

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



## TRABAJO DE DIPLOMA

*Título: "Perfeccionamiento del proceso de producción de cerveza a partir de malta de sorgo".*

*Autora: Nailín Carvajal Mena.*

*Tutoras: Dra. Irenia Gallardo Aguilar.*

*Msc. Yanet Boffil Rodríguez*

2013-2014

*Todo lo que somos es el resultado de lo que hemos pensado; está fundado en nuestros pensamientos y está hecho de nuestros pensamientos.*

*Blaise Pascal*

*A mí por haber luchado por alcanzar mi sueño.*

*A mis padres por haberme dado la vida y por estar ahí cuando más los he necesitado.*

*A mis abuelos que todo lo que hago en la vida es pensando en ellos.*

*A mis hermanos y mis sobrinas que los adoro.*

*A mi novio que es la mejor persona que he conocido en mi vida.*

*A mis abuelos por haberme dedicado toda su vida desde mi nacimiento, son de las personas más importantes que tengo en la vida.*

*A mi mamá y mi padrastro por haber estado conmigo siempre en las buenas y las malas.*

*A mi papá y mi madrastra por haber estado cuando más los necesite.*

*A mis hermanos por ayudarme en todo y confiar en mí.*

*A mis sobrinas por alegrar mi vida cada día.*

*A mis tíos por estar pendiente de cada detalle de mi vida y mi educación.*

*A mis primos por quererme como si fuese su hermana.*

*A mi novio por haber estado conmigo en todos los momentos de mi carrera ayudándome y apoyándome.*

*A mis suegros por quererme como si fuera su hija.*

*A mis amigos por estar ahí para alegrar el día.*

*A mis tutoras por haber puesto todo su empeño en mi tesis, gracias por su educación.*

*A Margarita y Eduardo por haberme ayudado en todo.*

*A todos mis profesores que de una forma u otra han contribuido a mi formación.*

En el presente trabajo se realizó un estudio del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo UDG-110 a escala de laboratorio, con el objetivo fundamental de estudiar la influencia de las distintas variables en las etapas que conforman el proceso. Primeramente se realizó una revisión bibliográfica donde se destacaron en cada etapa del proceso las distintas variables a estudiar y los diversos parámetros a medir como variables respuestas, así también se expuso una caracterización de los parámetros fundamentales medidos a la bebida final. Seguidamente y con el uso del software Statgraphics se realizaron dos diseños de experimentos uno en la etapa de malteado y otro en la etapa de fermentación mediante los cuales se pudieron determinar los valores óptimos de las variables resultando ser 0.1% de concentración de hidróxido, 12 h de tiempo de remojo, 72 h de tiempo de germinación; así como 1 g/L de concentración de inóculo y 4 días de tiempo de fermentación. Luego se realizó el diseño de una planta piloto para la producción de esta bebida y finalmente se efectuó un análisis económico donde se obtuvo un valor actual neto de \$75 410,73, una tasa de interés de 24% y un periodo de recuperación de 5,5 años.

In this presentwork,it is realized a study of the beer process production mean by sorghum UDG-110 laboratory scale, with the primary aim of studying the influence of different variables on the steps in the process. First, a literature review, which stood out in every stage of the variables studied and the various parameters measured as response variables, was performed, and a characterization of measured fundamental parameters to the final beverage is presented. And then using the software Statgraphics two designs of experiments one on the other stage in the malting and fermentation step by which they were able to determine the optimal values of the variables to be 0.1% resulting hydroxide concentration were conducted, 12h steeping time,72h germination time ; and 1 g / L inoculum concentration and 4 days fermentation time. Then the design of a pilot plant for the production of this beverage plant was conducted and finally an economic analysis where a net present value of \$ 75 410.73 was obtained, an interest rate of 24% and a payback period of 5 was performed, five years.

## ÍNDICE

	Página
<b>Introducción</b>	1
<b>Capitulo 1 Revisión bibliográfica</b>	
1.1. Cervezas. Aspectos generales	5
1.1.1. Composición de la cerveza	5
1.1.2. Cervezas a partir de sorgo	7
1.2. Potencialidades del sorgo	8
1.3. Proceso de producción de cerveza	9
1.3.1. Malteado	9
1.3.1.1. Remojo	9
1.3.1.2. Germinación	10
1.3.1.3. Secado	10
1.3.2. Maceración de la malta	10
1.3.2.1. Conversión de sustancias amiláceas	11
1.3.2.2. Extractos	12
1.3.2.3. Azúcares fermentables	12
1.3.2.4. Aminoácidos	13
1.3.2.5. Vitaminas	14
1.3.3. Fermentación	15
1.3.3.1. Cepas empleadas	16
1.3.3.2. Enzimas	17
1.3.3.3. Adjuntos cerveceros	19
1.3.3.4. Características sensoriales	20
1.4. Sustitución de la malta de cebada por malta de sorgo	21
<b>Capitulo 2 Desarrollo experimental</b>	
2.1. Proceso de malteado	23
2.1.1. Etapas del proceso de malteado	23
2.1.1.1. Clasificación del grano	24
2.1.1.2. Remojo	24

2.1.1.3. Germinación del grano de sorgo	25
2.1.1.4. Secado	25
2.1.2. Análisis del diseño experimental.	26
2.1.2.1 Porcentaje de granos germinados	26
2.1.2.2 Porcentaje de pérdidas en el malteado	27
2.1.2.3. Poder diastático	28
2.1.3. Optimización del proceso de malteado	29
2.2. Proceso de maceración	30
2.3. Proceso de fermentación	31
2.3.1 Determinaciones experimentales de las variables respuestas	32
2.3.1.1. Azúcares reductores	32
2.3.1.2. Grados Brix	32
2.3.1.3. Grado alcohólico	32
2.3.2. Resultados obtenidos en la fermentación	32
2.3.2.1. Grados Brix	33
2.3.2.2. Grado alcohólico	34
2.3.2.3. Azúcares reductores finales	34
2.3.2.4. Consumo de ART	34
2.3.2.5. Análisis de los resultados	36
2.4. Maceración	37
2.5. Conclusiones parciales	39

### **Capitulo 3 Diseño de una planta piloto. Análisis económico**

3.1. Proceso de producción de cerveza	41
3.1.1. Función total del proceso	41
3.2. Selección del equipamiento	42
3.2.1. Molinos.	42
3.2.2. Transportadores	42
3.2.3. Macerador y tanque de cocción con Calentamiento y Agitación	43
3.2.4. Agitador	43
3.2.5. Filtro	43
3.2.6. Bombas	43

3.2.7. Tanques de almacenamiento del producto final.	44
3.3. Balances de masa y energía.	44
3.3.1. Balances de masa	44
3.3.2. Balances de energía.	45
3.4 Dimensionamiento de los Equipos del Proceso	47
3.4.1. Tanques de mezclado con chaqueta y agitación	47
3.4.2. Filtro de marcos y placas	49
3.4.3. Fermentador	50
3.4.4. Recipientes de almacenamiento para el proceso	50
3.4.5. Bombas	52
3.5. Economía del proceso.	54
3.5.1. Costo de inversión	54
3.5.2 Costos Totales de producción	55
3.5.3 Cálculo de la Ganancia	57
3.5.4 Indicadores dinámicos económicos	57
3.6. Conclusiones parciales	58
<b>CONCLUSIONES</b>	59
<b>RECOMENDACIONES</b>	61
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

# *Introducción*

El progreso de la industria química actual viene dado por el desarrollo de investigaciones que permitan crear nuevos productos para satisfacer las necesidades de la sociedad. Estos productos a su vez deben resultar atractivos a la vista y presentar un mercado amplio, además de ser medioambientalmente factibles.

En la actualidad la humanidad enfrenta una situación importante debido al elevado costo de los cereales en el mercado mundial, estos representan un producto básico en la alimentación ya que son una fuente de nutrientes. Dentro de los principales está la cebada que se ha empleado tradicionalmente en la obtención de bebidas, como cerveza, maltinas y etanol, aunque para muchos países como el nuestro es una materia prima de importación por lo que se ha trabajado en pos de buscar una nueva fuente para la obtención de estas bebidas.

Uno de los cereales más destacados en estos temas es el sorgo, que tiene propiedades beneficiosas ya que al tratarse de un alimento carente de gluten, representa una opción nutritiva para las personas celíacas. Posee propiedades astringentes, homeostáticas y antidiarreicas. Se emplea también en la alimentación animal, en la producción de forrajes, y para la elaboración de bebidas alcohólicas. Su resistencia a la sequía y al calor lo hace un cultivo importante en regiones áridas, y es uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo.

Actualmente se realizan estudios en el mundo y en Cuba, fundamentalmente en nuestra facultad para el empleo de malta de sorgo como materia prima en la obtención de cervezas y maltinas para enfermos celíacos esto conllevaría a un amplio ahorro por concepto de sustitución de importaciones.

Teniendo en cuenta todo lo planteado anteriormente se esboza el siguiente problema científico:

**Problema científico:**

Actualmente en el proceso de producción de cerveza se importa la malta de cebada, la cual le proporciona la enzima necesaria durante la maceración para la conversión del almidón en los azúcares fermentables y necesarios a la levadura *Saccharomyce cerevisia*e para la obtención de etanol. Con el propósito de utilizar granos no tradicionales cultivados en Cuba para reducir importaciones se precisa de una nueva materia prima y comparar su comportamiento en el proceso con respecto a la materia prima utilizada actualmente.

## **Hipótesis**

Es posible alcanzar resultados de calidad similares a los del proceso industrial de producción de cerveza a partir de malta de cebada, en cuanto al proceso de malteado, maceración y fermentación asegurando la conversión eficiente del almidón en azúcares fermentables si se utiliza malta de sorgo y enzimas exógenas.

## **Objetivo general**

Perfeccionar el proceso de producción de cerveza de sorgo UDG-110 mediante el estudio de la influencia de diferentes variables para cada etapa del proceso.

## **Objetivos específicos**

1. Optimizar el proceso de malteado mediante el estudio de la influencia de la concentración de solución alcalina y tiempo de remojo y germinación
2. Evaluar la calidad de la malta de sorgo para ser empleado en el proceso de producción de cerveza mediante la determinación del porcentaje de germinación, las pérdidas del malteado y el poder diastático (DP).
3. Perfeccionar las etapas de maceración y de fermentación mediante la determinación de grados Brix y azúcares reductores en la primera etapa y segunda etapa, y además el grado alcohólico y la concentración celular en la segunda.
4. Dimensionar los equipos fundamentales del proceso, partiendo de la mejor variante obtenida a escala de laboratorio, para producciones de planta piloto.
5. Efectuar un análisis de factibilidad económica de la implementación de la planta piloto.

# *Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.*

## 1.1. Cervezas. Aspectos generales.

La cerveza es la bebida alcohólica más consumida mundialmente; y es la tercera más popular después del agua y el té (Nelson, 2005). La cerveza es hecha a partir de malta de cereales como cebada, arroz, maíz, sorgo. El proceso de producción involucra la sacarificación del almidón por enzimas durante el malteado, y la fermentación de los azúcares resultantes por las levaduras (Aastrup et al., 2004). De ella se conocen múltiples variantes con una amplia gama de matices debidos a las diferentes formas de elaboración y a los ingredientes utilizados. Generalmente presenta un color ambarino con tonos que van del amarillo oro al negro pasando por los marrones rojizos. Puede alcanzar una graduación alcohólica hasta cerca de los 30% en volumen aunque principalmente se encuentra entre los 3 y los 9% en volumen.

### 1.1.1. Composición de la cerveza.

La cerveza está constituida por varios componentes los que se clasifican en dos grupos: componentes volátiles y no volátiles. Los primeros tienen una alta presión de vapor y son los responsables del aroma y del "bouquet", y se forman fundamentalmente en la etapa de fermentación. Estos se encuentran concentrados en el espacio de cabeza de los envases de cerveza y el grupo incluye alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, compuestos azufrados, aminas, compuestos fenólicos volátiles, y algunos hidrocarburos y lactonas. En cambio, los componentes no volátiles forman un conjunto más heterogéneo, pues incluye:

- Compuestos inorgánicos. Suelen alcanzar globalmente una concentración de 0,5 a 2 g/l. Los compuestos minerales influyen sobre el sabor de la cerveza. Los cloruros dan sensación de plenitud de sabor, los sulfatos sequedad, los carbonatos producen efectos muy variados en el sabor, el sodio tiene un efecto importante sobre el sabor global, mientras que el magnesio puede conferir un sabor desagradable. Por otra parte, hierro, plomo, cobre, cinc y estaño pueden producir turbidez en las cervezas. La mayoría de estos componentes proceden exclusivamente de las materias primas de partida. Una parte importante de potasio es absorbida por la levadura y lo mismo ocurre con el fósforo, que sufre además una pérdida adicional al precipitar durante la maceración. Por el contrario, elementos traza como níquel, cromo y estaño llegan a la cerveza procedentes del equipo de proceso o del envase, mientras que el cobre puede proceder del equipo, del envase o de ciertos restos de herbicidas aportados por el lúpulo
- Hidratos de carbono. Las cervezas "normales" contienen un 2,5-4% de carbohidratos, en forma de mono-, di- y trisacáridos, dextrinas y  $\beta$ -glucanos. El 75-80% de esta cantidad son dextrinas con un

grado de polimerización mínimo de 4. Proceden de la degradación enzimática del almidón por los enzimas de la malta, y no sufren modificaciones durante la fermentación del mosto. Actúan como portadores de sabor (dan “cuerpo” a la cerveza), retienen el anhídrido carbónico formado en la fermentación, participan en la formación de la espuma, y tienen valor nutritivo. Entre los azúcares más sencillos se encuentran la ribosa, arabinosa, xilosa, glucosa, fructosa y galactosa; entre los disacáridos la maltosa, isomaltosa, kojibiosa, nigerosa y maltulosa, y entre los trisacáridos la panosa, isopanosa y maltotriosa. Además también existen pequeñas cantidades de glicerol y mioinositol. **(Sendra, 1999)**

- Componentes nitrogenados. Un litro de cerveza contiene habitualmente entre 1,9 y 6,3 gramos de componentes nitrogenados, que incluyen aminoácidos, péptidos, polipéptidos, proteínas, ácidos nucleicos y sus productos de degradación. No obstante algunos tipos de cerveza de alto extracto original llegan hasta 11,5 gramos de sustancias nitrogenadas (Hough, 1982).
- Compuestos fenólicos. La cerveza contiene entre 150 y 350 mg/l de compuestos fenólicos diversos, dos tercios de los cuales proceden de la malta y el resto del lúpulo. Una fracción minoritaria es volátil y contribuye al aroma de la cerveza; pero el resto son mayoritariamente polifenoles no volátiles, e influyen sobre el color, sabor y estabilidad coloidal de la cerveza.
- Alcohol etílico. El alcohol etílico es, obviamente después del agua, el constituyente más abundante en la cerveza. Se produce, junto con el anhídrido carbónico, en la fermentación, a razón de 1 g de alcohol por cada 1,6 g de substrato hidrocarbonado transformado. Participa de forma importante en el sabor de la cerveza.
- Vitaminas. Contiene pequeñas cantidades de vitaminas del grupo B: tiamina, riboflavina, ácido pantoténico, piridoxina, biotina, mesoinositol, cianocobalamina y niacina. También contiene ácido fólico y sus derivados (folatos).
- Otros compuestos. Contiene una pequeña proporción de lípidos, procedentes de la malta, adjuntos y lúpulo, así como resultantes del metabolismo de la levadura en el proceso de fermentación. Son fundamentalmente ácidos grasos (0,33-0,76 mg/l), mono-, di- y triacilglicéridos junto a trazas de esteroides y fosfolípidos. También contiene pequeñas cantidades de ácidos orgánicos (cítrico, fumárico, láctico, málico, pirúvico, succínico, glutárico, oxálico, tartárico,...), que afectan al sabor y la estabilidad de la cerveza. Proceden de la malta y de la actividad metabólica de la levadura.

### 1.1.2. Cervezas a partir de sorgo.

En la mayoría de las cervecerías de Europa se produce cerveza a partir de cebada debido al requerimiento de clima templado en las condiciones de cultivo de este cereal. El sorgo a diferencia de la cebada, se adapta a las condiciones semi y sub-tropicales (Agu and Palmer, 1998). Debido a ello, en zonas del continente africano se han desarrollado procesos industriales en la búsqueda de una nueva materia prima para la obtención de cervezas, a partir de sorgo. Dentro (Lyumugabe et al., 2012) de los tipos que se producen se encuentran la Ikigage de Rwanda, Merissa de Sudan, Doro de Zimbabwe, Dolo de Burkina Faso, Pito y burukutu de Nigeria y Amgba o bili de Cameroon (Lyumugabe et al., 2012). El valor nutricional de las cervezas de sorgo es generalmente mayor que el de las de cebada, la comparación se muestra en la tabla 1.1 para ambos continentes. (Nout, 1987)

**Tabla 1.1 Elementos nutrientes en cervezas africanas y europeas (por parte de 100 g).**

	<b>Cervezas tradicionales africanas</b>	<b>Cervezas tradicionales europeas</b>
<b>Na (mg)</b>	1,1	3
<b>K (mg)</b>	84	47
<b>P (mg)</b>	39	40
<b>Ca (mg)</b>	2,2	6,3
<b>Alcohol (g)</b>	2,9	4,0
<b>Carbohidratos (g)</b>	4,8	3,2
<b>Proteína (N*5,7)</b>	0,6	0,3
<b>Calorías (KJ)</b>	155	164
<b>Fe (mg)</b>	2,55	0,1
<b>Vitamina B1 (mg)</b>	0,11	0,003
<b>Vitamina B2 (mg)</b>	0,05	0,04
<b>Vitamina B12 (mg)</b>	0,03	-
<b>Vitamina C</b>	0,04	-

En África, el sorgo rojo es la variedad principal usada para producir las cervezas tradicionales "opacas" Las cervezas africanas tradicionales de sorgo son muy ricas en calorías, vitaminas en grupo B incluyendo ácido fólico y nicotínico, tiamina, riboflavina, y aminoácidos esenciales como lisina (Lyumugabe et al., 2012). En Argentina en los últimos 20 años, aumentó el número de cerveceros artesanales, los cuales podrían producir cerveza a base de sorgo blanco, para suplir necesidades del mercado (Vicente,

**2013).** Brasil ha desarrollado investigaciones sobre el tema de las bebidas a partir del sorgo, pero hasta la actualidad solo se ha desarrollado la producción de cerveza de manera cacera o artesanal. En México también se han realizado estudios que han demostrado la factibilidad de utilizar sorgo para producir malta y adjuntos cerveceros. Este cereal tiene un costo más bajo que la cebada y otros cereales usados como adjuntos y es el segundo cultivo más producido en ese país. En este sentido, **(Serna, 2005)** reportó que la utilización de sorgo para producir malta y grits o adjuntos cerveceros puede bajar significativamente la importación de cebada y otras materias primas, reducir costos de producción y generar una cerveza libre de gluten que pueda ser canalizada hacia el mercado de consumidores intolerantes a esta proteína

### **1.2. Potencialidades del sorgo.**

Existen diferentes variedades del sorgo (*Sorghum bicolor* **L Moench**) dentro de las que se destacan las blancas, amarillas y rojas. Se han realizado estudios para seleccionar de estas la mejor para la producción de cervezas, hasta el momento los resultados reportados son con las variedades de sorgo rojo ya que a partir de estas es que se ha obtenido en varios países de África cervezas y etanol. **(Lyumugabe et al., 2012)**

Sin embargo, se aprecia en la tabla 2 que la variedad de sorgo blanco contiene los mejores valores en cuanto contenido de nitrógeno y de proteína. Con respecto al este último, la selección puede tener como fundamento que el alto nivel de proteínas en el sorgo blanco conste de una alta composición de aminoácidos no esenciales, o tóxicos para el organismo.

La tabla 1.2 muestra un análisis comparativo entre distintas variedades de sorgo en cuanto a las diversas propiedades que presentan.

**Tabla 1.2. Propiedades de diferentes variedades de sorgo**

<b>Color</b>	<b>Blanco</b>	<b>Amarillo</b>	<b>Rojo</b>
<b>% germinación</b>	99	91	80
<b>% humedad</b>	11,6	12,3	11,3
<b>% nitrógeno</b>	1,74	1,53	1,47
<b>% proteína</b>	10,88	9,56	9,19

Se ha comprobado que a temperatura ambiente (30°C) el grano de sorgo blanco reporta los mejores porcentajes de germinación. Además esta variedad de sorgo produce bajos niveles de glucosa y altos niveles de maltosa lo que sugiere diferencias desconocidas en la hidrólisis del almidón del sorgo durante la maceración(Agu, 1996).

En la actualidad, en Cuba la variedad de sorgo más utilizada es el UDG-110, la misma ha reportado resultados satisfactorios en la alimentación animal y humana. Se ha utilizado como sustituto de harina de trigo en extensor cárnico, elaboración de cerveza, pan, repostería, pastas alimenticias y alimento para niños celiacos.

### **1.3. Proceso de producción de cerveza.**

El proceso de producción de cerveza consta de las siguientes etapas: (1) malteado, (2) maceración, (3) filtración, (4) (hervidura del mosto), (5) fermentación, maduración, (6) y filtración y esterilización (Moll, 1991).

#### **1.3.1. Malteado.**

El malteado es un proceso que tiene como objetivo desarrollar las enzimas  $\alpha$ -amilasa y  $\beta$ -amilasa que permiten la hidrólisis del almidón. Consta de tres etapas (remojo, germinación y secado) decisivas para la conversión del almidón en azúcares fermentables, las mismas se realizan bajo determinadas condiciones dependiendo de la variedad de sorgo empleada.

##### **1.3.1.1. Remojo.**

Luego de realizada la selección, se realiza el remojo para modificar la estructura del endospermo de los granos previa a la germinación, se requiere que los mismos alcancen una humedad próxima al 45%, por lo que es necesario remojarlo (French and McRuer, 1990). Estudios realizados demuestran que el remojo debe tener un tiempo de duración entre uno y dos días, pero el valor óptimo es de 36h y que el agua debe de presentar una concentración de hidróxido de sodio próxima al 0.1%, esta sustancia es añadida para eliminar la contaminación de microorganismos no deseados que se presenta en esta etapa del proceso y para aumentar el poder diastático de la malta obtenida (Lyumugabe et al., 2012).

### **1.3.1.2. Germinación.**

La germinación del grano ha de ser rápida, vigorosa y uniforme. Se debe de asegurar que durante este proceso el grano este oxigenado y húmedo, además que el proceso dure 80h aproximadamente para que comiencen a crecer las plumillas, aquí es donde se emite una enzima que convierte el almidón en azúcares; en este instante se interrumpe el germinado y se pasa al secado de los granos.

Esta etapa del proceso es afectada por dos tipos de factores internos y externos, siendo estos últimos los más importantes que inciden en el proceso donde se destacan la humedad, la temperatura y los gases.

### **1.3.1.3. Secado.**

El secado del grano se realiza para detener el crecimiento de la plumilla y conservar la actividad enzimática, además de suministrar a la malta seca final las características de color y aroma deseadas para el producto final. En él se reduce la humedad del grano hasta valores adecuados en función del tipo de malta que se quiera malta clara o malta caramelo.

Para obtener este tipo de malta clara se requiere que la humedad descienda hasta valores entre 4 y 5 %, esto se logra haciendo pasar el sorgo por un secadero durante 4 horas a una temperatura de 60 °C y 30 min a 110°C. Para obtener el tipo de malta caramelo se requiere que la humedad descienda hasta valores entre 1 y 2 %, esto se logra haciendo pasar el sorgo por un secadero durante 5 horas a una temperatura de 60 °C y 30 min a 110°C. En la etapa de secado es de vital importancia controlar la temperatura debido a que valores por encima de los comprendidos puede afectar la calidad de la malta.

### **1.3.2. Maceración de la malta.**

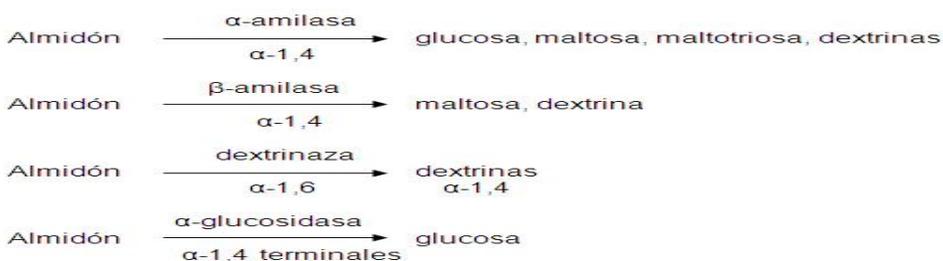
En este proceso se realizan una serie de operaciones destinadas a activar diversas enzimas que reducen las cadenas largas de azúcares en otras más simples y fermentables; la conversión de las sustancias amiláceas, hidrolisis, comprende tres etapas sucesivas: gelatinización, licuefacción y sacarificación. La primera consiste en un calentamiento progresivo de la suspensión de almidón para romper puentes de hidrógeno de las regiones cristalinas y conseguir un hinchamiento de los gránulos de almidón por absorción de agua, estado en el que se tornan susceptibles al ataque mecánico, químico y biológico. En la licuefacción se efectúa una hidrólisis parcial para disminuir el grado de polimerización y obtener equivalentes de dextrosa entre 10 y 12 unidades. Finalmente, en la sacarificación se completa la hidrólisis en aras de obtener un jarabe de glucosa. **(González, 2006)**

### 1.3.2.1. Conversión de sustancias amiláceas.

La conversión de las sustancias amiláceas se conoce como sacarificación, la cual se puede realizar por medio de procesos ácidos o preferentemente biológicos. El proceso de desdoblamiento del almidón envuelve la hidrólisis o sacarificación de los puntos de unión (enlaces) de las moléculas de glucosa produciendo una mezcla de maltosa y dextrinas infermentables. El almidón consta de dos partes la amilosa y la amilopectina.

- 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, esta fracción es casi toda cuantitativamente hidrolizada a maltosa.
- 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. Esta molécula es parcialmente hidrolizada, aunque pueden hidrolizarse en la etapa de fermentación.

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 ácido 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)** La bioquímica de la maceración puede mostrarse en las siguientes ecuaciones:



Se puede resumir que el proceso de maceración tiene como objetivo la preparación de un extracto con azúcares fermentables, aminoácidos, vitaminas, etc., a partir del grano malteado.

### **1.3.2.2. Extractos.**

Los extractos son las sustancias disueltas en el agua que se emplean para la maceración que proveen de materias primas como la malta, adjuntos entre otros fermentables y es obtenido durante el proceso de maceración gracias a procesos enzimáticos los cuales se controlan empleando temperaturas y tiempos.

Los extractos de malta se elaboran mediante la deshidratación del mosto. Según sea el grado de deshidratación se obtiene un producto resultante en polvo o jarabe. Los jarabes son de mayor calidad que los extractos en polvo ya que su proceso de elaboración requiere una menor manipulación. Existen extractos de malta aromatizados con lúpulos o sin aromatizar (más utilizados) y con diferentes grados de color ("lights" claros, "medium" ligeramente oscuros y "dark" muy oscuros). También se puede emplear extractos con poder diastático, que conservan activos los enzimas con capacidad de convertir el almidón en azúcares fermentables. Los extractos con poder diastático se utilizan en procesos de elaboración en los que no se utilizan maltas base pero sí se incorporan a los macerados cereales que no han sido malteados.

Los extractos contienen azúcares fermentables, F.A.N (nitrógeno amínico libre), por sus siglas en inglés, o nitratos de amino-ácidos, minerales, vitaminas y otros nutrientes para la levadura.

### **1.3.2.3. Azúcares fermentables.**

El extracto obtenido como resultado de la maceración presenta varios azúcares fermentables dentro de los que se destacan la glucosa y la maltosa.

- La glucosa es un monosacárido con fórmula molecular  $C_6H_{12}O_6$ . Es una forma de azúcar que se encuentra libre en las frutas y en la miel. La glucosa, libre o combinada, es el compuesto orgánico más abundante de la naturaleza. Es la fuente primaria de síntesis de energía de las células, mediante su oxidación catabólica, y es el componente principal de polímeros de importancia estructural como la celulosa y de polímeros de almacenamiento energético como el almidón y el glucógeno. Además es uno de los tres monosacáridos dietéticos, junto con fructosa y galactosa, que se absorben directamente al torrente sanguíneo durante la digestión. Todas las frutas naturales tienen cierta cantidad de glucosa que puede extraerse y concentrarse para preparar un

azúcar alternativo. Sin embargo, a escala industrial se obtienen a partir de la hidrólisis enzimática de almidón de cereales como trigo, maíz cebada y sorgo.

- La maltosa, también conocida como maltobiosa o azúcar de malta, es un disacárido formado por dos glucosas unidas por un enlace glucosídico producido entre el oxígeno del primer carbono anomérico (proveniente de -OH) de una glucosa y el oxígeno perteneciente al cuarto carbono de la otra. A la maltosa llama también azúcar de malta, ya que aparece en los granos de cebada germinada. Se puede obtener mediante la hidrólisis del almidón y glucógeno. Su fórmula es  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , y se encuentra en alimentos como la cerveza y otros.

#### **1.3.2.4. Aminoácidos.**

Un aminoácido es una molécula orgánica con un grupo amino (-NH<sub>2</sub>) y un grupo carboxilo (-COOH). Los aminoácidos más frecuentes y de mayor interés son aquellos que forman parte de las proteínas. Los aminoácidos más comunes en los extractos de malta son la lisina y el ácido glutámico.

- La lisina (abreviada Lys o K) es un aminoácido componente de las proteínas sintetizadas por los seres vivos. Es uno de los 10 aminoácidos esenciales para los seres humanos. Los requerimientos nutricionales de lisina son de 1,5 g al día. En cantidades mínimas se encuentra en todos los cereales (gramíneas), pero es muy abundante en las legumbres, levadura de cerveza y frutos secos. La L-lisina es un elemento necesario para la construcción de todas las proteínas del organismo. Desempeña un papel central en la absorción del calcio; en la construcción de las proteínas musculares; en la recuperación de las intervenciones quirúrgicas o de las lesiones deportivas, y en la producción de hormonas, enzimas y anticuerpos.
- El ácido glutámico, o en su forma ionizada, el glutamato (abreviado Glu o E) es uno de los 20 aminoácidos que forman parte de las proteínas. El ácido glutámico es crítico para la función celular y no es nutriente esencial porque en el hombre puede sintetizarse a partir de otros compuestos.

### 1.3.2.5. Vitaminas.

Las vitaminas más frecuentes en los extractos de cervezas de sorgo son algunas del grupo B, estas forman un grupo de vitaminas relacionadas con el metabolismo. Al principio se creía que sólo era una pero luego se descubrió que eran varias con funciones parecidas. Son hidrosolubles, por lo que se pueden perder en el agua de cocción y en caso de tomar exceso se eliminan por la orina (hasta un límite).

- La vitamina B1 o tiamina es fundamental para el proceso de transformación de azúcares y cumple una importante labor en la conducción de los impulsos nerviosos, y en el metabolismo del oxígeno. Se encuentra en la levadura de cerveza, germen de trigo, carne de cerdo, hígado y riñones, pescado, pan integral, alubias cocidas, leche y sus derivados, principalmente.
- La vitamina B2 o riboflavina por su parte, es pieza clave en la transformación de los alimentos en energía, ya que favorece la absorción de las proteínas, grasas y carbohidratos. Esta vitamina se encuentra en su estado natural en la levadura seca, el hígado, los quesos, los huevos, las setas, el yogur, la leche, la carne, el pescado, los cereales, el pan integral y las verduras cocidas. La ausencia de la B2 puede ocasionar anemia, trastornos en el hígado, conjuntivitis, resequedad, dermatitis de la piel y mucosas, además de úlceras en la boca. Para mejores resultados se recomienda no mezclarla con el ácido bórico, la penicilina, etc.
- La vitamina B5 o ácido pantoténico es una vitamina hidrosoluble requerida para mantener la vida (nutriente esencial). El Ácido pantoténico es necesitado para formar la coenzima a (CoA) y es considerado crítico en el metabolismo y síntesis de carbohidratos, proteínas y grasas. En su estructura química es una amida entre D-pantotenato y beta-alanina. Su nombre deriva del griego Pantothen, que significa “de todas partes”, y pequeñas cantidades de ácido pantoténico son encontradas en casi todos los alimentos, con altas cantidades en cereales de grano completo, legumbres, levaduras de cerveza, jalea real, huevos, carne. Es comúnmente encontrado como un análogo de alcohol, la provitamina pantenol y como pantotenato de calcio.
- La vitamina B6 o piridoxina su papel en el crecimiento, conservación y reproducción de todas las células del organismo, es importantísimo. La aportan la levadura seca, el germen de trigo, el hígado, los riñones, la carne, el pescado, las legumbres, los huevos, la coliflor, los plátanos, las judías verdes y el pan integral. Mientras que bajos niveles de la misma producen inflamaciones en la piel como pelagra, resequedad, eccemas, además de anemia, diarrea y hasta demencia. La B6 se utiliza con mucho éxito en mujeres menopáusicas, dado que alivia los síntomas de este período.

### 1.3.3. Fermentación.

Uno de los problemas que presenta la cerveza de sorgo es la conversión ineficiente del almidón en azúcar fermentable. Referente a las cantidades de azúcares fermentables en sorgo y fermentos de malta de cebada, la diferencia principal se ha encontrado en el contenido de glucosa. A diferencia de cerveza europea hecha con cebada, las cervezas africanas de sorgo son ejemplos típicos de fermentación láctica seguido por la fermentación alcohólica en la cual inicialmente, la bacteria de ácido láctico, y las posteriores levaduras, juegan el papel fundamental. El fermento de malta de sorgo es inoculado con una levadura tradicional, y el tiempo de fermentación oscila entre 10 y 24 h en la temperatura ambiental.

Estas cervezas tienen un bien bajo contenido de alcohol (el % 2-4,5 v/v), un pH de entre 3,3 y 4 y una tasa de ácido láctico de casi 0,26. Usualmente, las cervezas de sorgo africanas tienen un poco de olor a fruta añadido para su olor de fermentación.

El problema principal reportado por los cerveceros africanos es la poca durabilidad de las cervezas. Estas se descomponen rápidamente porque están fermentándose siempre cuando hay presencia de un sólido, con organismos creciendo en el medio sustancioso. Además las actividades metabólicas de la bacteria ácido lácticas del mesophilic junto con otra bacteria indeseable (*Acetobacter*), producen ácido acético, olores volátiles indeseables, sabor a fruta, olor y textura inaceptable para los consumidores de la cerveza(Lyumugabe, 2012)

La fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de O<sub>2</sub>, originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono para obtener como productos finales: un alcohol en forma de etanol, dióxido de carbono en forma de gas y unas moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico. El etanol resultante se emplea en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas, tales como el vino, la cerveza, la sidra, el cava, etc.

Las levaduras empleadas en el proceso de fermentación de la cerveza se dedican a fermentar la maltosa y por regla general suelen depender de las características del producto cervecero final que se desee obtener, por ejemplo se suele emplear la *Saccharomyces cerevisiae* para elaborar cervezas de tipo ale (de color pálido) y la *saccharomyces carlsbergensis* que sirve para la elaboración de la cerveza tipo lager (Generalmente de color rubio) y la Stout (Cerveza oscura de alto contenido alcohólico generalmente más dulce, un ejemplo: Guinness).

Durante el proceso se le añade lúpulo (*Humulus lupulus*) con el objeto de saborizar, aromatizar y controlar las reacciones enzimáticas durante el proceso de elaboración de la cerveza. El proceso de fermentación de la cerveza se produce en un medio ácido que suele oscilar entre los pH 3,5 y 5,6.

Existen en la elaboración de la cerveza dos tipos fundamentales de fermentación etílica:

- Alta fermentación(*Saccharomyces cerevisiae*), esta permanece en actividad por un intervalo de tiempo de 4 a 6 días a temperaturas relativamente altas entre los 18 y 25 °C.
- Baja fermentación(*Saccharomyces carlsbergensis*), que se mantiene en actividad fermentativa durante un periodo de 8 a 10 días a temperaturas comprendidas entre 6 y 10 °C.
- Fermentación espontánea: que se trata de una fermentación que se realiza en algunas cervezas belgas elaboradas en las cercanías del río Senne, cerca de Bruselas, no se le añade levadura. La fermentación es como la del vino y suele durar años.

#### **1.3.3.1. Cepas empleadas.**

La industria cervecera ha seleccionado durante siglos las cepas de levaduras para que se adaptaran al proceso de elaboración de cerveza, logrando una gran variedad de las mismas. Dentro de estas se destacan:

- *Saccharomyces uvarum*, es tolerante al etanol y clasificada con la denominación Budvar, con 90 % de viabilidad y 76 % de sólidos en volumen. Se añade desde el comienzo de la fermentación en una relación en masa constante de 0,1186 g/g de extracto fermentable total, fermenta a temperatura de 10°C. **(Carrillo, 2011)**
- *Brettanomyces* más dominante en algunas ales belgas, particularmente en las de estilo "marrón amargo".
- *Saccharomyces cerevisiae*es apropiado para la fermentación a temperaturas más cálidas (20-30°C; 68-86°F) con un tiempo de demora corto. La fermentación a altas temperaturas puede resultar en agotamiento acelerado de amino nitrógeno libre en el mosto/jugo en estas situación es puede ser necesario agregar nitrógeno libre o disponible. Exhibe una tolerancia alcohólica excelente en el rango de 15-17% (v/v). Es una cepa de espuma baja o moderada, tiene propiedades de sedimentación excelentes luego de la fermentación alcohólica.
- *Saccharomyces carlsbergensis* es un producto de la elaboración de cerveza descubierto y empleado por la gran industria danesa de cerveza denominada Carlsberg, hoy en día se

emplea esta levadura en la investigación de ciertos procesos de la Glucólisis. Es un híbrido de *Saccharomyces bayanus* y *Saccharomyces cerevisiae*, esto no es sorprendente ya que existe un grado de similitud entre el fenotipo y el genotipo de ambas especies. Nunca se cultiva con temperaturas sobre los 34°C.

- *Saccharomyces diastaticus* se utiliza en la fabricación de cervezas para diabéticos. Además de fermentar los azúcares corrientes como la glucosa, sacarosa, maltosa y maltotriosa, esta levadura fermenta también las dextrinas más sencillas. En las cervezas fermentadas por *esta bacteria* el contenido final de azúcares es muy bajo y por ello la bebida es adecuada para diabéticos. Últimamente se abandona el uso de esta levadura debido a que afecta negativamente al sabor. Para la fermentación del mosto de cerveza se utilizan cepas de gran poder fermentativo, tales como *S. carlsbergensis* y durante la fermentación se añade glucoamilasa para reducir las dextrinas a azúcares fermentables por levadura.

### 1.3.3.2. Enzimas.

Las enzimas son proteínas que actúan como aceleradores de las reacciones químicas, de síntesis y degradación de compuestos se encuentran en todos los seres vivos y son piezas esenciales en su funcionamiento.

Una de sus características fundamentales es su elevada especificidad, esto quiere decir que cada tipo de enzima se une a un único tipo de sustancia, el sustrato, sobre el que actúa. **(Bairgian, 2006)**

Las enzimas no son alterados por la reacción, pero por ser proteínas, resultan termolábiles y sensibles a los cambios y variaciones del medio ambiente físico en que se hallen. **(Alemán, 2001)**

Pasteur descubrió que la fermentación del azúcar mediante levaduras, con su conversión en alcohol etílico y anhídrido carbónico es catalizada por fermentos o enzimas. En 1897 Buchner logró extraer de las células de levadura las enzimas que catalizan la fermentación alcohólica **(Hernández, 2007)**. Fuentes bibliográficas informan que la malta, enzima del cereal, es el grano de cereal sometido a la germinación y posterior deshidratación y tostado.

La transformación del almidón en azúcares es vital, ya que las levaduras encargadas de la fermentación no son capaces de atacar directamente al almidón sino que los necesitan convertidos en azúcares para su crecimiento y multiplicación. En la elaboración de Cervezas, el proceso de maceración es el encargado de

que las moléculas de almidón sean transformadas en azúcares, este proceso es llevado a cabo por dos tipos de enzimas las alfa-amilasas y las beta-amilasas (**Eggert, 2004**).

En las Cervecerías las enzimas utilizadas son la Amilasas, Papaína y Pepesina para licuar la pasta de malta y evitan la turbidez durante la conservación de ciertos productos. Las fuentes de obtención de estas enzimas son la malta de cereales y las que se extraen de bacterias, hongos y levaduras que se desarrollan en esta industria de fermentación.

La ingeniería genética está realizando progresos importantes en la producción de enzimas recombinantes en microorganismos ya que estas son las más económicas porque los microorganismos se reproducen a ritmo acelerado, son fáciles de manipular genéticamente y crecen en un amplio rango de condiciones ambientales.

Algunas enzimas recombinantes destinadas a la industria cervecera son:

- $\alpha$ -Amilasa: obtenida a partir de *Bacillus subtilis* recombinante. Esta enzima licua el almidón y lo convierte en dextrina en la producción de jarabes favoreciendo la retención de la humedad del producto y bajando su contenido calórico.
- $\beta$ -glucanasa: Producida por levaduras cerveceras recombinantes, que facilitan la filtración del producto.

En la obtención de la malta intervienen cuatro tipos de enzimas:

1. Amilolíticas: responsables de la solubilización de la fécula y su posterior sacarificación. Intervienen los siguientes grupos de enzimas:
  - Beta-amilasa: Actúa produciendo maltosa sobre la cadena lineal de glucosa. Se obtiene 68-84% de maltosa, dependiendo del origen de la amilasa. La temperatura óptima de trabajo es de 60 - 70°C pH, entre 4,6 – 5.
  - Alfa-amilasa: Actúa en enlaces 1,4 de almidón, produciendo unidades de dextrinas. La temperatura óptima de trabajo es de 70 - 76 °C y un pH 4,6-5.
2. Proteolíticas: Desdoblan las proteínas en compuestos más sencillos, como péptidos, aminoácidos.
3. Fitasas: Enzimas importantes porque ayudan a establecer y mantener el pH de la mezcla agua-malta durante la maceración.

4. Beta-gluconasas: Actúan sobre la beta-gluconasas que son un grupo lineal de polisacáridos, consistente en unidades de glucosa con enlaces  $\beta$  (1,4) 70%,  $\beta$  (1,3) 30% que aumentan la viscosidad de la solución. Estos se encuentran en altas cantidades en maltas mal disgregadas y en cereales no malteados (**Florio, 2005**).

Estas enzimas actúan cuando el pH es de 5.6, para la beta-amilasa alrededor de 65°C y para las alfa-amilasas 72°C. Por esta razón para tener un buen macerado se deben seguir curvas de temperatura-tiempo para que se permita actuar a cada enzima en su condición óptima(**Eggert, 2004**).

En estudios realizados en la Facultad de Química-Farmacía UCLV Cuba, se ha malteado el sorgo UDG-110 siguiendo las técnicas de malteo para la cebada. Los resultados obtenidos para la malta de sorgo difieren en cuanto a tiempo reportado para las diferentes etapas, dadas las características del grano de sorgo, diferente al de la cebada, además de la calidad del cultivo del sorgo. Los resultados de la caracterización del sorgo y de su malta, arrojan que el contenido de calcio y de proteínas de la malta de sorgo es inferior, pero superior en hierro que la malta de cebada. Se ha aplicado esta malta en la obtención de alcohol(**Rodíguez, 2005**), (**Alemán, 2007**)y en la producción de maltinas para enfermos celíacos(**Ozuna, 2008**).

#### **1.3.3.3. Adjuntos cerveceros.**

Se entiende por adjuntos cerveceros a las materias primas que sustituyan parcialmente a la malta, o al extracto de malta en la elaboración de cerveza. Su empleo no podrá ser en su conjunto superior al 45% en relación al extracto primitivo.

Se consideran adjuntos cerveceros a los cereales, malteados o no, aptos para el consumo humano, a excepción de los productos definidos en los numerales. También se consideran adjuntos cerveceros a los almidones y azúcares de origen vegetal.

Los principales adjuntos cerveceros son:

- El sorgo es principalmente utilizado como un adjunto porque proveen extracto con un costo inferior que el de la malta de cebada, además de que es fácilmente disponible. Además es consistente en el término de composición, disponibilidad y produce un espectro de azúcar fermentable y la dextrina parecido al producido por la malta de cebada. Tiene el sabor dulce y fino que es

compatible con muchos estilos de cerveza, es también utilizado como adjuntos porque baja la proteína y el polifenol contenido en la cerveza. **(Ogbeide, 2011)**

- El maíz es ampliamente utilizado por cerveceras grandes para brindarle una mayor cantidad de azúcares fermentables al mosto sin utilizar maltas para reducir costos de producción. La composición química del grano de maíz se ve afectada por el genotipo, medioambiente y condiciones de siembra. En promedio, el contenido de proteína es de 10 % y más de 60 % son proláminas y se conocen como zeínas. Existen ciertos estilos donde el maíz es aceptado a cierto rango para brindarle al estilo un carácter único, por ejemplo una Cream Ale puede tener hasta un 20% de maíz. El maíz no puede ser utilizado solo así como sale del campo. Para que pueda ser de ayuda en nuestra cerveza tiene que estar pre-gelatinizado, aplastado y cocido a cierto punto. Un ejemplo perfecto de cómo debe estar son los "Corn Flakes" o más bien dicho Hojuelas de maíz.
- El arroz negro como adjunto le aporta a la cerveza desde el punto de vista nutricional casi dos veces más polifenoles que una cerveza tradicional por esto se considera como una alternativa promisorio a ser utilizada en el proceso cervecero en los próximos años. **(Batista, 2008)**
- La sacarosa es el edulcorante más utilizado en el mundo industrializado, aunque ha sido en parte reemplazada en la preparación industrial de alimentos por otros endulzantes tales como jarabes de glucosa, o por combinaciones de ingredientes funcionales y endulzantes de alta intensidad. La extensa utilización de la sacarosa se debe a su poder endulzante y sus propiedades funcionales como consistencia. Por tal motivo es importante para la estructura de muchos alimentos incluyendo panecillos y galletas, nieve y sorbetes, además es auxiliar en la conservación de alimentos y en la obtención de bebidas.

#### **1.3.3.4. Características sensoriales.**

El análisis sensorial es el examen de los atributos de la cerveza mediante los sentidos (vista, olfato, gusto y tacto), obteniendo datos cuantificables y objetivos. Las cervezas se evalúan atendiendo a diversas características como son la apariencia (transparencia, color, formación de burbujas, espuma) y el flavor (gusto, aroma, sensación en la boca). Para ello se le realiza una inspección a la botella, la cerveza en el vaso, color, si está acorde al estilo, la efervescencia, luego se inspecciona la espuma y dentro de ella su formación y estabilidad. **(Pérez, 2008).**

#### **1.4 Sustitución de la malta de cebada por malta de sorgo.**

En todas las cervecerías del mundo actual se utiliza la malta de cebada para obtener cerveza y malta, aunque se han realizado diversas búsquedas para a partir de otro cereal obtener estos productos, solo en algunos países del continente africano y americano se utiliza la malta de sorgo como sustitutivo de manera artesanal. La búsqueda no solo ha sido incentivada por el costo de la materia prima sino también por la influencia que tendrían sobre la vida de las personas celiacas que no pueden consumir ninguna bebida obtenida a partir de cereales que posean gluten.

Cuba no está exenta de esta situación por lo que en el país se han realizado una serie de investigaciones encaminadas a estos fines. La Universidad Marta Abreu de Las Villas es la principal institución de nuestro país que ha llevado a cabo estas ideas destacándose los resultados reportados en la elaboración tanto de repostería como de bebidas. Varios estudios afirman que es posible la sustitución de la malta de cebada por malta de sorgo en la producción industrial de bebidas destacándose la cerveza y la malta.

## *Capítulo 2: Desarrollo experimental.*

El presente estudio se basa en la optimización de la etapa de malteado del sorgo y en la realización de un estudio de la fermentación alcohólica que ocurre para la obtención de cerveza de sorgo. Para ello se tomó como antecedentes los estudios realizados hasta el momento sobre el tema, en los cuales se habían tomado para ambos procesos los parámetros, en dependencia de lo planteado para el grano de cebada cereal utilizado en las cervecerías mundiales.

El sorgo empleado para dichos análisis fue el tradicionalmente utilizado UDG -110, con el cual hasta el momento se han obtenido resultados satisfactorios.

### **2.1. Proceso de malteado.**

Para la realización de la optimización del proceso de malteado se utilizó un diseño de experimento factorial completo  $2^k$  con una réplica y un punto central. Las variables independientes y sus niveles se muestran en la tabla 2.1, estos niveles se tomaron de acuerdo a estudios reportados en la literatura con otras variedades de sorgo y a la experiencia de trabajo con este sorgo.

**Tabla 2.1 Variables independientes y sus niveles.**

<b>Variables</b>	<b>Niveles</b>
Concentración de NaOH (X1)	0,1-0,5%
Tiempo de remojo (X2)	24-36h
Tiempo de germinación (X3)	48-72h

Después de seleccionadas las variables y sus niveles mediante el software Statgraphics se obtuvo la matriz experimental en la que se reportan 10 experimentos en la tabla 2.2.

#### **2.1.1. Etapas del proceso de malteado.**

Las etapas que constituyen el proceso de malteado comienzan con la selección del grano, el remojo, luego la germinación y por último una etapa de secado. En este proceso se logra obtener las enzimas (tipo  $\alpha$ -amilasa y  $\beta$ -amilasa) que permiten convertir los almidones obtenidos en azúcares (maltosa).

### 2.1.1.1. Clasificación del grano.

La clasificación del grano consistió en eliminar de manera manual los granos dañados existentes y así lograr una limpieza y selección del grano adecuada.

Tabla 2.2 Matriz experimental.

Exp.	NaOH (%)	TR (h)	TG (h)	Germ (%)	PM (%)	DP (°L)
1	0,1	36	48	77	15,64	98,90
2	0,1	12	72	98	13,54	147,20
3	0,1	12	48	88	11,54	110,40
4	0,3	24	60	70	18,74	70,43
5	0,5	12	48	34	18,76	58,65
6	0,5	36	72	18	17,85	63,19
7	0,5	36	48	14	20,31	61,85
8	0,5	12	72	27	19,58	32,20
9	0,1	36	72	97	18,62	104,10
10	0,1	36	48	75	15,21	96,90
11	0,1	12	72	96	12,98	145,20
12	0,1	12	48	85	11,21	109,40
13	0,3	24	60	69	17,94	71,85
14	0,5	12	48	32	17,86	56,65
15	0,5	36	72	16	17,25	61,19
16	0,5	36	48	15	19,91	60,85
17	0,5	12	72	25	20,08	35,20
18	0,1	36	72	95	19,62	101,10

### 2.1.1.2. Remojo.

La etapa de remojo trae como consecuencia la contaminación por microorganismos por lo que **(Nelles and Taylor, 2002)** y **(Lefyedi and Taylor, 2006)** mostraron un método químico que no afecta negativamente al grano de sorgo y consiste en la adición de una solución alcalina (0.1-0.5% NaOH o CaOH<sub>2</sub>). Además de prevenir la contaminación. **[(Okolo and Ezeogu, 1996a); (Okungbowa et al., 2002)]** recomendaron la adición de una solución alcalina al 0,1% para mejorar el poder diastático de la malta, parámetro clave en la calidad del proceso de malteado.

Por lo planteado anteriormente en esta etapa uno de los parámetros a estudiar fue la concentración de hidróxido de sodio a añadir. Otro parámetro objeto de estudio fue el tiempo de remojo (TR) para el cual se tomaron valores superiores e inferiores a los reportados para la cebada.

Para cada uno de los experimentos se tomaron 120g de sorgo y se sometieron a la etapa de remojo variando los parámetros en dependencia de la serie experimental. Al finalizar el proceso se determinó la humedad alcanzada reportando valores entre 20-45%. Los valores determinados se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Porcentaje de humedad alcanzado en el remojo.**

<b>Exp.</b>	<b>% Hum</b>	<b>Exp.</b>	<b>% Hum</b>
1	36,37	10	39,03
2	35,18	11	35,68
3	20,34	12	28,52
4	32,21	13	35,08
5	40,64	14	34,68
6	37,25	15	39,47
7	34,90	16	38,04
8	31,36	17	43,81
9	38,32	18	34,42

#### **2.1.1.3. Germinación del grano de sorgo.**

Luego de que el grano de sorgo había alcanzado en el remojo la humedad requerida se colocó en bandejas cubiertas por un paño aireándose a temperatura ambiente. El tiempo de germinación (TG) fue uno de los parámetros estudiados variando de 48–72h ya que son aproximadamente los reportados para la cebada y se necesitaba obtener cual era el tiempo apropiado para el grano de sorgo.

#### **2.1.1.4. Secado.**

En esta etapa el principal objetivo es eliminar la humedad del grano, utilizando para ello una estufa de tiro de aire inducido. Luego de colocar el sorgo sobre una bandeja se introdujo en dicha estufa a 65°C. Teniendo en cuenta el tipo de malta que se desee obtener en este caso para la cerveza malta clara, que se seca hasta que el grano alcanza una humedad entre el 3-5%, los resultados se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Variación de la humedad en el secado**

Exp.	%Hum	Exp.	%Hum
1	5,00	10	5,29
2	5,17	11	4,41
3	3,04	12	5,00
4	5,00	13	5,18
5	3,82	14	5,30
6	5,00	15	5,00
7	4,73	16	3,46
8	5,00	17	5,01
9	5,00	18	4,83

### **2.1.2. Análisis del diseño experimental.**

Las variables medidas como respuesta fueron el poder diastático (DP), Porcentaje de granos germinados y porcentaje de pérdidas en el malteado.

#### **2.1.2.1 Porcentaje de granos germinados.**

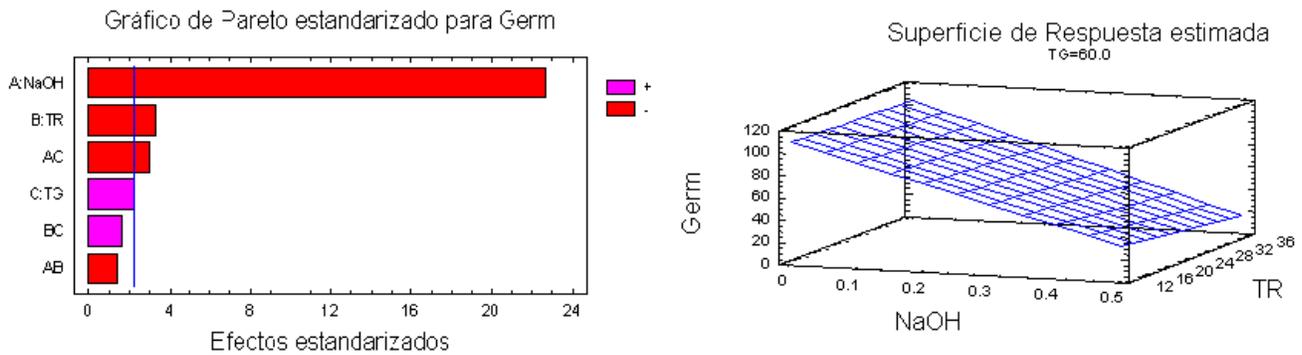
El porcentaje de granos germinados se determinó con muestras aleatorias de 100 granos y mediante la siguiente ecuación:

$$\%Ger = \frac{\text{granos germinados}}{\text{granos totales}} * 100 \text{Ec. 2.1}$$

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de regresión múltiple en el que se obtuvo la siguiente función objetivo:

$$\text{Germ} = 85.4028 - 36.25*\text{NaOH} - 1.14583*\text{TR} + 0.421875*\text{TG} - 0.833333*\text{NaOH}*\text{TR} - 1.82292*\text{NaOH}*\text{TG} + 0.0164931*\text{TR}*\text{TG}$$

Además se obtuvieron los gráficos superficie de respuesta y diagrama de Pareto que se muestran en la figura 2.1.



**Fig. 2.1 Diagramas de superficie de respuesta y Pareto para la germinación.**

Como se muestra en los resultados anteriores las variables más influyentes en el porcentaje de germinación son la concentración de hidróxido de sodio y el tiempo de remojo, que influyen negativamente sobre el proceso, a mayores concentraciones de hidróxido de sodio hay una inhibición en la germinación y por lo tanto el grano no germina y se pudre.

### 2.1.2.2 Porcentaje de pérdidas en el malteado.

Las pérdidas en el malteado vienen evidenciadas por el porcentaje de rendimiento de los granos de sorgo, esto depende mucho de la calidad que esté presente. Para su determinación se utilizó la ecuación que se muestra a continuación.

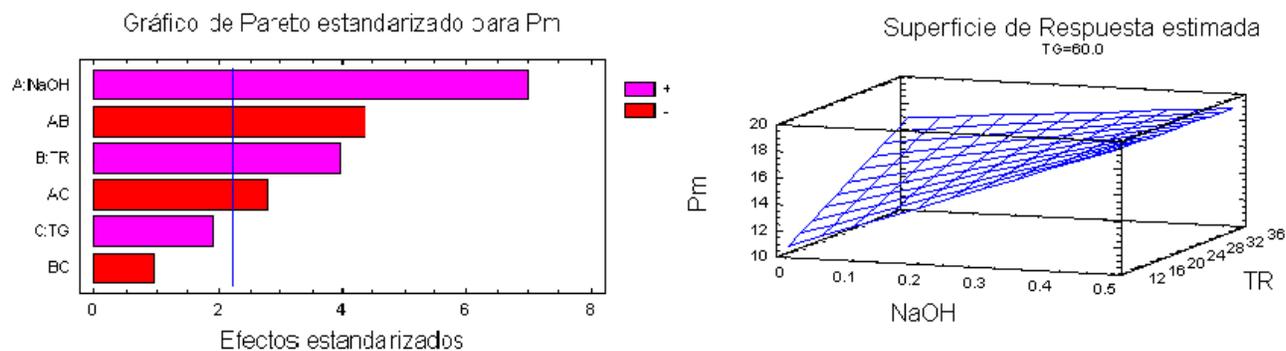
$$\% \text{ Pérd } = \frac{Pg - Pms}{Pg} * 100 \text{ Ec. 2.2}$$

Pg: peso inicial de la muestra.

Pms: peso de la malta seca

Luego de analizar los resultados se obtuvo el siguiente modelo que describe la relación entre las pérdidas de malteado y las distintas variables independientes objeto de estudio, además de sus respectivos gráficos de Pareto y superficie de respuesta que se muestran en la figura 2.2.

$$Pm = -4.21569 + 44.0625 * NaOH + 0.378802 * TR + 0.198021 * TG - 0.541146 * NaOH * TR - 0.344792 * NaOH * TG - 0.00197049 * TR * TG$$



**Fig. 2.2 Diagrama de Pareto y de superficie de respuesta para las pérdidas del malteado.**

Las pérdidas en el malteado es una variable respuesta de esencial importancia en la economía del proceso, como se aprecia, en ellas tiene influencia significativa la concentración de hidróxido de sodio, el tiempo de remojo y las interacciones entre estas y la interacción también con el tiempo de germinación del hidróxido.

### 2.1.2.3. Poder diastático.

El poder diastático (*DP*) expresado en °L es una medida de las enzimas que degradan el almidón presente en la malta. Los valores están influenciados por la variedad del grano y el contenido de proteína. **(Anexo 1).**

$$DP(asis) = (B - A) * 23 \text{Ec. 2.4}$$

$$DP = \frac{DP(asis) * 100}{100 - M} \text{Ec. 2.5}$$

B: ml consumidos por el blanco

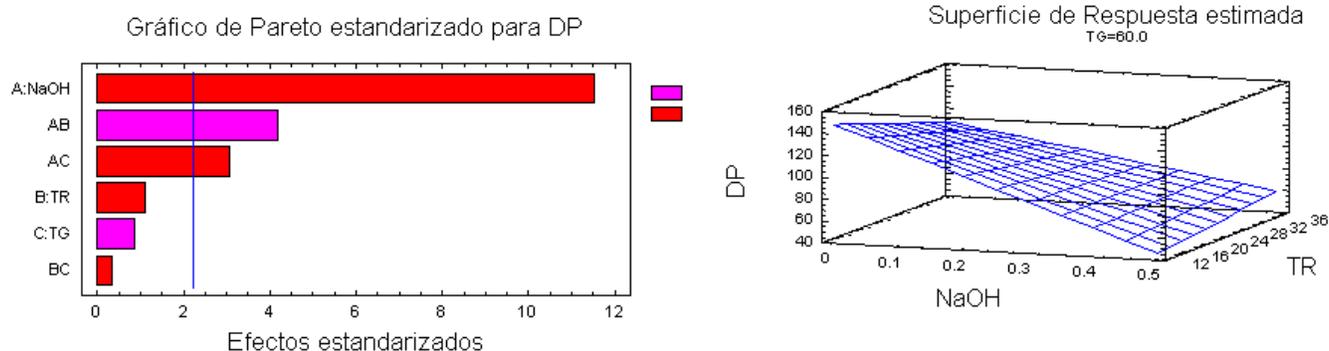
A: ml consumidos por los experimentos en la valoración

M: porcentaje de humedad de la malta.

DP(asis): Poder Diastático

Con los resultados obtenidos anteriormente se logró la siguiente función objetivo que es descrita por los gráficos de Pareto y Superficie de repuesta.

$$DP = 86.8119 - 60.4625*NaOH - 1.26089*TR + 1.32995*TG + 4.5724*NaOH*TR - 3.33906*NaOH*TG - 0.00591146*TR*TG$$



**Figura 2.3 Diagrama de Pareto y superficie de respuesta para el poder diastático.**

En el análisis de esta variable respuesta y la más importante en el uso de la malta como enzima, las variables independientes con significación, son también la concentración de hidróxido la cual debe estar en su menor concentración, seguida de las interacciones entre esta con el tiempo de germinación y el tiempo de remojo esto es lógico ya que, el PD depende también de la calidad en la germinación y estas dos variables fueron también las significativas en el porcentaje de germinación.

### 2.1.3. Optimización del proceso de malteado.

La optimización del proceso de malteado se realizó mediante el Solver del Excel. En Solver, puede buscarse el valor óptimo para una fórmula de una celda, denominada celda objetivo, en una hoja de cálculo de Excel. Además funciona en un grupo de celdas que estén relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo y ajusta los valores en las celdas cambiantes que se especifiquen, denominadas celdas ajustables, para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo. Pueden aplicarse restricciones para restringir los valores que puede utilizar Solver en el modelo y las restricciones pueden hacer referencia a otras celdas a las que afecte la fórmula de la celda objetivo. Para realizar la optimización del proceso de malteado se tomaron las tres funciones objetivos obtenidas y en el Solver del Excel se procesaron arribando a un óptimo muy semejante en las tres funciones.

Luego de procesar los datos en Excel los óptimos resultaron ser 0.1% de concentración de hidróxido de sodio, 12 h de remojo y 72h de germinación.

Basados en los resultados obtenidos en la optimización del malteado, se maltearon 5 Kg de sorgo de los cuales se obtuvieron 4,4 Kg para un 12% de pérdidas, con un porcentaje de germinación de 96% y un poder diastático de 86,24°L, siendo este inferior a los reportados para los experimentos con estos mismos niveles porque se presentaron problemas con el fluido eléctrico en la etapa de secado que también influye en la calidad de la malta.

La caracterización de la malta obtenida comparada con el grano de sorgo y la malta de cebada aparece reflejada en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Comparación de la malta de sorgo obtenida**

Grano	% PB	Minerales %				
		Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
<b>Sorgo</b>	12,5	0,015	0,171	0,0042	0,00044	0,0025
<b>Malta de Sorgo</b>	13,08	0,0602	0,0304	0,0108	0,00092	0,00437
<b>Malta. Cebada</b>	13,56	0,0366	0,026	0,0067	0,00065	0,0020

## 2.2. Proceso de maceración.

Para realizar el proceso de maceración se calentó agua en un reactor enchaquetado con agitación continua, hasta alcanzar los 38 °C; en ese punto, se agregó el grano, agitando para evitar que se formaran grumos. Entonces aquí se comienza un proceso de elevación y mantenimiento de la temperatura escalonadamente, colocando la muestra en un termostato para regular la temperatura. Durante media hora se mantiene la temperatura entre los 50 °C y 55 °C, revolviendo de vez en cuando para facilitar la disolución del almidón y azúcares en el agua, esta operación se realiza durante treinta minutos. Luego se eleva la temperatura a 63 °C por 40 minutos y posteriormente al rango comprendido entre los 69 °C y 72 °C y se sigue cocinando durante 45 minutos. Este proceso se realiza para lograr la sacarificación de los almidones, es decir la conversión de los almidones en azúcares fermentables.

### 2.3. Proceso de fermentación.

El extracto obtenido en el proceso de maceración fue filtrado y luego sufrió un cocinado donde se le adicionó adjunto cervecero que fue azúcar crudo en una razón de 70% de malta/ 30% de adjunto ya que con esta proporción se han obtenido los mejores resultados preliminares, además se le adicionó el lúpulo aromático y amargo, luego de la cocción se obtuvo una solución que se tomaría para la posterior fermentación.

Para el estudio de la obtención de cerveza se aplicó un diseño de experimentos del tipo  $2^{k-1}$ , siendo  $k=3$ , resultando cuatro experimentos con un punto central. Las variables que se utilizaron fueron tres, con dos niveles, los que se seleccionaron en base a trabajos realizados para la obtención de etanol y estudio preliminar de cerveza. (Gallardo et al, 2011 y 2013) aquí  $X_1$  es la concentración de inóculo (CI) en los niveles de 1 y 2 g/L,  $X_2$  tiempo de fermentación (TF) en niveles de 2 y 4 días atendiendo que se añadía enzima pues en trabajos reportados por Serna (Serna, 2005) la fermentación duraba 144 horas (6 días) y enzima  $X_3$  la cantidad de Enzima Termamyl ( $\alpha$  Amilasa) (CE) añadida en niveles de 0,5 y 1%. Al final fue realizado un experimento sin enzima para ver el efecto solamente de la malta utilizando para ello la CI intermedia y el tiempo de fermentación máximo estudiado. La matriz experimental se muestra en la tabla 2.6. Se tomaron como variables respuesta el Brix y los ART al final de la fermentación, el consumo de ART y el grado alcohólico del producto.

**Tabla 2.6 Matriz experimental para la fermentación.**

Exp.	Conc. de inóculo (g/L)	Conc. de enzima (%)	Tiempo de fermentación (días)
1	2,0	0,5	2
2	1,0	0,5	4
3	2,0	1	4
4	1,5	0,75	3
5	1,0	1	2
SN	1,5	0,75	4

### 2.3.1 Determinaciones experimentales de las variables respuestas.

#### 2.3.1.1. Azúcares reductores.

Los Azúcares Reductores fueron determinados en muestras duplicadas de filtrados con el Método de Bernfeld, utilizando el Ácido 3,5-Dinitro salicílico. Este se basa en la relación según la ley de Lambert-Beer, siendo la absorbancia medida en un espectrofotocolorímetro a 540 nm proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra. **(Anexo 2)**.

#### 2.3.1.2. Grados Brix.

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, esta nos da una medida de los sólidos solubles en sólidos totales o lo que es lo mismo los grados Brix. **(MACU, 1986)**. Para la determinación del brix se utiliza un refractómetro. **(Anexo 3)**.

#### 2.3.1.3. Grado alcohólico.

El grado alcohólico nos da la medida de cuanto etanol presentan las cervezas al final de la fermentación, se determina mediante el método picnométrico que se basa en el pesar el destilado obtenido después de hacer ebullición y pasar los vapores a través de un condensador. **(Anexo 4)**

### 2.3.2. Resultados obtenidos en la fermentación.

Las variables medidas para cada experimento se muestran en la tabla 2.7

**Tabla 2.7 Resultados experimentales de la fermentación**

Exp	CE (%)	CI (g/L)	TF (Días)	ART(final) (g/L)	Brix (%)	GA (°GL)	Consumo de ART
1	0,5	1	4	4,11	2,6	6,79	85,16
2	0,5	2	2	5,55	3,4	5,63	90,72
3	1	2	4	4,16	2,5	14,83	90,72
4	0,75	1,5	3	4,05	2,4	15,16	88,86

5	1	1	2	4,6	2,6	7,58	89,39
SE	-	1,5	4	4,05	2,9	13,72	91,19

Al analizar por el Software Statgraphics la correlación entre las variables en la fermentación, donde se valoraron como variables respuesta el Brix y los ART al final de la fermentación, el consumo de ART y el grado alcohólico, se observa que cuando se tienen en cuenta las tres variables independientes estudiadas, se presenta un efecto confundido entre las tres variables, recomendando eliminar la de menor significación que en este caso es la enzima.

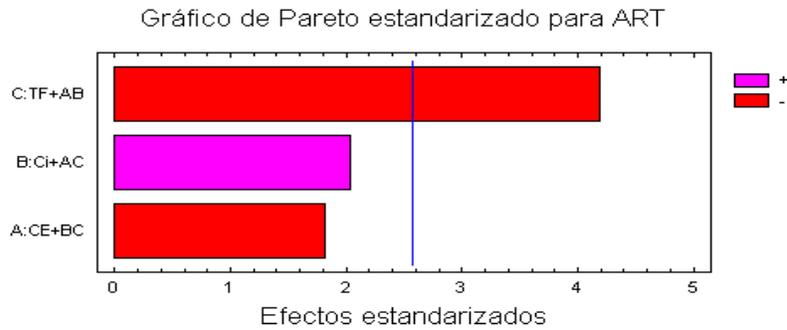


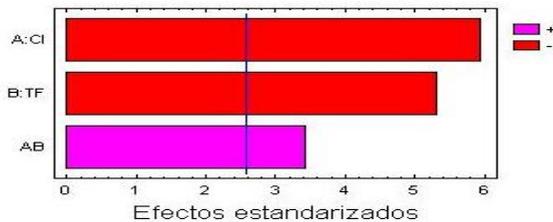
Fig. 2.4 Diagrama de Pareto de ART con presencia de las tres variables.

Al analizar el diseño como un  $2^2$  se obtienen los modelos y los diagramas correspondientes.

### 2.3.2.1. Grados Brix.

$$\text{BRIX} = 5,2775 - 1,3*CI - 0,625*TF + 0,275*CI*TF$$

Gráfico de Pareto estandarizado para BRIX



Superficie de Respuesta estimada

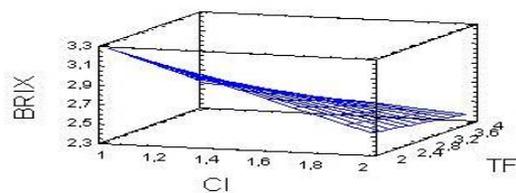


Fig. 2.5 Relación del Brix con la CI y el TF.

### 2.3.2.2. Grado alcohólico.

$$GA = -5,62725 + 1,78*CI + 4,74*TF - 0,2975*CI*TF$$

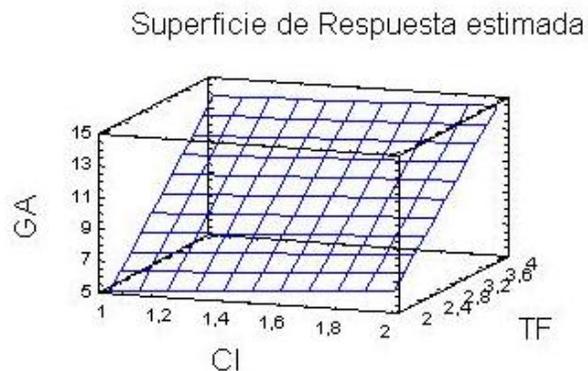
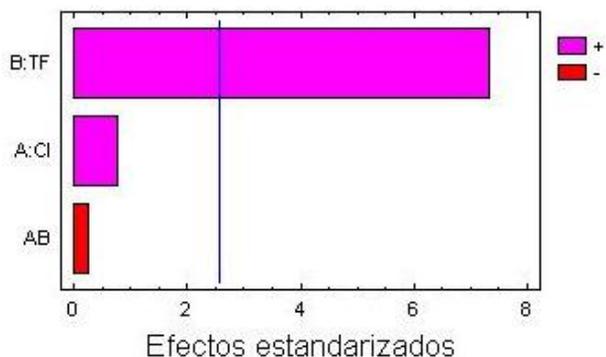


Fig. 2.6 Relación del GA con la CI y el TF.

### 2.3.2.3. Azúcares reductores finales.

$$ART = 9,6785 - 2,735*CI - 1,3425*TF + 0,655*CI*TF$$

Gráfico de Pareto estandarizado para ART

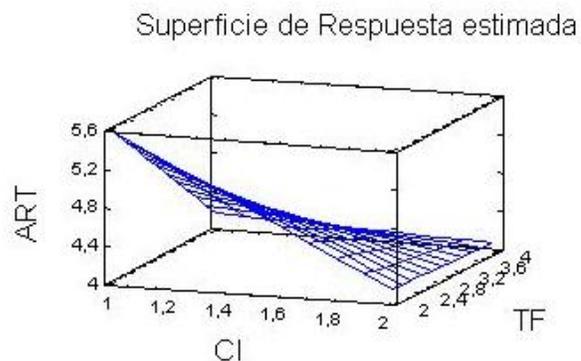
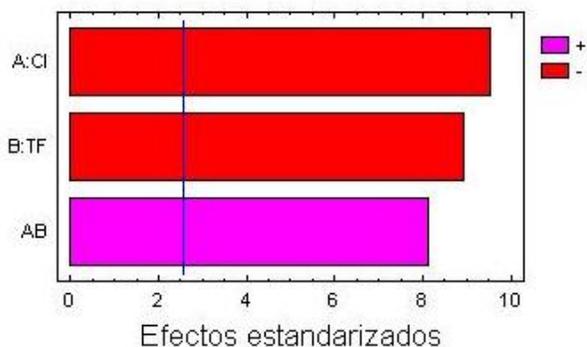
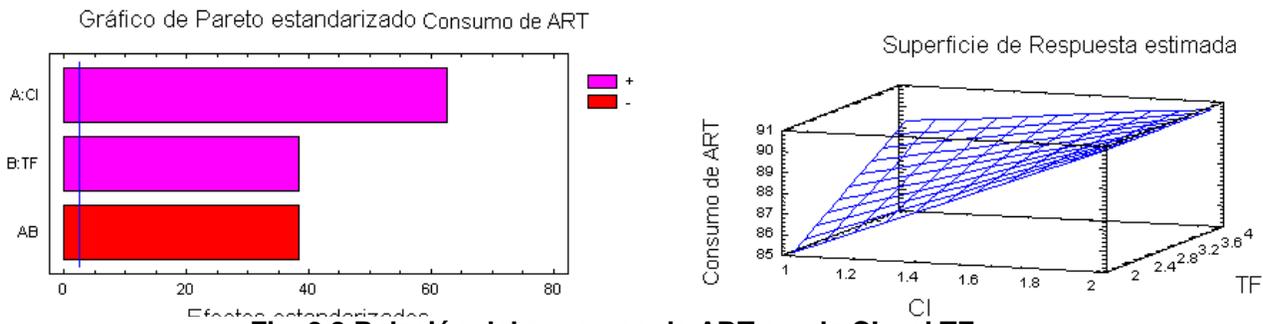


Fig. 2.7 Relación del ART final con la CI y el TF.

### 2.3.2.4. Consumo de ART.

$$Co1_7 = 71.1125 + 9.79*CI + 4.23*TF - 2.115*CI*TF$$



**Fig. 2.8 Relación del consumo de ART con la CI y el TF.**

Las cervezas obtenidas al final fueron caracterizadas, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.8. (Ver anexo 5 y 6)

**Tabla 2.8 Características finales de las cervezas**

Exp.	Acidez (%)	ph	Brix (%)	Ga(°GL)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
1	0,35	4,09	3,4	20,15	987,22
2	0,27	4,10	2,2	12,78	991,01
3	0,09	3,54	3,0	15,65	995,82
4	0,36	4,42	2,9	16,14	993,026
5	0,18	3,53	3,5	14,20	994,42

Como se aprecia la muestra que brinda los mejores resultados es la muestra 1 donde las variables se encuentran en los máximos valores, seguida por la 2 que tiene también la variable enzima en los mayores niveles.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Serna, empleando malta de sorgo, sorgo como adjunto y enzima sacarificante amiloglucosidasa, con un valor de grado alcohólico 3,92, no están muy alejados, al igual que los valores de pH que en las muestras de ese estudio estuvieron entre 5,00 y 5,54 y en este trabajo fueron superiores para las muestras 3 y 4 con menos enzima.

Los colores de estas cervezas son similares a las de las cervezas claras comerciales, no así el sabor, pues la mayoría de las cervezas añaden azúcar también como adjunto, para mejorar sabor y ayudar a la fermentación y en este caso no se añadió sino al final. Se realizaron dos experimentos adicionales sin emplear adjuntos, solamente con dos tipos de malta, caramelo y malta clara, con las proporciones de los experimentos 3 y 4. Los resultados fueron inferiores a los reportados anteriormente.

#### **2.3.2.5. Análisis de los resultados.**

Al analizar el diseño como un  $2^2$  se obtienen los modelos donde aparece como variable significativa para todas las variables respuesta el tiempo de fermentación, la concentración de inóculo para el Brix y los ART, siendo esta última la más significativa seguida del tiempo y después la interacción entre las dos variables. Estadísticamente la enzima no parece tener significación o dando efecto confundido, lo cual puede deberse a que la malta tiene un poder diastático que hace que se confunda el efecto con la enzima, o que como se añadió al final de la maceración no se percibe la variación en la concentración de azúcares. Sin embargo físicamente se ve un gran efecto en la clarificación del producto, dando cervezas transparentes las de mayor contenido de enzimas. El efecto de ella es como catalizador, acelerando el proceso ya que al observar la variación de los ART con el tiempo en la figura... para todas las muestras se nota un cambio brusco en estos en el primer día de fermentación. Los elevados grados alcohólicos obtenidos en los experimentos con enzima pueden deberse al alto poder catalítico de la malta como enzima o que al medir la gravedad específica para la determinación de los grados alcohólicos pueden existir imprecisiones con la balanza para la determinación de los pesos.

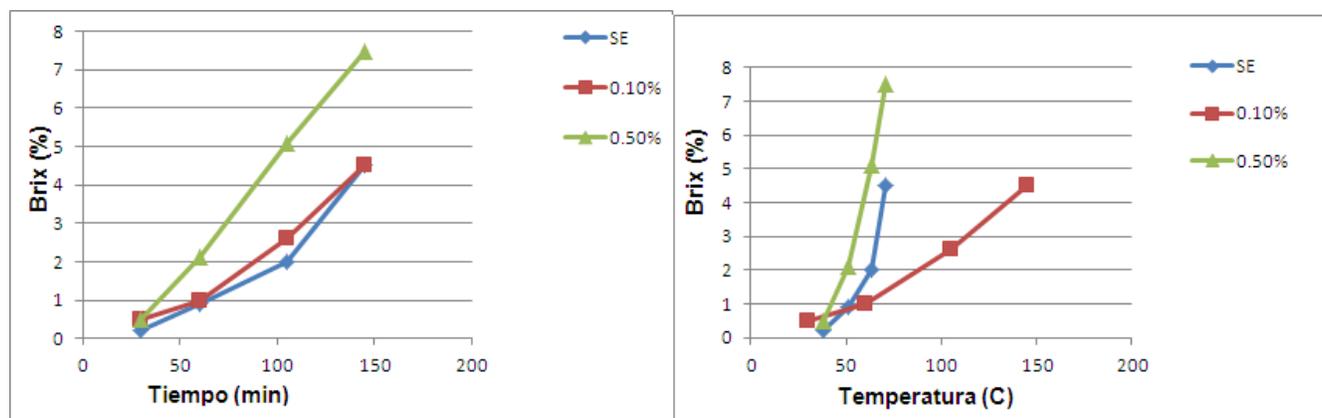
Al realizar una prueba para ver el efecto de la enzima en la etapa de maceración comparada con no añadir enzima, se comprueba que para las concentraciones estudiadas se obtienen valores de ART superiores a los añadidos en los experimentos donde se añadió al final de la maceración.

## 2.4. Maceración.

Luego de realizado el análisis anterior se efectuó un estudio de la maceración. En este proceso se estudió como variable el Brix en los distintos cambios de temperatura y en el tiempo sin enzima (SE) y con la máxima (0.5%) y mínima (0.1%) concentración de esta los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.9 y en la figura 2.9.

**Tabla 2.9 Brix en la maceración.**

Temperatura (°C)	Tiempo (Min)	Brix (SE)	Brix (0,1%)	Brix (0,5%)
38	30	0.2	0.5	0.5
50-55	60	0.9	1	2.1
63	105	2	2.6	5.1
71	145	4.5	4.5	7.5



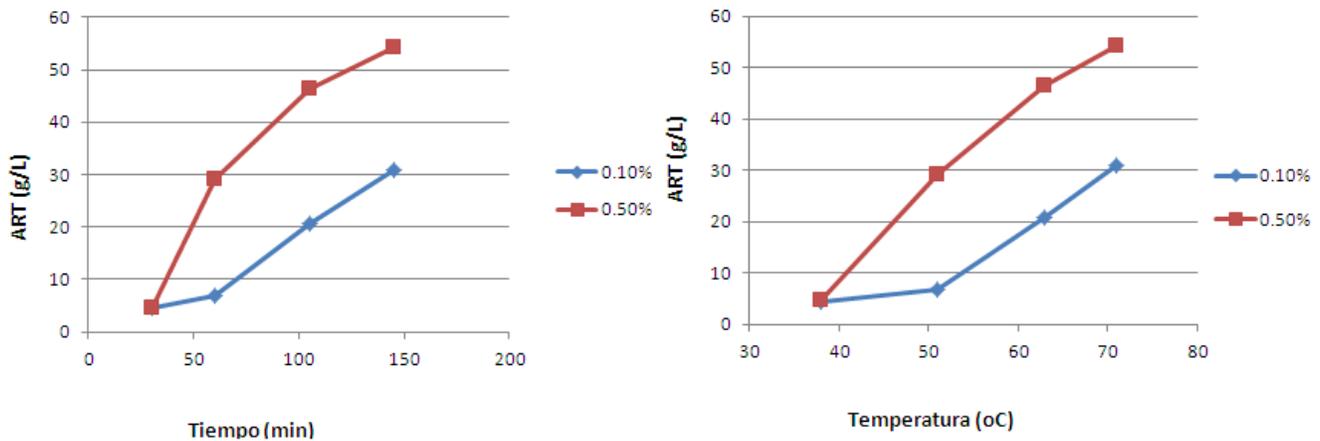
**Fig. 2.9 Comportamiento del Brix con el tiempo y la temperatura.**

Al analizar los resultados anteriores en el Excel se puede apreciar como todas las graficas responden a un comportamiento polinomial de segundo orden destacándose los coeficientes de regresión superiores al 99%.

Además se fue determinando como variaban los ART con el tiempo y la temperatura durante la maceración. Los resultados se muestran en la tabla 2.10 y en la figura del mismo número.

**Tabla 2.10 Comportamiento de los ART en la maceración.**

T(°C)	T(min)	0.1%	0.5%
38	30	4.51	4.62
51	60	6.82	29.20
63	105	20.78	46.40
71	145	30.94	54.13



**Fig. 2.10 Comportamiento de los ART con el tiempo y la temperatura.**

Al analizar el efecto del brix con la temperatura y el tiempo de maceración no se notan cambios significativos entre trabajar sin enzima y trabajar con la mínima concentración de esta empleada, (figura 2.9) variando apreciablemente cuando se cambia la concentración de enzima, aunque este parámetro no es significativo de almidones convertidos a azúcares en el proceso, pues las muestras pueden contener almidones solubles que no fueron convertidos, lo cual se percibe mejor con la medida de los azúcares reductores

Para los ART como se puede apreciar hay una diferencia que prácticamente es constante de 23g/L entre las dos concentraciones de enzimas estudiadas, esto se debe a que los almidones se desdoblán en maltosa y glucosa, por lo que se debe valorar la adición de la enzima en el proceso de maceración a la temperatura donde mayor es su actividad enzimática.

## 2.5. Conclusiones parciales

1. Para sustituir la malta de cebada por la malta de sorgo, los valores óptimos en el proceso de malteado para la concentración de hidróxido de sodio (%), el tiempo de remojo y de germinación (h) fueron 0.1, 12 y 72, respectivamente; obteniéndose un 98% de germinación, un 13.2% de pérdidas y un poder diastático de 147.2°L.
2. Cuando se añade la enzima en el primer cambio de temperatura en la etapa de maceración se pueden alcanzar valores superiores de ART que los obtenidos cuando se utiliza al final de esta etapa.
3. En la etapa de fermentación las variables más significativas fueron la concentración del inóculo y el tiempo de fermentación, obteniéndose los mejores valores en la calidad de la cerveza en el experimento 1 siendo las variables de 1 g/L, 0.5% y 4 días, respectivamente.
4. El comportamiento de la fermentación en este proceso corrobora lo planteado en la literatura, que a medida que van pasando los días van disminuyendo los Brix y los ART y aumentando los grados alcohólicos.
5. El experimento realizado sin la adición de enzima mostro valores cercanos a los más altos obtenidos cuando se añade esta en cuanto al grado alcohólico (13.64°GL) no así en cuanto a la turbidez de la misma, demostrándose la calidad de la malta obtenida.

*Capítulo 3: Diseño de una planta piloto. Análisis económico.*

Luego de todos los resultados obtenidos en el capítulo anterior se impone el diseño de una planta de producción de cerveza a partir de malta de sorgo, por eso este capítulo se centra en el diseño de dicha planta y en un análisis económico del proceso. Se seleccionó una capacidad de producción de cerveza de planta piloto (1 HL/día), y para cuantificar las corrientes del proceso se aplicaron balances de masa y energía.

### 3.1. Proceso de producción de cerveza.

El proceso de producción de cerveza cuenta de varios procesos en su interior que a su vez están conformados por varias etapas, el esquema de producción se muestra en el anexo 7.

#### 3.1.1. Función total del proceso.

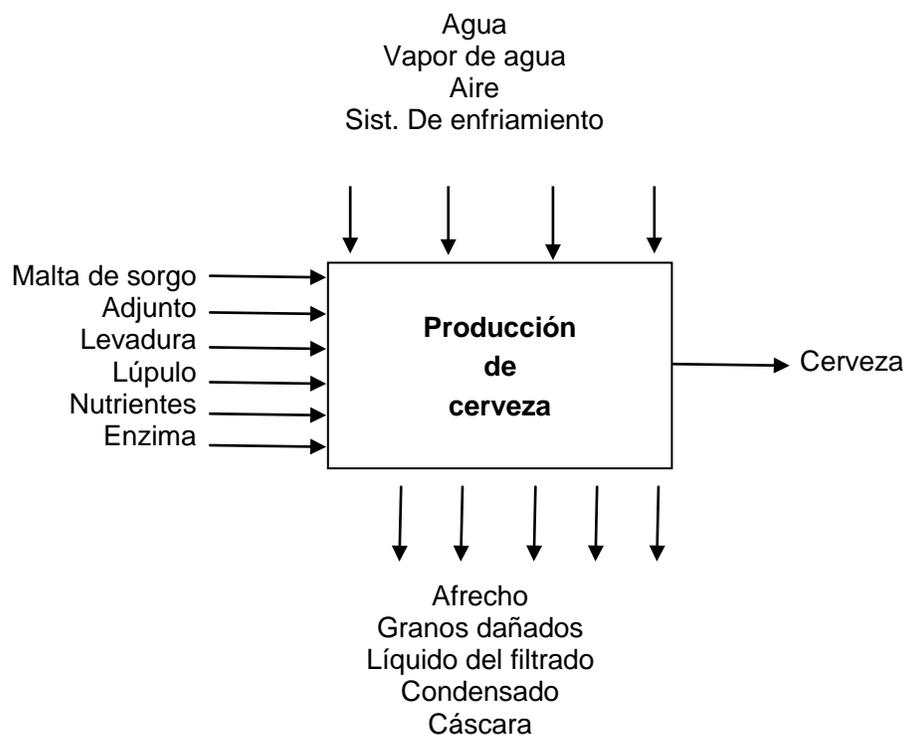


Fig. 3.1 Función total del proceso.

### **3.2. Selección del equipamiento.**

La selección de los equipos se realizó mediante el texto de Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. (Ulrich, 1985).

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

#### **3.2.1. Molinos.**

Para la selección de un molino es necesario tener en cuenta varios parámetros como son la naturaleza del material (sólido) y el tamaño de partícula que se desea obtener. Esta se realizó por la tabla 4.5 de Peter, 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 es el más adecuado para el proceso debido esto a que es posible ajustar la finura deseada de las partículas variando el espacio entre las hojas fijas de la carcasa y los martillos móviles y además es el recomendado por la literatura para estos procesos.

#### **3.2.2. Transportadores.**

Los transportadores son usados para transportar la malta y los adjuntos desde su recepción hasta los elevadores. Para la selección de ellos 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 e 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.

### **3.2.3. Macerador y tanque de cocción con Calentamiento y Agitación.**

El macerador y el tanque de cocción tienen como principal característica que tratan grandes volúmenes a batch y que son tanques agitados con medios de calentamiento y para la selección se compara 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.

### **3.2.4. Agitador.**

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 qué 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.

### **3.2.5. Filtro.**

En la selección del filtro 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.

### **3.2.6. Bombas**

Existen diversas variedades de bombas dentro de las que se destacan para el uso industrial las bombas centrífugas y las reciprocante o de desplazamiento positivo.

Tomando como patrón las características de los fluidos a tratar la bomba seleccionada fue las bombas centrífugas de flujo axial. Además estas sirven para mover grandes volúmenes de líquido, con bajos diferenciales de presión.

### 3.2.7. Tanques de almacenamiento del producto final.

En el almacenamiento del producto final es necesario un tanque al cual se le pueda realizar un control de la temperatura como parámetro fundamental. Los tanques de fondo cónico a pesar de que sean más costosos cumplen con los requisitos para lograr un buen almacenamiento del producto final. Además trabaja en un intervalo de  $-250$  a  $800^{\circ}\text{C}$ , con una presión máxima de 14 atm.

### 3.3. Balances de masa y energía.

#### 3.3.1. Balances de masa.

Para determinar los valores de las variables que se manejarán en el proceso es necesario realizar los balances de materiales según corresponda. En la realización de estos balances se deben tener en cuenta los criterios para el uso de los balances tanto parciales como totales tomando en consideración los principios básicos de la Ingeniería Química.

#### Leyenda para el balance de masa

MP: Masa de Materia Prima.

Vc: Volumen de cerveza

MPT: Masa de Materia Prima Triturada

Le: Masa de levadura

Mm: Masa Mosto macerado

E: Enzima

$V_a$ : Volumen de Agua  $\rho_a$ : Densidad del agua

$M_a$ : Masa de agua

Az: Azúcar

Af: Afrecho

C: Cerveza

A: Agua que se adiciona en el filtrado R: Residuo del filtro

Mfilt: Masa de Mosto a la salida del filtro 2L: Masa de Lúpulo

M<sub>f</sub>: Masa de Mosto a la salida del filtro 1MC: Masa del Mosto Cocinado

R<sub>f</sub>: Residuo del fermentador

**Tabla 3.1. Balances de Masa**

Equipo	Datos	Ecuaciones	Resultados
<b>Molino</b>	MP= 15 Kg	B. Total MPT = MP	MPT = 15 Kg
<b>Macerador</b>	MPT: 15 Kg $\rho_A: 1\ 000\ \text{Kg/m}^3$ $V_A: 0,1\ \text{m}^3$	B. Total Mm = MPT+MA $MA = V_A * \rho_A$	Mm= 115 Kg MA= 100 Kg
<b>Filtro</b>	Mm= 115 Kg Af = 20% Mm A=0,01m <sup>3</sup>	B. Total Mf= (Mm – Af)+A	Mf= 102 Kg Af= 23 Kg A=10 Kg
<b>Tanque cocción</b>	Mf= 102 Kg Az: 5,7 Kg L = 0.3 Kg	B. Total MC = Mf + Az + L	MC = 108 Kg
<b>Fermentador</b>	Le=1.0 Kg Mfilt= 108 Kg $\rho = \frac{998.24\text{Kg}}{\text{m}^3}$ Vc= 0,1 m <sup>3</sup>	Balance total Mfilt=C+Rf C=Vc*ρ	C = 99,83 Kg Rf= Kg

### 3.3.2. Balances de energía.

En todo proceso es necesario el conocimiento de las corrientes energéticas involucradas por lo que se plantean los balances de energía con el objetivo de determinarlas.

Leyenda de los Balances de Energía

Ti: Temperatura de entrada al macerador °C.

$\lambda$ : Calor latente .

Tf: Temperatura a la salida del macerador °C.

Qc: Calor cedido **kJ** .

Qg: Calor ganado **kJ** .

Te: Temperatura de entrada a los tachos °C.

Ts: Temperatura a la salida de los tachos °C.

$\Delta T$ : Variación de temperatura °C.

Cp1: Capacidad calorífica a la entrada del macerador.

Cp2 : Capacidad calorífica a la entrada del tacho .

V<sub>1</sub>: Masa de vapor necesaria en macerador Kg.

V<sub>2</sub>: Masa de vapor necesaria en los tachos Kg.

Vtotal: Vapor total del proceso

M comb: masa de combustible

**Tabla 3.2. Balances de energía.**

Equipo	Datos	Ecuaciones	Resultados
<b>Macerador</b>	Ti:30 °C Tf: 71 °C Cp1: 3,2908 kJ/kg°C $\lambda$ : 2 051,6 kJ/kg Mm= 115 Kg	Qg+Qc=0 Qg=-Qc Qg=Mm* $\Delta T$ *Cp1 Qc=V1* $\lambda$ V1=Qc/ $\lambda$	Qg=15 516,12 kJ Qc=-15 516,12 kJ V1=7,56 kg
<b>Tanque Cocción</b>	Te:30 °C Ts: 105 °C MC = 108 Kg Cp2:3,2684 kJ/kg°C	Qg+Qc=0 Qg=-Qc Qg=MC* $\Delta T$ *Cp Qc=V* $\lambda$	Qg=25 920 kJ Qc=-25 920 kJ V2= 12,63 kg

		$V=Qc/\lambda$	
<b>Calderas</b>	P: 0,784 mPa $\eta: 0,8$ $\Delta H_{\text{vapor sat}}: 2768,1 \text{ kJ/kg}$ Pc: 43 064 kJ/kg	$V_{\text{total}} = V1 + V2$ $Qg + \eta * Qc = 0$ $Qc = -Qg/\eta$ $Qg = V_{\text{total}} * \Delta H_{\text{vapor}}$ $Qc = M_{\text{comb}} * Pc$	$V_{\text{total}} = 20,18 \text{ Kg}$ $Qg = 55 860,26 \text{ kJ}$ $Qc = -69 825,32 \text{ kJ}$ $M_{\text{comb}} = 1,62 \text{ kg}$

### 3.4 Dimensionamiento de los Equipos del Proceso.

El dimensionamiento de los equipos principales se realizó atendiendo a la propuesta de la instalación de una planta piloto de cerveza de sorgo. El diseño de los equipos y sistemas auxiliares se realizará utilizando como referencia el Rosabal, Ulrich, Pavlov, Mijeev, Kern, entre otros.

#### 3.4.1. Tanques de mezclado con chaqueta y agitación.

En las siguientes tablas se muestra el dimensionamiento del tanque, la chaqueta y el agitador de paleta de la maceración.

**Tabla 3.3. Diseño tanque de maceración.**

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Volumen total	$Qv = 0,1 \text{ m}^3/\text{día}$ $t = 1 \text{ día}$	$Vt = Vi + Vsd$ $Vi = Qv * t$ $Vsd = 0,2 * Vi$	$Vi = 0,1 \text{ m}^3$ $Vsd = 0,02 \text{ m}^3$ $Vt = 0,12 \text{ m}^3$	<b>(Rosabal and V., 1989)</b>
Diámetro	$Vt = 0,12 \text{ m}^3$	$D = \sqrt[3]{\frac{4 * Vt}{1.5 * \pi}}$	$D = 0,46 \text{ m}$	<b>(Rosabal and V., 1989)</b>
Altura	$D = 0,46 \text{ m}$	$h = 1,5 * D$	$h = 0,69 \text{ m}$	<b>(Rosabal and V., 1989)</b>

**Tabla 3.4. Diseño chaqueta de calentamiento.**

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Área de transferencia de calor	D = 0,46 m h = 0,69 m	$A = (\pi * d * h) + \left(\frac{\pi * d^2}{4}\right)$	A = 1.17 m <sup>2</sup>	(Kern, 1988)
Ud	Rd = 0,005 $hd = \frac{1}{Rd}$ hd = 200	$Ud = \left(\frac{Uc * hd}{Uc + hd}\right)$	$731.3 \left(\frac{J}{s * C * m^2}\right)$	(Kern, 1988)
Uc	h <sub>io</sub> = 1500 Btu/hpie <sup>2</sup> °F ho: 476,9	$Uc = \frac{ho * hio}{ho + hio}$	361,8	(Kern, 1988)

**Tabla 3.5. Diseño agitador de paleta.**

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Ref.
Largo del rodete(d)	D = 0,46 m	= 0,65 * D	0,3 m	Rosabal
Ancho del rodete		$\frac{d}{8}$	0,04 m	Rosabal
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador		0,25 * Ht	0,17 m	Rosabal
Arquímedes(Ar)	Dp = 0,002 m ρl = 1 000 kg/ m <sup>3</sup> ρs = 700 kg/ m <sup>3</sup> <b>μ: 2.45 Pa*s</b>	$Ar = \frac{Dp^3 * \rho l * (\rho l - \rho s)}{\mu l}$	9,79 * 10 <sup>6</sup>	Rosabal
Reynold Modificado (Re <sub>m</sub> )	C = 14.8 tabla 9.1 K = 0 tabla 9.1 d = 0.33 tabla 9.1 Dp = 0.002 m	$Re m = C * Ar * \left(\frac{Dp}{d}\right)^{0.5} * \left(\frac{D}{d}\right)^k$	2,89 * 10 <sup>5</sup>	Rosabal
Revoluciones del agitador(n)		$n = \frac{Re m * \mu}{\rho s^2 * D}$	6.1	Rosabal

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Ref.
Factor de potencia de agitación (Kn)	Re <sub>m</sub> Fig. 9.7		0.15	Rosabal
Consumo de potencia del Agitador(N)		$N = kn * \rho * n^3 * D^3$	420, 90 kWh	Rosabal

### 3.4.2. Filtro de marcos y placas

Al ser seleccionado un filtro de marcos y placas de acción continua por las características del mismo donde uno de los parámetros más importantes en el diseño y operación es el espesor del sedimento y el área del mismo.

**Tabla 3.6. Diseño filtro de placas y marcos.**

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencias
Masa de sólidos en la torta /unidad de volumen de líquido	%Sólido. Torta 0,38	$X_t = \frac{x}{1-x}$	0,61	Rosabal
Masa de sólidos /Masa de líquido (X <sub>s</sub> )	%Sólido 0,19	$X_s = \frac{x}{1-x}$	0,23	Rosabal
Masa de sólidos en la suspensión/unidad de volumen de líquido	ρ <sub>s</sub> =1 050Kg/m <sup>3</sup>	$C_s = X_s * \rho_s$	241,5 Kg/m <sup>3</sup>	Rosabal
Masa de sólidos en la torta/unidad de volumen filtrado(C)	ρ <sub>t</sub> = 948 Kg/m <sup>3</sup>	$C = \frac{C_s}{1 - \left( \frac{C_s}{X_t * \rho_t} \right)}$	416,38	Rosabal
Superficie de filtración (S)	hmarco: 0,05 m Vfiltrado: 0,115 m <sup>3</sup>	$S = \frac{(C * V)}{X_t * \rho_t * h}$	1,66 m <sup>2</sup>	Rosabal

### 3.4.3.Fermentador.

Este equipo es uno de los más importantes en el proceso pues en el ocurre la transformación del mosto lupulizado en cerveza.

**Tabla 3.7 Diseño Fermentador**

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultados	Referencia
<b>Volumen</b>	Q = 0.1 m <sup>3</sup> /d t=1 día	$V = \frac{Q}{t}$ Vreal=1.2 *V	V= 0,1 m <sup>3</sup> V real=0,12 m <sup>3</sup>	O'Levenspiel
<b>Altura</b>	$\frac{H}{D} = (1 - 3)$	$V = \frac{\pi D^2}{4} * H$ H=2*D	H=0,92 m D=0,46 m	O'Levenspiel

### 3.4.4. Recipientes de almacenamiento para el proceso.

Se necesitan cinco tanques para el almacenamiento de las diferentes corrientes. Las dimensiones de estos se muestran en las tablas mostradas a continuación.

**Tabla 3.8 Tanque de almacenamiento de materia prima.**

Parámetros	Valores	Unidades
<b>Volumen</b>	4,5	m <sup>3</sup>
<b>Diámetro</b>	2,5	m
<b>Altura</b>	6	m
<b>Material de construcción</b>	Acero inoxidable	
<b>Sustancias a manipular</b>	Granos malteados	

<b>Temp. de almacenamiento</b>	30	°C
<b>Presión de trabajo</b>	1	atm

**Tabla 3.9. Tanque de almacenamiento del azúcar.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>	<b>UM</b>
<b>Volumen</b>	4,5	m <sup>3</sup>
<b>Diámetro</b>	2,5	m
<b>Altura</b>	6	m
<b>Material de construcción</b>	acero inoxidable	
<b>Temp. de almacenamiento</b>	30	°C

**Tabla 3.10. Tanque de almacenamiento de agua.**

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>	<b>UM</b>
<b>Volumen</b>	1	m <sup>3</sup>
<b>Diámetro</b>	0,92	m
<b>Altura</b>	1,7	m
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono	
<b>Sustancias a manipular</b>	Agua	
<b>Temp. de almacenamiento</b>	30	°C
<b>Presión de trabajo</b>	1	Atm

### 3.4.5. Bombas.

Las bombas juegan un papel fundamental en todo proceso químico ya que son las encargadas de mover los fluidos líquidos de un equipo a otro dentro del proceso.

**Tabla 3.11. Bomba que impulsa el mosto lupulado al intercambiador de calor**

Parámetro	Datos	Ecuación	Result.
Carga	$\Delta Z = 3 \text{ m}$ $v = 1,5 \text{ m/s}$ $D = 0,019 \text{ m}$ $\mu: 0,0023$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\rho: 1053 \text{ Kg/m}^3$ $\Sigma K = 7,26$ <b>(ver Anexo 8)</b> $L = 20 \text{ m}$	$H = \Delta Z + \left(\frac{\Delta P}{\rho} * g\right) + \left(\frac{\alpha * \Delta V^2}{2} * g\right) + h_p$ $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ $h_p = \left(\frac{f * L}{D} + \Sigma K\right) * \left(\frac{V^2}{2 * g}\right)$ $\text{Re} = \frac{v * D * \rho}{\mu}$	$f = 0,037 \text{ Fig 3.9}$ $h_{pt} = 5,3 \text{ m}$ $\text{Re} = 12676$ $H = 8,3 \text{ m}$
Flujo(m <sup>3</sup> /s)	0.00003		
Potencia	$\eta = 85\%$	$N = \frac{\rho * g * H * Q}{1000\eta}$	$N = 3,02 \text{ kW}$

**Tabla 3.12 Bomba que impulsa el mosto lupulado enfriado al tanque de Fermentación.**

Parámetro	Datos	Ecuación	Result.
Carga	$\Delta Z = 9 \text{ m}$ $v = 1,5 \text{ m/s}$ $D = 0,019 \text{ m}$ $\mu: 0,0023$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\rho: 1053 \text{ Kg/m}^3$	$H = \Delta Z + \left(\frac{\Delta P}{\rho} * g\right) + \left(\frac{\alpha * \Delta V^2}{2} * g\right) + h_p$ $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ $h_p = \left(\frac{f * L}{D} + \Sigma K\right) * \left(\frac{V^2}{2 * g}\right)$	$f = 0,037 \text{ Fig 3.9}$ $h_{pt} = 6,36 \text{ m}$ $\text{Re} = 12676$ $H = 15,36 \text{ m}$

Parámetro	Datos	Ecuación	Result.
	$\Sigma K = 6,8$ <b>(ver Anexo 8)</b> $L = 25 \text{ m}$	$Re = \frac{v * D * \rho}{\mu}$	
Flujo(m <sup>3</sup> /s)	0.00003		
Potencia	$\eta = 85\%$	$N = \frac{\rho * g * H * Q}{1000\eta}$	N = 5,59kW

Tabla 3.13 Bomba que impulsa la cerveza al tanque de Maduración.

Parámetro	Datos	Ecuación	Result.
Carga	$\Delta Z = 2\text{m}$ $v = 1,5 \text{ m/s}$ $D = 0.019 \text{ m}$ $\mu: 0,0023$ $\rho: 1053 \text{ g/m}^3$ $\Sigma K = 5,76$ <b>(ver Anexo 8)</b> $L = 30$	$H = \Delta Z + \left( \frac{\Delta P}{\rho} * g \right) + \left( \frac{\alpha * \Delta V^2}{2} * g \right) + h_p$ $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ $h_p = \left( \frac{f * L}{D} + \Sigma K \right) * \left( \frac{v^2}{2 * g} \right)$ $Re = \frac{v * D * \rho}{\mu}$	$f = 0,039$ Fig3 .9 $h_{pt} = 7,41\text{m}$ $Re = 12676$ $H = 9,41 \text{ m}$
Flujo (m <sup>3</sup> /s)	$2,99 * 10^{-5}$		
Potencia	$\eta = 85\%$	$N = \frac{\rho * g * H * Q}{1000\eta}$	N = 3,43kW

### 3.5. Economía del proceso.

#### 3.5.1. Costo de inversión.

Costo de adquisición del equipamiento

$$Costo_{Actual} = Costo_{Original} \frac{Indice_{Actual}}{Indice_{Original}}$$

Índice actual.....567,3

Índice original.....356 año 1991(Peters, 1991)

**Tabla 3.14. Costo de adquisición del equipamiento.**

Equipos	No de Equipos	Costo original (\$)	Costo actual (\$)
Molino de Martillos	1	480	764,49
Condensador	1	850	1 353,79
Fermentador	1	3 750	5 972,61
Tanque Macerador	1	1 489	2 371,52
Tanque Cocción	1	1 500	2 389,04
Tanque Maduración	1	1 500	2 389,04
Elevadores	1	1 540	2 452,75
Filtro	3	2 059.52	3 280,19
Tanque Envasado	1	1 500	2 389,04
Tanque Almacenam.	3	1 500	2 389,04
agitador	1	1 000	1 592,69
Bombas	4	500	796,35
Válvulas	13	60	95,56
<b>Costo Total (\$).</b>			<b>28 236,15</b>

La estimación del costo total de inversión se realizó utilizando los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes a la tabla 17 del Peters, adaptándola a las características de la inversión.

CTI = Costo Fijo de Inversión (CFI) + Inversión de Trabajo (IT)

CTI = CFI + IT

IT = 15 % CTI

CFI = Costos directos+ C.indirectos + Derecho de contrato + Contingencia

**Tabla 3.15. Estimación del Costo Total de Inversión.**

<b>Estimación de los Costos Directos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Costo del equipamiento (E)		28 236,15
Instalación	39% E	11 012,09
Instrumentación	13% E	3 670,69
Instalaciones eléctricas	10% E	2 823,61
Tuberías	31% E	8 753,20
Facilidades de servicio	55% E	15 529,88
<b>CD</b>		<b>70 025,65</b>
<b>Estimación de los Costos Indirectos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Ingeniería y supervisión	32% E	9 035,56
<b>CI</b>		<b>9 035,56</b>
<b>CD + CI</b>		<b>79 061,22</b>
<b>Otros Componentes</b>	<b>%</b>	
Derecho de contrato	5% (CD + CI)	3 953,06
Contingencia	10% (CD + CI)	7 906,12
<b>Costo Fijo de Inversión (CFI)</b>		<b>90 920,403</b>
<b>Costo Total de Inversión(CTI)</b>		<b>106 965,18</b>

### 3.5.2 Costos Totales de producción.

Para la estimación del costo total de producción se utilizaron los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes que se encuentran en la tabla 27 del Peters.

$$CTP = \text{Costo de fabricación (CF)} + \text{Gastos Generales (GG)}$$

$$CTP = CF + GG$$

$$CF = \text{Costos directos (CD)} + \text{Cargos Fijos (Cf)} + \text{Costos Indirectos (CI)}$$

$$CF = CD + Cf + CI$$

GG = Distribución y venta (DV) + Admon (A) + Inves. y Des.(ID)

$$\text{Depreciación} = \frac{CFI - VR}{Vd}$$

VR: valor residual, asumimos VR=0

VD: vida útil igual a 15 años.

**Tabla 3.16. Estimación del Costo Total de Producción.**

<b>Estimación de los Costos Directos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Materia prima ( sorgo, azúcar,lúpulo,levadura, enzima)		1 200
Mano de obra	10 %CTP	1 675,54
Supervisión	15 % Mano de obra	83,77
Requerimientos	10 %CTP	1 675,54
Mantenimiento y reparación	2 %CFI	1 818,40
Suministro	0.5 % CFI	454,60
<b>CD = 3 473,01 + 0.215 CTP</b>		
<b>Estimación de Cargos Fijos</b>		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Depreciación		6 061,36
Impuestos	1 %CFI	909,20
Seguros	0.4 % CFI	363,68
<b>Cf =Depre + 0,014 CFI= 7 334,246</b>		
<b>Estimación de los Costos Indirectos</b>		
Costos indirectos	5% CTP	837,77
<b>CI = 0,05 CTP</b>		
<b>Gastos Generales</b>		
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	<b>Costo (\$)</b>
Administrativos	2 % CTP	335,11
Distribución y ventas	2 %CTP	335,11
Investigación y desarrollo	5 %CTP	837,77
<b>GG = 0,09 CTP</b>		

Como  $CTP = CF + GG$ , sustituyendo las ecuaciones obtenidas en las tablas anteriores tenemos que:

$$CTP = 10\,807,26 + 0,355 CTP$$

$$CTP = 16\,755,44 \text{ \$/año}$$

### 3.5.3 Cálculo de la Ganancia

$$Ganancia = \text{Precio de venta del producto} - \text{Costos totales de producción}$$

**Tabla 3.17 Determinación de la ganancia.**

Producto	Precio	Cantidad Anual (Kg/año)	Valor del Producto (\$/año)
Cerveza	1,35 (\$/L)	30 000	40 500
Afrecho	0,68 (\$/Kg)	6 900	4 692
Precio de venta de los productos finales (\$)			45 192
Ganancia (\$)			28 436,56

### 3.5.4 Indicadores dinámicos económicos.

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los más importantes indicadores económicos que se tuvo en cuenta, ya que es el valor que se obtiene cuando se termina la vida útil y es la forma de comprobar si la inversión que se propone es rentable.

$$ValorActualNeto = \sum_{k=1}^n \frac{Flujodecaja}{(1+i)^k} - InversiónTotal$$

$$VAN = \$75\,410,73$$

$$TIR = 24 \%$$

TRI: Tasa interna de recuperación de la inversión.

El tiempo de recuperación de la inversión será de aproximadamente 5,5 años.

### **3.6. Conclusiones parciales.**

1. Al realizar el dimensionamiento de la planta piloto de producción de cerveza a 100 L/día se obtuvo que el costo total de inversión es de \$ 106 965,18, el costo total de producción es de 16 755,44 \$/año para obtener una ganancia de 28 436,56 \$/año.
2. Los indicadores dinámicos muestran valores adecuados para una planta piloto como son el valor actual neto (VAN) que es de \$75 410,73, con una tasa de rendimiento interno (TIR) de 24 % y un período de recuperación de 5,5 años.

# *Conclusiones*

1. Para demostrar la factibilidad de la sustitución de la malta de cebada por la malta de sorgo, los valores óptimos en el proceso de malteado para la concentración de hidróxido de sodio (%), el tiempo de remojo y de germinación (h) deben ser 0.1, 12 y 72, respectivamente; pudiendo obtenerse un 98% de germinación, un 13.2% de pérdidas y un poder diastático de 147.2°L que fundamenta la calidad de la malta.
2. En la etapa de maceración utilizando una concentración de enzima de 0.5% se pueden alcanzar valores finales de 7.5°Brix y 54.13 g/L de ART, en contraste cuando se emplea una concentración menor (0.1%).
3. En la etapa de fermentación las variables más significativas fueron la concentración del inóculo y el tiempo de fermentación, obteniéndose los mejores valores en el experimento 1 siendo los mismos de 1 g/L y 4 días, respectivamente.
4. El análisis económico para una planta piloto de producción de cerveza con capacidad de 100 L/día, arrojó un costo total de inversión y de producción de \$106 965, 18 y 16 755, 44 \$/año, respectivamente con una ganancia de 28 436, 56 \$/año. Además se obtuvieron como indicadores dinámicos un valor actual neto (VAN) de \$75 410, 73, una tasa interna de rendimiento (TIR) de 24 % y un período de recuperación (PRD) de 5, 5 años.

## *Recomendaciones*

1. Continuar el estudio del malteado de sorgo con otras variedades.
2. Probar concentraciones menores de enzima u otra enzima sacarificante como la amiloglucosidasa en la etapa de maceración.
3. Realizar el estudio de inhibición enzimática en el proceso fermentativo empleando distintas variedades de sorgo como sustrato.

# *Bibliografía*

1. AASTRUP, STEN, BAUTISTA, N., JANSER, E. & DÖRREICH, K. Choice of enzyme solution should determine choice of raw materials and process. Presentation given at World Brewing Conference., 2004 San Diego, USA.
2. AGU, R. C. & PALMER, G. H. 1998. A reassessment of sorghum for lager-beer brewing. *Bioresour. Technol.*, 66, 253-261.
3. AGU, R. C. A. P., G. H. 1996. Effect of mashing procedures on some sorghum varieties germinated at different temperatures. *Process Biochemistry*, 32, 147-158.
4. AGUIRRE J, E. P. M., Chávez Villasana A. (2005) Evaluación de los patrones alimentarios y la nutrición en cuatro comunidades rurales.
5. ALEMÁN, L. 2001. Principales Enzimas Antioxidantes. *Licenciatura en Biología*.
6. ALEMÁN, L. 2007. *Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo*. UNIVERSIDAD CENRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.
7. BAIRGIAN, A. J. 2006. *Enzimas utilizadas en la industria alimenticia*, Argentina.
8. BATISTA, J. 2008. ARROZ NEGRO COMO ADJUNTO EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE CERVEZA.
9. BELLO, L. C., S. y Col (2006) Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de Plátano musa paradisíaca I. *Agrociencia* **36**, 002.
10. BOFFILL, Y. (2009). Incremento del valor agregado del sorgo mediante procesos biológicos industriales. Ingeniería Química. Santa Clara. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
11. CARRILLO, R. 2011. EFICIENCIA EN LA FERMENTACIÓN DE MOSTO PARA CERVEZA. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 21.
12. BRIZUELA, E. (1987) Aspectos Fundamentales del Diseño de Plantas Industriales. Tomo I. Editorial ISPJAE. La Habana.
13. BRIZUELA, E. (1987) Aspectos Fundamentales del Diseño de Plantas Industriales. Tomo II. Editorial ISPJAE. La Habana.
14. COUNCIL, G. (2008). Sorghum. U.S.Grains Council.
15. EGGERT, T. 2004. Enantioselective biocatalysis optimized by directed evolution. *Curr Opin Biotechnol*, 4.
16. FLORIO, E. D. 2005. *Elaboración de chicha de jora a nivel de planta piloto utilizando tecnología cervecera.*, Perú.
17. FRENCH, B. J. & MCRUER, G. R. 1990. Malt quality as affected by various steep aeration regimes. *Techn. Q. Master Brew. Assoc. Am.*, 27, 10-14.
18. GÓMEZ, L. (2008) Estudios demuestran que la malta posee propiedades de gran valor nutritivo. Grupo RPP. Perú.

19. GONZÁLEZ, M. E. M. (1990). Microbiología de Bebidas. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
20. GONZÁLEZ, G. M., M. . 2006. *Estudio de los factores que afectan la hidrólisis enzimática y el proceso fermentativo para la producción de alcohol a partir de papa (solanum tuberosum)*.
21. HERNÁNDEZ, R. 2007. Enzimas. *Universidad de los Andes-Mérida-Venezuela*.
22. HOUGH, J. S., BRIGGS, D.E., STEVENS, R., & YOUNG, T.W. 1982. *Malting and Brewing Science. New York: Chapman and Hall., I and II.*
23. HOUGH, J. (1990). Biotecnología de la cerveza y de la malta. Editorial Acirbia Zaragoza.
24. KASATKIN, A. G. (1985). Operaciones Básicas y Aparatos en la Tecnología Química. Tomo II. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
25. KERN, D. 1988. "*Procesos de Transferencia de Calor.*".
26. KRAMER (1969). Producción de sorgo y su utilización.
27. L, A. (1987). Empleo del sorgo como adjunto en cervecería. Farmacia- Alimentos. Cuba, Universidad de La Habana.
28. LYUMUGABE, F., GROS, J., NZUNGIZE, J., BAJYANA, E. & THONART, P. 2012. Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 16(4), 509-530.
29. LYUMUGABE, F., GROS, J. , NZUNGIZE, J. ,BAJYANA, E. AND THONART, P. 2012. Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 16, 509-530.
30. Manual de métodos de ensayos. Ministerio de la industria alimenticia (1988) Empresa de Cervecerías Habana.
31. MaCABE. W. and Smith, J. (1990). Operaciones básicas de la Ingeniería Química. Vol. II. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
32. MATZ, (1991). The chemistry and technology of cereals as food and feed.
33. MOLL, M. 1991. Bières. *Paris : Lavoisier Tec & Doc.*
34. NELSON, M. 2005. The Barbarian's Beverage: A History of Beer in Ancient Europe. . *Routledge publication*, 1.
35. NOUT, M. J. R. 1987. Composition of foods: African traditional beers. . *Food Lab. Newsl.*, 8, 18-20.
36. OGBEIDE, S. O. 2011. Investigating the Use of Sorghum as Malted Barley Adjunct in Brewing Process. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2, 521-524.
37. ORTEGA, M. T. and S. O. Serna (2003). Producción de Cervezas Tipo Lager a partir de Malta y Adjuntos Cerveceros de Sorgo. *Revista de la Facultad de Salud Pública y Nutrición.*
38. OZUNA, Y. 2008. *Obtención de maltina a partir de sorgo malteado para niños celíacos.*, Martha Abreu de Las Villas.

39. PARGAS, M. (1994). Estudios de Germinación del sorgo para producir malta. Ingeniería Química. Santa Clara. Cuba. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
40. PAVLOV, K. F. "Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química". Tomo I. Editorial MIR. Moscú. 1981.
41. PETERS, M. 1991. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers.*, United States.
42. PERRY, R. H. (1999). Chemical Engineers Handbook. M. G.-H. Handbook.
43. PÉREZ, C. Evaluación Sensorial de Cerveza. 2008.
44. PORTUONDO, F. (1985). Economía de empresas industriales. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
45. PORTUONDO, F. (1985). Economía de empresas industriales. Tomo II. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
46. PRESCOT, S. 1952. *Microbiología Industrial.*, Madrid.
47. RODÍGUEZ, L. 2005. *Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo.* UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.
48. R. Nielsen and B. Johnson (2008). Grain Sorghum Considerations for Late Planting in Southern Indiana.
49. ROSABAL, J. and M. Valle (1998). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Cuba, ENPES.
50. SAUCEDO, O. (2008). Utilización del Sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench) en la alimentación de los niños celíacos.
51. SAUCEDO, O. (2010). Recetario de productos elaborados con harinas de sorgo. Biblioteca ACTAF.
52. SENDRA, J. M., J.V.CARBONELL, 1999. Evaluación de las propiedades nutritivas, funcionales y sanitarias de la cerveza, en comparación con otras bebidas. *Instituto de Agroquímica y Tecnología de los Alimentos - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IATA/CSIC).*
53. SERNA, S. O., URÍAS, D. ,DEL POZO, D. Y HERNÁNDEZ, C. 2005. Efecto de la adición de amiloglicosidasa en las propiedades de cervezas lager producidas a partir de sorgo. *Revista digital de posgrado, investigación y extensión del Campus Monterrey, 70.*
54. ULRICH, G. 1985. "*Diseño y Ecocomía de los Procesos de Ingeniería Química.*".
55. VICENTE, F. 2013. BEBIDA FERMENTADA A BASE DE SORGO *Desarrollo De Nuevos Productos*
- WAGNER, M. (2005) Cervezas sin malta de cebada. Código Alimentario Argentino. Vol. **1080**.
- WIKIPEDIA Insumos cerveceros
56. WIKIPEDIA Cervezas.

*Anexos*

### **Anexo 1: Determinación del poder diastático.**

Preparación de la infusión de malta: pesar 25,5 g de malta y transferir a un frasco donde se le adiciona 500 ml de solución de cloruro de sodio al 0,5 %, esta infusión ponerla a incubar a 20 grados por 2,5 h agitar por rotación en intervalos de 20 min luego de este tiempo filtrar la solución resultante.

Diastasis: tomar 20 ml del filtrado y transferir a un frasco volumétrico de 100 ml enrasar el frasco con solución de cloruro de sodio al 0,5 %. Con una pipeta transferir 10 ml del extracto diluido a un frasco volumétrico de 250 ml. Adicionar 200 ml de solución de almidón y colocar por 30 min a 20 grados. Lugo de pasado el tiempo adicionar 20 ml de hidróxido de sodio a 0,5 N y mezclar por inversión el contenido del frasco. Completar el volumen con agua destilada.

Preparación de blancos

Añadir 20 ml de hidróxido de sodio (0,5 N) a 10 ml de extracto de malta diluida, luego adicionar 200ml de la solución de la solución de almidón y mezclar.

Valoración de las soluciones y el blanco.

Con una pipeta de adicionar 5ml de la solución en un Erlenmeyer de 125ml. Adicionar 10ml de la solución de ferrocianuro y mezclar, poner a hervir en agua por 20min. Luego de transcurrido el tiempo enfriar y luego añadir 25ml de acido acético y un mililitro de yoduro de potasio. Mezclar y valorar con una solución de tiosulfato a 0.05N y ver cómo cambia de color desde azul hasta blanco.

## **Anexo 2: Determinación de ART.**

### *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 azúcares reductores presentes en la muestra.

### *Procedimiento*

1. Se añade a un tubo de ensayo 1 mL del sobrenadante centrifugado y se añaden 2 mL de la solución de reactivo 3,5 – Dinitrosalicílico mezclando bien.
2. Se colocan los tubos de ensayo en baño de agua hirviendo durante 5 minutos, extrayéndose posteriormente y dejándose enfriar hasta temperatura ambiente.
3. Se enrasan todos los tubos de ensayo hasta 10 mL con agua destilada y se lee en el espectrofotocolorímetro a 240 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria. **(Herrera A. 1989).**

### **Anexo 3: 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 °Bx de la muestra, expresado en %.

#### **Anexo 4: Determinación del Grado alcohólico.**

##### Método Picnométrico

Se toman 100 ml de fermento, más 50 ml de agua destilada y ambos son adicionados a un balón, se calienta y se hace que la mezcla ebulle, a través de un condensador, se recoge un volumen de 50 ml de destilado en un matraz de 100 ml y se enrasa con agua destilada.

Con este producto se procede a realizar los análisis de medición del grado alcohólico que consiste en realizar un conjunto de pesadas al picnómetro, vacío, con agua destilada y hervida, y con el destilado. Entonces a través de la fórmula se obtiene la gravedad específica y con ese valor se va a la tabla "Determinación del alcohol en volumen y en peso por ciento según K. 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.

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

Donde:

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

## **Anexo 5: Determinación de la acidez.**

### Determinación de la acidez total en las maltinas (Método por titulación con fenolftaleína)

#### Objetivo y alcance

Este método se establece para determinar la acidez total

#### Fundamento del método

El método se basa en la neutralización de las funciones ácidas titulables del producto, mediante la adición de un hidróxido alcalina, en presencia de un indicador de neutralización, cuyo cambio de color evidencia el punto final de la reacción.

#### Equipos

Vaso o erlenmeyer de vidrio, de 500 cm<sup>3</sup>.

Pipeta, de 25 cm<sup>3</sup> ± 0,1 cm<sup>3</sup>, tipo flujo rápido.

Bureta.

#### Reactivos

Solución de fenolftaleína, 0,5% en 95% de alcohol etílico.

Solución estándar de hidróxido de sodio, 0,1 N.

#### Reactivos químicos

Solución de hidróxido de sodio, 0,1 N.

Fenolftaleína, solución al 0,5% en etanol.

#### Preparación de la muestra de ensayo

#### Procedimiento

#### Determinación

Se pone a hervir 250 ml de agua destilada en un frasco cónico de 500 ml y se mantiene hirviendo por dos minutos más, después de comenzar la ebullición. Después se adiciona mediante pipeta 1 ml si es oscura.

Se continúa el calentamiento por un minuto, regulando el calor de modo que la ebullición se produzca en los 30 segundos finales.

Se retira del calor, se agita por 5 segundos y se enfría a temperatura ambiente. Se adicionan 0,5 ml de la solución indicadora de fenolftaleína y se valora con la solución de hidróxido de sodio hasta la aparición del color rosado permanente.

#### Expresión de los resultados

#### Método para los cálculos

La acidez total se calcula por la fórmula siguiente:

$$At = \frac{((V_1 - V_0) \cdot N)}{V} \times \text{gravedad específica de la cerveza}] \times 0,09$$

Donde

At acidez total (ml NaOH 0,1 N/100 ml de muestra)

V<sub>1</sub>- volumen de solución de hidróxido de sodio consumidos en la valoración de la muestra (ml)

V<sub>0</sub> - volumen de solución de hidróxido de sodio consumido en la valoración del blanco (ml)

N- normalidad de la solución de hidróxido de sodio

V - volumen de la muestra utilizada en el ensayo (ml)

0,09 = cm<sup>3</sup> equivalentes de una solución de ácido láctico 1,0 N

## **Anexo 6: Determinación del Ph.**

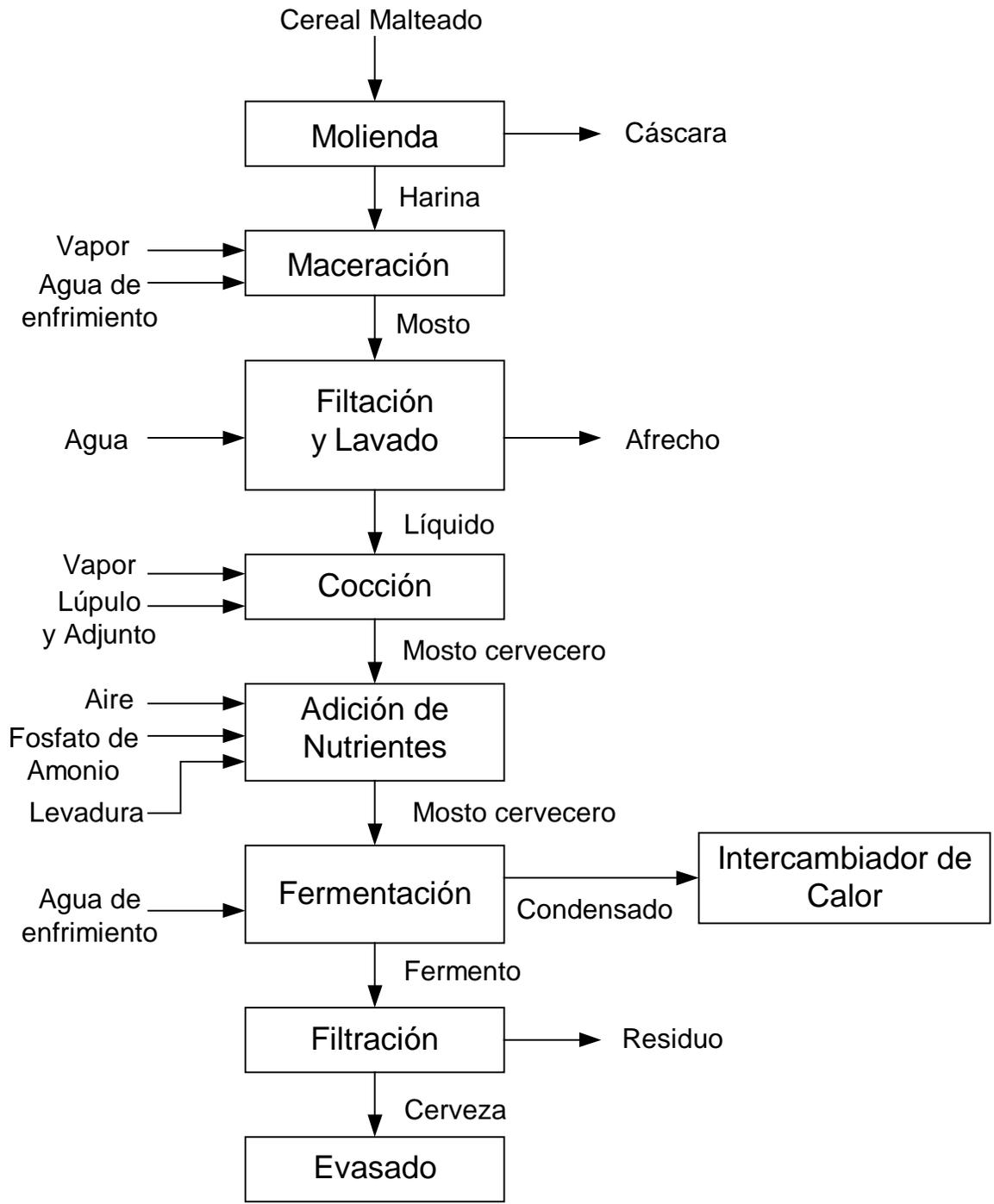
### Fundamento del método

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 7: Diagrama de bloques del proceso.**



**Anexo 8: Cálculo de los Coeficientes de Resistencias Locales (K).**

Accesorios	K		K		K	
	Cantidad	Total	Cantidad	Total	Cantidad	Total
Entrada en un tubo desde un depósito de gran volumen	1	0.5	1	0.5	1	0.5
Codos de 90° estándar	6	4.5	6	4.5	5	3.75
Válvulas compuerta abierta	2	0.34	5	0.85	3	0.51
Salida de un tubo a un gran depósito	1	1	1	1	1	1
<b><math>\Sigma K</math></b>		<b>6.34</b>		<b>6.85</b>		<b>5.76</b>

## **Anexo 9: Determinación de Proteínas Totales .**

### Determinación de Proteínas Totales

#### Objetivo

Esta norma tiene como objeto establecer un método para la determinación de las proteínas totales en las maltas.

#### Aparato

Balones Kjeldahl

Balanza analítica

Pesa filtro

Molino de laboratorio

#### Reactivos

Ácido sulfúrico concentrado

Hidróxido de sodio al 20 %

Granallas de zinc

Indicador rojo de metilo

Catalizador de selenio

Solución de ácido sulfúrico 0.1 N

Solución de hidróxido de sodio 0.1 N

#### Determinación

Preparación de la muestra de ensayo

Se cogen alrededor de 10g de malta y se hacen pasar por el molino de laboratorio.

Se pesan de 1g a 4g de la malta molida. Se pesan exactamente dos muestras y se colocan cada una en un balón Kjeldahl de 700 a 800 ml de capacidad. Los cuellos de los frascos deben estar secos y al echar la malta se debe tratar de que no se adhiera ninguna partícula en el cuello del balón. Se añade una pequeña cantidad del catalizador y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado.

Los balones se someten al calor, calentando directamente en el aparato especial para digestiones. En las bases de los balones debe colocarse un pequeño embudo para evitar ciertas pérdidas de  $\text{SO}_4 (\text{NH}_4)_2$  durante la digestión.

La gestión dura alrededor de 1.5 horas. Se deja enfriar por espacio de 15 a 20 min.

Se adicionan 200 ml de agua destilada y se neutraliza con solución de NaOH al 20%. Para neutralizar se utiliza papel de tornasol. Después de neutralizar se añaden unas granallas de zinc para evitar los saltos durante la ebullición, por último se añade a 100 ml de solución NaOH. Inmediatamente los balones se colocan en el aparato de destilación recibiendo el destilado en un frasco conteniendo de 20 a 25 ml de solución de  $\text{SO}_4\text{H}_2\text{N}/10$ , tres gotas de rojo de metilo y agua suficiente para poder introducir el final del tubo del destilador. Se destila durante 20 min, pasado este tiempo se da por terminada la destilación. Se valora con solución de NaOH 0,1 N hasta el cambio amarillo del indicador.

#### Cálculo y expresión de los resultados:

Para el cálculo

$$\text{Base húmeda} = \frac{\text{ml de } \text{SO}_4\text{H}_2 - \text{ml NaOH} * 0,0014 * 6.25 * 100}{Pm}$$

$$\text{Base seca} = B. Húmeda * \left( \frac{100}{100 - \% \text{Hum}} \right)$$

Los resultados se expresaran en %.