. La masa, a una temperatura de 30° C se coloca en un mezclador y se añade salvado enmohecido en suspensión en agua. Tras agitar durante un minuto la mezcla se devuelve al erlenmeyer de 500ml y se inocula 1hr a 30° C para sacarificar los almidones solubles. En algunas experiencias de conversión se empleo también una temperatura mayor (55° C) y tiempos distintos de 1 a 3hr.

Hao y sus colaboradores inoculan una masa como la indicada con 20ml de un cultivo de 24hr de una raza especial de S. cerevisiae desarrollada en caldo-extracto de malta al 10 %.

Método de Roberts, Laufer, Stewart y Saletan: Roberts y colaboradores han empleado 2 tipos diferentes de masa. Se describen a continuación con las denominaciones de tratamiento de sobre presión y tratamiento a la presión atmosférica.

Tratamiento con sobre presión: A 400ml de agua, que se ha calentado previamente a 50° C durante 15 min. , y luego se sube la temperatura en 15 min, hasta 66° C., a cuya temperatura se mantiene durante 30 min. De nuevo se asciende la temperatura en 15 min, hasta 93° C y se mantiene durante otra media hora. Finalmente se calienta la masa con vapor durante una hora a la presión de 1.4 atm y se enfría después hasta la temperatura de conversión.

Tratamiento a la presión atmosférica: Este procedimiento es idéntico al anterior hasta el momento en que la temperatura se asciende a 66° C.

La masa se mantiene a esta temperatura durante 55 min. Y se enfría después rápidamente hasta la temperatura de sacarificación (en 5 min.). **(Prescott, 1952)**

De los métodos de sacarificación los mas usados son los enzimáticos y enzimáticos con un pretatamiento acido, donde no se utiliza grandes concentraciones de acido, o sea que la conversión de los almidones ocurre en mayor medida por la acción de los enzimas. También son estos los de mayor costo, en este indicador influye en gran medida el tipo de agente enzimático escogido, debido la marcada diferencia que existe en los precios de los mismos.

1.6 Mecanismo de conversión en la fermentación

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

$C_6H_{12}O_6$	$2C_2H_5OH$	+	$2CO_2$	**Ecuación 1**
Azúcar-hexosa	etanol		anhídrido carbónico	
180	92		88	

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 Luís 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 IV.

Las propiedades específicas de las levaduras, como la tolerancia a altas concentraciones de alcohol y CO_2, 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, de los cuales hasta el momento los más importantes son cepas selectas de Saccharomyces cerevisiae y Saccharomyces carlsbergensis.

Tabla IV Concentraciones medias de producto por 100g 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, 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 y 18 h, dependiendo de la cepa de levadura, la naturaleza del sustrato y la temperatura de operación. **(Mathewson, 1980)**

La mayor parte de las técnicas de fermentación rápida continua que existen actualmente como unidades comerciales, comprenden de 3 a 5 vasijas cerradas, organizadas en cascada. Cada vasija tendrá su propio sistema de refrigeración y la concentración de etanol que se acumula en cada etapa, comienza generalmente por 4% v/v en la primera vasija y alcanza el 10% v/v en la salida final.

Son normales productividades del orden de 10-20 Kg. de etanol $m^{-3}h^{-1}$ (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 $m^{-3}h^{-1}$. 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, 1999; Underkofler, 1954)

Rendimiento alcohol –sustrato

$$Y\ P/S\ \% = \frac{\%\ Alc\ *\ \rho_{E\tan ol}}{ConsumoART} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Eficiencia de la fermentación

$$Efic.Ferm. = \frac{Alc.prod.}{Alc.Teórico} x100 \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

Productividad

$$PROD. = \frac{Conc.\Pr od.}{TiempoFerm\ ent.}(g/L-h) \qquad \textbf{Ecuación 4}$$

Eficiencia de la fermentación sobre la base de la planta

$$Efic.Ferm.base-planta\,\% = \frac{Alc.prod.}{Alc.TeóricoCar\ b.usados} x100 \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

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.

1.7 Destilación

En esta etapa del proceso de obtención de alcohol etílico, se logra la separación de la inmensa cantidad de componentes que acompañan la mezcla obtenida en la fermentación y obtener una mezcla líquida lo mas homogénea y con el mayor nivel de pureza posible. Esto se realiza en las columnas de destilación, que pueden ser de varios tipos.

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 este principio se basan los procedimientos de concentración y purificación, los cuales se efectúan normalmente y de forma tradicional mediante procesos de destilación y la

utilización de columnas destiladoras y rectificadoras, casi siempre en número de tres como mínimo, hasta
obtener una mezcla cercana al punto de azeotropía. **(Gálvez, 1973) (Bitter, 1993).**
En virtud de que el alcohol tiene una presión de vapor mayor que la del agua, si se evapora una mezcla hidroalcóholica 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.
Las columnas destiladoras perfeccionan el agotamiento del alcohol y en algunos casos producen el alcohol necesario para el resto de las columnas. En el caso de la destilación del etanol, a los vinos se le extrae casi la totalidad del alcohol que contiene, juntamente con los productos más volátiles y algo de agua, esta parte extraída recibe el nombre de flemas, llamándose mostos o vinazas a la parte del líquido agotado de alcohol y que contiene agua y las materias sólidas contenidas en el vino**. (Velázquez, 2000).**
En dependencia de la calidad que se desee del producto final se emplearan desde tres hasta cinco columnas para alcoholes hidratados (95-96% v/v). Para etanol absoluto o deshidratado (99,8% v/v), el alcohol hidratado es sometido al proceso de deshidratación mediante otras técnicas de destilación como destilación a vacío, destilación azeotrópica y destilación extractiva u otras operaciones unitarias, como adsorción y las más modernas mediante membranas conocido el proceso como pervaporación.
En el proceso de fabricación de etanol, la destilación es la última etapa del proceso y es donde se obtiene el alcohol. En la actualidad se han desarrollado diferentes procesos para la obtención del bioetanol, producto este que forma parte de los biocarburantes actuales.

1.6 Biocarburantes actuales.

En la actual coyuntura de la sociedad, donde es imperativo el desarrollo de amplias capas de la población, hasta el momento parecen contraponerse la

experimentada relación entre bienestar material y consumo energético, con la sensación, cada vez mas generalizada, de que tal desarrollo ha de hacerse de forma sostenible; sostenibilidad ensombrecida por dos circunstancias:

Primero el inevitable agotamiento de los recursos energéticos fósiles, hasta el momento alimento del desarrollo; y en segundo lugar la resistencia del medioambiente tal como lo ha conocido la humanidad en tiempos históricos, muy afectada precisamente por el consumo, muchas veces incontrolado, de los recursos energéticos. Así lo muestra la figura 1. 2 **(Andrés, 2003)**

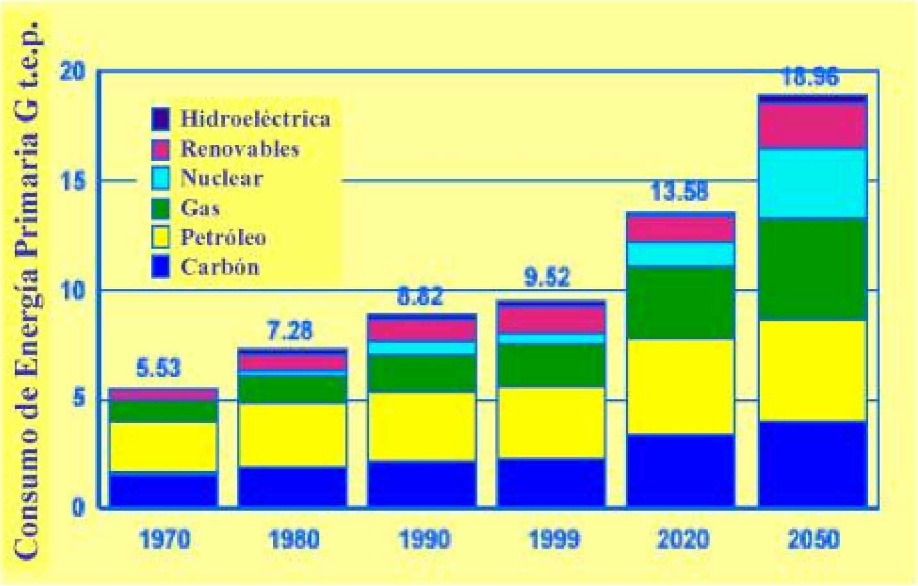


Figura 1.4. Fuentes energéticas en la historia y previsiones mundiales.

La producción de biocombustibles comprende la obtención de combustibles a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos. Entre sus principales características se observa que no son tóxicos, carcinógenos o alergénicos, son biodegradables, no contienen azufre y su origen elimina el riesgo inherente a la extracción de combustibles fósiles ante manipulaciones inadecuadas o fugas accidentales; reducen muchísimo las emisiones de monóxido de carbono, partículas, hidrocarburos compuestos aromáticos, óxidos de azufre y dióxido de carbono. **(Maria, 2006)**

Una de las circunstancias que caracterizan a los biocarburantes es la confluencia de diferentes problemáticas (energética, medioambiental, política-agrícola, política

fiscal, etc.) cada una de ellas, a su vez, de elevada complejidad, por lo que no resulta fácil establecer pautas generales.

Esta confusión llega hasta la propia denominación, pudiéndose encontrar con frecuencia que se conocen como biocombustibles o biocarburantes indistintamente.

- Ø Biocombustible: Cualquier combustible de origen biológico no fosilizado.
- ø Biocarburante: Un subgrupo de los biocombustibles, caracterizados por la posibilidad de aplicación a los actuales motores de combustión interna. **(Andrés, 2003)**

Los combustibles que se producen actualmente a escala industrial son el bioetanol y el biodiesel**,** constituyéndose en los actores de mayor relevancia mundial dentro de los biocombustibles; el biogás, con un desarrollo más modesto, completa esta terna de biocarburantes**. (María, 2006).**

1.6.1 Panorama Mundial.

La producción de bioetanol es liderada mundialmente por Brasil y Estados Unidos, países que lo obtienen principalmente a base de caña de azúcar y maíz, respectivamente. **(Ibarz, 2006)**

Estados Unidos.

En 2005 las 97 fábricas ubicadas en EEUU produjeron casi 15.000 millones de litros de bioetanol, un volumen que ha venido creciendo en forma constante desde 1980, en que comenzó su producción. Además se encontraban en construcción 35 fábricas con una capacidad anual de producción de 8.300 millones de litros.

En su presupuesto para 2006, EEUU destinó 86 millones de dólares para Investigación y Desarrollo e instó a que comience a utilizarse el E85 (mezcla de 85% de etanol y 15% de combustibles) para aumentar su consumo (actualmente el más utilizado es el E10). Se producen 372 litros de bioetanol por cada tonelada de maíz.Una hectárea produce en EEUU aproximadamente 10 toneladas de maíz. Siendo la producción mundial de maíz de alrededor de 700 millones de toneladas anuales podrían obtenerse 260.400 millones de litros de bioetanol, si toda la cosecha se dedicara a la producción de bioetanol.

Evidentemente los EU. se presentan ante el mundo como una amenaza para los pobres de la tierra, pues una vez que con esos grandes presupuestos y esas macro producciones dominaran el mercado de los biocombustibles, harán de ello un negocio, que pudiera convertirse en un gran monopolio, ya que la producción de biocombustible, se encuentra estrechamente ligada a la producción automovilística. Prueba de esto es que el presidente George W. Bush se reunió el pasado mes de marzo con los fabricantes de famosas marcas de carros, para apoyar la fabricación de automóviles que consuman estos combustibles alternativos.

Todo esto ocurre por la política hegemónica e irracional que siempre ha expuesto al mundo los EE.UU., ya que convierte la producción de Biocombustibles alternativos, en línea económica de la política exterior de este país. **(Castro, 2007)**.

Cuando estos combustibles alternativos en realidad pudieran darle solución a los problemas de los países pobres estableciendo pequeñas producciones, para amortiguar su dependencia de los combustibles fósiles.

Brasil.

En 1973, el fuerte aumento del petróleo impulsó a Brasil, rico en caña de azúcar y sin petróleo (importaba el 80% del combustible), a comenzar a producir bioetanol. Se construyeron automóviles que funcionaban con bioetanol puro hasta finales de los 80, 9 de cada 10 automóviles nuevos funcionaban exclusivamente con etanol.

En 2003 los constructores de automóviles trajeron un motor flex-fuel que podía funcionar con cualquier mezcla de etanol y nafta; actualmente 7 de cada 10 automóviles nuevos que se venden son de este tipo, incentivados por la posibilidad que tiene el consumidor de utilizar el combustible que le resulte más barato. Estos motores cuentan con un dispositivo que calcula la proporción de etanol y gasolina que hay en el tanque y ajusta el motor para que trabaje adecuadamente con esa mezcla.

Brasil tiene la suerte de que el azúcar es la forma más económica de producir el etanol y de reunir las condiciones aptas para cultivar la caña: abundante tierra, lluvia y mano de obra barata. A esto se le agregan los trabajos de investigación

que le permitieron mejorar los rendimientos de azúcar y la productividad en la fabricación de bioetanol.

En 1975 obtenían 2.000 litros de etanol por hectárea de caña de azúcar; hoy obtienen casi 7.000 litros. En 2005 la exportación de etanol alcanzó a 600 millones de dólares, proyectando para 2010 exportaciones por 1.300 millones de dólares.

Sus principales clientes son Suecia y Japón, países que aspiran a que el etanol les ayude a cumplir con los requerimientos del Protocolo de Kyoto.

La producción de bioetanol durante 2005 ha sido del orden de los 17 mil millones de litros, de una producción mundial de 40 mil millones de litros, posicionándolo como el primer productor global. Un 65% de la producción mundial se utiliza como combustible.

Unión Europea.

Los principales países productores son España, Francia, Polonia, Suecia y Alemania. En Alemania existen tres grandes plantas industriales que producen en total 590 millones de litros de bioetanol al año a partir de trigo y centeno.

(María, 2006) .

En la tabla V se presenta la producción de materias primas para biocarburantes.

Tabla V Producción mundial de materias primas para biocarburantes.

Materia Prima	Producción mundial(M t/a)	Biocarburante equivalente(M t/a)
BIOETANOL		
Cereales:	1900	600
Azúcar:	140	75
TOTAL		675
Producción de gasolina		840
BIODIESEL		
Semillas Oleaginosas: (1)	326	
Aceite y grasa vegetal y animal	120	120
TOTAL		120
Producción mundial de gasóleo (2)		1100

(Andrés, 2003)

1.6.2 Ventajas e inconvenientes del bioetanol como biocarburante.

Históricamente, el empleo del etanol como combustible de automóvil data de los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, cuando en Inglaterra funcionaron automóviles con mezclas de gasolina y etanol. Su uso como combustible se abandonó después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el petróleo se convirtió en un producto abundante y barato. Pero las condiciones actuales en que se encuentran los combustibles fósiles, nos han obligado a pensar nuevamente en él como combustible.

El etanol obtenido a partir de biomasa es ya una solución viable en muchos países de nuestro planeta. Las razones que hacen del etanol un combustible deseable son:

Ventajas

Tecnológicas

- El bioetanol aumenta el índice de octano de las gasolinas, sin la contaminación del MTBE, permite una combustión más completa y un costo menor.
- Utilizable en prácticamente todos los vehículos.
- Reduce la dependencia de la importación del crudo de petróleo.
- Fácil de producir.
- Puede ser obtenido de diferentes fuentes de biomasa, tales como caña de azúcar, maíz, sorgo, papa, uva, etc.

Medioambientales

- Reducción de gases contaminantes a la atmósfera, como CO e Hidrocarburos.
- Reducción de la lluvia ácida.
- Mejora de la calidad del aire en zonas urbanas.
- No contamina el agua.
- Reducción de residuos.
- El bioetanol es superior medioambientalmente al resto de los carburantes más importantes.

Energéticas

- Constituye una fuente de energía renovable y limpia
- Los subproductos obtenidos de la producción de etanol tienen un valor económico alto y pueden ser utilizados para combustión en calderas o como fertilizantes, biogás, alimento para animales o materia prima para la industria química, siendo totalmente reciclados y reduciendo costos generales.
- Tiene un ratio energético positivo de aproximadamente un 1.34 (por cada Kwh. utilizado para la producción del bioetanol, existe un beneficio energético del 34%)

Económicas

- Incremento de la actividad agrícola y fomento de la actividad industrial.
- Se incorpora Valor Agregado al producto nacional (Caña de Azúcar y Melazas) y aprovecha la capacidad instalada.

Legales

- Cumplimiento con las Directivas europeas de fomento de los biocarburantes (sustitución del 5.75% de gasolinas y gasóleos en 2010) y del uso de fuentes energéticas alternativas (llegar a una sustitución del 20% de los carburantes convencionales por otras fuentes energéticas en 2020). **(García, 2006)**

Inconvenientes

Costo: Sin duda el impedimento más serio a su implantación. Lo más grave es que el principal componente del costo final es la materia prima, cuyo precio se rige por consideraciones ajenas a la industria de los carburantes.

Competencia: En la producción de bioetanol generalmente la materia prima puede ser utilizada para la alimentación, por lo que es necesario llegar a un compromiso en esa cuestión.

En la tabla VI se ofrecen algunos precios internacionales orientativos, en el convencimiento que las implicaciones agrícolas tienen que ser estudiadas de forma particularizada para cada situación.

Tabla VI Precios internacionales de carburantes y materias primas

GASÓLEO	GASOLINA	CEREALES	ACEITES
250 $/t (ARA)	280 $/t (ARA)	90 $/t (Maíz; USA)	400 $/t (Palma; ARA)

Aún admitiendo el aumento de los precios, agrícolas y petroleros, parece deducirse que, pese a las aproximaciones realizadas no se han tenido en cuenta los ingresos por venta de coproductos o corregido el inferior poder calorífico de los biocarburantes en ambos casos el costo de materia prima es superior al precio ex refinería de los carburantes a que pretende sustituir.

Si se quiere mantener el precio de venta al público del carburante, esta situación conlleva a dos posibles soluciones:

A. Subvencionar fuertemente el bioalcohol y el biodiesel; política adoptada en USA. y la UE.
B. Promover la investigación y desarrollo para utilizar materias primas de menor costo que las actualmente empleadas, cuya productividad parece una barrera de muy difícil superación y fundamentalmente aquellas que constituyen residuos ya sean agrícolas o industriales.

Esta disyuntiva da lugar a una reflexión: Cada sociedad debe implantar la vía que más se acomode a sus necesidades, **(Andrés, 2003)** Para los países pobres, con escasos recursos energéticos, claramente la segunda opción debe ser tenida en cuenta.

1.6.3 *Ventajas que proporciona en las gasolinas la adición de etanol.*

- Se registra un aumento de 2 a 3 unidades de Índice Anti Detonante (IAD).
- Se observa un aumento de potencia de los vehículos entre un 2% y 15%.
- Se presenta una mejora del rendimiento de combustible entre 2% y 6%.
- No se afecta el consumo de combustible de los vehículos. **(MADR, 2006)**

1.7 Residuos de la producción de etanol

Los desechos líquidos de la industria azucarera y sus derivados constituyen uno de los principales problemas de contaminación que afectan el ambiente, por sus elevados volúmenes, su composición y sus propiedades altamente agresivas **(Fabelo et al., 1985).**

Las vinazas o mostos se obtienen como residuos de la destilación del producto fermentado. La naturaleza y la composición de los mismos dependen de que se haya obtenido a partir de mieles, de jugos sometidos a la clarificación simple o la clarificación por sulfatación (en la producción de azúcar crudo o blanca, respectivamente), u otros sustratos.

La composición también depende de: el sistema de fermentación, los productos químicos, los nutrientes, los tipos de equipos de destilación, el tipo de levadura utilizada, la calidad del agua, el sistema de funcionamiento, y los operadores.

Por su parte la vinaza constituye un residual altamente contaminante el que de ser eliminado en uno u otro porciento redundaría en un beneficio ecológico. Este constituye un sustrato barato ya que es un residuo del proceso.

Las vinazas se usan como alimento animal después de pasar por un evaporador donde se concentran o pueden ser utilizados como fuente de energía al ser quemados en calderas de recuperación. Se ha valorado como biofertilizante, por su alto contenido de fósforo, potasio y nitrógeno, siendo capaces de sustituir considerables cantidades de fertilizantes y minerales artificiales. Además se considera como otra alternativa, una fermentación anaerobia utilizando bacterias para producir biogás.

Las vinazas por ser un residual, hacen que su composición varíe de acuerdo con las condiciones del proceso: tales como concentración de trabajo, grado alcohólico alcanzado, sistemas y eficiencia de la etapa de destilación.

Existen diferencias significativas entre las vinazas provenientes de miel final de caña y las de remolacha.

Casi siempre, los mostos de mieles finales de caña presentan un menor contenido de nitrógeno y un mayor contenido de minerales, que los de cereales o remolacha, por lo cual su utilización en la alimentación animal es más limitada a escala mundial.

En la Tabla VII se ilustra la composición promedio de la vinaza de destilería de miel final de caña y de cereales. Hay diferencias que se deben a la composición de la miel final utilizada y la tecnología empleada en la destilería.

Tabla VII Composición promedio de las vinazas de destilería.

Parámetros	Miel de caña	Cereales
Materia seca (%)	60-65	65-70
Cenizas (%)	16-20	20-25
Proteína bruta (%)	4-8	15-25
Carbohidratos (%)	35-42	10-15
Azúcares (%)	5	2
Potasio (%)	4-5	8

Las vinazas de destilería pueden ser utilizadas como una de las alternativas para las mezclas de sustratos en la fermentación alcohólica y es desechado de las destilerías, **(Otero, 1990; Fabelo, 1999)**. La recirculación de la vinaza provoca una serie de beneficios al proceso de fermentación, entre los cuales se puede citar:

- Ø Fermentaciones más rápidas debido al retorno de los nutrientes.
- Ø Mayor acidez en los fermentadores, por tanto, fermentación más sana.
- Ø Recirculación de azúcares eventualmente no fermentables y de levaduras muertas que van a servir como nutrientes, pues por el calentamiento de la columna son de fácil asimilación por otra célula (termólisis). **(Laval ,1982)**

1.7 DDGS (Destiler Drain Grain Soluble)

Los subproductos de destilería se obtienen mediante secado de los residuos del proceso de obtención de etanol como biocombustible, a partir de diversos ingredientes ricos en almidón. En la mayor parte de los procesos se utilizan cereales: maíz en USA, trigo en Canadá Occidental y cebada en los países nórdicos europeos.

El proceso en sí consiste en convertir los almidones y azúcares de la materia prima inicial en etanol. Por tanto, en el producto final se reduce drásticamente el

contenido en hidratos de carbono no estructurales y se concentra proporcionalmente el porcentaje del resto de nutrientes.

El proceso da lugar a dos tipos de subproductos: los granos de destilería (DDG) y los mal llamados solubles (DDS, vinazas o *thin stillage*). Los DDG contienen fundamentalmente residuos no fermentados de los granos originales. Los DDS contienen levaduras, nutrientes solubles y las partículas de granos más finas. A veces estos productos se suministran en húmedo, y por separado, a cebaderos de terneros localizados cerca de la industria; los DDG mezclados con el pienso y los DDS, que sólo tienen un 5% de materia seca, como sustitutivos del agua. En la mayoría de los casos ambos productos se comercializan conjuntamente (75% DDG y 25% DDS, aproximadamente), una vez secados.

Las características del producto final dependen de la calidad del producto inicial y de las condiciones del proceso (temperaturas y tiempo de cocción, destilación, deshidratación y granulado). En general, concentran entre 2,2 y 3 veces el contenido en fibra, proteína, extracto etéreo y cenizas, en relación con el producto original. El contenido proteico es alto, en torno al 25%, pero es pobre en lisina. El calor aplicado durante los procesos de fermentación, destilación y secado reducen la solubilidad de la proteína y aumentan su indegradabilidad. Sin embargo, la digestibilidad intestinal de sus aminoácidos, tanto para monogástricos como para rumiantes no es muy elevada, especialmente cuando las temperaturas en el proceso de secado superan los 100 ºC durante varios minutos. De aquí, que el valor proteico sea superior en los productos húmedos que en los secos. El contenido en grasa de los residuos de destilería es alto (en torno al 5-10%) de carácter insaturado (56% de ácido linoléico).

El proceso de hidrólisis y secado posterior al que se somete el producto original aumenta la concentración de ácidos grasos libres. Por ello, la acidez oléica es alta pero no indicativa de deterioro o enranciamiento.

Los DDGS son un producto muy palatable, con altos contenidos en levaduras, minerales y vitaminas del grupo B. No obstante, su inclusión a niveles elevados puede alterar la fermentación ruminal de la fibra por su alto contenido en grasa insaturada. La adición de sales cálcicas, sódicas o ácido fosfórico para ajustar el

pH, a fin de favorecer el rendimiento del proceso, es frecuente lo que modifica el nivel en estos minerales del producto final.

DDG de maíz

Los DDGS de maíz son una materia prima ampliamente utilizada en piensos de monogástricos. Al igual que para el gluten feed, su valor energético para ganado porcino varía considerablemente según las fuentes consultadas, siendo notablemente (superior a 500 Kcal. ED/kg) en las tablas americanas que en las europeas. El perfil de aminoácidos esenciales es más desequilibrado que en el gluten-20, al estar incluidas en los DDGS las proteínas del endospermo y su digestibilidad es también inferior a la del gluten-20, dado que el tratamiento térmico recibido es más enérgico. Otros factores que limitan su uso son su alto contenido en grasa insaturada, por su efecto negativo sobre la calidad de la canal, y un aumento de la proporción de huevos sucios, a niveles altos de inclusión, en gallinas ponedoras.

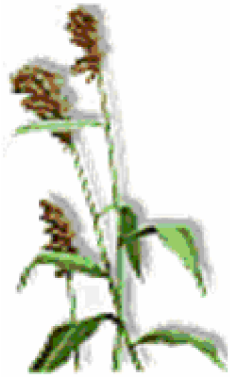
DDG de trigo y cebada

Los residuos de destilería de cebada y trigo incorporan toda la fibra del grano (p. ej. el grano de cebada contiene entre un 10 y un 12% de cáscara cuyo valor nutritivo es similar al de la paja). Por ello, su valor energético es menor, especialmente en monogástricos. Su principal aplicación está en dietas para todo tipo de rumiantes, así como conejos, caballos y cerdas gestantes, en función de su alto contenido en fibra. Su uso en aves de carne y lechones viene limitado por su bajo contenido energético y por la calidad de su proteína. A este particular son más recomendables los residuos procedentes del trigo por su menor contenido en componentes fibrosos.

(FEDNA, 2003)

Conclusiones parciales

1. Por las ventajas que presenta el bioetanol, no solo en sus usos tradicionales, sino en estos momentos, como combustible, se hace necesario continuar el estudio de aquellos sustratos no tradicionales a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o de biomasa en general, que aunque con bajos rendimientos aun y altos costos de producción, significan una fuente importante de materia prima para este producto, fundamentalmente para los países con escasos recursos energéticos.
2. El sorgo como materia prima amilácea, ha sido estudiado como grano y forraje para alimento animal y como parte esencial de un sistema de rotaciones para mantener la productividad y estabilidad estructural de los suelos, sin embargo ha sido poco explotado, como alimento humano y en la producción de etanol, por lo que es importante su estudio en estos renglones, dada las enormes ventajas que presenta su cultivo.
3. Por los bajos rendimientos obtenidos en la sacarificación acida y en los pocos trabajos reportados sobre el empleo de sorgo malteado para la producción de etanol, debe continuarse su estudio y el efecto combinado ácido-malta.
4. Para poder emplear la malta de sorgo como vía enzimática en la sacarificación de cereales hay que hacer un estudio de sus diferentes etapas y su caracterización, para que tenga las enzimas necesarias para la conversión de los almidones, además de que deben realizarse experimentos comparativos con malta de cebada, que es la malta empleada tradicionalmente en las hidrólisis.
5. Es importante la caracterización del residuo que se obtenga de los experimentos que se realicen con sorgo, para poder ser considerado como alimento animal, ya que hasta ahora es el uso fundamental que se le ha dado a este producto.



CAPITULO II

Capítulo II: Desarrollo experimental para la obtención de alcohol a partir de sorgo

2.1. Influencia de diferentes variables en la hidrólisis del sorgo.

Para comenzar el trabajo se parte de los resultados obtenidos en trabajos anteriores que concluyeron acerca de la variedad del cultivo y las condiciones de sacarificación para la obtención de alcohol a partir del grano de sorgo. Los experimentos se realizaron con tres variedades de sorgo y las condiciones de operación en la sacarificación que se analizaron fueron la relación sólido/líquido, concentración de ácido y tiempo de cocción. Estas variables fueron analizadas en una hidrólisis ácida y posteriormente se empleó un método combinado ácido – enzima, con malta obtenida del propio sorgo germinado, muestras M1 y M3. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se trabajó la variedad UDG – 110, a una concentración de ácido de 0.1 N ó 0.365 % y en un tiempo de 180 minutos, para tratamiento ácido y de igual forma para la M1 con UDG-110.Los resultados se muestran en las siguientes tablas VIII y IX.

Tabla VIII Resultados de las variedades estudiadas.

Muestra	Tipo de sorgo	°Brixl	Tiempo de Ferment.	°GL	Rend
I	CIAP6G-95	26	3 días y 2 h	4.4	0,1580
II	UDG-110	23.7	3 días y 6 h	3.6	0,1363
III	UDG-110	22.2	1 día y 12 h	3.1	0,1135

(Rodríguez, 2000)

Tabla IX Resumen de los resultados de la investigación.

No	S/L	Conc.Ácido	Tiempo	$\%CTS_{cons}$	$\%ART_{cons}$	ºGL	Rend	Prod
I	200	0.05	90	-	-	-	-	-
II	100	0.05	180	-	-	-	-	-
III	150	0.075	135	17,9190	66,6586	0	-	-
IV	200	0.1	180	17,5803	71,4216	1.5	0,04	0,17
V	100	0.1	90	54,7794	53,8350	0.5	0,05	0,08
M1	200	0.04	180	65,2652	95,8323	4.8	0,11	1,78
M2	200	0.04	180	6,3569	69,9927	0.9	0,03	0,23
M3	200	0.04	180	62,3493	93,4766	3.3	0,12	0,62

(Rodríguez, 2000)

Como se aprecia los mejores resultados obtenidos fueron para la combinación ácido - enzima (muestras M1 y M3) es por eso que los autores de este trabajo para estudiar la etapa de sacarificación, han analizado algunas de estas variables con el fin de estudiar la influencia de algunas de ellas como son la presión, la concentración de malta y la concentración de ácido, teniendo en cuenta la misma relación sólido/líquido y tiempo de cocción de las muestras analizadas anteriormente.

El tipo de hidrólisis empleada en el siguiente trabajo es una combinación ácido – enzimático, donde se utiliza la malta del propio sorgo como agente sacarificante.

Para el desarrollo del trabajo se hizo un diseño experimental del tipo 2^{k-1} donde k sería el número de variables, en este caso tres y para dos niveles de cada variable:

Tabla X Variables y niveles a estudiar en el diseño.

Variables	Niveles
Concentración de ácido (X_1)	0.146 – 0.365 %
Concentración de la malta (X_2)	4 – 10 %
Presión (X_3)	1 – 1.4 atm

Los niveles de cada variable fueron seleccionados sobre la base de los mejores resultados obtenidos en trabajos anteriores 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 2.4.

Tabla XI Programación del diseño de experimento

Experimento	X_1(%)	X_2(%)	X_3(atm)
1	0.365	10	1.4
2	0.146	10	1
3	0.146	4	1.4
4	0.365	4	1

2.2. Técnica general seguida para el desarrollo de los experimentos.

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

Tratamiento preliminar: En esta etapa el sorgo es secado previamente para facilitar la trituración que se realiza por medio de un molino casero con el fin de reducir la granulometría y de esta forma facilitar su acondicionamiento. El cereal molido es tamizado en una malla 9 y separadas sus fracciones. Esto se hace con el fin de romper la cáscara del sorgo que es muy dura, ya que para otros cereales se reporta que el tamaño del grano no tiene influencia en la obtención de alcohol. Además se recomienda trabajar con fracciones de grano reducidas hasta las ¾ partes, ya que inferior a estas tiende a gelatinizar en la etapa siguiente.

Hidrólisis de los almidones: Se pone a calentar el ácido clorhídrico hasta una temperatura aproximadamente de 50°C y luego se le agrega el sorgo, esta mezcla se agita espaciadamente durante un tiempo de 180 min con el objetivo de solubilizar e hidrolizar parcialmente los almidones. Para seguir la solubilización de los almidones se mide el Brix de la solución cada 30 min. Ver Anexo 2.

Luego las muestras que lo requieren se cuecen en le autoclave y se presuriza durante 30 min.

Luego de terminada la cocción se realiza un enfriamiento hasta la temperatura de 30 °C y se le ajusta el pH (ver anexo 1) a un valor comprendido entre 4.5-5 que es el rango donde se desarrollan las levaduras.

La hidrólisis culmina con la adición de la malta que se realiza a la temperatura de 30 °C y se agita durante 1 min y se incuba durante 1 h a la misma temperatura.

Fermentación: En esta etapa, por la acción de las levaduras, los azúcares fermentecibles son transformados en alcohol etílico y dióxido de carbono, además de otros productos en menor proporción. Aquí se incorporan los nutrientes y oxígeno inicialmente, para un mejor crecimiento y desarrollo de las levaduras, ya que se obvia la etapa de prefermentación.

Al jugo fermentado se le determina el grado alcohólico por picnometría o mediante un alcohómetro Gay Lussac y de ser necesario se pasa a la próxima etapa.

Filtración: EL fermento se filtra a vacío el cual se separa en licor claro y residuo sólido. El residuo sólido puede ser utilizado como alimento animal se somete a un proceso de lavado y secado debido a su pH ácido para poder ser utilizado y así no constituir una carga ambiental. El licor filtrado pasará a la etapa de destilación.

Destilación: El alcohol producido en la fermentación es separado del mosto por destilación fraccionada en una columna de cristal de 10 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.

Las mediciones realizadas a las muestras fueron:

Determinación de Carbohidratos Solubles Totales.

Los Carbohidratos Solubles Totales fueron determinados en muestras duplicadas de filtrados con el Método de Fenol - Ácido Sulfúrico. Ver Anexo 3.

Determinación de la concentración de Etanol.

La concentración del etanol fue determinada mediante el método de gravedad específica por picnómetro o por alcoholímetro. Ver Anexo 4

2.3 Desarrollo de los experimentos

Experimento 1

Se calienta un volumen de 1.5 L de una solución de HCL al 0.365 % (masa) hasta 50 °C y se adicionan 300 g de sorgo triturado.

$pH_{inicial} = 1.33$

Con una agitación pobre se calienta la solución durante 180 min y se mide la temperatura y el Brix

Tiempo(min)	Temperatura(°C)	°Brix
0	50	1
30	89	2.9
60	97	8.5
90	98	12
120	98.3	14.4
150	98.5	15.2
180	98.5	16.5

$pH_{final} = 1.16$

Después de la cocción presurizada y el enfriamiento se ajusto el PH

pH =1.6 $pH_{ajustado} = 4.8$

Se le adicionó un 10% de peso del grano de malta de sorgo

La etapa de filtrado

Vol. Fermento(ml)	Vol.Licor Filtrado(ml)	Masa Torta(g)	Rendimiento(%)
1.5	630	245	0.58

$°Brix_{inicial} = 15.5$

$CST_{iniciales} = 68.03$ g/L

La etapa de fermentación duró 44 horas

$°Brix_{final} = 8$

$CST_{finales} = 11.46$ g/L

Alcohol en fermento

° GL (Alcoholímetro)	5. 7
° GL (Picnómetro)	6.16

Por los resultados obtenidos en este experimento se procedió a la etapa de destilación en una columna de cristal de 10 platos con cazoletas y el producto fue caracterizado por cromatografía gaseosa. Los cromatogramas aparecen en el anexo 7 y el por ciento de componentes en base al total de los que acompañan al etanol en orden de mayor a menor son:

Acetato de Etilo……42.2%

Alcohol Isoamílico……...18.8%

n-Propanol……18.6%

n-Butanol……12.8%

Acetaldehído……..4.44%

Isopropanol……3.1 %

Experimento 2

Se calienta un volumen de 1 L de una solución de HCL al 0.146 % (masa) hasta 50 °C y se adicionan 200 g de sorgo triturado.

$pH_{inicial} = 1.61$

Con una agitación pobre se calienta la solución durante 180 min y se mide la temperatura y el Brix.

Tiempo(min)	Temperatura(°C)	°Brix
0	50	0.3
30	75	8
60	96	9.3
90	98	10.1
120	98.2	10.5
150	98.2	12.8
180	98.3	14.5

$pH_{final} = 2.61$

La muestra no se somete a presión

$pH_{ajustado} = 4.71$

Se le adicionó un 10% de peso del grano de malta de sorgo

La etapa de filtrado

Vol. Fermento(ml)	Vol.Licor Filtrado(ml)	Masa Torta(g)	Rendimiento(%)
1000	380	152	38

°Brix $_{inicial}$ = 14

CST $_{iniciales}$ = 59.43 g/ L

La etapa de fermentación duró 41.75 horas

°Brix$_{final}$ = 9

CST$_{finales}$ = 22.61 g/ L

Alcohol en fermento

° GL (Alcoholímetro)	2.3
° GL (Picnómetro)	2.37

Experimento 3

Se calienta un volumen de 1.5 L de una solución de HCL al 0.365 % (masa) hasta 50 °C y se adicionan 300 g de sorgo triturado.

pH $_{inicial}$ = 2.41

Con una agitación pobre se calienta la solución durante 180 min y se mide la temperatura y el Brix.

Tiempo(min)	Temperatura(°C)	°Brix
0	51	0.5
30	96	8
60	92	11.5
90	85	12.9
120	84.2	13
150	97	14.5
180	98	16

La variación en la temperatura se debe a que la fuente de calor fue inestable

pH $_{final}$ = 2.39

Después de la cocción presurizada y el enfriamiento se ajusto el PH.

pH = 2.4 $pH_{ajustado}$ = 4.52

Se le adicionó un 4 % de peso del grano de malta de sorgo

La etapa de filtrado

Vol. Fermento(ml)	Vol.Licor Filtrado(ml)	Masa Torta(g)	Rendimiento(%)
1500	450	477	30

$°Brix_{inicial}$ = 16.4

$CST_{iniciales}$ = 64.74 g/ L

La etapa de fermentación duró 44.08 horas

$°Brix_{final}$ = 9

$CST_{finales}$ = 24.86 g/ L

Alcohol en fermento

° GL (Alcoholímetro)	2.4
° GL (Picnómetro)	2.79

Experimento 4

Se calienta un volumen de 1 L de una solución de HCL al 0.365 % (masa) hasta 50 °C y se adicionan 200 g de sorgo triturado.

$pH_{inicial}$ = 1.61. Con una agitación pobre se calienta la solución durante 180 min y se mide la temperatura y el Brix.

Tiempo(min)	Temperatura(°C)	°Brix
0	50	0.3
30	97	11
60	97	14.2
90	96.5	15.4
120	97	16.3
150	97	16.5
180	96	23.3

pH_{final} = 1.36

La muestra no se somete a presión.

$pH_{ajustado}$ = 4.93

Se le adicionó un 4% de peso del grano de malta de sorgo.

La etapa de filtrado.

Vol. Ferm(ml)	Vol.Licor Filtrado(ml)	Masa Torta(g)	Rendimiento (%)
580	325	130	32.5

Se diluyó el fermento con 423 ml de agua, para llevar de 23 a 17 °Brix, producto que el valor recomendado para las levaduras S. cerevisiae.

$°Brix_{inicial}$ = 18

$CST_{iniciales}$ = 65.25 g/ L

La etapa de fermentación duró 41.75 horas

$°Brix_{final}$ = 9.5

$CST_{finales}$ = 17.12g/ L

Alcohol en fermento.

° GL (Alcoholímetro)	5
° GL (Picnómetro)	5.25

Experimento 5 Comparativo con malta de cebada

Esta muestra se le realiza el tratamiento bajo las mismas condiciones que el experimento 1, esto se debe a que para la malta de sorgo, los mejores resultados se obtienen para la primera muestra, entonces para comparar el efecto de las dos maltas, se realizan los experimentos a las mismas condiciones.

Se calienta un volumen de 1 L de una solución de HCL al 0.365 % (masa) hasta 50 °C y se adicionan 200 g de sorgo triturado.

$pH_{inicial}$ = 1.26

Con una agitación pobre se calienta la solución durante 180 min y se mide la temperatura y el Brix.

Tiempo(min)	Temperatura(°C)	°Brix
0	50	0.8
30	98.5	11.2
60	98	12.9
90	98.7	14.8
120	99	15.2
150	99	17.5
180	99	19.7

pH_{final} = 1.36

Después de la cocción presurizada y el enfriamiento se ajustó el PH

pH = 1.67 $pH_{ajustado}$ = 4.64

Se le adicionó un 10% de peso del grano de malta de cebada.

La etapa de filtrado

Vol. Fermento(ml)	Vol.Licor Filtrado(ml)	Masa Torta(g)	Rendimiento (%)
915	600	132.3	65.57

$°Brix_{inicial}$ = 16.5

$CST_{iniciales}$ = 74.35 g/l

La etapa de fermentación duró 39 horas

$°Brix_{final}$ = 7

$CST_{finales}$ = 8.38 g/l

Alcohol en fermento

° GL (Alcoholímetro)	6.0
° GL (Picnómetro)	7.02

2.4 Resultados

La etapa de hidrólisis es donde se obtienen los azúcares, para ser usados en la fermentación por la levadura, de ahí su importancia y su marcada influencia en el rendimiento del proceso de obtención de alcohol.

Es importante que en esta etapa se utilice un método de cocción adecuado para grano, ya que este tiene gran significación en los resultados del proceso.

Los principales parámetros del desarrollo del método que se utiliza en este trabajo se muestra en la figura 2.1

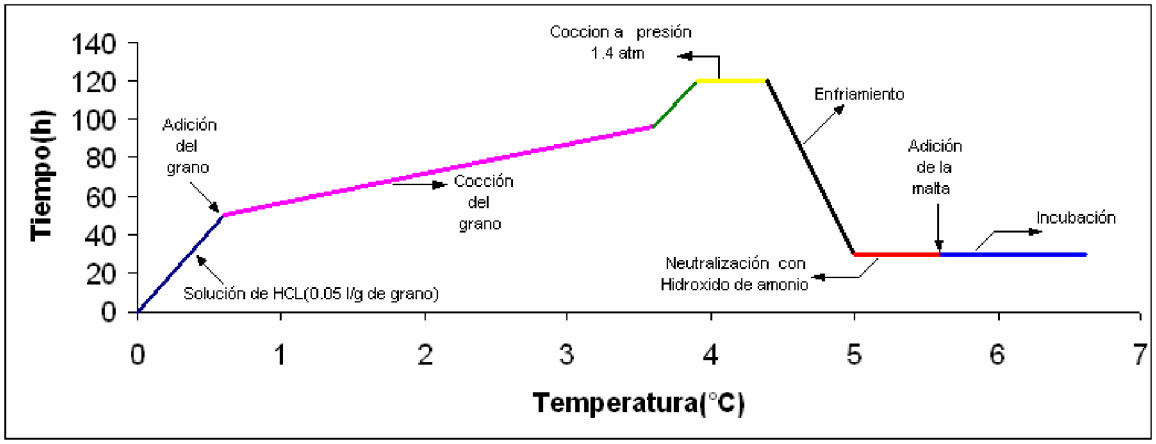


Fig. 2.1 Desarrollo de proceso de cocción.

Un resumen de los resultados de la etapa de hidrólisis aparece reportado en la tabla IX

Tabla XII Resumen de los resultados de la hidrólisis

Exp	Ácido(%)	Malta(%)	Presión(atm)	°Brix$_I$	CTS$_I$(g/l)	pH
I	0.365	10	1.4	16.5	68.03	1.6
II	0.146	10	1	14.5	59.43	2.61
III	0.146	4	1.4	16	64.74	2.4
IV	0.365	4	1	23.3	65.25	1.36
V	0.365	10	1.4	19.7	72.83	1.36

Con los resultados obtenidos en la tabla IX se procede a su procesamiento en el Software Statgraphics, pudiéndose, obtener un modelo que representa la influencia de las variables estudiadas sobre la formación de carbohidratos.

Modelo de carbohidratos

Carbohidratos = -757.848 + 1025.23*ConcÁcido + 50.7692*ConcMalta +

349.163*Presión

R^2 = 100 %

Del análisis estadístico realizado podemos concluir que la variable de mayor influencia en la formación de los carbohidratos es la concentración de ácido, seguido de la presión y por último la concentración de malta. Ver Anexo 6

También se pudo seguir el aumento del brix con la temperatura en esta etapa y obtener un modelo del comportamiento del brix en la cocción, el cual se muestra en la figura 2.2. Este aumento del brix con la temperatura se comparó con las curvas de elevación del punto de ebullición de las soluciones azucaradas en el proceso de obtención de azúcar y son semejantes. **(Honing, 1987)**

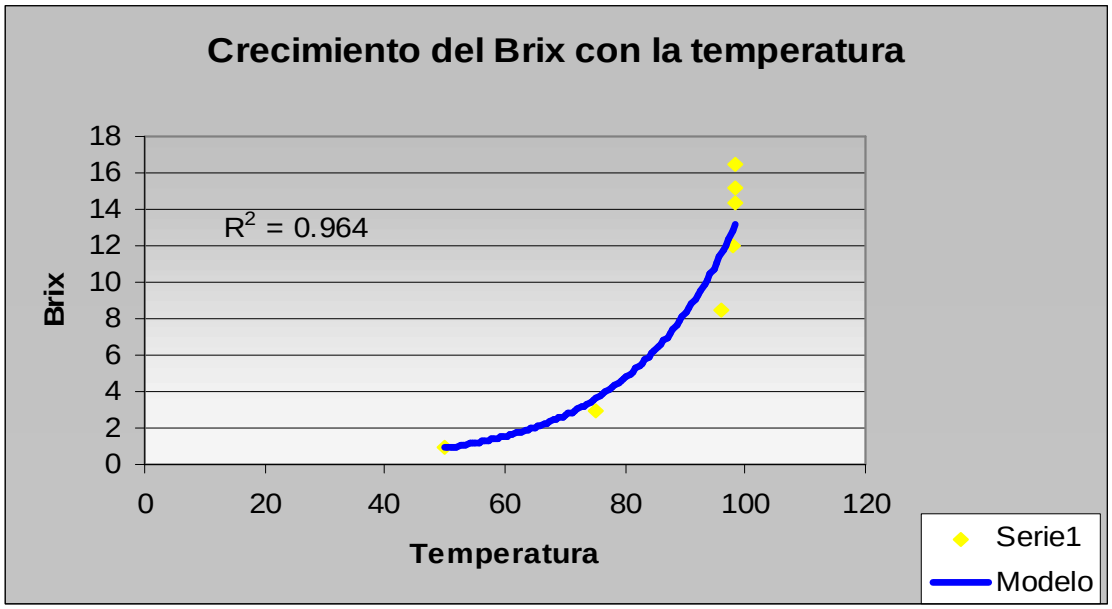


Fig. 2.2 Comportamiento del Brix en la cocción.

Por otro lado se determinaron algunas variables de respuestas para poder analizar la etapa de fermentación, como son el grado alcohólico de los fermentos, el rendimiento y las productividades de cada una de ellas.

Tabla XIII Resumen de los resultados de la fermentación

Exp	°Brix$_F$	Tiempo (h)	ºGL	CTS$_I$ (g/l)	CTS$_F$ (g/l)	Consumo (%)
I	8	44	6.16	68.03	11.46	83..32
II	9	41.75	2.37	59.43	22.61	61.95
III	9	44.08	2.79	64.74	24.86	61.6
IV	9.5	41	5.25	65.25	17.12	73.76
V	7	38	7.02	72.83	8.38	88.49

Tabla XIII (continuación)

Vol.Licor (L)	Prod (g/L-h)	Rend L/KgSorgo)	Rend(%)
0.63	1.106	0.1575	12.4
0.38	0.448	0.045	3.5
0.45	0.5	0.042	3.31
0.325	1.01	0.0853	6.74
0.6	1,459	0.21	16.59

Para analizar los resultados de la etapa de fermentación también se utiliza el Software Statgraphics para obtener un modelo mediante un análisis de regresión multifactorial y se relacionan en el mismo la influencia de las variables estudiadas con la variable de respuesta en cada caso , que pueden ser el rendimiento, la productividad y el grado alcohólico.

Modelo rendimiento

Rendimiento = -0.1616 + 0.157991*ConcÁcido + 0.0129833*ConcMalta +

0.094*Presión

R^2 = 100%

Modelo productividad

Productividad = -0.1485 + 2.65297*Ca + 0.00316667*Cm + 0.1775*p

R^2 = 100%

Modelo grado alcohólico

Grado Alcohol = 1.78917 + 0.388128*ConcÁcido + 0.424167*ConcMalta -

0.8375*Presión

R^2 = 100%

En los modelos anteriores se puede ver como se mantiene la concentración de ácido como la variable de mayor influencia, seguida por la presión y finalmente la concentración de malta. Esto se cumple excepto en el modelo del grado alcohólico donde la mayor influencia la posee la concentración de malta. El resto del análisis estadístico se puede consultar en el anexo 6.

2.5 Malteado del sorgo.

El sorgo empleado para obtener la malta fue la variedad UDG-110 la que fue liberada en 1989 por la Universidad de Guadalajara, México e introducida, estudiada y seleccionada por el grupo de mejoramiento Genético y Producción de Semillas de granos, Hortalizas y Vegetales de la UCLV, en 1992. Además presenta las siguientes características: Humedad inicial de 12.89 %, Proteína bruta, 12.5% base seca, 68% de almidones, además de presentar un tamaño, color y sabor característicos de su variedad.

Para el proceso de malteado del sorgo se requieren varias etapas:

Limpieza y selección: El grano se hace pasar por un tamiz malla 9, con el cual se logra separación del polvo, las impurezas y las partículas extrañas de mayor tamaño. Se retiran los granos partidos, semillas y otros tipos de granos que acompañan el cereal.

Remojo: En esta etapa se ponen 1.02 kg de sorgo en un recipiente adecuado y se añade agua hasta que todos los granos estén tapados por ésta. Se efectúa el remojo durante 60 h, cambiando el agua y aireando cada 6 h, evitando así que éste adquiera olor desagradable debido a la actividad de las bacterias presentes

en el grano, además se logra que se disuelvan en el agua sustancias que contiene el mismo y que pueden ser eliminadas durante el cambio de agua, porque de lo contrario estas sustancias pueden dificultar o retardar la germinación. Durante el remojo se determinó humedad cada 12 h, mediante desecación en una estufa a 100 ° C, cuyos resultados se muestran a continuación en la tabla XI y en la figura 2.3.

Tabla XIV Comportamiento de la humedad en la etapa de remojo.

Tiempo (h)	Humedad (%)
0	12.89
12	34.64
24	36.63
36	38
48	41
60	46

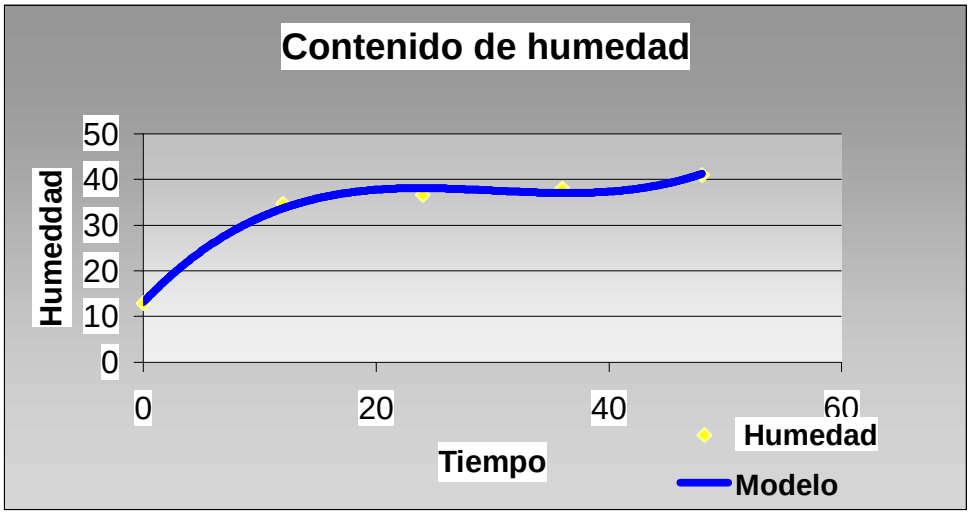


Fig. 2.3 Aumento del contenido de agua del grano en el remojo.

En esta etapa se pudo observar que a medida que transcurría el tiempo el grano iba creciendo, producto de la absorción del agua en el seno de grano, lo cual provoca una hinchazón (elongación de la semilla), este comportamiento se pudo seguir, midiendo una porción de granos, cada 6 h y midiendo su diámetro,

considerando que estos son una muestra representativa de la muestra, se procesó esa data estadísticamente, obteniéndose un promedio del tamaño. Los resultados se pueden observar en la tabla XV y en el grafico 2.4.

Tabla XV Crecimiento del grano durante la etapa de remojo.

Tiempo(h)	Tamaño de Grano(mm)	Elongación(mm)
0	3.85	0
6	4.15	0.3
12	4.28	0.13
18	4.30	0.02
24	4.32	0.01
30	4.33	0.01
36	4.34	0.01
42	4.35	0.01
48	4.36	0.01
48	4.37	0.01

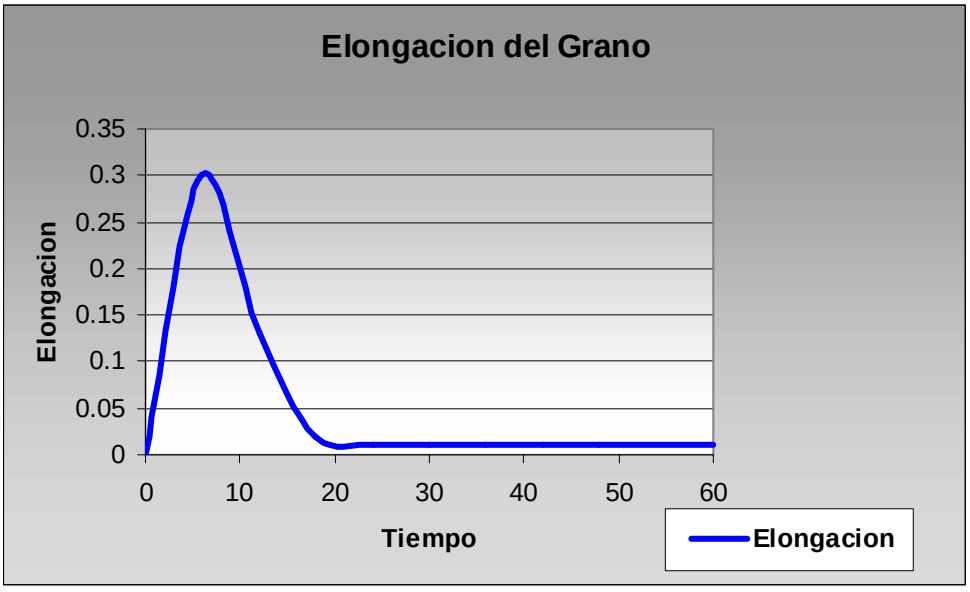


Fig. 2.4 Aumento del tamaño del grano.

Germinación: Al pasar a la germinación, los granos se colocan en una bandeja sobre un paño húmedo y cubiertos con un papel humedecido. Esta etapa dura aproximadamente 52 horas hasta que las raicillas alcancen las ¾ partes del tamaño del grano.

En el proceso de germinación, el grano produce alfa-amilasa, enzima que transforma el almidón insoluble en azúcares solubles. Lo cual tiene el efecto de aclarar la pasta hecha, calentando una mezcla de almidón en agua. A su vez, esto permite una mayor densidad calorífica en una pasta de una determinada viscosidad: puede utilizarse hasta el triple de harina germinada como si fuera grano sin germinar.

Secado: Concluída la germinación, los granos germinados se colocan en una estufa de tiro de aire inducido a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 5 h, ya que con esta temperatura se garantiza que no se destruyan las enzimas, luego la temperatura asciende hasta los100 °C, durante 30 min. El proceso concluye cuando el grano ha alcanzado una humedad inferior al 5%.

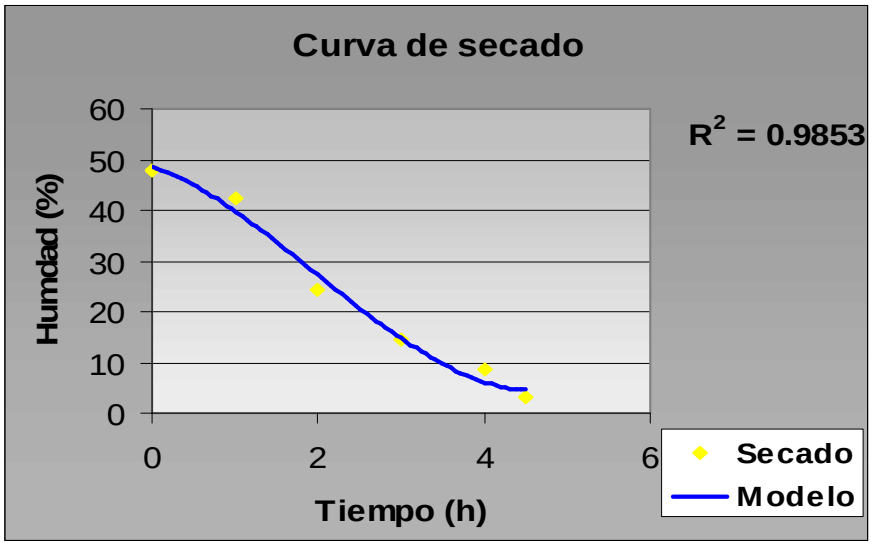


Fig. 2.5 Curva de secado

En esta etapa la malta adquirió un olor característico, parecido al de la malta de cebada empleada en las cervecerías. No fue factible por falta de tiempo y reactivos, determinar las propiedades a esta malta en la facultad, pero a las materias primas empleadas en este trabajo se le determinaron el contenido de

proteínas, así como el contenido de minerales. Esta malta será caracterizada en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, para su posterior uso.

2.6 Obtención del residuo sólido o DDG

En el proceso de obtención de alcohol a partir de cereales se genera un subproducto sólido que proviene de la fracción del grano que no fermentó y que se separa de la corriente principal. La fracción sólida de esta separación se recomienda ser tratada por dos razones fundamentales, la primera es el impacto ambiental que pudiera tener sino se tratara y la segunda es el alto valor energético, para la alimentación animal, la obtención de un subproducto a partir de este residual, reduce grandemente el impacto medioambiental. Por eso los autores de este trabajo decidimos realizar a pequeña escala la producción de un pienso o granzón.

Este residuo generalmente tiene un pH que no es adecuado para verter al medio ambiente, ni ser utilizado con fines alimenticios. El proceso para obtener el producto consta de dos etapas fundamentales la neutralización de la materia y luego la deshidratación por secado del producto final.

La neutralización se recomienda realizarla con agentes que tengan un aporte positivo en el contenido proteico del producto, estos se escogen dependiendo del pH del residual al finalizar el proceso. Para procesos donde el residual es ácido se recomienda la adición de sales sádicas y cálcicas, por el contrario en caso de ser básico pudiera utilizarse ácido fosfórico.

Elaboración del pienso

Se pesan 78.8 g de la torta que se obtuvo en la etapa de filtrado del experimento 1 se lavan en un volumen de 0.3 L de agua y esta solución se filtra a vacío obteniéndose un residuo sólido lavado y un agua residual a la cual se le mide el pH, esta operación de lavado se repite, hasta que el pH del agua alcance un valor cercano al neutro. El comportamiento de la etapa de lavado se describe a continuación en la tabla XVI y la figura 2.6

$pH_{\text{agua lavado}} = 7.23$

Tabla XVI Lavados en la neutralización del residuo sólido.

Lavados	pH
Lavado 1	4.46
Lavado 2	4.72
Lavado 3	5.12
Lavado 4	6.1
Lavado 5	6.5

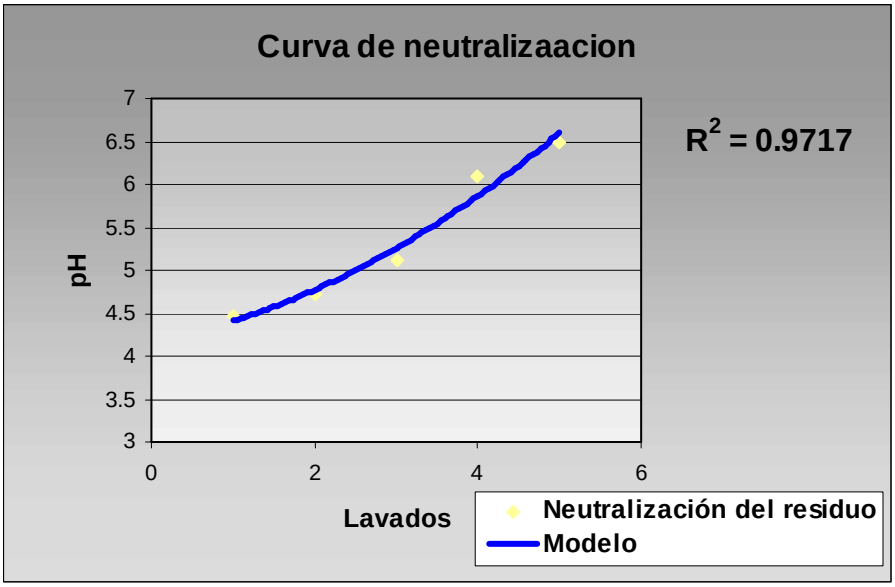


Fig. 2.6 Neutralización del residuo a través de los diferentes lavados.

Una vez neutralizado el pienso húmedo, se pesa nuevamente resultando una masa de 74.2 g. Esta se somete a una etapa de deshidratación en una estufa a una temperatura de 60 °C durante un periodo de 5h, resultando un producto de olor dulzón característico. El mismo fue sometido a una caracterización, los resultados de algunos de sus parámetros comparados con los de la malta de sorgo y de cebada, ambas empleadas en los experimentos, y también caracterizadas se reportan en la tabla XIV.

Tabla XVII Caracterización de las materias primas empleadas en los experimentos y del residuo (% materia seca)

		Minerales						
Grano	**% PB**	**Ca**	**Mg**	**K**	**Na**	**Fe**	**Cu**	**Zn**
Sorgo	12,5	0. 015	0,171	-	-	0,0042	0,00044	0,0025
Malta de Sorgo	11.01	0,0162	0,0256	0,0554	0,0342	0,0073	0,00090	0,0021
Residuo Sólido	48.06	0,0498	0,0248	0,0077	0,0289	0,0074	0,0715	0,0183
Malta. Cebada	13.56	0,0366	0,026	0,240	0,0217	0,0067	0,00065	0,0020

2.7 Análisis de resultados

Se realizó una caracterización a las maltas de sorgo y de cebada empleadas en los experimentos, (tabla XVII) , donde desde el punto de vista del contenido de los minerales analizados, la malta de cebada tiene mayor contenido de Potasio algo superior a cuatro veces la del sorgo y el Calcio el doble, sin embargo la malta de sorgo la supera ligeramente en Sodio, Hierro, Cobre y Zinc, mientras que el contenido de Magnesio es similar en ambas maltas y excepto en este último mineral y el Zinc son superiores a los reportados en la literatura para el sorgo sin maltear. La proteína es un poco menor en la malta de sorgo que en la de cebada y que en el sorgo sin maltear.

En la etapa de cocción, seguida para la realización de los experimentos con sorgo UDG 110, se aprecia que el brix obtenido es superior al obtenido con el sorgo CIAP-74V-04 empleado por Rodríguez **(Rodríguez, 2005),** lo cual corrobora en parte, lo planteado por esta autora en cuanto a la calidad de este sorgo para la obtención de etanol, sobre el empleado por ella en su trabajo. Se obtuvieron curvas de variación del brix con la temperatura a medida que ocurría la solubilidad de los almidones y la conversión parcial a azúcares, las cuales dieron parecidas a las reportadas para la elevación del punto de ebullición en soluciones de azúcar

de caña. **(Honing, 1987).** En esta etapa es fundamental controlar el calentamiento de las muestras, pues se presentaron dificultades en dos muestras, lo cual atenta contra el volumen final de fermento a obtener y por tanto en el rendimiento de la etapa.

En la etapa de hidrólisis completa, no fue posible medir los ART por dificultades con el reactivo Ácido 3-5 Dinitrosalicílico, a pesar de que es la variable que demuestra la efectividad de esta etapa, sin embargo por el análisis de los carbohidratos solubles obtenidos al final, los valores fueron inferiores a los obtenidos con esa misma malta en trabajos anteriores, e incluso tratados con menor concentración de ácidos **(Rodríguez, 2005),** se considera que estos resultados se deban a que el sorgo suministrado para los experimentos no era de la mejor calidad, por el tiempo que llevaba almacenado (semilla 2005) lo cual también fue planteado por Rodríguez.

En el modelo estadístico obtenido para analizar la influencia de las variables independientes o factores, para esta variable respuesta, la concentración de ácido tiene la mayor influencia, seguida de la concentración de malta añadida y con menor influencia o efecto negativo la presión, pero hay que decir que por la escasez de los experimentos (sin réplica), los modelos no tienen confiabilidad estadística y sólo son analizados como una tendencia para ver la influencia de las variables, pues en trabajos anteriores tratados por vía ácida se había visto la influencia de este factor sobre la solubilidad de los carbohidratos.

También para esta etapa se trazó la curva de perfil de temperatura contra tiempo, obteniéndose resultados similares a los obtenidos con otros cereales, empleando malta de cebada y para diferentes métodos de cocción. **(Underkofler, 1954)**

En la conversión de los carbohidratos a azúcares reductores que son los que aprovecha la levadura en la etapa de fermentación, para la obtención del producto final, el comportamiento es bastante similar en los indicadores de esta etapa (variables respuestas), la concentración del ácido sigue teniendo la mayor influencia, lo cual se refleja en las muestras I y IV que son las tratadas con la concentración mayor. En los modelos obtenidos para esta etapa, analizados como se dijo anteriormente como tendencia, el comportamiento es similar para las

variables rendimiento y productividad, donde las tres variables influyen, aunque en menor cuantía que en la etapa de sacarificación, esto es lógico, porque mientras mejor preparado esté el medio con el sustrato para el trabajo de las levaduras, así será la eficiencia de esta etapa. En el grado alcohólico la presión no ejerce prácticamente influencia. El consumo de carbohidratos se comporta de acuerdo a los resultados alcohólicos finales y con la misma influencia de las variables.

La malta de sorgo empleada, aunque con un tiempo prolongado de almacenamiento, tiene marcado efecto en los resultados, pues los grados alcohólicos obtenidos en estos experimentos, incluso en las variantes de niveles inferiores de esta variable, son superiores a los reportados sólo con el tratamiento ácido. También es importante el efecto de ella en la etapa de filtración de los licores y por tanto en el rendimiento. En estos experimentos se filtraron las muestras después de la fermentación, lo cual no se realizó por **Rodríguez (2005)** en su trabajo. Es importante continuar este estudio, pues en algunas bibliografías se plantea que los sólidos pueden interferir en la fermentación, pero por otro lado, otras señalan que en el caso de los almidones las cadenas de Amilopectina continúan desdoblándose en el proceso fermentativo, de ahí el comportamiento tan irregular que se presentó con el descenso del brix en los experimentos realizados y por tanto en los elevados tiempos de fermentación. Por otro lado también se ve en la literatura, en la obtención de alcohol a partir de granos que se filtra después de la destilación, para lograr un mejor rendimiento alcohólico de todo el proceso, además de obtener un residuo con mejores características para alimento animal.

Analizando los resultados generales obtenidos para la obtención de bioetanol a partir de sorgo UDG-110, empleando la sacarificación combinada ácido-malta del propio sorgo (tabla X) se aprecia que los resultados son superiores a los obtenidos por Rodríguez, si se tiene en cuenta la calidad de la materia prima y de la malta (ambas con un tiempo prolongado de almacenamiento), las cuales fueron empleadas de esa forma por causas ajenas a este autor. Los mejores resultados se obtienen para el experimento I, donde todos los parámetros medidos en la etapa final, son cercanos a los obtenidos sacarificando con la malta de cebada, en

iguales condiciones de tratamiento, seguida por el experimento IV, por lo que puede decirse que la malta de sorgo puede ser empleada para sacarificar las sustancias amiláceas en tratamiento combinado y con una concentración de ácido muy inferior a los reportados por otros autores, por otro lado se puede emplear una materia prima de producción nacional y a un costo mucho menor que la malta de cebada. **(Pargas, 1994).**

El proceso de malteado con sorgo más fresco, pudo realizarse después de terminados los experimentos, lo cual brindó resultados algo diferentes a los reportados por **Rodríguez (2005) y Pargas (1994),** en sus trabajos de diploma, la etapa de remojo duró alrededor de 16 horas más para obtener más del 45% de humedad, reportado para esta etapa en el malteado de cebada, en total esta etapa duró 60 horas. Se obtuvieron las curvas de humedad y de crecimiento del grano en función del tiempo, donde se aprecia que la velocidad de humidificación se mantiene constantemente ascendiendo hasta alcanzarse las 12 horas, a partir de la cual esta desciende mientras el grano se satura, hasta alcanzar la humedad final (Tabla XIV y Figura 2.3. Para el crecimiento del grano se ve que este se va hinchando y creciendo hasta obtener una elongación máxima alrededor de las ocho horas, a partir de la cual comienza a disminuir, manteniéndose constante a partir de las 20 horas, hasta esa hora la elongación sigue una curva de distribución estándar, a partir de la cuál, no crece el grano y sólo aumenta su contenido de humedad. (Tabla XV y Figura 2.4).

La etapa de secado fue modificada, como se plantea en la literatura, se calentó a 60^{o}C, hasta obtener un 12% de humedad y se elevó la temperatura a 100 ^{o}C en la etapa final, resultando este período muy corto para la malta de sorgo. El tiempo total de secado fue de 5,5 horas, tiempo extremadamente corto comparado con el de cebada, que puede durar hasta dos días en dependencia del tipo de malta que se desee producir. También se determinó la curva de secado para este cereal, con resultados adecuados con la bibliografía. (Fig.2.2). Como producto final se obtuvo una malta con olor dulzón y sabor característico, parecidos a los de la malta de cebada, lista para ser empleada en futuros trabajos.

Como se aprecia, los rendimientos son muy bajos, por lo que se hace necesario realizar experimentos, donde se empleen otros métodos de cocción o tiempos de sacarificación mayores, variable que también ha tenido gran influencia en estudios empleando el sorgo como materia prima en la obtención de bioetanol **(Fernández, C, et al. 2004)**, también es posible la combinación del licor obtenido a partir de sorgo, con otros sustratos de mayor contenido de ART como la miel final, para lograr mayores rendimientos lo cual constituye uno de los objetivos finales del proyecto ARE, es decir la obtención de bioetanol a partir de diferentes fuentes de sustratos, para ser utilizado en la producción de biodiesel.

En los resultados de la muestra de alcohol caracterizada por cromatografía, si bien no se reportan cuantitativamente la concentración, de los compuestos o impurezas que acompañan al etanol, los valores reportados en por cientos de los mismos, se pueden apreciar en lo cromatogramas, donde en mayores contenidos aparecen el acetato de etilo, aalcohol isoamilico, n-propanol, n-butanol , aacetaldehído y por ultimo el isopropanol, compuestos reportados normalmente para alcoholes etílicos, obtenidos a partir del sustrato tradicional y valores acordes a la calidad de la muestra caracterizada de 40º GL.

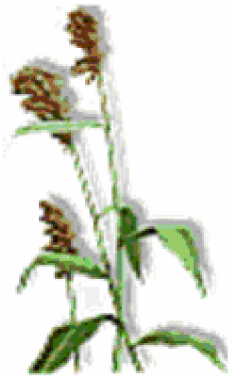
La preocupación que pudiera existir en cuanto al tratamiento ácido de estas muestras, y el comprometimiento del alimento animal al emplear este cereal, se elimina con la preparación dada al residuo para ser utilizado como pienso para animales monogástricos, el proceso fue bastante sencillo, pues se logra la neutralización del producto ácido en cinco lavados, variando el pH de estas aguas de forma lineal, como lo refleja la figura 2.3.

La caracterización de ese residuo (tabla XIV), tiene las características necesarias para ser considerado como alimento animal, ya que los niveles de proteínas, y minerales, están dentro de los parámetros establecidos para estos productos.

Conclusiones parciales

1. De las tres variables estudiadas, para la obtención de alcohol a partir de sorgo, empleando el tratamiento combinado ácido-enzima de la propia malta del sorgo, como vía de sacarificación, la concentración de ácido, resulta ser la variable de mayor influencia, seguida por la concentración de malta.
2. La malta de sorgo empleada, aunque con un tiempo prolongado de almacenamiento, tiene marcado efecto en los resultados, pues los grados alcohólicos obtenidos en estos experimentos, incluso con niveles para esta variable inferiores, los resultados son superiores a los reportados sólo con el tratamiento ácido, para condiciones similares de trabajo.
3. De acuerdo a la técnica seguida las mejores condiciones para la obtención de alcohol a partir de sorgo mediante tratamiento ácido-enzima son: concentración de ácido de 0.1mol/L o 0,365 % de ácido, 10% de malta referido a materia prima y por último la presión, cercanos a los resultados obtenidos con malta de cebada.
4. Se corrobora lo reportado en trabajos anteriores que el tiempo y condiciones de almacenamiento del sorgo, tienen influencia en la obtención de alcohol a partir de este cereal, ya que en los experimentos con malta y ácido realizados previo a este trabajo, se obtuvieron mejores resultados en la etapa de sacarificación que en los realizados actualmente con la misma malta y en condiciones de trabajo en algunos casos similares.
5. Se corrobora que el sorgo UDG-110 resulta ser un buen sustrato para la obtención de bioetanol, tanto en combinación ácido-enzima como solo con tratamiento ácido y recién cosechado, reportados anteriormente y siguiendo el mismo procedimiento experimental, ya que los rendimientos alcohólicos productividad y grados alcohólicos son los de mejores resultados.
6. Para la etapa de filtración la malta tiene un marcado efecto ya que los mejores resultados se obtienen para los experimentos tratados con mayor cantidad de malta.

7. El residuo obtenido de la producción de etanol, puede emplearse como alimento animal dada las características que el mismo presenta en cuanto a valor proteico, grasas, minerales, valor energético, etc.



CAPITULO III

Capítulo III: Diseño de una planta piloto para la producción de licores de sorgo como uno de los sustratos en la obtención de bioetanol

3.1 Esquema tecnológico del proceso y funciones de las diferentes etapas.

3.1.1 Introducción

Como parte del proyecto Acción Regional Estratégica (ARE), se tiene como tarea el proyecto de una planta para la producción de bioetanol, utilizando diferentes sustratos como licores de sorgo granero, licores a partir de residuos lignocelulósicos y mieles finales, del proceso de obtención del azúcar de caña, este alcohol será empleado en la etapa de transesterificación para la producción de biodiesel a escala piloto.

Este proyecto se concibe como un pequeño complejo de miniplantas para la obtención de biocombustibles, donde estas instalaciones se interrelacionan entre si y con su principal abastecedor de servicios auxiliares, la planta piloto de fabricación de azúcar "José Martí". La microlocalización del conjunto de plantas se escoge en ese lugar, debido a su cercanía con las materias primas (cachaza, bagazo y sorgo). También se analiza los accesos que tiene la instalación y la posibilidad de obtener una gran cantidad de servicios del central como vapor, electricidad, agua, etc.

Para la integración de dichas plantas se fijaron capacidades partiendo de la producción de biodiesel , y así quedó fijada capacidad de producción de bioetanol de 1.5 HL/día, por lo que aplicando balances de materiales y teniendo las características de los licores que serían empleados como sustratos, obtenidos a escala de laboratorio (ART) se determinó la cantidad de licor (sustrato) que tendría que entregar cada una de las plantas individuales a la etapa de fermentación y de esta a la de obtención final de un alcohol de 95^{o}GL.

Para la planta de obtención de licores de sorgo correspondió una capacidad de producción de la planta de 922 L de licor diarios ó 313.48 Kg/batch.

El proyecto de la planta desarrollado por **(Alemán, 2006)** siguiendo los resultados obtenidos experimentalmente de **(Rodríguez, 2005)**, serán reajustados con los resultados obtenidos en la presente investigación y son los resultados que serán reflejados en el presente capítulo.

3.1.2 Esquema del proceso

El proceso consta de las siguientes etapas:

1. Reducción de tamaño
2. Sacarificación
   2.1 Cocción de la harina y el ácido
   2.2 Cocción de la masa gelatinizada a presión
   2.3 Enfriamiento y mezclado con la malta
3. Filtrado
4. Neutralización

En la figura 3.1 aparece un esquema en forma de diagrama de bloques del proceso de obtención del licor de sorgo.

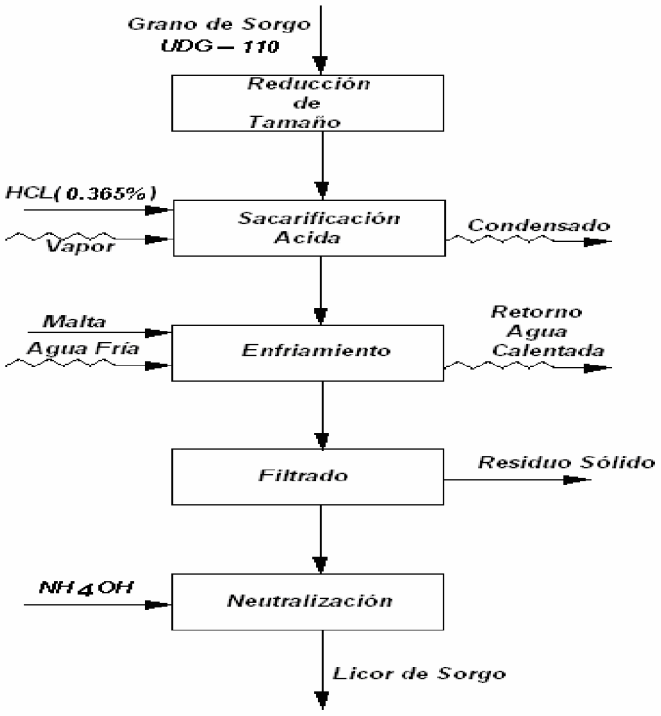
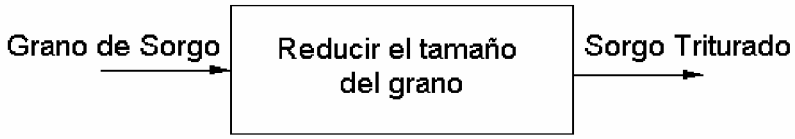


Figura 3.1 Etapas del proceso de obtención de licor de grano de sorgo

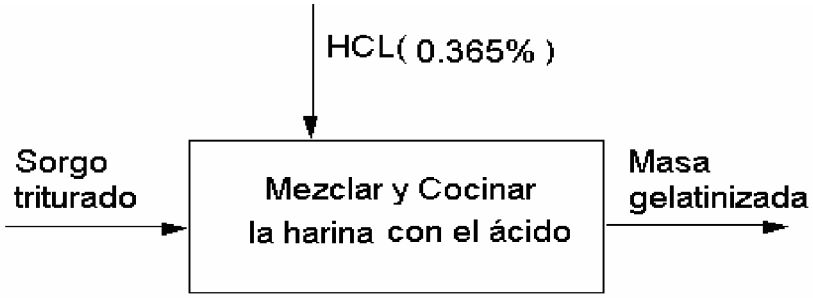
3.1.3 Funciones y objetivos de las diferentes etapas

Etapa de reducción de tamaño



La variable a controlar es el tamaño del grano triturado

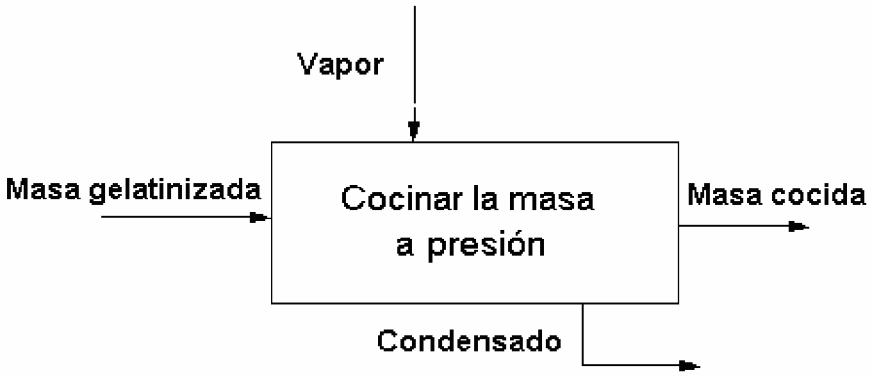
Etapa de Sacarificación (Cocción de la harina con el ácido)



Variables a controlar:

- Relación Temperatura /Tiempo
- Concentración del ácido: 0.365 %
- Agitación

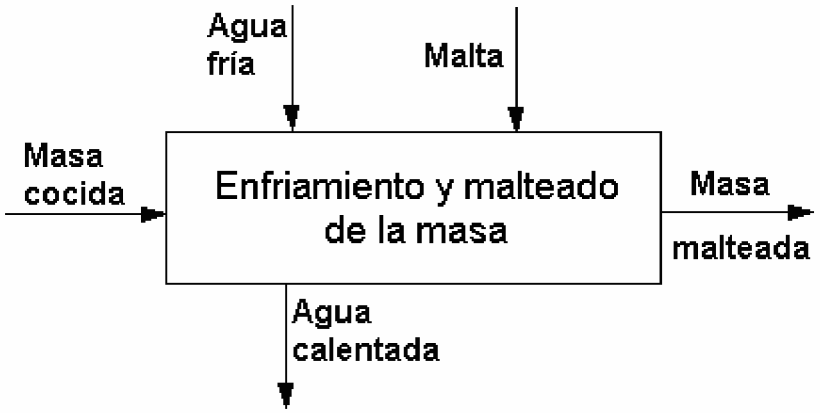
Etapa de cocción presurizada



Variables a controlar

- Presión del vapor 1.4 a.m.
- Temperatura 110 °C
- Tiempo 30 min.

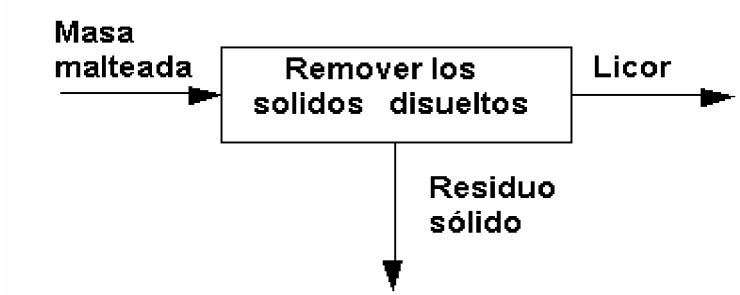
Etapa de enfriamiento y mezclado con la malta



Variables a controlar

- Temperatura de salida de la mezcla 28 °C
- Temperatura de entrada del agua 20 ° C
- Concentración de la malta 0. 02 Kg/ Kg de mezcla alimentada
- Agitación

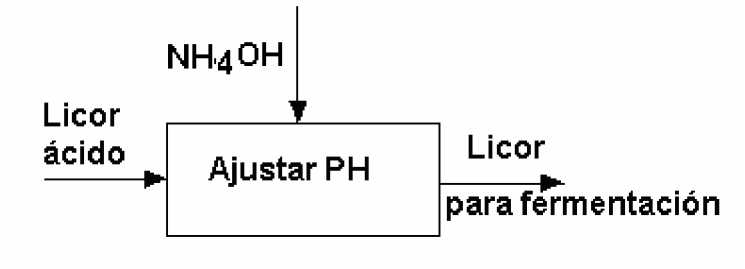
Etapa de Filtrado



Variables a controlar

- Grado de separación

Etapa Neutralización



Variables a controlar

- PH del licor para fermentación 4.5 – 5
- Concentración del NH_4OH
- Agitación

Función Total

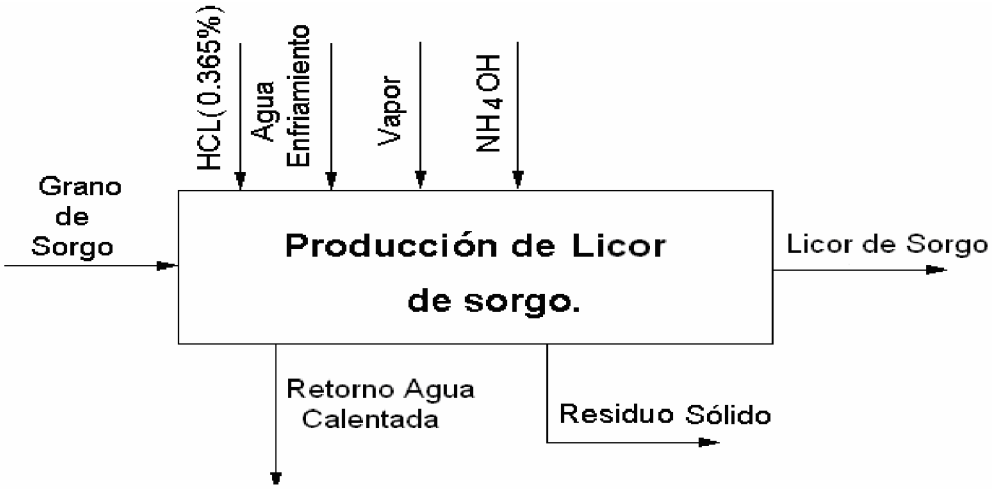


Fig. 3.2 Función total del proceso

El objetivo principal es producir un licor a partir de granos de sorgo, para ello es necesario que se cumplan los siguientes límites:

- El ácido clorhídrico a utilizar en la etapa de sacarificación es necesario que tenga una concentración de 0.365 %
- El agua de enfriamiento debe estar a una temperatura de 20 ° C.
- El producto final debe tener una concentración de (30 g/L de ART o superior)
- Se debe utilizar la S.Cerevisiae como levadura, cultivada en un caldo de malta al 10 %.

3.2 Selección de los equipos

Se deben seleccionar equipos para las siguientes operaciones:

1. Reducción de tamaño del grano
2. Transporte de sólidos
3. Calentamiento y cocción a presión de la masa
4. Enfriamiento de la masa
5. Filtración
6. Neutralización

Molino

La selección del molino para la operación de reducción de tamaño, se realizó por la tabla 4.5 **(Ulrich).** Atendiendo a los diferentes parámetros de esta tabla, como son la relación de reducción, la capacidad (Kg/s), el costo, el consumo de potencia, la compatibilidad con diferentes materiales y por último los materiales específicos del tipo de molino. Se analizaron molinos rotatorio de bolas, de Martillos y de Energía de Fluidos, entre ellos se seleccionó un molino de martillos porque además de que fue el que mejor resultado proporcionaba por la tabla, toda la bibliografía sobre el proceso propone este tipo de equipo para la etapa de reducción de tamaño.

Transportador

Para el transportador de sólido **(Ulrich)** se tuvieron en cuenta los parámetros tales como diámetro o anchura, longitud, capacidad máxima de sólidos m^3/s compatibilidad de los sólidos fibrosos, el transporte hacia arriba en un plano inclinado, la elevación vertical, el ángulo de inclinación limitado, el costo relativo anual y el consumo de potencia. Se analizaron transportadores de banda, de tornillo sin fin, elevador de cangilones y de cadenas y paletas en flujo continuo. De acuerdo a que el sólido que se necesita transportar es un sólido granular (sorgo) y considerando que debe introducirse en el tanque de cocción, se ha escogido el tornillo sin fin, a pesar de ser el transportador con mayor costo y consumo de potencia, pero es el más eficiente para este tipo de material.

Equipos de calentamiento y enfriamiento

Para el calentamiento y enfriamiento por las características de dichas etapas, que son grandes volúmenes a batch, se había pensado en tanques agitados con medios de calentamiento y se compararon las opciones de si calentar con una chaqueta o serpentín. Para estas dos etapas del proceso se escogieron tanques enchaquetados con agitación, Por las cantidades de calor que habría que manejar, a pesar de ser recipientes relativamente pequeños, no importó el alto costo de las chaquetas, frente a su gran eficiencia en dicho proceso.

Para la selección del filtro se tuvo en cuenta primeramente el tipo de filtro, de acción periódica o continua.

Se valoraron las ventajas que brinda el filtrado continuo, en cuanto a productividad, pero por el alto costo de este y la particularidad del proceso, que es completamente a batch, en las etapas anteriores, se valoraron los filtros de marcos y placas, filtro prensa y de criba y se tomó la decisión de seleccionar un filtro de marcos y placas.

Agitadores

En la selección de los agitadores se tuvieron en cuenta características tales como, velocidad de rotación, velocidad circunferencial en función de la viscosidad, costo, consumo energético, volumen de agitación, tipo de suspensión, la cantidad de impelentes en el mismo eje y otras, se consideraron los de Hélice o propela, de Turbina y de Paletas, resultando seleccionado el agitador de tipo paletas, ya que el mismo tiene bajo costo y por que el mezclado que se necesita no es tan grande e intenso. Además se recomienda para grandes volúmenes, con respecto al tamaño de los agitadores. También se tuvieron en cuenta las propiedades de la mezcla que se va a agitar, su viscosidad y densidad, e incluso se reporta en el diseño.

3.3 Balances de materiales

3.3.1 Datos usados en los balances

Capacidad de la planta: 922 l de licor diarios ó 313.48 Kg/batch

Duración de un batch: 4 h

Total de batch en la jornada: 3 batch cuando en realidad se pudieran realizar 6 batch en un día pero por razones de la seguridad de proceso, fiabilidad y aseguramiento de las materias primas en las etapas posteriores se realizarán solamente 3 batch.

Tiempo de trabajo de la planta: 12 h

Relación de ácido de solución de HCL /grano: 6 a 1

Densidad del sorgo: 0.7 Kg/l

Densidad del HCL: 1.85 Kg/l

Densidad del agua: 1.0 Kg/l

Densidad de la mezcla: 0.944 Kg/l

Densidad del licor filtrado: 1.06 Kg/l

Cp del sorgo: 1.68 KJ/Kg °C

Cp del HCL: 0.1 KJ/Kg °C

Cp del agua: 4.18 KJ/Kg °C

Cp de la mezcla: 3.81 KJ/Kg °C

Relación de separación en la etapa de filtración: Se obtienen 0.336 kg de residuo por cada 1 kg de masa que se filtre.

Base de cálculo - 1 batch

3.3.2 Balances de masa

Los balances de masa fueron planteados a partir del licor a obtener como producto, en cada uno de los equipos que componen la planta.

Balance de masa en el filtro

$M_{malteada} - M_{r.solido} = 313.48$

$M_{malteada} – 0.336*(Mmalteada) = 313.48$

$M_{malteada} =313.48/1-0.336)$

$M_{malteada}$ = 472.1 Kg/batch

Balance de masa en el tanque de enfriamiento y malteado

Se adicionan 0.022Kg de malta /Kg. de masa que se enfría

$M_{cocida} = M_{mateada} - M_{malta}$

$M_{cocida} = M_{matead} - 0.022* M_{mateada}$

$M_{cocida} = 472.1*(1-0.022)$

M_{cocida} = 482.2 Kg/batch

Balance de masa en la hidrólisis

El ácido se adiciona a razón de 6 Kg de ácido por cada Kg. de sorgo por lo tanto.

$M_{sorgo} = C_{ocida} - M_{HCL}$

$S_{orgo} = 482.2 – 6 S_{orgo}$

S_{orgo} = 482.2/7 = 68.95 Kg/batch

3.3.3 Balances de energía

Balances de energía en la camisa del tanque de cocción.

Esta etapa consiste en realizar el mezclado de la harina, con el ácido y se calienta hasta 50° C, luego se necesita guardar relación entre el tiempo y la temperatura.

Este calentamiento se pretende llevar a cabo en un tanque enchaquetado, utilizando vapor de baja presión 1.4 atm.

Datos:

Masa de mezcla = 481.74 Kg

Calor especifico de mezcla = 3.81 Kj/Kg °C

La solución de ácido entra a temperatura ambiente al tanque, por lo tanto primeramente hay que calentar la mezcla desde 25 a unos 50 °C

El calor que hay que transferirle a esa masa para que alcance esa temperatura es de:

$Q = mC_p\Delta t = 4.257*10^4$ KJ

Entonces para calcular en qué tiempo se realiza este proceso nos auxiliaremos de las ecuaciones de la sección 10.38 del Perry para procesos a batch:

$$Ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) = \frac{UA\theta}{MC_p}$$

Donde:

T_1: Temp. que entra la mezcla = 25 ºC

T_2: Temp. hasta donde se lleva la mezcla = 50 ºC

t_1: Temp. del medio calefactor = 110 ºC

U_d: Es el coeficiente total de transferencia de calor que será calculado, según la metodología que plantea Kern Cáp. 20, la cual se explicará detalladamente en el diseño del equipo.

$U_d = 762$ J/sm^2°C

A: El área de transferencia será calculada como propone Kern Cáp. 20

$$A = \pi dz + \frac{\pi d^2}{4}$$

A = 3.04 m^2

Luego el tiempo que se demora en calentar la masa hasta la temperatura deseada a esas condiciones se define:

$$\theta = \frac{Ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) MC_p}{U_d A}$$

$\theta = 4.2 \min$

Entonces la cantidad de calor Q en ese tiempo se convierte en el flujo calórico

$$Q' = \frac{4.25 * 10^4 Kj}{256 seg}$$

$Q' = 1.66 * 10^2 KJ/\mathrm{s}$

Entonces con un balance de energía entre el medio calefactor y la mezcla

$Q' = MC_p \Delta T$

$MC_p \Delta T = M_v \lambda$ donde λ es el calor latente del vapor e igual a 2228.5 KJ/Kg

M_v = 0.074 Kg/s ó 19 Kg de vapor/batch

Luego será necesario cocinar la masa desde 50 hasta 96 °C en un tiempo de 3 horas

El calor necesario es Q = mCpΔt = $7.83*10^4$ KJ que en el intervalo de tiempo serán:

Q' = 7.25 KJ/s

Entonces $MC_p \Delta T = M_v \lambda$

M_v= $3.25*10^{-3}$ Kg/s ó 35.1 Kg de vapor/batch

Sólo falta calcular el calor que necesita para mantener la temperatura durante 80 minutos, una vez que el sistema alcanza esta temperatura no habría que suministrar mas calor si no fuera por las pérdidas del sistema, las cuales se han estimado sean un 10 % del calor que se alimentó para llevarlo a dicho estado.

$Q_p = 0.1 * Q$

Q_p = 784.3 KJ eso en 480 seg.

Q'_p = $1.63*10^{-3}$ KJ/s

$M_v \lambda$ = 0.35 Kg de vapor/batch

La masa de vapor necesaria para esta etapa será la suma de estos balances y con un monto de 54.1 Kg de vapor de 1.4 atm de presión por cada batch.

Balance de energía para la cocción a presión.

Esta etapa se había pensado llevarla a cabo en un equipo tipo reactor con agitación rotatoria y adicción de vapor directo pero el alto costo que esto implica y su complicación en los balances, nos llevó a pensar en una alternativa mas económica y mas factible, que consiste en calentar la mezcla en el tanque de cocción, seguir calentándola hasta 110°C que es la temperatura del vapor a 1.4 atm y mantenerla durante 30 min.

Esto se lograría fácilmente una vez que en el mismo equipo se cerrase la válvula de la tapa y haciendo presión en su interior por un aumento sucesivo de temperatura en la camisa.

La masa habría que llevarla desde 96 hasta 110°C, el calor necesario para esto seria:

Q = mCpΔt = 6812.3 KJ

El tiempo que se demora en realizar esto la chaqueta de vapor de 1.4 atm es:

$$\theta = \frac{Ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) MC_p}{U_d A}$$

$\theta = 1940 seg$ **(32 min.)**

Entonces la cantidad de calor Q en ese tiempo se convierte en el flujo calórico

$$Q' = \frac{6812.3 Kj}{1940 seg}$$

$Q' = 3.51\ KJ/\text{s}$

Entonces con un balance de energía entre el medio calefactor y la mezcla

$Q' = MC_p \Delta T$

$MC_p \Delta T = M_v \lambda$ donde λ es el calor latente del vapor e igual a 2228.5 KJ/Kg

M_v = 1.57*10^{-3} Kg/s ó 3 Kg de vapor/batch

Luego que se alcanza la temperatura de 110°C, hay que mantenerla durante 30 min. para lo cual hemos considerado que la cantidad de calor que hay que

suministrar debe ser igual a las perdidas del sistema y éstas se consideran un 10 % del calor suministrado.

Q_{perd} =0.1* Q

Q_{perd} = 288.53 KJ en 30 min.

Q = 0.16 KJ/s

Mλ =7.18*10^{-5} Kg/s ó 0.13 Kg/batch

Para esta etapa la masa de vapor necesaria es de 3.13 Kg de vapor / batch

Balance de energía en la camisa del tanque de enfriamiento

Este balance se procede similar que con el tanque de cocción y se determina primeramente el calor a extraer del fluido que es:

Q = mCpΔt = 102184.2 KJ tratando de enfriar la mezcla desde 110 hasta 30 °C

Luego se calculó el tiempo que tardaría en enfriarse bajo las condiciones del proceso, utilizando agua de enfriamiento con 25 °C

$$\theta = \frac{Ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) MC_p}{U_d A} = 2156.1 \text{ seg. (36 min.)}$$

Por tanto Q'= 63.19 KJ/s

El área de transferencia también fue calculada

$$A = \pi dz + \frac{\pi d^2}{4} = 3.06 \text{ m}^2$$

Entonces se puede plantear el siguiente balance, considerando que el medio enfriante varie unos 8 °C su temperatura.

$$M_m C_p \Delta t = M_{H2O} C_p \Delta t$$

$$M_{H2O} = \frac{63.19}{4.18 * 8}$$

M_{H2O} **= 1.88 Kg/s ó 4074 kg/batch**

Para la resolución de los balances fue necesario el apoyo del diagrama de flujo de la planta completa el cual aparece en el anexo 8

3.4 Dimensionamiento de los equipos

Para el diseño y dimensionamiento se tuvieron en cuenta los equipos principales de la planta, los cuales se señalan a continuación

Equipos Principales

1. Molino de martillo
2. Tanque de cocción
3. Tanque de enfriamiento
4. Filtro
5. Tanque de neutralización

De acuerdo a los balances de materiales las dimensiones para los diferentes equipos se dan en las tablas XVIII - XXII

Tabla XVIII Dimensionamiento del Molino de martillo

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Potencia del motor (N)	Q_m=0.045t/h W=14.38 Kw/t	$N = Q_m * W$	0.652 Kw-h	Rosabal
Trabajo	W_i=10.6 (Tabla 10 Rosabal) Dpe=3.12 Dpj =1.58	$W = \frac{W_i * \left(\sqrt{D_{pe}} - \sqrt{D}\right.}{\sqrt{D_{pe} * D_{pj}}}$	14.38	Rosabal
Dpe	Tamaño las partículas que entran 4 mm	$D_{pe} = 0.8^{1.11} * 4$	3.12	Rosabal
Dpj	Tamaño las partículas que salen 1.98 mm	$D_{pj} = 0.8^{1.11} * 1.98$	1.54	Rosabal

Observaciones:

- Este equipo debe estar provisto de una criba con malla #9, asegurando que todas las partículas tengan un diámetro de $1.98*10^{-3}$.
- También un embudo de alimentación de 16x30 pulgadas, donde las partículas alimentadas no excedan un tamaño de 1 pulgada y no sean menor de 0.26 pulgadas.

Tabla XIX Dimensiones para el tanque de cocción

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Diámetro(D)	V_t=0.474 m^3 $\beta = H_c / r = 2.4$ $\alpha = H_f / r = 0.3$	$D = 2 * \sqrt[3]{\frac{V_t}{\pi * \left(\beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{6}\right)}}$	0.778 m	Ulrich
Altura Total(h)		$h_t = h_c + h_f$ Mas un sobre diseño del 20 %	1.26 m	Ulrich
Agitador de Paletas				
Largo del rodete(d)		d=0.65D	0.5 m	Rosabal
Ancho del rodete		d/8	0.063 m	Rosabal
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador		0.25Ht	0.315 m	Rosabal
Revoluciones del agitador(n)		$n = \frac{Re_m * \mu}{\rho_s^{\ 2} * D}$	2.4	Rosabal
Factor de potencia de agitación (Kn)	Re_m y Fig. 20.2 Rosabal		0.18	Rosabal

Consumo de potencia del Agitador(N)		$N = Kn * \rho * n^3 * D^5$	669.5 W ó 0.667 Kwh	Rosabal
Área de transferencia de calor de la camisa.(A)	D=0.778 m Z=1.06 m altura del líquido en el tanque	$A = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4}$	3.06 m^2	Kern
Calculo del Ud de la chaqueta				
Reynold modificado	N =2.4 rps d =0.5 m ρ =944 Kg/m^3 μ = $2.45*10^{-3}$ PaS	$\mathrm{Re}\, j = \frac{n * d^2 * \rho}{\mu}$	2.31 $*10^5$	Kern
J	Gráfica	$J = \frac{h_j * k}{D_j} * \left(\frac{C_p * \mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^{-0.14}$	850	Kern
Coeficiente de transferencia de calor de medio(hj)	Cp= 3.81Kj/Kg°C μ = $2.45*10^{-3}$ PaS k = 0.38 $\frac{Btu}{hpie - F}$ Dj= 0.778 m	$hj = \frac{J * k}{Dj} * \left(\frac{C_P * \mu}{k}\right)^{1/3}$	560.6	Kern
Uc	H_{io}= 1500 $\frac{Btu}{hpie^2 - F}$	$Uc = \frac{hj * h_{io}}{hj + h_{io}}$	408.1	Kern

Coeficiente total de transferencia de calor(Ud)	Rd = 0.005 $hd = 1/Rd = 200$	$Ud = \frac{Uc * hd}{Uc + hd}$	134.2 $\frac{BTU}{hpie^2 - F}$ o 762 $\frac{J}{sm^2 - C}$	Kern

- **Observaciones:**
- El tanque de cocción debe estar provisto de una chaqueta de calentamiento que será alimentada con vapor de 1.4 atm, regulado por una válvula automática que se accionará cuando la temperatura descienda. Para lograr esto debe tener un adecuado control de la temperatura.
- Se alimentará mas de una materia prima, por lo tanto debe estar provisto de varias entradas.
- El área de transferencia de la chaqueta está diseñada para que cubra todo el fondo y parte de la virola cilíndrica.
- El equipo será construido de acero inoxidable y tapado para lograr la presión necesaria(1.4 atm)
- El agitador debe ser colocado, desplazado del eje vertical para que sea mejor y más eficiente el mezclado.
- La tapa debe estar provista de una válvula de presión, para cuando se requiera lograr presión se cierre la misma.
- Además debe tener un sistema de control lazo cerrando donde un sensor de de presión o temperatura accione la válvula que alimenta el vapor.

Tabla XX Dimensiones del Tanque de Enfriamiento

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencias
Diámetro(D)	V_t=0.492 m^3 $\beta = H_c / r = 2.4$ $\alpha = H_f / r = 0.3$	$D = 2 * \sqrt[3]{\frac{V_t}{\pi * \left(\beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{6}\right)}}$	0.788 m	Ulrich
Altura Total(h)		$h_t = h_c + h_f$ Mas un sobre diseño del 20 %	1.27 m	Ulrich
Agitador de Paletas				
Largo del rodete(d)		d=0.65D	0.512 m	Rosabal
Ancho del rodete		d/8	0.063 m	Rosabal
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador		0.25Ht	0.265 m	Rosabal
Revoluciones del agitador(n)		$n = \frac{Re_m * \mu}{\rho_s^2 * D}$	2.4	Rosabal
Kn factor de potencia de agitación	Re_m y Fig. 20.2 Rosabal		0.18	Rosabal

Consumo de potencia del Agitador(N)		$N = Kn * \rho * n^3 * D^5$	713.7 W ó 0.713 Kwh	Rosabal
Calculo del Ud de la chaqueta de enfriamiento				
Coeficiente de transferencia de calor de medio(hj)	Cp= 3.81Kj/Kg°C μ = $2.45*10^{-3}$ PaS k = 0.38 $\frac{Btu}{hpie - F}$ Dj= 0.778 m	$hj = \frac{J * k}{Dj} * \left(\frac{C_P * \mu}{k} \right)^{1/3}$	476.9	Kern
Uc	H_{io}= 1500 $\frac{Btu}{hpie^2 - F}$	$Uc = \frac{hj * h_{io}}{hj + h_{io}}$	361.8	Kern
Coeficiente total de transferencia de calor(Ud)	Rd = 0.005 $hd = 1/Rd = 200$	$Ud = \frac{Uc * hd}{Uc + hd}$	128.8 $\frac{BTU}{hpie^2 - F}$ 731.3 $\frac{J}{sm^2 - C}$	Kern
Área de transferencia de calor.(A)	D,z	$A = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4}$	3.06 m	Kern

Observaciones:

- Para el buen funcionamiento de este equipo debe tener un buen control de la temperatura, pues no se debe descargar hasta que no alcance la temperatura adecuada.
- El área de transferencia de la chaqueta está diseñada para que cubra todo el fondo y parte de la virola cilíndrica.
- El equipo será construido de acero inoxidable y tapado aunque trabaja a presión atmosférica.
- El agitador debe ser colocado , desplazado del eje vertical para que sea mejor y mas eficiente el mezclado.

Tabla XXI Dimensionamiento del filtro

Área (m^2)	Longitud del marco (cm)	Ancho del marco (cm)	Área de un marco Lm *Am *2 (m^2)	N° de Marcos Area /Area (m)
4.5	40	37.5	0.3	15

Observaciones:

Para el diseño de este equipo se tomaron en la practica los valores de masa de sólidos en la torta/volumen de liquido, masa de sólidos por masa de liquido, dando similares a las supuestas en el proyecto de curso, siendo algo diferente la Masa de sólidos en la suspensión/unidad de volumen de líquido.

Tabla XXII Dimensiones del Tanque de Neutralización

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencias
Diámetro(D)	V_t=0.31 m^3 $\beta = H_c / r = 2.4$ $\alpha = H_f / r = 0.3$	$D = 2 * \sqrt[3]{\frac{V_t}{\pi * \left(\beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{6}\right)}}$	0.676 m	Ulrich
Altura Total(h)	$hc = 1.2d = 0.81$ $hf = 0.15d = 0.1$	$h_t = h_c + h_f$ Mas un sobre diseño del 20 %	1.10 m	Ulrich

Agitador de Paletas				
Largo del rodete(d)		d=0.65D	0.44 m	Rosabal
Ancho del rodete		d/8	0.054 m	Rosabal
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador		0.25Ht	0.275 m	Rosabal
Revoluciones del agitador(n)		$n = \frac{\mathrm{Re}_m * \mu}{\rho s * D^2}$	3.2	Rosabal
Kn factor de potencia de agitación	Re_m y Fig. 20.2 Rosabal		0.18	Rosabal
Consumo de potencia del Agitador(N)		$N = Kn * \rho * n^3 * D^5$	786 W ó 0.786 Kwh	Rosabal

Observaciones:

- Es importante en el diseño de este taque no olvidar ,que debe medirse el PH en esta etapa por lo que debe estar provisto de un control de PH , o al menos por un toma muestras para controlar dicho parámetro en un laboratorio , esto como alternativa debido a los altos precios de un PHmeter.

- También debe tener más de una entrada, para adicionar el hidróxido de sodio.
- El equipo será construido de acero inoxidable y tapado auque trabaja a presión atmosférica.
- El agitador debe ser colocado , desplazado del eje vertical para que sea mejor y mas eficiente el mezclado

3.5 Análisis económico

En la producción de biocarburantes actuales todavía se discute la idoneidad de las materias primas, por razones referentes a su costo y disponibilidad. Se ha comprobado que los costos de mayor significación, dentro del proceso son los de la materia prima.

En este trabajo se analizan dos alternativas de producción de licor de sorgo para producir bioetanol, utilizando diferentes materias primas. Las alternativas consisten en comprar económicamente el efecto de la utilización como agente enzimático de la malta de sorgo y la malta de cebada.

Tabla XXIII Alternativas para el análisis económico

Alternativa I	Malta de cebada.
Alternativa II	Malta de sorgo.

Costo de inversión.

El costo de inversión, el costo del equipamiento, la inversión fija y la inversión total de la planta permanecerán constantes para las dos alternativas, ya que la tecnología es común para ambas, solo cambian los costos de fabricación, por el cambio de la materia prima.

Costo de Inversión = Inversión fija + Inversión de trabajo

Inversión fija = costo directo + costos indirectos

Costos del equipamiento:

Costo actual = costo original * índice actual / índice original

Índice original: 109.1 **(Peter, 1967)**

Índice Actual Diciembre del 2006: 499.6 (**Chemical Engineering, 2007**)

Costo actual = costo original * 4.579

Tabla XXIV Costo del Equipamiento

Equipo	Costo Original($)	Costo Actual($)	Referencia
Molino de martillo	195	891	Fig. 13.82 Peter
Tornillo sin fin	61.5	281.3	Fig.13.97 Peter
Tanque de cocción	10000	45737	Fig.13.56 Peter
T. de enfriamiento	150	686	Fig.13.56 Peter
Filtro	500	2286.8	Fig.13.67 Peter
T. de Neutralización	233	1065.7	Fig.13.56 Peter
Bombas(L-1 y L-2)	138.4 y 210	633 y 960.5	Fig.13.40 Peter
Total	11254.9	52541.3	

Tabla XXV Inversión Fija

	Indicador		Fórmula	Costo
	Equipamiento		100%	$52541.3
	Instalación de equipos		35% del costo de equipamiento	$18389.45
	Aislamiento		9% del costo de equipamiento	$4728.7
	Instrumentación y control		6% del costo de equipamiento	$3152.47
	Tuberías		66% del costo de equipamiento	$34677.26
	Instalaciones eléctricas		7% del costo de equipamiento	$3677.9
Costos directos	Servicios	Generación de vapor	3% de la inversión fija	0.03*IF
		Distribución del vapor	1% de la inversión fija	0.01*IF
		Suministro de agua	1% de la inversión fija	0.01*IF
		Distribución de la electricidad	0.4% de la inversión fija	0.004*IF

		Almacenamiento de las materias primas	2% de la inversión fija	0.02*IF
		Almacenamiento de los productos finales	1% de la inversión fija	0.01*IF
		Sistema de protección contra fuego	1% de la inversión fija	0.01*IF
Costos indirectos	Supervisión y Ingeniería		5% de la inversión fija	0.05*IF
	Gastos de construcción		1% de la inversión fija	0.01*IF
	Gastos de puesta en marcha		10% de la inversión fija	0.1*IF
	Imprevistos		10% de la inversión fija	0.1*IF

Inversión fija (IF) = costos directos (CD) + costos indirectos (CI)

IF = 52541.3 + 18389.45 + 4728.7 + 3152.47 + 34677.26 + 3677.9 + 0.03*IF + 0.01IF + 0.01*IF + 0.004*IF + 0.02*IF + 0.01*IF + 0.01*IF + 0.05*IF + 0.02*IF + 0.1*IF + 0.1*IF

IF = 117167.1 + 0.354*IF

IF = $ 181373.22

Inversión de trabajo (iT) = 10% de Inversión total (IT)

Costo de Inversión total (IT) = Inversión fija + Inversión de trabajo

IT = $ 181373.22+ 0.10*IT

IT = $ 201525.8 (Inversión total)

Costos de Producción

Costos de producción para la alternativa I

Costos Totales de Producción (CTP) = Costos de Fabricación (CF) + Gastos Generales (GG)

Costos de fabricación (CF) = Costos Directos (CD) + Costos Fijos (CF) + Costos Indirectos (CI)

Tabla XXVII Costo de las materias primas

Materia prima	Precio ($/Kg)	Consumo (Kg/año)	Costo ($/año)
Sorgo	0.12	49644	5957.28
HCL	0.84	852	715.68
Malta de cebada	4.8	7638	36662.4
		Total	43335.36

El costo total de las materias primas es:

MP = 43335.36 $/año

Costo de la mano de obra:

La cantidad de obreros en relación a la cantidad de operaciones unitarias es:

8 obreros (según tabla 21 del Peter)

Costo: 8*300/mes*1mes/24dias = 100 $/obrero-día = 24000 $/obrero-año

Costo de los sistemas auxiliares

Electricidad

El costo de la electricidad es 0.063$/kW-h.

La potencia requerida para la planta es: 10 kW

Costo de la electricidad:

10 kW*0.063 $/kW-h*8h/día = 5.04 $/día = 1210 $/año

Vapor y agua

Costo del vapor de agua saturado: 0.008 $/Kg de vapor

Cantidad de vapor a utilizar: 180 Kg/día

Costo del consumo de vapor: 1.44 $/día = 346 $/año

Costo del agua: 0.08 $/$m^3$, cantidad de agua: 12222 Kg/día = 12.2 m^3/día

Costo del agua: 0.976 $/día = 234.24 $/año

Requerimientos de vapor y agua = 580 $/año

Tabla XXVIII Costos de Fabricación Alternativa I

		Indicador	Fórmula	Costo/día	Costo/año
Costos de fabricación cebada	Costos directos de producción	M primas	-	180.564	43335.36
		M. de obra	-	100	24000
		Supervisión	0.1*M.obra	10	2400
		Vapor Agua,Electricidad		7.4583	1790
		Mantenimiento y reparaciones	0.05*IF	37.786	9068.661
		Suministros	0.005*IF		906.8661
		Laboratorio	0.1*Mano de obra	10	2400
	Costos fijos	Depreciación	IT/(Vida útil)		23597.8689
		Seguros	0.004*IF	3.022887	725.49288
		Impuestos	0.1*IF		18137.322
	Costos externos	Otros costos	0.5*(M.Obra+Sup+ Mtto)	28.893	6934.3305
	Costos de fabricación				**133295.91**

Gastos generales = 0.1*CTP

CTP = CF + GG = CF + 0.1*CTP

CTP = 148106.55 $/año

Tabla XXIX Valor total de la producción

Producto	Producción (Kg/año)	Precio ($/Kg)	Valor ($/año)
Licor	225360	0.25	56340
Residuo Sólido	78960	0.07	5527.2
		Valor Total	61867.2

G_1 = V.P – CTP

V.P = 61867.2 $/año

G_1 = 61867.2 $/año –148106.55 $/año = - 86239.35 $/año

Alternativa II

La segunda alternativa se analiza de la misma forma solo cambia el costo total de la materia prima, por lo tanto los valores de la inversión fija y total permanecen constantes

Tabla XXX Costo de las materias primas

Materia prima	Precio ($/Kg)	Consumo (Kg/año)	Costo ($/año)
Sorgo	0.12	49644	5957.28
HCL	0.84	852	715.68
Malta de sorgo	1.8	7638	13748.4
		Total	20421.36

El costo total de las materias primas es:

MP = 20121.44 $/año

Tabla XXXI Costo de fabricación alternativa II

		Indicador	Fórmula	Costo/día	Costo/año
Costos de fabricación sorgo	Costos directos de producción	Mprimas	-	85.0875	20421
		Mobra	-	100	24000
		Superv	0.1*M.obra	10	2400
		revaaguele		7.45833333	1790
		Mantenimiento y reparaciones	0.05*IF	37.7860875	9068.661
		Suministros	0.005*IF		906.8661
		Laboratorio	0.1*Mano de obra	10	2400
	Costos fijos	Depreciación	IT/(Vida útil)		23597.8689
		Seguros	0.004*IF	3.022887	725.49288
		Impuestos	0.1*IF		18137.322
	Costos externos	Otros costos	0.5*(M.Obra+Sup.+ Mtto)	28.8930438	6934.3305
	Costos de fabricación				110381.541

CTP = 122646.15 $/año

G_2 = 61867.2 $/año –122646.15 $/año = - 60778.95 $/año

La diferencia entre ganancias de las alternativas es 25460.7 $/año

3.6 Análisis de resultados.

En las variantes analizadas se aprecia que la ganancia es negativa en ambas alternativas, pues los valores de la producción son muy bajos, siendo más desfavorable en la que emplea la malta de cebada por el costo de esta materia prima comparada con la de sorgo

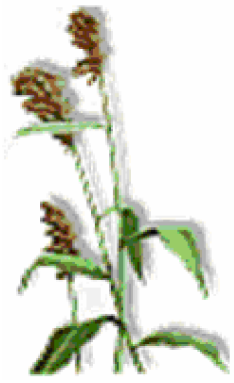
Por lo antes señalado la planta diseñada para la producción de licores de sorgo no es rentable, lo cual es lógico para una planta de este tipo, que constituye una etapa de un proceso completo de producción de bioetanol, donde el producto final a cotizar es el etanol y que a su vez es una planta piloto.

Por otro lado como se plantea en los resultados experimentales, los rendimientos aun son bajos, lo que conlleva a una modificación del proceso de sacarificación.

Debe valorarse el diseño de la planta cuando se modifique la etapa de sacarificación o analizarla en el contexto de la destilería completa con todas sus etapas

Conclusiones parciales

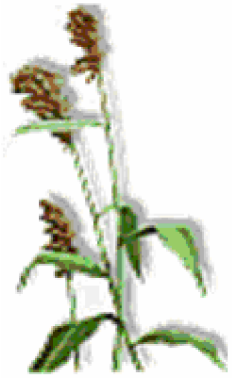
1. La planta de producción de licores de sorgo puede ser considerada en la variante de emplear este producto, con el objetivo por el que fue planteada, obtener uno de los sustratos en la producción de bioetanol.
2. La ganancia aunque negativa se hace más favorable en la variante de emplear como enzimas para la sacarificación la malta de sorgo, por la diferencia tan notable en los precios de cada una de ellas, una de importación y la otra de producción nacional. La diferencia entre las ganancias de las dos alternativas es de 25460.7 $/año.
3. Es importante considerar, en la integración del proyecto completo bioetanol-biodiesel, el diseño de una planta de malteado de sorgo de capacidades superiores, no solo para ser empleada en la producción de bioetanol, sino que pudiera emplearse con fines alimentarios.



CONCLUCIONES

Conclusiones generales

1. Las características de la malta de sorgo, muy parecidas a las de la malta de cebada, permiten su empleo como enzima en los procesos de sacarificación de almidones para la obtención de alcohol, corroborado además por los resultados obtenidos, comparables con los realizados con malta de cebada en igualdad de condiciones, además que mejora la etapa de filtrado de este proceso
2. El sorgo constituye un material amiláceo idóneo como sustrato en la producción de bioetanol, por los rendimientos que presenta como cultivo, resistencia tanto a la sequía como a la humedad, así como su bajo costo comparado con otros cereales.
3. De los sorgos estudiados como sustrato, para la obtención de bioetanol, el UDG-110 de doble propósito es el que mejores resultados ha brindado en todos los experimentos realizados.
4. Si bien los resultados obtenidos en cuanto al grado alcohólico y productividad del proceso son adecuados, cercanos a los que se obtienen a partir de la caña de azúcar en fermentación discontinua, los rendimientos son muy bajos, por lo que deben valorarse otros métodos de sacarificación.
5. La planta diseñada para la producción de licores de sorgo no es rentable, ya que las ganancias son negativas, dado el nivel de escala (planta piloto) y constituir una etapa del proceso de producción de Bioetanol.
6. El proceso de producción de bioetanol por sacarificación de los almidones del sorgo puede considerarse una tecnología viable, no sólo desde el punto de vista económico al obtenerse un producto de alta demanda y a bajo costo, sin comprometer la alimentación animal ni el medio ambiente.



RECOMENDACIONES

Recomendaciones

1. Por los bajos rendimientos obtenidos se recomienda analizar otros procesos de cocción, e ir determinando la conversión de los almidones a azúcar a lo largo del proceso, así como el volumen de fermento a obtener.
2. Sería recomendable realizar algunos experimentos con los resultados obtenidos, complementando azúcares para la fermentación con otros sustratos, como el jugo de la caña de sorgo forrajero, miel final, etc.
3. Se sugiere para futuros trabajos medir de forma experimental la eficiencia de la fermentación haciendo burbujear el CO_2 desprendido en este proceso en una solución alcalina digamos de hidróxido de sodio, determinando luego la concentración por métodos gravimétricos.
4. En los experimentos que se continúen realizando para este estudio, es necesario disponer de la materia prima suficiente para la realización de replicas, caracterizar las materias primas, ya que las mismas tienen marcada influencia en los resultados y pueden variar de cuerdo a la cosecha realizada.
5. De acuerdo a los resultados que se obtengan en el método empleado en la cocción, deberá modificarse el diseño realizado para la obtención de los licores de sorgo como sustrato alcoholero.
6. Debe considerarse y analizarse también en la integración completa de la planta de producción de bioetanol-biodiesel la planta de producción de malta pudiéndose emplear estas producciones en otros usos, por ejemplo como alimento.

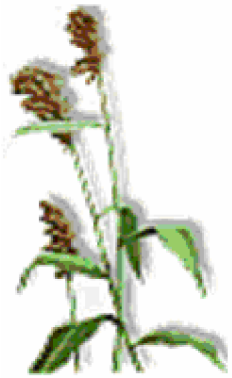
BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

1. Abreu, R. (2005). "Alcohol orgánico: otra alternativa de diversificación."
2. Alemán, L. (2006). "Diseño de una planta de licor de sorgo."
3. Altmann, R. (2004). "Uso de sorgo granero en la producción de alcohol carburante y alimento animal en Costa Rica."
4. ANCAP (2004). "Destilería capuro."
5. Andrés, J. (2003). "Biocarburantes: Algunas consideraciones."
6. BIO-CAT. (2007). "Enzyme products." Retrieved 20 Junio, 2007.
7. Bitter, R. (1993). " Distillation some new data" " Chemical Engineering 100(11).
8. Blanco, G. (1982) La producción de alcohol a partir de la industria azucarera y sus posibilidades.
9. Campo, F. (2005). Evaluación técnico - económica de la introducción de biocarburantes en España a partir de cultivos energéticos. Madrid, ICAI Universidad Pontificia Comillas.
10. Castro, F. (2007). "Condenados a muerte prematura por hambre mas de 3 mil millones de personas en el mundo." Granma 43.
11. De Lucas, J. (1994). "Fermentación Alcohólica."
12. Fabelo, J. (1999). Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos. Ing.Qca. Sta.Clara, UCLV.
13. FEDNA (2003). Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la formulación de piensos compuestos Madrid, C. de Blas, G.G. Mateos y P.Gª. Rebollar
14. Fernández, C. G., O (2004). "Alcohol a partir de sorgo dulce. Sacarificación y fermentación." Comunicaciones científicas y tecnológicas.
15. Gálvez, I. (1973). "Etanol y otros alcoholes".Barcelona.
16. García, B. (2006). Presentación de planta de producción de bioetanol. Madrid, Aries Ingeniería y Sistemas, S.A.
17. Herrera, A. (1989). "Manual de prácticas de laboratorio de microbiología industrial".

18. Honing, P. (1987). Principios de la tecnología azucarera. La Habana, Ediciones Revolucionarias.
19. Horri, J. (1979) Biotechnology Bioengineering Symposium.
20. Hough, J. (1990). Biotecnología de la cerveza y de la malta. Zaragoza.
21. Ibarz, J. (2006). "La masificación de los biocombustibles. Conducir con alcohol es sano." La Nación.
22. Kern, D. (1988). Procesos de Transferencia de Calor.
23. Laval (1982). "Producción de etanol por proceso denominado: "Biostil" " Brasil Azucarero 6.
24. MACU (1986). “Producción de alcohol y levadura”.
25. MADR (2006). Exposición de Motivos Zonas Francas para Biocombustibles.
26. Malpica, K. (2006). "Otros usos de Alcohol."
27. María, J. (2006). "La producción de biocombustibles."
28. Marshall, R. V., N (2007). Economic Indicators Chemical Engineering 114: 84.
29. Mathewson, S. (1980). The Manual for the Home and Farm Production of Alcohol Fuel J.A. Diaz Publications.
30. Otero, M. (1990). Efecto inhibitorio de las melanoidinas sobre el crecimiento de la Candida utilis. II Seminario Internacional de Azúcar y Derivados de la caña, La Habana.
31. Pargas, M. (1994). Estudios de germinación del sorgo para producir malta. Ing.Qca. Sta. Clara, UCLV.
32. Pavlov, K. (1981). Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química.
33. Peter, M. T., K (1968). Plant Desing and Economics for Chemical Engineers.
34. Polania, F. (2002). "El sorgo dulce en china." Tecni - Fenalce 1(10).
35. Prescot, S. (1952). Microbiología Industrial. Madrid, Aguiar, S. A.
36. Rodríguez, L. (2005). Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo. Ing.Química. Sta Clara, UCLV.
37. Rosabal, J. a. M. V. (1989). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. La Habana, ENPES.

38. Ruiz, O. V., M; Garcés, F; Morato, A (2006). Impacto de la Biotecnología en los Sectores Industrial y Energético. C. Refojo, Spainfo, S.A.
39. Sánchez, M. (2003). "Cultivo de sorgo granífero."
40. Ulrich, G.Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química.
41. Underklofler, L. (1954). Industrial Fermentations. New York, Chemical Publishing Co.
42. Velázquez de Barreto, E. (2000). " Hacia el mejoramiento de la calidad de la caña paraguaya".” Revista de Ciencia y Tecnología. 1(2).



ANEXOS

Anexo 1: **Determinación del pH**

Fundamento del método

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. **(MACU, 1986)**.

Expresión de resultados

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

Anexo 2: Determinación del Brix

Fundamento del método

Al atravesar un rayo de luz dos medios diferentes, el primero experimenta una variación en su trayectoria en un cierto ángulo, llamándosele a esta desviación refracción.

El índice de refracción varía con la temperatura, con la longitud de onda y con la concentración de sólidos solubles presentes. **(MACU, 1986)**.

Expresión de resultados

La lectura anotada es el valor que corresponde al ^{o}Bx de la muestra, expresado en %.

Anexo 3: Determinación de carbohidratos solubles totales por el método del fenol-sulfúrico, según la técnica de Dubois et al., (1951*).*

Fundamento del método

Este se basa en la relación lineal que existe entre la absorbancia y la concentración según la ley de Lamber - Beer, siendo la absorbancia medida proporcional a la concentración de carbohidratos solubles totales presentes en la muestra.

Procedimiento

1. Se toman 10 ml del cultivo y centrifugan a 5000 rpm durante 15 minutos tomando 5 ml del sobrenadante, al cual se le añaden 5 ml de una solución de ATC al 10%, esperando 10 minutos.
2. Se filtra por papel, o centrifuga a 5000 rpm durante 15 minutos. Del filtrado, o centrifugado, se realizan diluciones desde 1/10 hasta 1/10000, para determinar el rango de trabajo con las muestras.
3. De cada una de estas diluciones se toma 1 ml y añade 1 ml de la solución fenólica al 5%.
4. Se añade con cuidado, por las paredes del tubo, 5 ml de la solución reactivo de ácido sulfúrico al 95%, agitándose con cuidado y dejando enfriar hasta temperatura ambiente, durante unos 20 minutos.
5. La mezcla reactiva así obtenida se lee a 490 nm en espectro colorímetro, dentro de las primeras 3 horas de efectuada la reacción.
6. Se prepara un blanco empleando 1 ml de agua destilada, el cual debe sufrir el mismo tratamiento que las muestras.

7. Los resultados en densidades ópticas, se transforman a sus respectivos valores de concentración en carbohidratos solubles totales, mediante su multiplicación por el factor de la curva patrón previamente confeccionada.

8. Debe tenerse especial cuidado en considerar las diversas diluciones que ha sufrido la muestra, durante las operaciones efectuadas. (Herrera A. 1989).

Para la confección de la curva de calibración se prepararon 10 soluciones a diferentes concentraciones de glucosa, midiéndose la absorbancia de las mismas, obteniéndose el siguiente resultado:

c (g/L)	0.009	0.018	0.027	0.036	0.045	0.054	0.063	0.072
A	0.107	0.198	0.295	0.412	0.505	0.627	0.721	0.859

Se tomaron solamente el resultado de 8 muestras debido a que las demás reportaban resultados fuera del rango de trabajo.

Expresión de los resultados

$CST = A * d * \xi$ [g / L]

Donde:

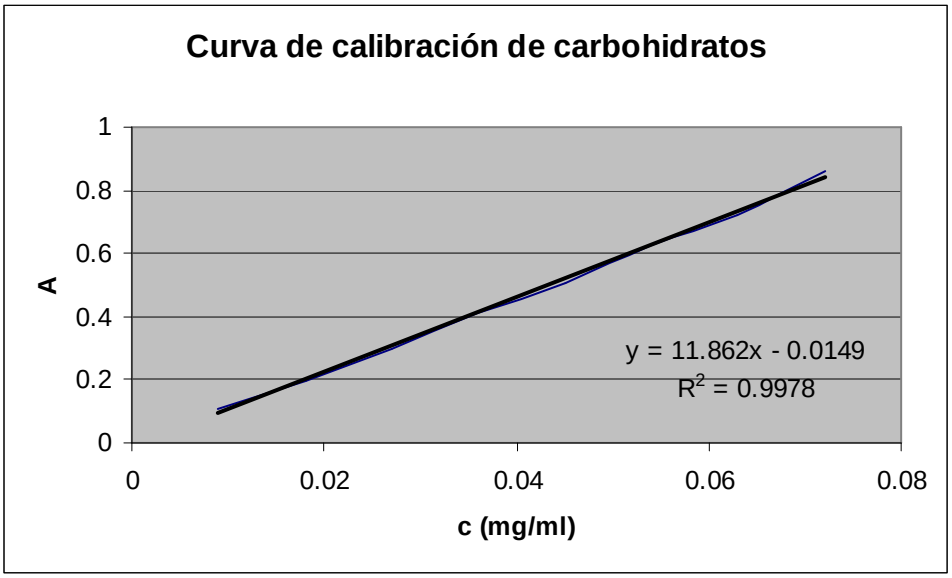
CST carbohidratos solubles totales

A absorbancia

d dilución

ξ pendiente de la recta de la curva de calibración

Curva de calibración para la determinación de carbohidratos solubles totales.



Anexo 4: Determinación del grado alcohólico en fermento.

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 ebulla, 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. Windish, a 15 °C " Donde se obtiene el valor del grado °GL

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

Tabla para determinación del grado alcohólico por picnometría.

TABLA I. — *Determinación del alcohol en volumen y en peso por ciento,* según K. Windisch, a 15° C.

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
1,0000	**0,00**	**0,00**	**0,00**
0,9995	0,25	0,33	0,26
0,9990	0,53	0,67	0,53
0,9985	0,80	1,00	0,80
0,9980	1,06	1,34	1,06
0,9975	1,34	1,68	1,33
0,9970	1,61	2,02	1,60
0,9965	1,89	2,37	1,88
0,9960	2,17	2,72	2,16
0,9955	**2,45**	**3,07**	**2,43**
0,9950	2,73	3,42	2,72
0,9945	3,02	3,78	3,00
0,9940	3,31	4,14	3,29
0,9935	3,60	4,51	3,58
0,9930	3,90	4,88	3,87
0,9925	4,20	5,25	4,17
0,9920	4,51	5,63	4,47
0,9915	4,81	6,01	4,77
0,9910	5,13	6,40	5,08
0,9905	**5,44**	**6,79**	**5,38**
0,9900	5,76	7,18	5,70
0,9895	6,09	7,58	6,02
0,9890	6,41	7,99	6,34
0,9885	6,75	8,40	6,66
0,9880	7,08	8,81	6,99
0,9875	7,42	9,23	7,33
0,9870	7,77	9,66	7,66
0,9865	8,12	10,09	8,00
0,9860	8,48	10,52	8,35
0,9855	**8,84**	**10,96**	**8,70**
0,9850	9,20	11,41	9,06
0,9845	9,57	11,86	9,42
0,9840	9,94	12,32	9,78
0,9835	10,32	12,78	10,44
0,9830	10,71	13,25	10,52
0,9825	11,09	13,72	10,89
0,9820	11,48	14,20	11,27
0,9815	11,88	14,68	11,65
0,9810	12,28	15,16	12,03
0,9805	**12,68**	**15,65**	**12,42**
0,9800	13,08	16,14	12,81
0,9795	13,49	16,64	13,20
0,9790	13,90	17,14	13,60
0,9785	14,32	17,64	14,00
0,9780	14,73	18,14	14,39
0,9775	15,15	18,64	14,79
0,9770	15,56	19,14	15,19
0,9765	15,98	19,65	15,59
0,9760	16,40	20,15	15,99
0,9755	**16,82**	**20,65**	**16,39**
0,9750	17,23	21,16	16,79
0,9745	17,65	21,66	17,19
0,9740	18,07	22,16	17,58
0,9735	18,48	22,65	17,98
0,9730	18,89	23,14	18,37
0,9725	19,30	23,63	18,76
0,9720	19,71	24,12	19,14
0,9715	20,12	24,60	19,53
0,9710	20,52	25,08	19,91
0,9705	**20,92**	**25,56**	**20,28**
0,9700	21,32	26,03	20,66
0,9695	21,71	26,50	21,03
0,9690	22,10	26,96	21,40

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
0,9685	22,49	27,42	21,76
0,9680	22,87	27,87	22,12
0,9675	23,25	28,32	22,47
0,9670	23,63	28,76	22,82
0,9665	24,00	29,20	23,17
0,9660	24,37	29,64	23,52
0,9655	**24,73**	**30,06**	**23,86**
0,9650	25,09	30,49	24,19
0,9645	25,45	30,91	24,53
0,9640	25,81	31,32	24,85
0,9635	26,16	31,73	25,18
0,9630	26,51	32,14	25,50
0,9625	26,85	32,54	25,82
0,9620	27,19	32,93	26,13
0,9615	27,53	33,33	26,45
0,9610	27,86	33,71	26,75
0,9605	**28,19**	**34,10**	**27,06**
0,9600	28,52	34,47	27,36
0,9595	28,85	34,85	27,66
0,9590	29,17	35,22	27,95
0,9585	29,49	35,59	28,24
0,9580	29,81	35,95	28,53
0,9575	30,12	36,31	28,82
0,9570	30,43	36,67	29,10
0,9565	30,74	37,02	29,38
0,9560	31,05	37,37	29,66
0,9555	**31,36**	**37,72**	**29,93**
0,9550	31,66	38,06	30,21
0,9545	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,9540	32,25	38,74	30,74
0,9535	[illegible]	39,07	31,01
0,9530	[illegible]	39,40	31,27
0,9525	33,13	39,73	31,53
0,9520	33,42	40,06	31,79
0,9515	33,71	40,38	32,05
0,9510	33,99	40,70	32,30
0,9505	**34,28**	**41,02**	**32,55**
0,9500	34,56	41,33	32,80
0,9495	34,84	41,64	33,05
0,9490	35,11	41,95	34,30
0,9485	35,39	42,26	33,54
0,9480	35,66	42,57	33,78
0,9475	35,94	42,87	34,02
0,9470	36,21	43,17	34,26
0,9465	36,48	43,47	34,50
0,9460	36,75	43,77	34,73
0,9455	**37,01**	**44,06**	**34,96**
0,9450	37,28	44,35	35,20
0,9445	37,54	44,64	35,43
0,9440	37,80	44,93	35,66
0,9435	38,07	45,22	35,88
0,9430	38,33	45,50	36,11
0,9425	38,59	45,79	36,34
0,9420	38,84	46,07	36,56
0,9415	39,10	46,35	36,78
0,9410	39,35	46,63	37,00
0,9405	**39,61**	**46,90**	**37,22**
0,9400	39,86	47,18	37,44
0,9395	40,11	47,45	37,66
0,9390	40,37	47,72	37,87
0,9385	40,62	47,99	38,09
0,9380	40,87	48,26	38,30
0,9375	41,11	48,53	38,51

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
0,9370	41,36	48,80	[illegible]
0,9365	41,61	49,06	[illegible]
0,9360	41,85	49,33	[illegible]
0,9355	**42,10**	**49,59**	[illegible]
0,9350	42,31	49,85	[illegible]
0,9345	42,59	50,11	[illegible]
0,9340	42,83	50,37	[illegible]
0,9335	43,07	50,62	[illegible]
0,9330	43,31	50,88	[illegible]
0,9325	43,55	51,14	[illegible]
0,9320	43,79	51,39	[illegible]
0,9315	44,03	51,64	[illegible]
0,9310	44,27	51,89	[illegible]
0,9305	**44,51**	**52,14**	[illegible]
0,9300	44,75	52,39	[illegible]
0,9295	44,98	52,61	[illegible]
0,9290	45,22	52,85	[illegible]
0,9285	45,46	53,14	[illegible]
0,9280	45,69	53,39	[illegible]
0,9275	45,93	53,63	[illegible]
0,9270	46,16	53,88	[illegible]
0,9265	46,39	54,12	[illegible]
0,9260	46,63	54,36	43,14
0,9255	**46,86**	**54,60**	[illegible]
0,9250	47,09	54,84	43,52
0,9245	47,32	55,08	43,71
0,9240	47,55	55,32	[illegible]
0,9235	47,78	55,56	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,9225	48,24	56,03	44,47
0,9220	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,9210	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,9205	**49,16**	**56,97**	**45,21**
0,9200	49,39	57,21	45,40
0,9195	49,61	57,44	45,58
0,9190	49,84	57,67	45,76
0,9185	50,07	57,90	45,95
0,9180	50,29	58,13	46,13
0,9175	50,52	58,36	46,31
0,9170	50,75	58,59	46,49
0,9165	50,97	58,82	46,67
0,9160	51,20	59,05	46,86
0,9155	**51,42**	**59,27**	**47,04**
0,9150	51,65	59,50	47,22
0,9145	51,87	59,72	[illegible]
0,9140	52,09	59,95	[illegible]
0,9135	52,32	60,17	47,75
0,9130	52,54	60,40	47,93
0,9125	52,76	60,62	48,11
0,9120	52,99	60,84	48,28
0,9115	53,21	61,06	48,46
0,9110	53,43	61,29	[illegible]
0,9105	**53,65**	**61,51**	**48,81**
0,9100	53,88	61,73	48,99
0,9095	54,10	61,95	49,16
0,9090	54,32	62,17	49,33
0,9085	54,54	62,39	49,51
0,9080	54,76	62,61	49,68
0,9075	54,98	62,82	49,86
0,9070	55,20	63,04	50,03
0,9065	55,43	63,26	50,20
0,9060	55,65	63,47	50,37

TABLA I. — (Continuación)

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
0,9055	**55,87**	**63,69**	**50,54**
0,9050	56,09	63,91	50,71
0,9045	56,31	64,12	50,89
0,9040	56,52	64,34	51,06
0,9035	56,74	64,55	51,23
0,9030	56,96	64,76	51,39
0,9025	57,18	64,98	51,56
0,9020	57,40	65,19	51,73
0,9015	57,62	65,40	51,90
0,9010	57,84	65,61	52,07
0,9005	**58,06**	**65,82**	**52,24**
0,9000	58,27	66,03	52,40
0,8995	58,49	66,24	52,57
0,8990	58,71	66,45	52,74
0,8985	58,93	66,66	52,90
0,8980	59,15	66,87	53,07
0,8975	59,36	67,08	53,23
0,8970	59,58	67,29	53,40
0,8965	59,80	67,50	53,56
0,8960	60,02	67,70	53,73
0,8955	**60,23**	**67,91**	**53,89**
0,8950	60,45	68,12	54,05
0,8945	60,66	68,32	54,22
0,8940	60,88	68,53	54,38
0,8935	61,10	68,73	54,54
0,8930	61,31	68,94	54,71
0,8925	61,53	69,14	54,87
0,8920	61,75	69,34	55,03
0,8915	61,96	69,55	55,19
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,8900	62,61	70,16	55,67
0,8895	62,82	70,36	55,83
0,8890	63,04	70,56	55,99
0,8885	63,25	70,76	56,15
0,8880	63,47	70,96	56,31
0,8875	63,68	71,16	56,47
0,8870	63,90	71,36	56,63
0,8865	64,11	71,56	56,79
0,8860	64,33	71,76	56,94
0,8855	**64,54**	**71,96**	**57,10**
0,8850	64,75	72,15	57,26
0,8845	64,97	72,35	57,42
0,8840	65,18	72,55	57,57
0,8835	65,40	72,74	57,73
0,8830	65,61	72,94	57,88
0,8825	65,82	73,14	58,04
0,8820	66,04	73,33	58,19
0,8815	66,25	73,53	58,35
0,8810	66,46	73,72	58,50
0,8805	**66,67**	**73,92**	**58,66**
0,8800	66,89	74,11	58,81
0,8895	67,10	74,30	58,96
0,8790	67,31	74,49	59,12
0,8785	67,52	74,69	59,27
0,8780	67,74	74,88	59,42
0,8775	67,95	75,07	59,57
0,8770	68,16	75,26	59,73
0,8765	68,37	75,45	59,88
0,8760	68,58	75,64	60,03
0,8755	**68,60**	**75,84**	**60,18**
0,8750	69,01	76,02	60,33
0,8745	69,22	76,21	60,48

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
0,8740	69,43	76,40	60,63
0,8735	69,64	76,59	60,78
0,8730	69,85	76,78	60,93
0,8725	70,06	76,97	61,08
0,8720	70,27	77,15	61,23
0,8715	70,48	77,34	61,38
0,8710	70,70	77,53	61,52
0,8705	**70,91**	**77,71**	**61,67**
0,8700	71,12	77,90	61,82
0,8695	71,33	78,08	61,97
0,8690	71,54	78,27	62,11
0,8685	71,74	78,45	62,26
0,8680	71,95	78,64	62,40
0,8675	72,16	78,82	62,55
0,8670	72,37	79,00	62,69
0,8665	72,58	79,18	62,84
0,8660	72,79	79,37	62,98
0,8655	**73,00**	**79,55**	**63,13**
0,8650	73,21	79,73	63,27
0,8645	73,42	79,91	63,41
0,8640	73,63	80,09	63,56
0,8635	73,83	80,27	63,70
0,8630	74,04	80,45	63,85
0,8625	74,25	80,63	63,99
0,8620	74,46	80,81	64,13
0,8615	74,67	80,99	64,27
0,8610	74,87	81,17	64,41
0,8605	**75,08**	**81,34**	**64,55**
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,8595	75,50	81,70	64,84
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
0,8585	75,91	82,05	65,11
0,8580	76,12	82,23	65,25
0,8575	76,32	82,40	65,39
0,8570	76,53	82,57	65,53
0,8565	76,74	82,75	65,67
0,8560	76,94	82,92	65,81
0,8555	**77,15**	**83,10**	**65,94**
0,8550	77,35	83,27	66,08
0,8545	77,56	83,44	66,22
0,8540	77,76	83,61	66,36
0,8535	77,97	83,78	66,49
0,8530	78,17	83,96	66,63
0,8525	78,38	84,13	66,76
0,8520	78,58	84,30	66,90
0,8515	78,79	84,47	67,03
0,8510	78,99	84,64	67,16
0,8505	**79,20**	**84,80**	**67,30**
0,8500	79,40	84,97	67,43
0,8595	79,60	85,14	67,57
0,8490	79,81	85,31	67,70
0,8485	80,01	85,47	67,83
0,8480	80,31	85,64	67,96
0,8475	80,42	85,81	68,09
0,8470	80,62	85,97	68,23
0,8465	80,82	86,14	68,36
0,8460	81,02	86,30	68,49
0,8455	**81,22**	**86,46**	**68,62**
0,8450	81,43	86,63	68,75
0,8445	81,63	86,79	68,88
0,8440	81,83	86,95	69,00
0,8435	82,03	87,11	69,13
0,8430	82,23	87,28	69,26

Peso específico $d\left(\frac{15°}{15°}\right)$	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Gramos de alcohol en 100 c.c.
0,8425	82,43	87,44	69,39
0,8420	82,63	87,60	69,52
0,8415	82,83	87,76	69,64
0,8410	83,03	87,92	69,77
0,8405	**83,23**	**88,08**	**69,90**
0,8400	83,43	88,23	70,02
0,8495	83,63	88,39	70,15
0,8390	83,83	88,55	70,27
0,8385	84,03	88,71	70,40
0,8380	84,22	88,86	70,52
0,8375	84,42	89,02	70,65
0,8370	84,62	89,18	70,77
0,8365	84,82	89,38	70,89
0,8360	85,01	89,48	71,01
0,8355	**85,21**	**89,63**	**71,14**
0,8350	85,41	89,79	71,26
0,8345	85,60	89,94	71,38
0,8340	85,80	90,09	71,50
0,8335	85,99	90,24	71,62
0,8330	86,19	90,40	71,74
0,8325	86,38	90,55	71,85
0,8320	86,58	90,70	71,97
0,8315	86,77	90,84	72,09
0,8310	86,97	90,99	72,21
0,8305	**87,16**	**91,14**	**72,33**
0,8300	87,35	91,29	72,44
0,8295	87,55	[illegible]	72,56
0,8290	87,74	91,58	[illegible]
0,8285	[illegible]	91,72	[illegible]
0,8280	88,12	91,87	72,90
0,8275	88,31	92,01	73,02
0,8270	88,50	[illegible]	[illegible]
0,8265	88,69	92,30	73,24
0,8260	88,88	92,44	73,36
0,8255	**89,07**	**92,58**	**73,47**
0,8250	89,26	92,72	73,58
0,8245	89,45	92,86	73,69
0,8240	89,64	93,00	73,80
0,8235	99,83	93,14	73,91
0,8230	90,02	93,28	74,02
0,8225	90,20	93,41	74,13
0,8220	90,39	93,55	74,24
0,8215	90,58	93,68	74,35
0,8210	90,76	93,82	74,45
0,8205	**90,95**	**93,95**	**74,56**
0,8200	91,13	94,09	74,66
0,8195	91,32	94,22	74,77
0,8190	91,50	94,35	74,87
0,8185	91,68	94,48	74,98
0,8180	91,87	94,61	75,08
0,8175	92,05	94,75	75,19
0,8170	92,23	94,87	75,29
0,8165	92,41	95,00	75,39
0,8160	92,59	95,13	75,49
0,8155	**92,77**	**95,26**	**75,59**
0,8150	92,96	95,38	75,69
0,8145	93,13	95,51	75,79
0,8140	93,31	95,63	75,89
0,8135	93,49	95,76	75,99
0,8130	93,67	95,88	76,09
0,8125	93,85	96,00	76,19
0,8120	94,03	96,13	76,29

Anexo 5 Determinación de la humedad

Fundamento del método

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 analisar 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 enfrie, 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:

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.

Anexo 6: Análisis estadístico del diseño experimental.

Modelo de los carbohidratos

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Carbohidratos

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-757.848			
ConcAcido	1025.23			
ConcMalta	50.7692			
Presion	349.163			

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	162708.0	3	54236.0		
Residual	0.0	0	0.0		
Total (Corr.)	162708.0	3			

R-squared = 100.0 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent

Standard Error of Est. = 0.0

Mean absolute error = 0.0

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Carbohidratos and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

Carbohidratos = -757.848 + 1025.23*ConcAcido + 50.7692*ConcMalta + 349.163*Presion

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100.0% of the variability in Carbohidratos. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 0.0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.0. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.0 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Modelo del rendimiento

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Rendimiento

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-0.1616			
ConcAcido	0.157991			
ConcMalta	0.0129833			
Presion	0.094			

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.00867933	3	0.00289311		
Residual	0.0	0	0.0		
Total (Corr.)	0.00867933	3			

R-squared = 100.0 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent

Standard Error of Est. = 0.0

Mean absolute error = 0.0

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Rendimiento and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

Rendimiento = -0.1616 + 0.157991*ConcAcido + 0.0129833*ConcMalta + 0.094*Presion

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100.0% of the variability in Rendimiento. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 0.0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.0. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.0 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Modelo del grado alcohólico

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Grado Alcohólico

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	1.78917			
ConcAcido	0.388128			
ConcMalta	0.424167			
Presion	-0.8375			

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	6.59648	3	2.19883		
Residual	0.0	0	0.0		
Total (Corr.)	6.59648	3			

R-squared = 100.0 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent

Standard Error of Est. = 0.0

Mean absolute error = 0.0

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Grado Alcohol and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

Grado Alcohol = 1.78917 + 0.388128*ConcAcido + 0.424167*ConcMalta - 0.8375*Presion

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100.0% of the variability in Grado Alcohol. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 0.0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.0. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.0 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Modelo de productividad

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Col_4

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-0.1485			
Col_1	2.65297			
Col_2	0.00316667			
Col_3	0.1775			

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.342963	3	0.114321		
Residual	0.0	0	0.0		
Total (Corr.)	0.342963	3			

R-squared = 100.0 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 0.0 percent

Standard Error of Est. = 0.0

Mean absolute error = 0.0

Durbin-Watson statistic =

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Col_4 and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

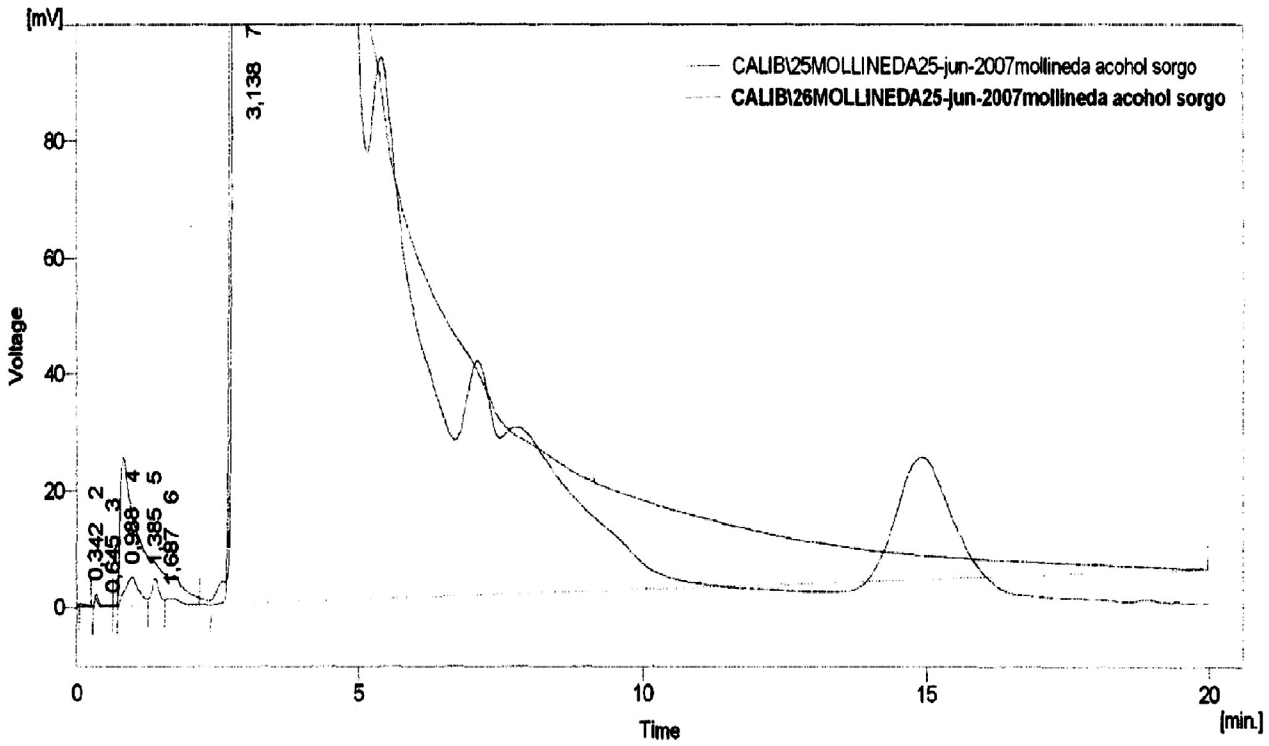
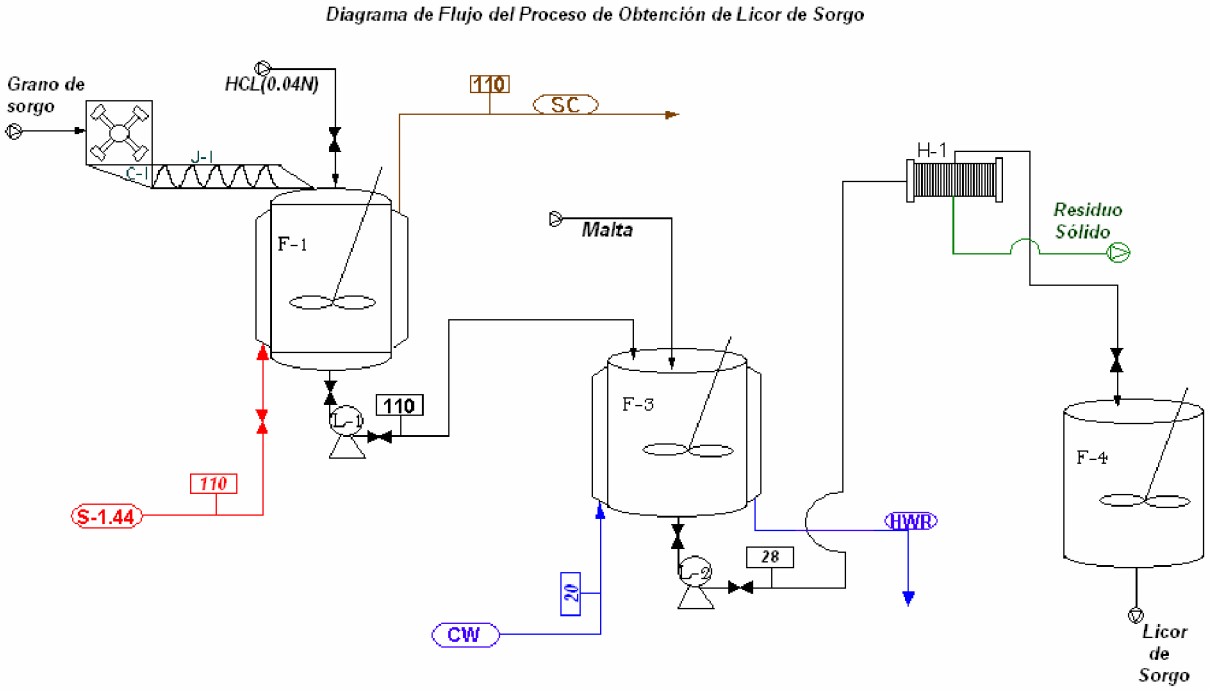
Productividad = -0.1485 + 2.65297*Ca + 0.00316667*Cm + 0.1775*p

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100.0% of the variability in Col_4. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 0.0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.0. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.0 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Anexo 7: Análisis cromatrográfico del alcohol de sorgo.

!!! Result Table (Uncal - CALIB\26MOLLINEDA25-jun-2007mollineda acohol sorgo) No identified peak(s) !!!

	Reten. Time [min]	Response	RB	Amount [g/kg]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
1	0,080	2,034	A	-	-		
2	0,342	10,613	A	-	-		
3	0,645	0,261	A	-	-		
4	0,988	86,580	A	-	-		
5	1,385	46,146	A	-	-		
6	1,687	21,342	A	-	-		
7	3,138	33067,244	A	-	-		
	Total			-	-		



Anexo 8: Diagrama de flujo de la planta de obtención de licor de sorgo.