

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO: " Tecnología para la producción de cerveza a partir de malta de sorgo para enfermos celíacos".

AUTOR: Mario Sergio Pino Hurtado
TUTORA: Dra. Irenia Gallardo Aguilar
2016-2017



PENSAMIENTO

PENSAMIENTO

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad
y la energía atómica: LA VOLUNTAD HUMANA”*

ALBERT EINSTEIN

DEDICATORIA

DEDICATORIA

A mis padres por toda la entrega, la dedicación y el apoyo incondicional brindado para poder alcanzar la meta de encontrarme hoy aquí

A mi querida hermana Lisett y mi sobrino Aaroncito

A la memoria de mi abuelo paterno Sergio "Tuti" que sé que dondequiera que esté me da su bendición

A mi abuela Ysabel por su dulzura

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A mi madre que tanto amo, doy gracias a la vida y a Dios por enviarme un ángel protector con el nombre de María Lina

A mi papá por ayudarme y por la educación recibida y ser siempre un ejemplo a seguir en la vida

A mi hermana Lisett y mi sobrino Aarón que ambos son la luz de mis ojos

A mi tutora Irenia Gallardo Aguilar por su paciencia y entrega para conmigo y por su bella sonrisa presente a cada momento

A mi abuela Ysabel por quererme tanto y a toda mi familia por estar siempre ahí cuando los he necesitado

A mi tía Doris “Nana” por ser tan dulce y cariñosa conmigo

A todas mis queridas amistades; a Sandy, Iliana, Yanet, Loraine, Leyanis, Clara, Yareny, Aurora, Carlos Alberto, Alex Jarián, Alexander y a todos los demás gracias por estar presentes

A los técnicos de laboratorios Noel, Cristina, Dayán y Marilyn por la ayuda brindada y especialmente a Margarita por haber sido de gran apoyo en el desarrollo de este proyecto

A todos los profesores de la facultad que contribuyeron a mi formación académica y que de una forma u otra ayudaron en la realización de esta tesis, en especial a los profe Yenisleidy, Mariano y Luis Gómez

A mis compañeros de aula por todo el tiempo que transitamos juntos y las vicisitudes vencidas durante estos cinco años, en especial a Yedier, Yamirka y las dos Lisett

A todos ¡Muchas Gracias!

RESUMEN

RESUMEN:

En el presente trabajo se desarrolló una nueva tecnología para la producción de cerveza a escala de laboratorio perfeccionando el proceso de malteado del sorgo UDG-110, con el objetivo fundamental de estudiar la influencia del uso de esta malta, de enzimas exógenas y diferentes adjuntos cerveceros. Primeramente se realizó la revisión bibliográfica de los dos procesos en estudio, el malteado y la producción de cerveza, las variables y parámetros que influyen en los mismos. Para ello, con el uso del Software Statgraphics se realizaron 2 diseños de experimentos, el primero de Superficie Respuesta, en el Malteado, efectuando una réplica dando como resultado 20 corridas, se estudió la influencia del Tiempo de Remojo (12 - 48h) y de la concentración de NaOH (0,03 - 0,1 %). En la producción de cerveza se empleó un diseño Multinivel 2^k , siendo $k = 2$, replicando dos de los experimentos, dando como resultado 6 corridas; donde se estudió la concentración de enzima (0,35 – 0,7 % p/p) y el tipo de adjunto a emplear (Sorgo o Arroz), se determinaron las variables respuestas, entre las cuales se encuentran el Porcentaje de Germinación, las Pérdidas en el Malteado, el Contenido de Extracto para el malteado y para el caso de la cerveza los ART, el Grado Alcohólico y el Rendimiento de la misma; además se mostró una caracterización de los parámetros fundamentales medidos a la bebida final. Por último se realizó el diseño de una planta piloto para la producción de esta bebida para una capacidad de **100 HL/día**, partiendo de los datos obtenidos de la realización de los Balances de Masa y Energía del proceso. El análisis económico de la misma arrojó un Costo Total de Producción de **810 500,11 \$/año**, una Ganancia igual a **\$ 3 353 626,8** por la venta del producto y subproductos, obteniendo un Valor Actual Neto de **\$ 14 760 706,1** y un Período de Recuperación de la Inversión de aproximadamente **1 año**.

ABSTRACT

ABSTRACT:

In the present work, a new technology was developed for the production of beer on a laboratory scale, perfecting the malting process of the UDG-110 sorghum, with the fundamental objective of studying the influence of the use of this malt, exogenous enzymes and different beer adjuncts. First, the bibliographic review of the two processes under study, the malting and the production of beer, the variables and parameters that influence them was realized. To do this, using the Statgraphics Software, two experiments were carried out, the first of Surface Response, in the Malting, making a replica resulting in 20 runs, the influence of the Soak Time (12 - 48h) and of the NaOH concentration (0.03-0.1%) was studied. In beer production a multilevel 2^k design was used, where $k = 2$, replicating two of the experiments, resulting in 6 runs; Where the concentration of enzyme (0,35 - 0,7% w / w) and the type of adjunct to be used (Sorghum or Rice) were studied, the response variables were determined, among which are the Germination Percentage, The Malting Losses, the Extract Content for the malt and for the case of the beer the ART, the Alcoholic Degree and the Performance of the same; In addition a characterization of the fundamental parameters measured to the final beverage was shown. Finally, the design of a pilot plant for the production of this beverage was carried out for a capacity of 100 HL / day, based on the data obtained from the realization of the mass and energy balance of the process. The economic analysis showed a Total Cost of Production of **810 500,11 \$ / year**, a Gain equal to **\$ 3 353 626,8** from the sale of the product and by-products, obtaining a Net Present Value of **\$ 14 760 706,1** and an Investment Recovery Period of approximately **1 year**.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN:	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
1.1- Enfermedad Celíaca o Celiaquía	3
1.2- Bebidas para Celíacos.....	4
1.3- Sorgo.....	5
1.4- Morfología.....	5
1.5- Beneficios del Sorgo.....	6
1.6- Variedades de Sorgo Cultivadas en Cuba	6
1.7- Origen y Evolución de las Fermentaciones de Cereales	7
1.8- Características de la Cerveza	7
1.9- Composición de la Cerveza	8
1.10- Calidad de la Cerveza.....	10
1.11- Ingredientes de la Cerveza	11
1.12- Cervezas a partir de sorgo.....	16
1.13- Proceso de producción de cerveza	17
1.13.1- Malteado.....	17
1.13.2- Maceración de la Malta	19
1.13.3- Filtración Previa	22
1.13.4- Hervidura del Mosto.....	22
1.13.5- Fermentación.....	22
1.13.6- Filtración y Reposo	26
CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
2.1- Experimento 1: Estudio del Malteado de los Granos de Sorgo UDG-110.....	27
2.2- Variables Respuesta.....	28
2.3- Análisis Estadístico de la Etapa de Malteado.....	32
2.4- Experimento 2: Estudio de Producción de Cerveza a Escala de Laboratorio.....	34
2.5- Variables Respuesta.....	34
2.6- Estudio de la etapa de Maceración	35
2.7- Extracción del Líquido y Lavado	40
2.8- Hervidura del Mosto.....	40
2.9- Adición de los Nutrientes	40
2.10- Fermentación.....	41
2.11- Filtración	43

2.12-	Análisis Estadístico de la Etapa de Maceración	43
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA.....		27
3.1-	Proceso de Malteado de los Granos de Sorgo.....	46
3.2-	Balance de Masa en el Malteado	46
3.3-	Selección y Diseño del Equipamiento para el Proceso de Malteado	48
3.4-	Proceso de Producción de Cerveza.....	49
3.5-	Balances de Materiales en la Producción de Cerveza	49
3.6-	Selección y Diseño del Equipamiento para la Etapa de Producción de Cerveza.....	53
3.7-	Análisis Económico del Proceso	55
3.7.1-	Cálculo del Costo de Adquisición del Equipamiento.....	55
3.7.2-	Cálculo del Costo Total de Inversión.....	56
3.7.3-	Cálculo del Costo Total de Producción	57
3.7.4-	Cálculo de la Ganancia.....	60
3.7.5-	Indicadores Dinámicos de Factibilidad.....	61
CONCLUSIONES		63
RECOMENDACIONES.....		63
BIBLOGRAFÍA.....		65
ANEXOS.....		68

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN:

Se denomina **CERVEZA** a la bebida alcohólica, no destilada y de sabor amargo, que se fabrica con granos de cebada u otros cereales cuyo almidón es fermentado en agua con levadura, básicamente *Saccharomyces cerevisiae*, y frecuentemente aromatizado con lúpulo, entre otras plantas. De ella se conocen múltiples variantes con una amplia gama de matices debidos a las diferentes formas de elaboración y a los ingredientes utilizados.

La elaboración de la cerveza se puede hacer con cualquier cereal, el cual debe ser preparado para que sus azúcares sean fermentables. En algunos casos una simple cocción es suficiente (como en el caso del maíz) y en otros es preciso «maltear» el cereal. En la elaboración de la cerveza se utilizan numerosos cereales en su estado crudo o malteado, siendo la cebada el mejor para ser malteado y el más utilizado en la cervecería occidental.

La posibilidad de reemplazar la cebada por otro cereal que sea apto para la producción de esta bebida, por ejemplo el sorgo, sería la solución ideal debido a que constituye una alternativa para la dieta de los enfermos celíacos, ya que no contiene gluten.

El cultivo de esta gramínea se inició en nuestro país en 1989 y la obtención de variedades para su uso en la práctica social, solo era encaminada a la alimentación animal. La resistencia del sorgo a la sequía, su adaptabilidad a las altas temperaturas y a la salinidad y, sus buenos rendimientos agrícolas, hacen que todavía hoy se atesore como forraje para el ganado vacuno y abono verde capaz de mejorar los suelos. Durante casi 30 años el doctor en Ciencias Agrícolas Orlando Saucedo, especialista en Sanidad Vegetal y Semillas de Granos del Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP) ha estudiado las características del sorgo y sus propiedades para la alimentación animal y humana. Todo esto ha demostrado que su cultivo es económicamente rentable, basado en su bajo costo de producción.

En nuestra Universidad Central Marta Abreu de Las Villas se ha trabajado por varios años en la elaboración de productos industriales a partir del malteado del sorgo UDG-110, entre estos están la producción de Etanol, Maltina y Cerveza.

Dando continuidad a estos estudios en el presente trabajo se propone una tecnología para la elaboración de cerveza con la calidad requerida para la población celíaca, empleando dos tipos de adjuntos. Para esto se plantea el siguiente problema científico con su hipótesis:

Problema científico:

Los trabajos realizados para la producción de cerveza, empleando malta de sorgo, han sido escasos y mayormente combinados con malta de cebada; por lo que no se ha desarrollado una tecnología que emplee solamente malta de sorgo para enfermos celíacos y el mejor adjunto para sus producciones.

Hipótesis:

Es posible desarrollar una tecnología para la producción de cerveza a partir de malta de sorgo que emplee enzimas exógenas y diferentes adjuntos, alcanzando así, resultados de calidad similares a los de cervezas producidas tradicionalmente a partir de malta de cebada.

Objetivo general:

Desarrollar una tecnología para la producción de cerveza a partir de malta de sorgo empleando enzimas exógenas y diferentes adjuntos.

Objetivos específicos:

1. Estudiar el malteado de sorgo UDG-110, con la adición de un agente químico, en un rango amplio de concentraciones y variando el tiempo de remojo, para el perfeccionamiento de la etapa de malteado.
2. Obtener la malta de sorgo, empleando los valores óptimos del estudio realizado, para la elaboración de cerveza.
3. Estudiar diferentes variables en la etapa de maceración con el empleo de enzimas exógenas y diferentes adjuntos.
4. Analizar dichas variables en la etapa de fermentación y en la calidad de la cerveza
5. Dimensionar los equipos fundamentales del proceso, partiendo de la mejor variante obtenida a escala de laboratorio, para producciones de planta piloto.
6. Efectuar un análisis de factibilidad económica a partir de la selección de una tecnología para la obtención de cerveza carente de gluten.

***CAPÍTULO 1: REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA***

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1- Enfermedad Celíaca o Celiaquía

La Celiaquía es una enfermedad autoinmune que se caracteriza por una inflamación crónica de la parte próxima del intestino delgado, causada por la exposición a la gliadina, una proteína vegetal de algunos cereales en la dieta.

En condiciones normales, todo alimento ingerido pasa por un proceso de digestión que lo degrada en componentes más pequeños para que éstos puedan ser luego absorbidos. Esta absorción de alimentos tiene lugar en el intestino delgado y para que esto sea posible es necesaria la existencia de vellosidades que podríamos comparar con raíces microscópicas que cuelgan en el interior del intestino. Su papel en la absorción se podría comparar a la que realizan las raíces de los árboles, siendo la longitud de las vellosidades (como de las raíces) muy importantes para que dicha absorción se produzca en mayor o menor grado. Cuando la longitud de la vellosidad se acorta, la absorción se reduce y la digestión y la nutrición de la persona queda comprometida. Esto es precisamente lo que sucede con los celíacos, que sufren de un acortamiento de estas vellosidades, provocado por una intolerancia al gluten.

Es un trastorno que aparece en personas genéticamente predispuestas, de todas las edades, y desde la infancia. Los síntomas incluyen diarrea crónica, retraso del crecimiento y/o del desarrollo infantil, disnea, erupciones en la piel, pérdida de peso, cambios en el carácter, vómitos y vientre hinchado. Aunque estos síntomas pueden estar ausentes y aparecen de vez en cuando, también pueden aparecer en casi todos los órganos y sistemas del cuerpo. Se estima que la enfermedad afecta a un 1% de la población de etnias indo-europeas, aunque se piensa que es una enfermedad considerablemente sub-diagnosticada. Como resultado de exámenes precoces, se está observando un número creciente de diagnosticados asintomáticos. El único tratamiento eficaz es el cambio a una dieta libre de gluten durante toda la vida, que permita la regeneración de las vellosidades intestinales.

Conocida en otros tiempos como la «enfermedad irlandesa», la celiaquía ha pasado por distintas fases a lo largo de la historia hasta hoy. La primeras descripciones sobre celíacos fueron realizadas en la segunda mitad del siglo I d. C. por Areteo de Capadocia, médico helenístico - romano, coetáneo de Galeno. En su descripción, Areteo hacía referencia a sujetos desnutridos, con deposiciones abundantes y malolientes, que empeoraban cuando ingerían

trigo. La palabra griega que empleó Areteo para identificar a los pacientes fue *koiliakós*, que originariamente significa 'los que sufren del intestino', y de la cual deriva la palabra 'celíaco'.

Esta dolencia constituye una enteropatía crónica que generalmente aparece en las personas cuando comienzan a consumir gluten en los primeros años de vida; con un fuerte componente autoinmune, tiene predisposición genética aunque no se hereda. La respuesta inmunitaria anormal causada por el gluten puede dar lugar a la producción de diferentes autoanticuerpos, que en ocasiones atacan a diversos órganos y sistemas.

La celiaquía posee dos formas de presentación clínica: la clásica, que aparece en los niños durante el primer año de vida, con diarreas crónicas de aspecto untuoso que constituyen algunos de los principales síntomas. Los pequeños que la padecen están cotidianamente desnutridos, tienen carácter huraño, pueden presentar pérdida del esmalte dentario, manifestaciones carenciales en la piel y abdomen distendido. La otra forma, no clásica o atípica, se diagnostica frecuentemente a partir de la adolescencia y la juventud y casi siempre debuta con amenorreas (ausencia de menstruación), abortos habituales o infertilidad; osteoporosis en edad juvenil de causa no precisada y anemia, entre otros síntomas.

De igual manera, el padecimiento se asocia a disímiles enfermedades entre las que figuran las tiroiditis, diversas patologías renales, epilepsias con calcificaciones intracraneales, el síndrome de Down y la diabetes mellitus tipo I. **(Bohemia Marzo 2017)**

1.2- Bebidas para Celíacos

Ser celíaco no significa ser abstemio, aunque es cierto que al eliminar de tu dieta el gluten, lo primero que pensamos es en eliminar la mayoría de bebidas espirituosas. Como en el resto de los casos, basta con ver la composición de la bebida para saber si lleva ingredientes no aptos o por el contrario, es 100% aconsejable. Cabe destacar que la mayoría de los procesos de destilación actuales eliminan el gluten, tal es el caso del whisky escocés, el bourbon, el ron, vodka, ginebra y tequila, entre otros.

El vodka, tiene un proceso de destilación que elimina el gluten, pero como se produce con distintos granos, hay que revisar sus ingredientes siempre salvo cuando se producen claramente de la uva. En el caso del whisky, pocos son los que dan problemas con el gluten. Pero hemos de tener en cuenta que la cebada y el trigo a veces forman parte de la composición.

La cerveza al ser producida en base a cereales es una de las bebidas de mayor riesgo, por su composición. Si se va a consumir se aconseja que sean explícitamente “Libres de Gluten” y verificar su composición con mucha atención. Por ejemplo, el vino está completamente libre de gluten, ya que solo se utiliza uva en su elaboración. (<http://www.ellahoy.es/salud/articulo/8-bebidas-alcoholicas-para-celiacos-sin-gluten/256249/>).

TABLA 1.1 BEBIDAS QUE NO CONTIENEN GLUTEN

BEBIDAS QUE NO CONTIENEN GLUTEN	
Anises	Tónicas
Aguardiente de Frutas	Refrescos de cola
Brandy	Ron de caña
Café	Sodas
Coñac	Vinos espumosos (cavas y champagnes)
Cerveza sin Gluten	Vinos
Ginebra	Vodka
Infusiones de hierbas	Whisky

1.3- Sorgo

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

1.4- Morfología

El sorgo tiene hábito y fisiología vegetal (metabolismo de las plantas C4) similares a los del maíz. El género Sorghum presenta un sistema radical profuso que le brinda una estructura de soporte muy desarrollada, lo que permite acumular gran cantidad de reservas; además le confiere una mayor capacidad de penetración y mejor persistencia en climas secos, donde la escasez de agua se mantiene por períodos prolongados; su tallo es grueso, con espigas que nacen por pares, y la altura puede oscilar de 1 a 3 m. Tiene inflorescencias en panojas; cada

panícula puede contener de 400 a 8 000 granos, con un valor energético aproximado de 1,08 Mcal/kg; comparado con el maíz es un poco más rico en proteínas, pero más pobre en materia grasa deficitaria en lisina. El color del grano varía desde un blanco translúcido hasta un pardo rojizo muy oscuro, con gradaciones de rosado, rojo, amarillo, pardo y colores intermedios; sus semillas son esféricas y oblongas, de aproximadamente 3 mm de tamaño.

Tolera mejor la sequía y el exceso de humedad que la mayoría de los cereales y crece bien bajo una amplia gama de condiciones en el suelo. Responde favorablemente a la irrigación, lográndose excelentes resultados bajo riego. **(Alemán 2007).**

1.5- Beneficios del Sorgo

Científicos del ARS (*Asociación de Investigación de los Estados Unidos*) y en Córdoba, Argentina, han realizado investigaciones sobre el cultivo del sorgo y su incorporación en alimentos humanos, como cereales de desayuno, pastas, etc., demostrándose que el mismo ofrece la ventaja de no contener gluten por lo que no presenta problemas para personas con la intolerancia celíaca, y algunas variedades contienen fenoles y taninos, que son sustancias que previenen la formación de radicales libres y la aparición del cáncer, así como su elevado contenido de fibras. Según los estudios realizados, el sorgo podría ser panificable, a pesar de su ausencia de gluten, y también usarse en galletas apta para celíacos.

Se utiliza mucho como pienso para el consumo de los animales. Otras características que presenta son: es astringente y antidiarreico. Se consume en forma de harina y puede combinarse con la de maíz y la de trigo para la confección de platos de todo tipo. Los diabéticos pueden consumirlo también si lo desean. El sorgo cada vez es más fácil de encontrar y puede ser un interesante recurso para muchas personas con problemas de diabetes o celíacos. El sabor puede chocar un poco al principio así como su digestión pero con el tiempo se acostumbra el organismo y sus beneficios son inmensos. **(www.es.wikipedia.org/wiki/Sorgo)**

1.6- Variedades de Sorgo Cultivadas en Cuba

Existen en el país muchas variedades del grano, de estas la más cultivada ha sido la UDG-110, por la amplia utilización que tiene en la industria, para la elaboración de pan integral, bizcochos, gofio, como sustituto total de la harina de trigo y en la confección de pan suave, galletas, dulces y bebidas con la sustitución parcial de la harina de trigo o cebada. **(Chaviano 2005).**

1.7- Origen y Evolución de las Fermentaciones de Cereales

La cerveza y las bebidas fermentadas de cereales son los productos más antiguos de la civilización, algunos historiadores creen que estas bebidas se remontan a 8.000 años a.C. y otros sostienen que hay datos más seguros 6.000 a.C. Estas conclusiones se sacaron en 1981 cuando se encontró una piedra tallada en la región de Babilonia que describía una bebida con características similares a la cerveza.

No se puede identificar o determinar los primeros productores de los cereales fermentados o señalar una zona o un pueblo responsable de las primeras producciones, podemos decir que bebidas elaboradas a base de granos y/o frutos existían en la antigua Mesopotamia, África, Lejano Oriente y América.

Las primeras bebidas fermentadas se elaboraban con los cereales disponibles en cada región, así en la Mesopotamia usaban trigo y mijo, en África sorgo (hoy se produce una bebida fermentada de sorgo que se consume durante la fermentación), en China y Japón de arroz y en América de maíz (Chicha). Durante el descubrimiento de América la cebada fermentada pasó a ser un ingrediente importante de la alimentación en Europa y América.

Hasta el siglo XV los ingredientes principales de la cerveza eran cebada malteada, agua y levaduras, con agregados de romero y tomillo para evitar la descomposición y mejorar el sabor. En este siglo los mercaderes de Flandes y los holandeses introdujeron el lúpulo en su composición, lo cual daba sabor amargo. En la edad media los monjes europeos refinaron el proceso de producción de cerveza con malta y el agregado de lúpulo por su sabor amargo y las propiedades conservantes del mismo.

En 1516 las autoridades bávaras, crearon las leyes de pureza de la cerveza, las materias primas aptas eran cebada malteada, agua y lúpulo, solamente faltaba la levadura. En 1680 el científico holandés Antón Van Leeuwenhoek observa las levaduras en el microscopio. Luis Pasteur hizo posible el control de la transformación de azúcares en alcohol. Hasta la identificación del proceso fermentativo los productores dependían de las levaduras naturales que estaban en las barricas y/o las aportadas por las materias primas. (www.es.wikipedia.org/wiki/Sorgo) (www.es.wikipedia.org/wiki/Sorgo).

1.8- Características de la Cerveza

La cerveza debe cumplir unos requisitos mínimos a fin de ser apta para su consumo. Entre otros: acidez total no superior a 0,3 %; anhídrido carbónico superior a 3 g/L; contenido en glicerina inferior a 3 g/L; pH comprendido entre 3,5 y 5; contenido en cenizas no superior al 0,4

% en masa; contenido máximo en metales pesados (cobre: 1,0 ppm; zinc: 1,0 ppm; plomo: 0,2 ppm; arsénico: 0,1 ppm; y cobalto: 50 ppb); contenido máximo en ácido fosfórico no superior a los 0,12 g por 100 g de cerveza; hidratos de carbono no superiores a 7,5 por 100 g de cerveza. Únicamente podrán utilizarse en la elaboración de las cervezas aquellos aditivos legalmente permitidos.

Los carbohidratos como el almidón, se degradan a moléculas más pequeñas por la acción de las enzimas de la malta, para que puedan ser posteriormente utilizados por la levadura; el modo tradicional de producir las enzimas y la degradación enzimática de los carbohidratos ha sido el malteado. Según lo descrito por **(Reed, Tedla et al. 1987)**, para la producción de cerveza los mostos son enzimáticamente hidrolizados hasta el grado deseado, así mismo son clarificados y calentados. Las razones para calentar el mosto son: para esterilizarlo, precipitar la proteína, solubilizar e isomerizar los componentes del lúpulo, para generar sabores a través de reacciones de oscurecimiento no enzimático y para concentrarlo. Las enzimas usadas para la conversión de los almidones de los cereales se obtienen de forma endógena, malteando los granos. Tradicionalmente al hablar de malta se sobrentiende malta de cebada, pero existen maltas de trigo, arroz, sorgo, etc. **(Reed, Tedla et al. 1987)**.

1.9- Composición de la Cerveza

La cerveza está constituida por varios componentes los cuales 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 β -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 las 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 sustrato 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, mono-, di- y triacilglicéridos, junto a trazas de esteroides y fosfolípidos. También contiene pequeñas cantidades de ácidos orgánicos, que afectan al sabor y la estabilidad de la cerveza.

1.10- Calidad de la Cerveza

La calidad de la cerveza naturalmente presupone la ausencia de aspectos reconocidos generalmente como indeseables. Depende de varios factores que tienen relación con las materias primas utilizadas, con el proceso de elaboración y principalmente con el mercado consumidor que evalúa esta calidad. Entre los parámetros más importantes de evaluación de calidad están: el sabor, la presencia y permanencia de espuma; color; grado alcohólico y la presencia de residuos o precipitados (estabilidad).

Color

El color del mosto se intensifica durante la ebullición, si la misma es prolongada, en especial a presión, se produce un marcado oscurecimiento. El pH elevado y el oxígeno, también favorecen la coloración intensa. Los dos principales fenómenos que intensifican el color son: la oxidación de polifenoles y la interacción de carbohidratos y compuestos nitrogenados.

Grado Alcohólico

El etanol se forma durante la etapa de fermentación del mosto (proceso anaeróbico), en el cual la levadura convierte la glucosa en etanol y dióxido de carbono según la siguiente ecuación estequiométrica:



Los principales productos de fermentación son etanol y CO₂, aunque también se forman numerosos subproductos, que contribuyen de forma importante al aroma de la cerveza. Al respecto los ácidos orgánicos, alcoholes y ésteres son especialmente importantes.

El porcentaje de azúcares fermentables en el extracto total determina el contenido alcohólico en el producto final. La concentración de glucosa debe estar alrededor del 7% para obtener un 4% v/v de alcohol en la cerveza (**Vicente 2013**)

Espuma

La formación de espuma es uno de los factores más importantes en la evaluación de calidad que realizan los consumidores, ya que transmite la primera impresión del producto tan pronto

es servido. La espuma se forma principalmente por el CO₂ disuelto en el líquido y debido al contenido proteico de la cerveza.

Turbidez

Con excepción de dos tipos de cervezas de ciertos nichos, como la cerveza de trigo o la cerveza fermentada en botellas agitadas, la turbidez, es generalmente inaceptable para el consumidor y, además, una preocupación para el cervecero. La pérdida de brillo, el descenso de la transparencia, el grado de enturbiamiento, incluso la floculación, precipitación y sedimentación, son las sucesivas manifestaciones visuales de la falta de estabilidad o inestabilidad de la cerveza. Así, la turbidez u opacidad de la cerveza se puede deber a las siguientes causas: biológica, coloidal y una química, ésta última debido a diversos agentes como el oxalato de calcio.

1.11- Ingredientes de la Cerveza

Los ingredientes básicos que intervienen en la elaboración de la cerveza son: la malta, el agua, el lúpulo, la levadura y el adjunto.

☑ Malta

Constituye uno de los elementos iniciales en la elaboración de la cerveza, compuesta principalmente por semillas que hayan germinado durante un período limitado, hasta que han brotado las raicillas de unos, dos o tres centímetros y posteriormente desecados y retiradas las mismas. La cerveza se puede producir con cualquier cereal que pueda ser "malteado" (es decir cualquier grano que posea almidón y sea susceptible de germinar).

Aproximadamente el 80 % del grano de los cereales está compuesto por hidratos de carbono y dentro de ellos el almidón es el que se encuentra en mayor proporción, como se aprecia en la **TABLA 1.2** referenciado en **(Nieblas 2015)**.

Los azúcares que contiene el grano de cebada no son inmediatamente accesibles y, en una fase previa, es preciso activar las enzimas presentes en el propio grano que reducirán las largas cadenas de almidón para liberar azúcares. Esta operación consiste simplemente en hacer germinar los granos. Cuando se estima que la activación enzimática de la germinación se encuentra en su punto óptimo, se para el proceso reduciendo la humedad del grano hasta su mínimo. Este producto recibe el nombre de *malta verde*. Después hay que hornearlo. A bajas temperaturas, el tostado es mínimo y se habla de *maltas claras* (llamadas también *maltas Lager* o *Pale* según el país en que se producen). A medida que se aumenta la temperatura del

horno, la malta resultante es cada vez más oscura. Se puede llegar al punto de quemarla, produciendo «malta negra».(Ohta 1992).

TABLA 1.2 COMPOSICIÓN EN HIDRATOS DE CARBONO DE LOS CEREALES

CEREAL	ALMIDÓN	CELULOSA	HEMICELULOSA	β - GLUCANAS	PENTOSANAS	AZÚCARES LIBRES
Arroz Elaborado	85	1	2	0,1	0,9	0,4
Avena Entera	-	-	-	4,6	3,2	1,3
Cebada	-	-	-	5,8	7,5	3,5
Centeno	-	-	-	2,4	6,4	7,1
Maíz	70	2	3	-	6,2	1,9
Sorgo	75	2,5	2,5	-	-	2
Trigo	60	2	5	0,8	4,9	2,3

Calidad de la Malta

En este sentido la calidad de la malta será adecuada si presenta: buena modificación del endospermo, bajo contenido en proteína, alto contenido de extractos y de azúcares reductores y gran poder enzimático.

Es importante para la calidad de la malta que tenga una modificación buena y regular para que las barreras físicas estén rotas y pueda existir una adecuada movilidad y acción enzimática. Señalan **(Novellie 1962)** y **(TAYLOR 1986)** que los ensayos realizados comúnmente para evaluar la calidad de la malta en la producción de bebidas de sorgo son la determinación del Poder Diastásico (DP) y el contenido de nitrógeno amínico libre (FAN, por sus siglas en inglés).

El poder diastático (DP) de la malta es mejorado si en la etapa de remojo los granos de sorgo son diluidos en una solución alcalina al 0,1 % **(Okolo and Ezeogu 1996)** y **(Okungbowa, Obeta et al. 2002)**. Según **(BAXTER 1981)** el contenido de FAN, es importante en el proceso ya que es la fuente de nitrógeno para las levaduras durante la fermentación. Señalaron **(TAYLOR 1986)** que en el proceso de producción de cerveza de sorgo, es sumamente importante ya que el FAN en el mosto puede ser limitante debido a la alta proporción de adjunto de cereal no malteado. El extracto, una medida de cómo la mayor parte de la malta puede disolverse durante el proceso, es un parámetro de calidad de la malta menos importante ya que la misma se prepara con 30 % del cereal molido, según **(Novellie 1962)**.

En estudios realizados en la Facultad de Química-Farmacología de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, se ha malteado el sorgo UDG-110 siguiendo las técnicas de malteo para la cebada. Los resultados obtenidos 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 (Rodríguez 2005), y en la producción de Maltina para enfermos celíacos.

Maltas en la Producción de Bebidas

- *Malta de Cebada*

La parte fundamental del grano de cebada es el embrión que, bajo condiciones favorables de temperatura y de humedad, germina formando raíces y tallo. El endospermo ocupa la mayor parte del grano y constituye la reserva alimenticia de la planta (almidón), la cual será posteriormente la fuente de azúcares del mosto de cerveza. Por este motivo debe ocurrir una transformación previa del almidón en azúcares sencillos (glucosa, maltosa y maltotriosa) componentes necesarios en las bebidas alimenticias. En cada etapa del proceso de malteo hay variables que son fundamentales por lo que para cada cereal se reportan los valores en que se deben de encontrar.

- *Malta de Sorgo*

Al igual que todos los cereales el sorgo para ser malteado consta de parámetros importantes a controlar como son el tiempo de remojo que es más prolongado que para otros cereales, todo depende de las condiciones físicas en que se encuentre este sorgo, de la cosecha y de la humedad inicial que contiene.

Diferencias entre la Malta de Sorgo y la de Cebada

Si se pretende elaborar bebidas a partir de sorgo para sustituir totalmente la cebada, se debe conocer primeramente los contrastes entre las maltas de ambos cereales. En este sentido, (Lyumugabe, Gros et al. 2012) resume las diferencias fisiológicas más importantes entre las mismas, las cuales se muestran a continuación.

La primera diferencia consiste en las enzimas que degradan el endospermo. Durante la germinación, la hormona ácido giberélico, a baja concentración (0,1-0,2 ppm) induce a la capa aleurona de la cebada a la producción de enzimas como α -amilasa, proteasa, pentosanasas y

endo- β -glucanasa que degradan el endospermo, pero esta hormona no desempeña tal papel en el desarrollo de la enzima en el sorgo. Por ejemplo, en el sorgo, la α -Amilasa y la carboxipeptidasas son producidas por el escutelo, mientras la endo- β -glucanasa, dextrinasa límite y la endo-proteasa crecen en el endospermo almidonado. En cambio, en el malteado de cebada la α -amilasa, endo-proteasa, dextrina límite y endo- β -glucanasa crecen en la capa aleurona, mientras que la carboxipeptidasas y β -amilasa se encuentran en el endospermo almidonado [(Aisien and Palmer 1983)].

La segunda contradicción está relacionada con las características del endospermo. El endospermo del sorgo malteado mantiene la compactación del almidón y no es desmenuzado como en los granos de malta de cebada. El tercer contraste radica en el nivel de enzimas en los granos. Los granos de malta de sorgo contienen bajo nivel de endo- β -glucanasa y β -amilasa (Aisien and Palmer 1983). La cuarta incongruencia radica en las pérdidas durante el malteado. Las pérdidas del malteado (respiración y echar raíces) de la malta de sorgo son alrededor del 20%, mientras que las pérdidas del malteado de la malta de cebada es de 7% después de 6 días de crecimiento a 25 °C.

☑ *Agua*

Interviene en los momentos iniciales de mezclado con la malta e introduce un sabor característico. En primer lugar tiene que ser bacteriológicamente limpia. Como la cerveza está constituida como mínimo por un 90 % de agua, este ingrediente es tan importante que define el tipo de cerveza que se pueda elaborar en una zona. Las cervezas de baja fermentación necesitan agua blanda, con poca cal, y las cervezas de alta fermentación necesitan agua dura, con muchas sales.

☑ *Lúpulo*

El humus lúpulos es un ingrediente relativamente moderno en la cerveza, se trata de una planta trepadora de la familia del cannabis que es la encargada de proporcionar además de un sabor amargo característico, llega a estabilizar la espuma. El lúpulo contribuye decisivamente a su conservación. Además obra como eficaz antiséptico y estabilizador. También sirve para detener la fermentación acética y clarificar el líquido, causando la precipitación de las sustancias albuminosas. El ácido del lúpulo (ácido α) tiene un suave efecto antibiótico contra las bacterias Gram positivas, y favorece la actividad de la levadura de malteado. El efecto organoléptico sobre la cerveza es muy diferente. La variedad y el frescor del lúpulo influyen muy sensiblemente en la calidad final de la cerveza. Los ácidos del lúpulo protegen a la levadura de

la competencia por los nutrientes y de las bacterias, ofreciendo mayores rendimientos alcohólicos en la fermentación.

☑ *Levadura*

La forma de las células de las levaduras cerveceras puede ser esférica, elipsoidal, cilíndrica o sumamente alargada, en agrupaciones de dos, cadenas cortas o racimos o bien sin agruparse; pueden formar o no pseudomicelio. La apariencia de las colonias es muy diversa: de color crema o ligeramente café, de lisas a rugosas, en ocasiones sectorizadas, brillantes u opacas. Esporan formando de una a cuatro ascosporas de forma redonda a ligeramente elipsoidal. **(García and Garibay 1994).**

☑ *Adjuntos Cerveceros*

Se entiende por adjuntos cerveceros a cualquier fuente adicional de azúcares, que puede ser almidón y que esté o no malteado, que suplementen 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. **(Serna 1996)**

El almidón de los adjuntos es degradado mediante la acción de las enzimas de la malta a dextrinas, maltotriosas, maltosa y trazas de glucosa. Estos carbohidratos son los responsables de dar cuerpo a la cerveza y proveen a la levadura de sustrato para que pueda efectuar su acción fermentativa. Los adjuntos son productos refinados con menos de 0,7% de grasa y de 1% de fibra. **(Serna 1996)**

Cuando se utilizan adjuntos cerveceros para elaborar cerveza se deben tener en cuenta las temperaturas de gelatinización de estos cereales utilizados. La cebada se puede añadir directamente al macerado principal junto con la malta. Los grits de maíz y arroz tienen temperaturas de gelatinización entre 61,5-73,9°C y 61,1-77,8 °C respectivamente, para el almidón de sorgo la temperatura de gelatinización oscila de 71 a 80 °C (Ortega 2001).

En el "Practical Brewer", un libro publicado por la Master Brewers Association of the Americas, señala que "el uso de adjuntos produce cervezas de color más claro y con un sabor más elegante y menos pleno, más brillantes, con mejor estabilidad y mejor comportamiento ante el frío". En el "Handbook of Brewing", en un capítulo de adjuntos se puede leer: "el maíz aporta un sabor más pleno que el trigo, el cual imparte una cierta sequedad. La cebada proporciona un sabor más fuerte y áspero. Tanto el trigo como la cebada pueden mejorar considerablemente la retención de espuma. El arroz también aporta un sabor muy característico a la cerveza". Vaya,

que los adjuntos no sólo aportan sabores diferentes para los cerveceros, sino que también pueden mejorar la sensación en boca, la retención de espuma y la claridad(<http://cerveceros-caseros.com/index.php/articulos/ingredientes/224-los-adjuntos-2>)

Los principales adjuntos cerveceros son:

- ✓ El sorgo es principalmente utilizado como un adjunto porque provee extracto con un costo inferior que el de la malta de cebada y es fácilmente disponible. Además es consistente en el término de composición, disponibilidad y produce un espectro de azúcar fermentable y de dextrina parecido al producido por la malta de cebada. Es también utilizado como adjunto porque baja la proteína y el polifenol contenido en la cerveza.
- ✓ 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
- ✓ 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
- ✓ 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.

1.12- 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 1996**)

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, incluyendo ácido fólico y nicotínico, tiamina, riboflavina y aminoácidos esenciales como lisina (**Lyumugabe, Gros 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. 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 casera o artesanal. En México también se han realizado estudios que han demostrado la factibilidad de utilizar sorgo para producir malta y adjuntos cerveceros.

En este sentido, la utilización de sorgo para producir malta 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.

1.13- Proceso de producción de cerveza

El proceso de producción de cerveza consta de las siguientes etapas:

- ✓ *Malteado*
- ✓ *Maceración*
- ✓ *Filtración*
- ✓ *Hervidura del mosto*
- ✓ *Fermentación*
- ✓ *Maduración*
- ✓ *Filtración y esterilización*

1.13.1- Malteado

El malteado es un proceso el cual consiste en la germinación limitada de los granos bajo condiciones de temperatura y tiempo controladas, que se realiza después de la selección de la variedad del cereal y la limpieza de los granos; el mismo tiene como objetivo desarrollar las enzimas α -amilasa y β -amilasa las cuales descomponen los compuestos principales (hidrólisis del almidón) para proporcionar azúcares fermentables, nitrógeno libre y aminoácidos libres. Además, también proporciona aroma y otros compuestos esenciales para la fermentación y la calidad sensorial de la cerveza. 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. **(Boffill-Rodríguez septiembre-diciembre, 2014)**

Remojo

Luego de realizada la selección, se efectúa 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%. La desventaja de alcanzar el contenido de humedad necesario es la contaminación por microorganismos, uno de los factores que afecta el proceso de fabricación de cerveza. Quizás, debido a los beneficios que aporta la etapa de remojo y a la contaminación

que puede sufrir, ha sido considerada por **(Dewar, Taylor et al. 1997)** y **(FRENCH and MCRUER 1990)** como la más crítica dentro del proceso de malteado.

El efecto de las condiciones de remojo ha sido investigado extensivamente, las variables que comúnmente se analizan son el tiempo y la temperatura. Estudios realizados demuestran que el valor óptimo de remojo es de 36h y además se ha estudiado añadir agentes químicos al agua, por ejemplo NaOH, que puede presentar una concentración próxima al 0,1%; esta sustancia se utiliza para eliminar la contaminación microbiana, no deseada, que se presenta en esta etapa del proceso y para aumentar el poder diastático de la malta obtenida **(Lymugabe, Gros et al. 2012)** . En estudios anteriores en la facultad se ha experimentado con la concentración de NaOH para ver cuál es la óptima a añadir en el tipo de sorgo UDG-110. **(Díaz 2014)** y **(Pino 2016)**.

Germinación

Después de la etapa de remojo, los granos son sometidos a la germinación en dispositivos donde son colocados en forma de capa, cubiertos durante días y rociados con agua para mantener el contenido de humedad inicial. La germinación del grano ha de ser rápida, vigorosa y uniforme. Se debe de asegurar que el proceso dure el tiempo necesario 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. Se han realizado estudios variando la temperatura de germinación entre 20 y 30 °C, dando los mejores resultados para 30 °C **(Reyes 2013)**.

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 el caso de la malta clara se han obtenido tiempos de secado de alrededor de cinco horas **(Gallardo 2012)**, muy inferior a los reportados para la cebada. En la etapa de secado es de vital importancia controlar la temperatura debido a que valores por encima de los comprendidos pueden afectar la calidad final de la malta.

Tamizado y Pulido

Luego del secado se retiran las raicillas que se producen durante la germinación, con el propósito de no perjudicar la calidad del producto final. Debe de realizarse después de la

conclusión del secado y aun cuando la malta se encuentre caliente, debido a que las raicillas son fuertemente higroscópicas y es más fácil retirarlas cuando están secas.

1.13.2- Maceración de la Malta

Los objetivos de la maceración son crear y extraer, dentro de la solución, compuestos necesarios como azúcares fermentables, aminoácidos, vitaminas, etc., a partir de la malta para luego ser utilizados por la levadura en la fermentación. Uno de los problemas señalados por **(Novellie 1959)** en la producción de cerveza de sorgo es la conversión eficiente de fragmentos de almidón en azúcares fermentables por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Altos niveles de extracto de almidón comparables a los de la malta de cebada han sido obtenidos por **(IGYOR 2001)** mediante el uso de procedimientos de maceración no convencionales.

El procedimiento involucra, decantación después de la maceración de la malta de sorgo a 45 °C por 30 min, y gelatinización del almidón a 80 hasta 100 °C antes de mezclarlo con el mosto, hasta alcanzar una temperatura de sacarificación de 63-65 °C. Por otra **(OWUAMA 1997)** reporta otro proceso eficiente de decocción en tres etapas: Gelatinización, Licuefacción y Sacarificación, el cual permite la hidrólisis máxima del mosto. 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)**. Inicialmente el 70 % de la malta es macerada, durante la segunda etapa la maceración ocurre por 30 min a 65 °C y finalmente se realiza por 30-60 min a 70 °C.

Los citados autores agregan que para incrementar el rendimiento del mosto extraído se pueden adicionar enzimas externas. Generalmente, antes de la hervidura se realiza la filtración del puré. En el proceso de fabricación de las cervezas tradicionales en África la filtración se realiza por decantación simple, como describen **(Lyumugabe, Gros et al. 2012)**. La hervidura del mosto es hecha por varias razones, en particular para provocar la desnaturalización de la enzima malta y la esterilización del mosto.

Aunque se ha reportado la realización de esta etapa **(DICKO 2006)** y **(KAYODÉ 2007)** en el proceso de fabricación de muchas cervezas tradicionales de África, esta fase no llega a

efectuarse (NZIGAMASABO 2009) y (Lyumugabe, Gros et al. 2012)].

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.

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 son obtenidos durante el proceso de maceración gracias a procesos enzimáticos los cuales se controlan empleando diferentes temperaturas y tiempos.

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.

Aminoácidos

Un aminoácido es una molécula orgánica con un grupo amino (-NH₂) 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 es un aminoácido componente de las proteínas sintetizadas por los seres vivos. En cantidades mínimas se encuentra en todos los cereales (gramíneas), pero es muy abundante en las legumbres, levadura de cerveza y frutos secos. Desempeña un papel central en la absorción del calcio; en la construcción de las proteínas musculares y en la producción de hormonas, enzimas y anticuerpos.
- ✓ El ácido glutámico, o en su forma ionizada, el glutamato 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.

Vitaminas

Las vitaminas más frecuentes en los extractos de cervezas de sorgo son algunas del grupo B, éstas forman un grupo relacionadas con el metabolismo.

- ✓ 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.
- ✓ 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.
- ✓ La vitamina B5 o ácido pantoténico es una vitamina hidrosoluble requerida para mantener la vida (nutriente esencial).
- ✓ La vitamina B6 o piridoxina juega un papel en el crecimiento, conservación y reproducción de todas las células del organismo.

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

En la obtención de la Malta intervienen cuatro tipos de Enzimas:

- ✓ **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 y 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.
- ✓ **Proteolíticas:** Desdoblan las proteínas en compuestos más sencillos, como péptidos y aminoácidos.
- ✓ **Fitasas:** Enzimas importantes porque ayudan a establecer y mantener el pH de la mezcla agua-malta durante la maceración.
- ✓ **Beta-gluconasas:** Actúan sobre la beta-gluconasas que son un grupo lineal de polisacáridos, consistente en unidades de glucosa con enlaces β (1,4) 70%, β (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 referenciado en **(Carvajal 2014)**.

1.13.3- Filtración Previa

El mosto, que tiene muchas partículas en suspensión, debe ser filtrado convenientemente para que quede libre de impurezas que molesten a la fermentación, es por esta razón que la malta remojada al final del proceso anterior en forma de masa espesa sobrante (denominada "afrecho") se retira y se emplea como subproducto para la elaboración de alimento para los animales. Antiguamente se hacía con unas cubas especiales con perforaciones en el fondo que se denominaban: "cubas de filtración". A esta fase de la filtración se la suele denominar primera filtración, la segunda se hace tras la fermentación. El mosto filtrado y esterilizado no debe ponerse en contacto con el aire.

1.13.4- Hervidura del Mosto

Tras el filtrado se introduce el mosto en una olla y se pone a hervir durante algún tiempo (puede durar casi una hora) con el objeto de esterilizarlo de bacterias que hayan podido aparecer durante los procesos anteriores, en este momento se añade el lúpulo con un doble objetivo: proporcionar un aroma característico y al mismo tiempo frenar los procesos enzimáticos anteriores. El tiempo de cocción tiene dependencias de la receta cervecera, pero suele durar algunas horas. Se suele acabar esta fase con una prueba de contenido de yodo.

1.13.5- Fermentación

La fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de O_2 , 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.

Antes de entrar en las cubas de fermentación se enfría el mosto a una temperatura de 15 °C a 20 °C para que al inyectar la levadura (que son organismos vivos) tenga efecto. Llegados a este punto se introduce una mezcla de aire y de levadura para que comience la fermentación, ésta suele durar varios días (entre cinco y diez, dependiendo de receta). Este proceso de fermentación del mosto es exotérmico y libera grandes cantidades de calor que hacen que las cubas deban ser refrigeradas constantemente para que sea posible la estabilización de la temperatura. La temperatura estabilizada dependerá en gran medida del tipo de fermentado y éste a su vez depende del empleo de diferentes clases de levaduras.

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).

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.

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.

Para medir la eficiencia del proceso fermentativo se emplean varios indicadores, los mismos se muestran a continuación (**Fabelo 1999**).

1. RENDIMIENTO ALCOHOL-SUSTRATO

$$Y^{P/S} \% = \frac{\%Alc * \rho_{etanol}}{\text{Consumo ART}}$$

2. EFICIENCIA DE LA FERMENTACIÓN

$$Efic_{Ferm} = \frac{\text{Alcohol}_{\text{produc}}}{\text{Alcohol}_{\text{teórico}}} * 100$$

3. PRODUCTIVIDAD

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Conc}_{\text{prod}}}{\text{Tiempo}_{\text{ferment}}} \text{ (g/L - h)}$$

Se sabe que la fermentación está completa o ha culminado cuando la masa deja de burbujear y la levadura se endurece yendo al fondo del fermentador. A estas alturas, el licor fermentado es conocido como fermento y está listo para ser destilado (**Cedeño 2015**).

Tipos de Fermentaciones

Existen muchísimos tipos de cerveza, teniendo en cuenta el modo de fermentación se pueden distinguir tres categorías:

- ✓ **Alta fermentación (*Saccharomyces cerevisiae*):** 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*):** se mantiene en actividad fermentativa durante un periodo de 8 a 10 días a temperaturas comprendidas entre 6 y 10 °C.
- ✓ **Fermentación espontánea:** 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.

Fermentación Baja o Cervezas Lager

La palabra Lager se deriva del vocablo alemán “lagern” que significa guarda o permanencia en bodega y se refiere al largo período de reposo de la cerveza para una lenta fermentación. Este proceso se realiza a bajas temperaturas (10 a 12°C), y en él la levadura se mantiene al fondo del estanque permitiendo que el lúpulo y la cebada malteada dominen el aroma y sabor del producto

Las levaduras “bajas” fueron empleadas por primera vez en Baviera para producir las cervezas llamadas Lager o Lagern. Estas levaduras se definen como aquellas que al final de la fermentación se van al fondo del tanque de fermentador.

Las levaduras *Saccharomyces carlsbergensis* y *Saccharomyces cerevisiae* de cervecería se clasifican de acuerdo con su modo de acción, la *S. carlsbergensis* es una levadura de fondo que no suele formar esporas, se adapta bien a la fermentación lenta a bajas temperaturas y es la preferida para elaborar cerveza tipo Lager. La levadura de *S. cerevisiae* produce una fuerte fermentación a temperatura elevada y tiende a flotar en la superficie. **(Novielle 1966)**.

Fermentación Alta o Cervezas Ale

La cerveza tipo Ale se originó en Baviera en la época medieval y posteriormente ha llegado a ser el tipo predominante en el mundo. Esta cerveza es, por tradición, el producto de la fermentación de las cepas “de superficie”, de *Saccharomyces cerevisiae*, denominada así debido a que una parte de la levadura sube hasta formar una densa “cabeza de levaduras” en la superficie del fermentador.

La fermentación de la cerveza Ale ocurre de manera más rápida y a temperaturas de 20° C aproximadamente, actuando la levadura en la superficie del mosto. Además, tienen un elevado porcentaje de alcohol y son muy aromáticas.

La cerveza tipo Ale es distinta de la cerveza Lager por la disminución más rápida del extracto de azúcar en la etapa de fermentación, causada por el uso de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, que permanece en suspensión, y por las temperaturas más altas utilizadas (20 - 23°C).

Las levaduras “altas” se pueden diferenciar de las “bajas” por fermentar el trisacárido rafinosa hasta un tercio, al formar sólo fructosa y melibiosa, pues les falta la enzima melibiasa que sigue descomponiendo la melibiosa, en glucosa y galactosa, ambas fermentables **(Novielle 1966)**.

Limitaciones del Proceso de Fermentación

La determinación de los factores que limitan la glucólisis fermentativa del etanol son complejos debido a la interrelación existente y a la naturaleza de los parámetros intervinientes durante el proceso de fermentación como son la concentración de etanol resultante. Dentro de las limitaciones están las siguientes

1. **La resistencia de las levaduras a las concentraciones de etanol** que se llegan a producir durante la fermentación, algunos microorganismos como la *Saccharomyces Cerevisiae* pueden llegar a soportar hasta el 20% de concentración en volumen. (Una de las principales)
2. **Acidez del sustrato:** el pH es un factor limitante en el proceso de la fermentación ya que las levaduras se encuentran afectadas claramente por el ambiente, bien sea

alcalino o ácido. Por regla general el funcionamiento de las levaduras está en un rango que va aproximadamente desde 3,5 a 5,5 de pH (**Cedeño 2015**).

3. **Concentración de azúcares:** la concentración excesiva de hidratos de carbono en forma de monosacáridos y disacáridos puede frenar la actividad bacteriana. De la misma forma la baja concentración puede frenar el proceso. Las concentraciones límite dependen del tipo de azúcar así como de la levadura responsable de la fermentación
4. **Contacto con el aire:** una intervención de oxígeno (por mínima que sea) en el proceso lo detiene por completo (es el denominado Efecto Pasteur). Esta es la razón por la que los recipientes fermentadores se cierran herméticamente.
5. **La temperatura:** el proceso de fermentación es exotérmico, y las levaduras tienen un régimen de funcionamiento en unos rangos de temperatura óptimos, se debe entender además que las levaduras son microorganismos mesófilos. Si se expone cualquier levadura a una temperatura cercana o superior a 55 °C por un tiempo de 5 minutos se produce su muerte. La mayoría cumple su misión a temperaturas de 30 °C.
6. **Ritmo de crecimiento de las cepas:** durante la fermentación las cepas crecen en número debido a las condiciones favorables que se presentan en el medio, esto hace que se incremente la concentración de levaduras (**Ogbeide 2011**).

1.13.6- Filtración y Reposo

Lo primero a realizar es la interrupción del proceso de fermentación, lo cual se logra calentando el fermento hasta temperaturas superiores a 50 °C, para lograr así detener la actividad de la levadura. Luego de esto la muestra es filtrada y colocada en un depósito en el cual ocurre el reposo y clarificación de la misma, para finalmente obtener la cerveza.

***CAPÍTULO 2: DESARROLLO
EXPERIMENTAL***

CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1- Experimento 1: Estudio del Malteado de los Granos de Sorgo UDG-110

Debido a la importancia que posee el sorgo como sustituto de la cebada en la elaboración de bebidas para el consumo de los enfermos celíacos, varios han sido los estudios que se han llevado a cabo en la búsqueda de obtener un producto con la mejor calidad posible. Se pretende continuar con los estudios desarrollados en trabajos anteriores pero acotando los niveles de las variables.

Dentro de las variables a estudiar están el tiempo de remojo (TR) y la concentración de hidróxido de sodio (NaOH) a utilizar, con un tiempo de germinación fijo de 72 h. En las **TABLAS 2.1, 2.2 y 2.3** se muestran las variables antes mencionadas con sus respectivos niveles y la matriz experimental codificada y decodificada de un diseño de experimentos Superficie Respuesta con dos puntos centrales y una réplica, obtenidas mediante el software Statgraphics Centurion.

TABLAS 2.1 Y 2.2 VARIABLES FIJADAS E INDEPENDIENTES Y SUS NIVELES EN EL MALTEADO

VARIABLES FIJADAS	
Tiempo de Germinación	72 h
Tiempo de Secado	6 h

VARIABLES INDEPENDIENTES	NIVELES
Concentración NaOH (X_1)	0,03 - 0,1 %
Tiempo Remojo (X_2)	12 - 48 h

TABLA 2.3 MATRIZ EXPERIMENTAL CODIFICADA Y DECODIFICADA

CORRIDAS	CONCENTRACIÓN NaOH (% Peso)		TIEMPO REMOJO (h)	
	VARIABLES CODIFICADAS	VARIABLES DECODIFICADAS	VARIABLES CODIFICADAS	VARIABLES DECODIFICADAS
1	0	0,065	0	30
2	-1	0,03	1	48
3	-1,41421	0,0155	0	30
4	0	0,065	1,41421	55
5	-1	0,03	-1	12
6	1	0,1	-1	12
7	1,41421	0,1145	0	30
8	0	0,065	0	30
9	1	0,1	1	48
10	0	0,065	-1,41421	5
11	0	0,065	0	30
12	-1	0,03	1	48
13	-1,41421	0,0155	0	30
14	0	0,065	1,41421	55
15	-1	0,03	-1	12
16	1	0,1	-1	12
17	1,41421	0,1145	0	30
18	0	0,065	0	30
19	1	0,1	1	48
20	0	0,065	-1,41421	5

2.2- Variables Respuesta

Dentro de las propiedades determinadas a la malta de sorgo se encuentran el Porcentaje de Germinación, las Pérdidas en el Malteado y el Contenido de Extracto (VER TABLA 2.4).

TABLA 2.4 VARIABLES INDEPENDIENTES Y VARIABLES RESPUESTAS ESTUDIADAS

CORRIDAS	CONCENTRACION NaOH (% PESO)	TIEMPO REMOJO (h)	GERMINACION (%)	PÉRDIDAS MALTEADO (%)	CONTENIDO EXTRACTO (g / 100 mL)
1	0,065	30	56,55	6,18	0,24
2	0,03	48	61,06	7,27	0,91
3	0,0155	30	55,92	6,99	0,03
4	0,065	55	74,55	7,54	1,19
5	0,03	12	55,56	4,80	1,87
6	0,1	12	62,73	4,05	1,27
7	0,1145	30	53,62	7,38	1,42
8	0,065	30	73,02	6,99	1,28
9	0,1	48	75,00	8,46	0,73
10	0,065	5	49,57	3,74	0,14
11	0,065	30	56,5	6,476	0,25
12	0,03	48	60,89	7,468	0,93
13	0,0155	30	56	7,26	0,028
14	0,065	55	75	7,44	1,2
15	0,03	12	55,8	4,58	1,8
16	0,1	12	63	4,46	1,29
17	0,1145	30	54	7,84	1,5
18	0,065	30	73	5,96	1,3
19	0,1	48	75	7,94	0,8
20	0,065	5	53	3,65	0,15

Porcentaje de Germinación

Después del remojo los granos se colocan en bandejas donde se cubren con paños húmedos con el objetivo de mantener la humedad alcanzada en la etapa anterior. En este tiempo puede observarse cómo brotan las raicillas o plumillas. El tiempo que se tomó para llevar a cabo el estudio fue de 72 horas. Los resultados alcanzados se obtuvieron a partir de la siguiente ecuación:

$$\%Ger. = \frac{\text{Granos germinados}}{\text{Granos totales}} * 100$$

Los Porcientos de Germinación alcanzados se encuentran en un promedio entre 50 y 75%, los cuales son bajos, en algunos granos hubo poco brote de raicillas y otros obtuvieron valores por debajo de la media. Esta tendencia se presenta en estos resultados y en los últimos trabajos, debido a la mala calidad del grano, procedente de la Empresa de Semillas del MINAGRI y no de la Estación Experimental, que era de donde procedía en los primeros estudios de malteado realizado en la investigación, los cuales alcanzaban valores de granos germinados superiores al 85%.

En las corridas 7 y 10 se obtuvieron los valores más bajos; correspondientes a los tiempos de remojo (30 y 5 h respectivamente) lo que demuestra que cuando esta variable es muy baja el grano no se hidrata lo suficiente, lo que inhibe la germinación y por consiguiente la actividad enzimática. Mientras que para tiempos mayores de remojo se observan mejores resultados, manifestado a través de los experimentos 4 y 9.

En cuanto a la concentración de NaOH el experimento que más bajo poder germinativo presentó fue el de una concentración media es decir de 0,065 % p/p y el de mayor germinación fue el correspondiente a la mayor concentración de NaOH por lo que la tendencia es que se favorece a la mayor concentración estudiada, coincidiendo con los resultados de **(Díaz 2014) y (Carvajal 2014)**

Pérdidas en el Malteado

Las pérdidas sufridas durante el malteado se basan fundamentalmente en dos parámetros, uno que el embrión toma rápidamente agua, en cambio el endospermo se hidrata más lentamente, cualquier fractura sufrida por la cascarilla o las cubiertas del fruto y la semilla facilita el humedecimiento del endospermo o el embrión y, desde luego la fuga de sustancias solubles del endospermo y otro es el representado por la respiración del embrión, que consume reservas de nutrientes, liberando energía, dióxido de carbono y agua.

La respiración aumenta significativamente cuando el embrión se activa, lo que crea una demanda de oxígeno en el agua de remojo, en ausencia de oxígeno el embrión puede metabolizar anaeróbicamente las reservas, pero de un modo energéticamente poco eficaz, convirtiéndolas en dióxido de carbono y alcohol, a medida que la concentración de alcohol aumenta su toxicidad va creciendo, por lo que se hace necesario cambiar el agua de remojo cada cierto tiempo. Además influyen en estas pérdidas los períodos de germinación prolongados que resultan en mayores pérdidas de materia seca y menores niveles de actividad

diastática.(Pargas 1994). Para su determinación se utilizó la ecuación que se muestra a continuación:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{Pg - Pms}{Pg}$$

Donde:

Pg: Peso Inicial de la Muestra.

Pms: Peso de la Malta Seca

En el malteado de los granos de cebada se reportan pérdidas cercanas al 7% y para los de sorgo hasta 19 % (Lyumugabe, Gros et al. 2012).

Las Pérdidas en el Malteado obtenidas se encuentran ligeramente por debajo del rango establecido por la literatura, especificando el caso del experimento 10 el cual tiene el menor valor (3,736%), correspondiente a un tiempo de 5 h y una concentración de NaOH de 0,065 % p/p y el caso del 9 el cual presenta el mayor porcentaje de pérdidas y corresponde a los valores máximos de las variables analizadas.

Contenido de Extractos

Fue realizado mediante el método donde se determina la gravedad específica del extracto de malta por métodos gravimétricos a 20°C y la ecuación siguiente. Con la gravedad específica se calcula el contenido de extracto como un porcentaje en peso por la tabla Plato (**Anexo 4 y 5**).

$$S = 0,99913 * \frac{C-A}{B-A}$$

Donde:

A: Peso Picnómetro Vacío

B: Peso Picnómetro con Agua Destilada

C: Peso Picnómetro con la Solución

En el caso del contenido de extracto se puede apreciar que los mayores valores del mismo corresponden a los experimentos 5 y su réplica, los cuales presentan 12 horas de remojo y una concentración de 0,03 % p/p de NaOH, es decir los extremos inferiores de las variables y los menores valores los aportan la corrida 3 con 30 h de remojo y 0,0155 de NaOH, seguida de la corrida 1 que tiene el mismo tiempo de remojo y la concentración media de hidróxido.

2.3- Análisis Estadístico de la Etapa de Malteado

Porcentaje de Granos Germinados

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

$$G \text{ Ger} = 66.4725 + 1.77013 \cdot \text{Conc NaOH} + 6.35993 \cdot \text{TR} - 4.5825 \cdot \text{Conc NaOH}^2 + 1.0825 \cdot \text{Conc NaOH} \cdot \text{TR} - 1.27999 \cdot \text{TR}^2$$

$$R^2 = 63,776 \%$$

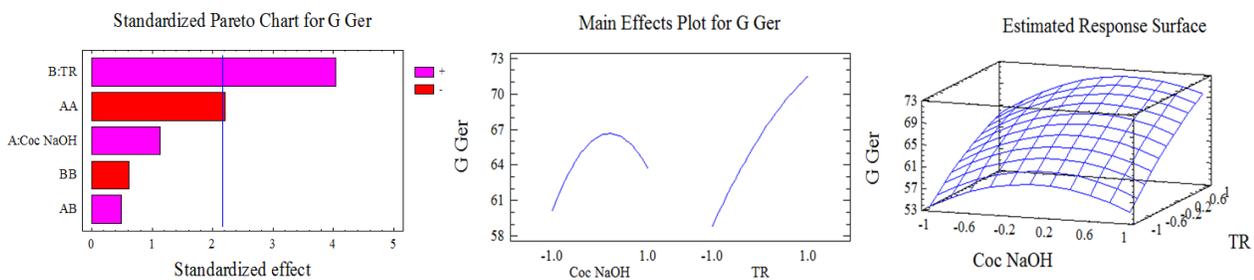


FIG. 2.1 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA EL PORCIENTO DE GERMINACIÓN

Como se puede apreciar en el caso del Porcentaje de Germinación la variable más significativa es el Tiempo de Remojo en su valor positivo, es decir los máximos 48 y 55 horas, seguido de la interacción cuadrática de la concentración de NaOH de forma negativa. Esto evidencia lo reportado hasta el momento de que al incrementarse el remojo en el grano, se alcanza una mayor humedad y por tanto favorece en gran medida la germinación. En el caso de la Concentración de NaOH aunque prácticamente no llega a ser significativa se puede observar, en el diagrama de Efectos Principales, como para valores medios de la misma se obtienen los porcentos más elevados.

Pérdidas del Malteado

La función objetivo obtenida para esta variable respuesta es la siguiente:

$$\text{Pérd M} = 6.4005 + 0.135215 \cdot \text{Conc NaOH} + 1.49945 \cdot \text{TR} + 0.394939 \cdot \text{Conc NaOH}^2 + 0.31675 \cdot \text{Conc NaOH} \cdot \text{TR} - 0.492066 \cdot \text{TR}^2$$

$$R^2 = 95,77 \%$$

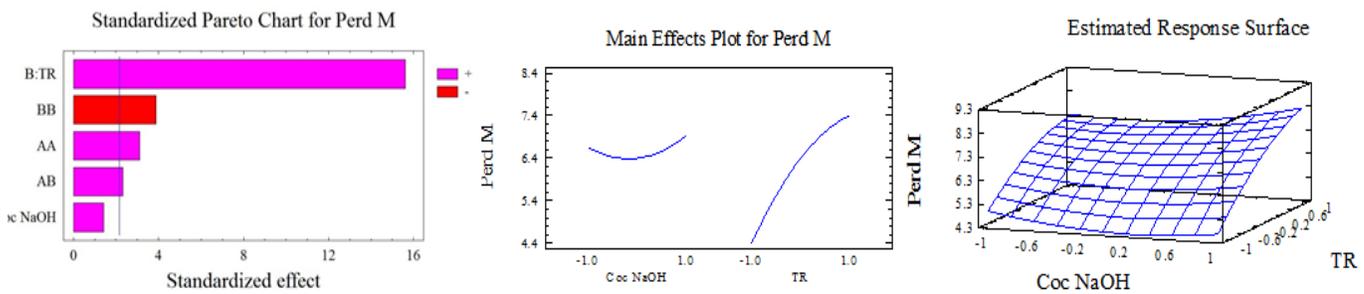


FIG. 2.2 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA LAS PÉRDIDAS DEL MALTEADO

Como se observa en el caso de las Pérdidas en el Malteado la variable más significativa es nuevamente el Tiempo de Remojo en su valor positivo, es decir los máximos de 48 y 55 horas, seguido de la interacción cuadrática del mismo de forma negativa, de la interacción cuadrática de la concentración de NaOH en su forma positiva y en menor medida de la combinación de ambas variables también de forma positiva. Esto demuestra que las pérdidas sufridas durante el malteado aumentan si se trabaja en un rango alto de concentración de NaOH y mayores Tiempos de Remojo, lo cual afecta el rendimiento del proceso. En el caso de la Concentración de NaOH aunque no llega a ser significativa por sí sola, se puede apreciar como para valores altos de la misma se obtienen los mayores porcentos de pérdidas.

Contenido de Extracto

La función objetivo obtenida para esta variable respuesta es la siguiente:

$$\text{Cont Ext} = 0.95925 - 0.0725565 \cdot \text{Coc NaOH} - 0.250489 \cdot \text{TR} - 0.0710002 \cdot \text{Coc NaOH}^2 - 0.11975 \cdot \text{Coc NaOH} \cdot \text{TR} + 0.0342504 \cdot \text{TR}^2$$

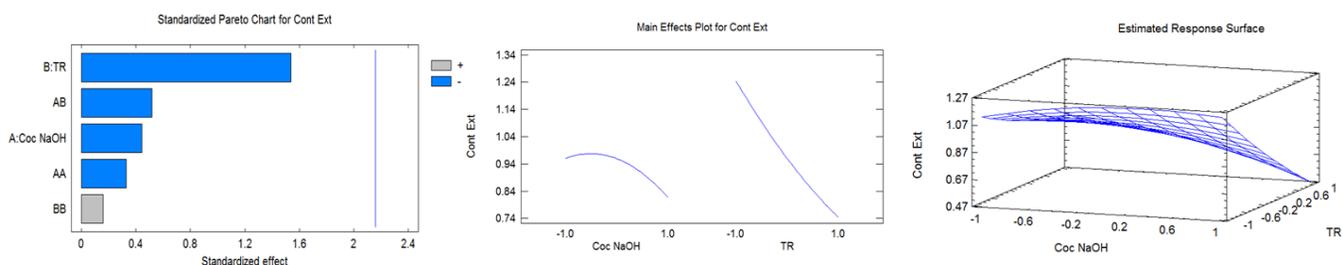


FIG. 2.3 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA EL CONTENIDO DE EXTRACTO

Como se observa en los Diagramas obtenidos ninguna variable resulta ser significativa en este caso del contenido de extracto, aunque cabe destacar la marcada influencia que presenta el tiempo de remojo aunque en su valor negativo.

2.4- Experimento 2: Estudio de Producción de Cerveza a Escala de Laboratorio

Para el comienzo de este experimento se parte de maltear el sorgo para las cantidades requeridas, tomando los mejores resultados obtenidos en el estudio de malteado precedente. Para ello se maltearon 2,2 kg de sorgo, llegando a obtener un 47% de humedad, en rango respecto a la cebada, 71 % de granos germinados, 0,87 g/100 mL de contenido de extracto y pérdidas de un 5,85 %. Debido a estos valores es que se justifica la adición de una enzima exógena para complementar la baja actividad diastática de la malta de sorgo, especialmente debido a que carece de α -amilasa, que es la enzima responsable de producir azúcares fermentables (**Taylor 1992**).

2.5- Variables Respuesta

ART

Los Azúcares Reductores (ART) 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 Lamber-Beer, siendo la absorbancia medida en un espectro fotocolorímetro a 540 nm proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra (**Anexo 9**).

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. Para la determinación del Brix se utiliza un refractómetro (**Anexo 6**).

Grado Alcohólico

El grado alcohólico da la medida de cuanto etanol presentan las cervezas al final de la fermentación, se determina mediante el método picnométrico que se basa en pesar el destilado

obtenido después de hacer ebullición y pasar los vapores a través de un condensador (**Anexo 7 y 8**).

Rendimiento Alcohol-Sustrato

El tiempo real exigido para fermentar una masa varía con el material que se está fermentando, el pH, la temperatura, y otros factores y puede tardar de uno a cuatro días. Para medir la eficiencia del proceso fermentativo se emplean varios indicadores, y uno de estos es el Rendimiento el cual se muestra a continuación.

RENDIMIENTO ALCOHOL – SUSTRATO

$$Y_{P/S} \% = \frac{\%Alch * \rho_{ETANOL}}{Consumo_{ART}}$$

2.6- Estudio de la etapa de Maceración

Este trabajo parte de los resultados obtenidos en un estudio previo de la etapa de maceración realizado por (**Ortega 2016**), en el cual trabaja con una concentración de Enzima Alfa-Amilasa entre 0,05% y 0,08% p/p, una relación Sólido/Líquido entre 96 y 133 g/L y un Tiempo de Acción de la enzima de 1 hora.

En este sentido (**Ortega 2016**) concluye que ocurre un aumento de los azúcares con el tiempo, en el cual se alcanzan los mejores resultados para el experimento con la menor concentración de enzima (0,05%) pero la mayor relación Sólido/Líquido seguido de dos experimentos con igual relación pero con la mayor concentración de enzima (0,08%), lo que parece indicar que la relación Malta/Solución es la variable de mayor influencia en la maceración. Aunque los mayores °Brix obtenidos no son los de mayores ART. Además (**Ortega 2016**) realizó otro estudio en la maceración fuera del diseño experimental, prolongando el tiempo de acción de la enzima exógena Alfa-Amilasa hasta un período de 2 horas con los mayores niveles de las variables que influyeron en esta etapa (133 g/L de malta y 0,08 % p/p de concentración de enzima) obteniendo resultados superiores a los anteriores, siendo los mismos de 6,5 % en cuanto al °Brix y 56,3 g/L en los ART.

Además también constituye un punto de partida el estudio desarrollado por (**Pino 2016**) en el cual las variables analizadas fueron; la Concentración de Enzima α -Amilasa (en este caso de 0,08 - 0,16% p/p) y el Tiempo de Acción de la misma (1 – 2,5 h). (**Pino 2016**) emplea una

relación Malta-Líquido de 133 g/L y además adiciona un 30% de sacarosa como adjunto. En este caso **(Pino 2016)** concluye que los mejores resultados se obtuvieron para los mayores niveles de las variables, es decir, destacando el tiempo de acción de la enzima. Obtenidos estos resultados es por lo que se decide en este proyecto continuar trabajando a partir de los valores alcanzados por **(Ortega 2016)** y **(Pino 2016)**.

En este estudio de la Maceración, para la obtención de cerveza, se aplicó un Diseño de Experimentos Multinivel de tipo 2^k , siendo $k=2$, y se realizó una réplica de los experimentos 3 y 4, resultando 6 experimentos en total. Se trabajaron dos variables, con dos niveles cada una, donde X_1 es la Concentración de la Enzima Alfa-Amilasa (0,35 – 0,7 % p/p) y X_2 es el Tipo de Adjunto a utilizar (Sorgo (-) o Arroz (+)). Los niveles de la enzima fueron superiores a los reportados en trabajos anteriores, debido al uso de enzima de otro suministrador, Bialfa T en lugar de la Termamyl 120 L, que no había dado los mismos resultados en estudios anteriores en cuanto a la conversión de almidones, además de ser los reportados en la ficha técnica de la misma para cervezas. También se tomaron niveles superiores de enzimas pues se trabajó el adjunto como almidón nativo y no como jarabe dextrinizado como lo hizo **(Ortega 2016)** o con el uso de azúcar como lo realizó **(Pino 2016)**. Se tomaron como Variables Respuesta los mencionados en el epígrafe 2.5, es decir los ART del mosto macerado, el consumo de Azúcares Reductores Totales (ART), el Grado Alcohólico de la cerveza y el Rendimiento de la misma. En las **TABLAS 2.5, 2.6 y 2.7** se muestran las variables independientes con los niveles seleccionados y la matriz experimental codificada y decodificada respectivamente.

TABLA 2.5 y 2.6 VARIABLES FIJADAS E INDEPENDIENTES Y SUS NIVELES

VARIABLES FIJADAS	
Relación Adjunto / Malta	30/70
Tiempo de Acción Enzima	1,5 h
Inóculo (Levadura)	1 g/L
Tiempo de Fermentación	5 días
Relación Sólido / Líquido	133 g/L

VARIABLES INDEPENDIENTES	NIVELES
Concentración de Enzima (X_1)	0,35 – 0,7 %
Tipo de Adjunto (X_2)	Arroz- Sorgo

TABLA 2.7 MATRIZ EXPERIMENTAL CODIFICADA Y DECODIFICADA

CORRIDAS	CONCENTRACIÓN DE ENZIMA (% p/p)		TIPO DE ADJUNTO	
	MATRIZ CODIFICADA	MATRIZ DECODIFICADA	MATRIZ CODIFICADA	MATRIZ DECODIFICADA
1	-1	0,35	1	Arroz
2	-1	0,35	-1	Sorgo
3	1	0,7	-1	Sorgo
4	1	0,7	1	Arroz
R3	1	0,7	-1	Sorgo
R4	1	0,7	1	Arroz

En la etapa experimental de maceración se utilizó un beaker como reactor, donde se añaden la malta y el adjunto en proporciones de 70/30 en un litro de agua y es colocado en un termostato (**MARCA U15 MLW**) con el propósito de regular la temperatura, acoplado a un agitador mecánico (**MARCA IKA RW-16**), logrando la homogenización de la mezcla. Se comenzó con un proceso de elevación y mantenimiento de la temperatura escalonadamente. Se realizó el ajuste del pH de la mezcla en un rango de 5,5 a 7 en un pH-metro (**MARCA HANNA 213**). Al alcanzar los 55 °C, se agregó el grano de sorgo, esta temperatura se mantiene durante 30 minutos. Luego se aumentó la temperatura a un rango de 69-72 °C, donde se le adicionó la enzima Bialfa-T (α -Amilasa) y se siguió cocinando durante 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se elevó la temperatura a 80 °C y se conservó por 90 minutos hasta terminar. Este proceso se realiza para lograr la sacarificación de los almidones, es decir la conversión de los almidones en azúcares fermentables. La malta se procesa como en la fábrica, escalando temperaturas en el tiempo para observar el efecto de la misma, también se tomaron tiempos superiores en cada etapa con respecto a la cebada, pues se reportan que para sorgo este proceso es más lento.

Otros experimentos realizados en la Maceración

A los experimentos 3 y 4 se les realizó un estudio adicional del °Brix y los ART durante todo el proceso de Maceración con el objetivo de analizar el comportamiento de los ART de acuerdo al tipo de Adjunto: 3 (Sorgo) y 4 (Arroz) y observar el comportamiento de los mismos.

TABLA 2.8 °BRIX Y ART DURANTE LA MACERACIÓN

CORRIDAS	PARÁMETROS	T= 55°C	T=70°C	T=80°C	Maceración Final (T=80°C)
	TIEMPO (min)	0	30	60	150
3	BRIX	0,6	1	3	6,5
	ART	4,06	5,41	95,56	168,23
4	BRIX	0,4	1	3,1	6,4
	ART	0,02	1,37	90,18	195,14

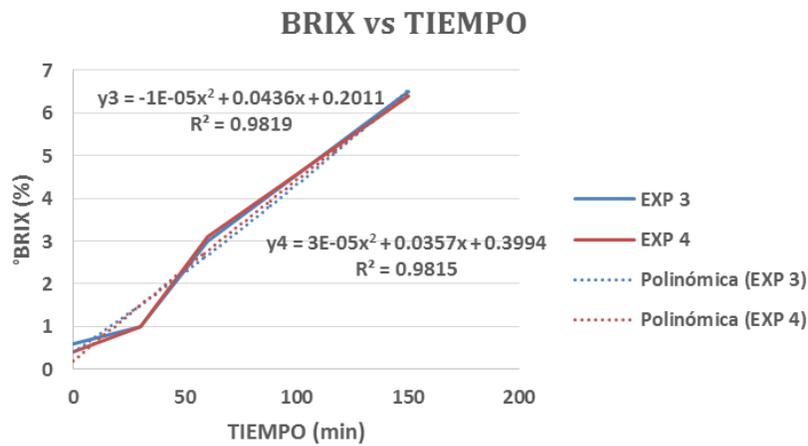


FIG 2.4 COMPORTAMIENTO DE LOS °BRIX DURANTE LA MACERACIÓN

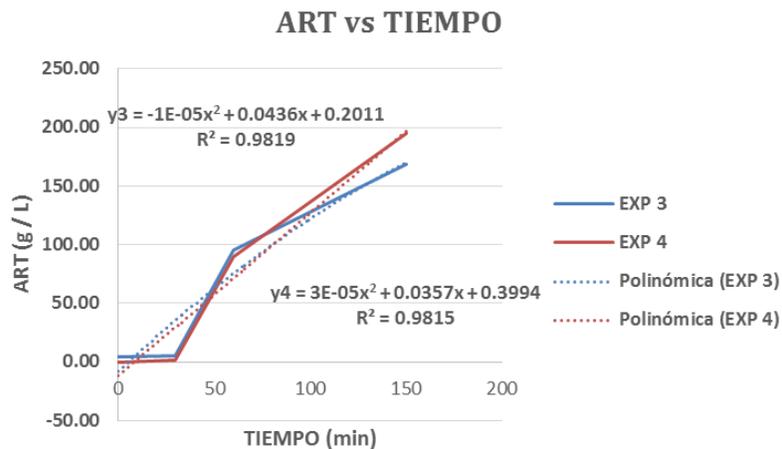


FIG 2.5 COMPORTAMIENTO DE LOS ART DURANTE LA MACERACIÓN

Como puede apreciarse en las FIG 2.4 y 2.5 a medida que transcurre el tiempo de maceración tanto los grados Brix como los ART tienden a aumentar, resultado de la solubilidad y conversión de los almidones, estos valores, en el caso de los ART son más altos al concluir la Maceración que los obtenidos por (Ortega 2016), lo cual se debe a la mayor cantidad de enzima añadida. Estas relaciones responden a polinomios de segundo orden, al igual que la relación entre estas dos variables, mostrada en la FIG 2.6.

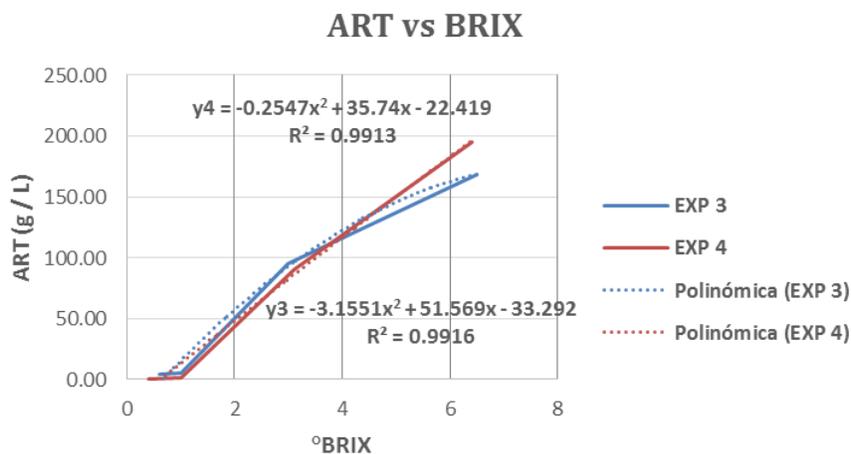


FIG 2.6 CORRELACIÓN ENTRE °BRIX Y ART EN LA MACERACIÓN

A partir de las expresiones obtenidas se procede a realizar estimaciones de los ART a partir del °Brix y a compararlas con los reales obtenidos experimentalmente, para lo que se concluye que existe una desviación en el comportamiento real marcando un 6% como promedio de error en los resultados obtenidos. Los cálculos obtenidos se muestran en la TABLA 2.9

TABLA 2.9 ART ESTIMADOS Y REALES EN LA MACERACIÓN

CORRIDAS	Concentración Enzima (% p/p)	Tipo de Adjunto	°BRIX	ART (g/L) Estimados	ART (g/L) Reales
1	0,35	Arroz	6,5	199,13	222,05
2	0,35	Sorgo	5,4	153,18	164,19
3	0,7	Sorgo	6,5	168,6	168,23
4	0,7	Arroz	6,4	195,88	195,14
R3	0,7	Sorgo	6,5	168,6	192,45
R4	0,7	Arroz	6,6	202,37	253

Como puede apreciarse en la **TABLA 2.9** los valores de ART son extremadamente elevados producto de la concentración de enzima empleada y del tiempo de acción de la misma que fue superior a los experimentos realizados por Ortega. También se pueden apreciar los mayores valores cuando se usa el arroz como adjunto debido a que el mismo presenta mayor contenido de almidón; por tanto es lógico que al ser macerado alcance un mayor contenido de azúcares reductores. Se pudo trabajar en rangos inferiores de concentración de enzima combinado con el tiempo de acción de ella, que en este estudio fue fijado a 1,5 h.

También se observa que no hay correspondencia entre los Grados Brix alcanzados en los mostos, con los ART obtenidos, por lo que resulta difícil ajustar los mostos para la etapa de fermentación teniendo en cuenta los grados platos, aquí se hace necesario ajustarlos por los ART.

2.7- Extracción del Líquido y Lavado

En esta etapa comienza la separación del mosto que se convierte en cerveza, del afrecho. Con un colador grande, se colocó toda la mezcla, guardando el líquido en un beaker y el grano en otro. Cuando se coló todo, se devolvió el grano y se le agregó más agua caliente, esta vez a unos 78°C y se revolvió para que continuaran disolviéndose los azúcares presentes en dicha mezcla. Luego de unos minutos se repitió el colado del grano.

2.8- Hervidura del Mosto

Primeramente se realizó el ajuste del pH de la mezcla en un rango de 4,8 a 5 (con el objetivo de detener la acción de la enzima) en un pH-metro (**MARCA HANNA 213**). Tras el filtrado se introdujo el mosto en el Beaker utilizado y se puso a hervir durante 1 hora, cuando comenzó el hervor se añadió el lúpulo amargo y de 5-10 min antes de terminar el proceso se le adicionó el aromático. Los resultados obtenidos de los Brix y los ART durante esta etapa se muestran en la **TABLA 2.10**

2.9- Adición de los Nutrientes

Se enfrió el mosto y se estabilizó el pH de la solución en un rango de 4,8-5,2 que es en el que trabaja la levadura empleada. Se añadió 1g/L de Sulfato de Amonio y Fosfato de Amonio dibásico empleados como nutrientes. Se añadió la dosis de levadura según el diseño experimental, es decir 1 g/L. La levadura empleada fue la *Saccharomyces cerevisiae* liofilizada. Sus características se muestran en la **TABLA 2.11**

TABLA 2.10 ART Y °BRIX OBTENIDOS CON LA HERVIDURA DEL MOSTO

CORRIDAS	Concentración Enzima (% p/p)	Tipo de Adjunto	°Brix (%)	ART (g/L)
1	0,35	Arroz	6,3	261,07
2	0,35	Sorgo	8	236,85
3	0,7	Sorgo	9	254,35
4	0,7	Arroz	8,5	293,37
R3	0,7	Sorgo	8,6	222,05
R4	0,7	Arroz	8,7	226,09

TABLA 2.11 CARACTERIZACIÓN DE LA LEVADURA EMPLEADA

VALOR NUTRITIVO (por 100 g)	CANTIDAD
Calorías	390 kcal
Grasas	6 g
Saturados	2 g
Colesterol	0 g
Sodio	0,075 g
Calcio	0,045 g
Hierro	0,005 g
Carbohidratos	33 g
Fibra	27 g
Azúcares	0 g
Proteínas	50 g
Vitamina A	0 g
Vitamina C	0,3 g

2.10- Fermentación

La muestra se introdujo en un frasco de cristal (fermentador) de dos litros de capacidad, el cual fue conectado a una Bomba Peristáltica, donde se aireó con el propósito de que el microorganismo adquiriese una reserva de Oxígeno que le permitiera desarrollarse y crecer, esto se realizó debido a que no existía una etapa de prefermentación y se efectuó durante 30

minutos. El proceso de fermentación como tal duró aproximadamente 5 días, en este punto se sabía que el mismo se había detenido pues la levadura se había endurecido y sedimentado.

En las **TABLAS 2.12 y 2.13** se muestran las variables analizadas y las respuestas obtenidas en el estudio de la fermentación así como los parámetros medidos a las cervezas obtenidas:

TABLA 2.12 CONSUMO DE ART Y RENDIMIENTOS DE LAS CERVEZAS OBTENIDAS

CORRIDAS	ART INICIALES	ART FINALES	CONSUMO ART (%)	VOLUMEN FINAL (L)	RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO (%)	RENDIMIENTO Yp/S (%)	RENDIMIENTO TEÓRICO %
1	261,07	56,54	78,34	0,8	80	26,02	51,01
2	236,85	47,12	80,11	0,78	77,5	20,12	39,45
3	254,35	65,96	74,07	0,7	70	32,74	64,21
4	293,37	87,49	70,18	0,68	68	33,77	66,22
R3	222,05	51,16	76,96	0,76	76	38,80	76,08
R4	226,09	57,89	74,40	0,78	78	32,92	64,55

TABLA 2.13 PARÁMETROS FINALES MEDIDOS A LAS CERVEZAS OBTENIDAS

CORRIDAS	Concentración Enzima (% p/p)	Tipo de Adjunto	°Brix (%)	pH	Grado Alcohólico (°GL)
1	0,35	Arroz	5,5	4,53	2,58
2	0,35	Sorgo	5	4,76	2,04
3	0,7	Sorgo	6	4,66	3,07
4	0,7	Arroz	5,4	4,36	3
R3	0,7	Sorgo	5,5	4,81	3,78
R4	0,7	Arroz	5	4,81	3,1

En la **TABLA 2.12** se aprecia que en cuanto a los porcentos de conversión de los azúcares estos oscilan entre 70-80%, al igual que los rendimientos, volumétricos de producto entre 70-80% y los rendimientos en base a alcohol teórico, que oscilan entre 39 y 76%, los cuales no son bajos, por lo que también pudiera pensarse que esté ocurriendo una inhibición por producto en el proceso, lo que debe ser tomado en cuenta en trabajos futuros.

Como se aprecia en la **TABLA 2.13** los valores de grados alcohólicos son bajos pues ninguno alcanza 4 °GL y no se corresponden con el nivel alcanzado en los ART, como es lógico al estar trabajando con ART tan superiores a los que admite la levadura se debe producir una inhibición por sustrato, de ahí los no tan altos grados alcohólicos.

En estos resultados también puede estar influyendo que al emplear una enzima hidrolizante y no sacarificante la cantidad de maltosa y maltotriosa formada sea mayor en proporción que la glucosa formada y que, aunque son azúcares fermentables su conversión en la fermentación por no ser monosacáridos, es inferior que para la glucosa como reporta (**Serna 2005**).

2.11- Filtración

Primeramente se detuvo el proceso de fermentación, siendo necesario calentar el fermento en una hornilla (**MARCA IKA RET**) a temperaturas superiores a los 50°C para detener la actividad de la levadura. Luego la muestra se filtró, utilizando para ello embudos de vidrio y papel de filtro, cayendo el líquido filtrado en un Erlenmeyer de 1000 ml obteniendo así la cerveza clara.

2.12- Análisis Estadístico de la Etapa de Maceración

ART

La función objetivo obtenida para esta variable respuesta es la siguiente:

$$\text{ART} = 199,171 + 3,03375 \cdot \text{Conc Enz} + 24,2138 \cdot \text{Tipo Adj} - 2,34875 \cdot \text{Conc Enz} \cdot \text{Tipo Adj}$$

$$R^2 = 86,5675 \%$$

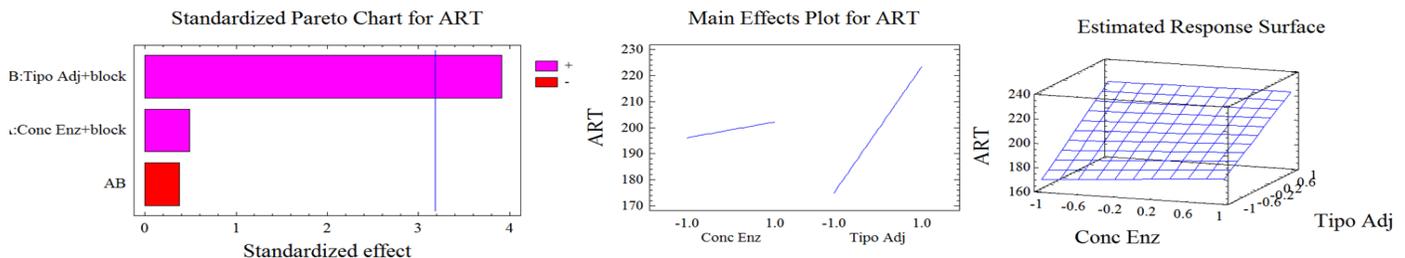


FIG. 2.7 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA LOS AZÚCARES REDUCTORES TOTALES

Como se observa en el caso de los ART la única variable significativa es el Tipo de Adjunto empleado, en su valor positivo, es decir el Arroz. Si se observa el Diagrama de Efectos Principales se aprecia que en este caso la concentración de Enzima no tiene significación para

los ART ya que los mismos se mantienen prácticamente constantes, por lo que se pudiera trabajar con la menor concentración, o inferior a ésta, combinándola como se dijo con su tiempo de acción.

Grado Alcohólico

La función objetivo obtenida para esta variable respuesta es la siguiente:

$$\text{Gr Alc} = 2.715 + 0.5225 \cdot \text{Conc Enz} - 0.0325 \cdot \text{Tipo Adj} - 0.155 \cdot \text{Conc Enz} \cdot \text{Tipo Adj}$$

$$R^2 = 86,1764 \%$$

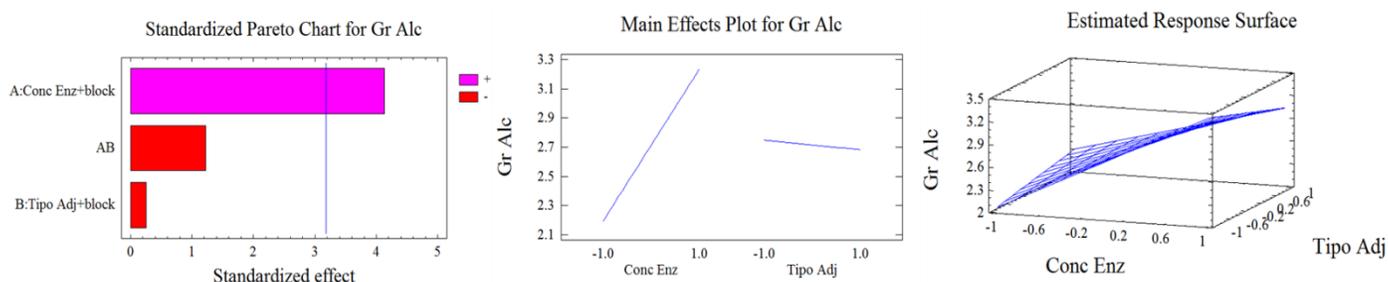


FIG. 2.8 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA EL GRADO ALCOHÓLICO

Como se aprecia anteriormente en el Grado Alcohólico la única variable significativa es la Concentración de Enzima a emplear en su valor positivo. Si se observa el Diagrama de Efectos Principales se ve como efectivamente se obtiene el mayor Grado Alcohólico cuando la concentración de Enzima es máxima, pero para el tipo de Adjunto no sucede lo mismo, ya que el Grado Alcohólico se mantiene casi constante destacando un leve aumento para el caso del sorgo. Estos resultados son lógicos, debido a que la levadura trabaja sobre los azúcares que ya están presentes en el mosto independiente de la procedencia de los mismos.

Rendimiento

La función objetivo obtenida para esta variable respuesta es la siguiente:

$$\text{Rend} = 56.5523 + 11.2102 \cdot \text{Conc Enz} + 1.61564 \cdot \text{Tipo Adj} - 3.99627 \cdot \text{Conc Enz} \cdot \text{Tipo Adj}$$

$$R^2 = 95,2773 \%$$

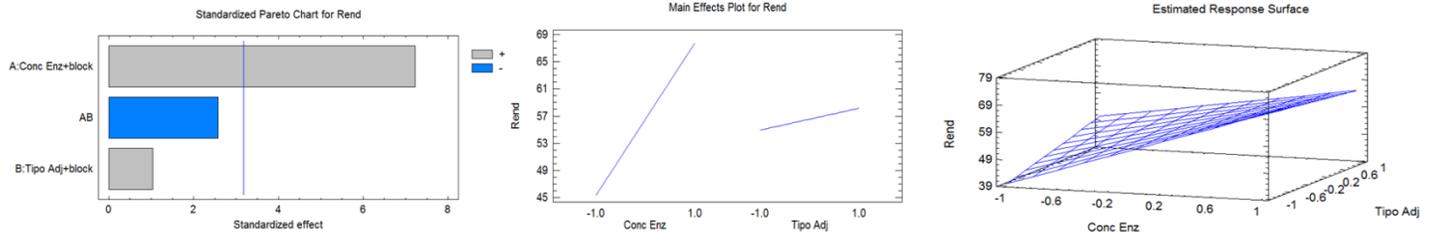


FIG. 2.9 DIAGRAMAS DE PARETO, EFECTOS PRINCIPALES Y SUPERFICIE RESPUESTA PARA EL RENDIMIENTO

Como se aprecia anteriormente en el Rendimiento la única variable significativa es la Concentración de Enzima a emplear en su valor positivo. Si se observa el Diagrama de Efectos Principales se ve como efectivamente se obtiene el mayor Rendimiento cuando la concentración de Enzima es máxima, pero para el tipo de Adjunto no sucede lo mismo ya que el Rendimiento se mantiene casi constante destacando un leve aumento para el caso del Arroz.

Estos resultados pudieron ser mejores si se hubiera trabajado ajustando los ART con los que trabaja óptimamente la levadura empleada, obteniéndose rendimientos superiores y mejores grados alcohólicos, pues evidentemente debe estar ocurriendo una inhibición por sustrato. También como se planteó en el análisis de la maceración debió combinarse el efecto de la concentración de enzima con el tiempo para lograr mejores resultados. No obstante se obtuvieron cervezas con buen color, sabor y grado alcohólico similares a las reportadas por otros autores empleando sorgo.

De todos los resultados obtenidos puede apreciarse que en términos generales la concentración de enzima tiene influencia en la producción de cerveza, lo que debe valorarse su efecto en cada una de las etapas del proceso, también valorar el empleo de una enzima sacarificante, con el objetivo de obtener más glucosa en los mostos macerados.

***CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UNA
PLANTA PARA LA
PRODUCCIÓN DE CERVEZA***

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA

En el caso de este proyecto se necesita diseñar una planta para la producción de Cerveza a partir de malta de sorgo, empleando **0,7% p/p** de enzima exógena Alfa-Amilasa y **Sorgo** como adjunto que fue el experimento de mejores resultados (**Réplica Exp 3**). Este capítulo se basa fundamentalmente en el Diseño y la Selección del Equipamiento del Proceso y esto se extiende desde el propio diseño de una planta para maltear el sorgo, con una capacidad de 1230 kg/día de malta, como propiamente la de una de producción de cerveza para **100 HL/día**, por lo que se hace necesario efectuar los Balances de Materiales con el objetivo de analizar y chequear las diferentes corrientes del proceso y realizar el análisis económico para ver la rentabilidad de la misma.

3.1- Proceso de Malteado de los Granos de Sorgo

El malteado resulta de crucial importancia para la producción de cerveza ya que constituye la preparación del grano antes de utilizarlo en el proceso; en la actualidad nuestro país no cuenta con la tecnología destinada a estos fines, la cual se muestra en este trabajo, para ello se parte de una capacidad de **1230 kg/día** de malta de sorgo producida. Las etapas del proceso se muestran en el Diagrama de Bloques y el de Flujo del proceso de malteado del sorgo (**Anexos 11 y 12**)

3.2- Balance de Masa en el Malteado

Para el desarrollo de estos cálculos se tomó como base una demanda de 1233 kg/día de malta de sorgo es decir la necesaria para la producción de cerveza (obtenida del balance a partir de los 100 HL fijados y a partir de la cantidad de personas celíacas que existen en nuestro país.

TABLA 3.1 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE MALTEADO DEL SORGO

CÁLCULOS BALANCE DE MASA		
M_L	1233	(kg / día)
$R = 5\% M_L$	61,67	(kg / día)
$M_S = M_L + R$	1294,98	(kg / día)
$V = 30\% G$	554,99	(kg / día)
$G = M_S + V$	1850	(kg / día)
$S_L = G / (1+0,3)$	1423,1	(kg / día)
$S_H = S_L(1+0.45)$	2063,4	(kg / día)
$I = 10\% S$	158,1	(kg / día)
$S = S_L + I$	1581	(kg / día)

CÁLCULO DE G
$G = M_S + V$
$G = M_S + 0.3 G$
$(1 - 0,3)G = M_S$
$G = M_S / 0,66$

CÁLCULO DE S
$S = S_L + I$
$S = S_L + 0.1 S$
$(1 - 0,1)S = S_L$
$S = S_L / 0,9$

Es válido aclarar que para realizar el cálculo de las corrientes V y S_L se procede a determinar el % de Humedad en el Remojo y la Germinación, este se obtiene por medio del pesaje de los granos durante cada una de las etapas experimentales del malteado realizado en el Capítulo 2, obteniendo para ambos un 30% de humedad. Por lo que se puede resumir que para producir **1233 kg/día** de malta se necesitan aproximadamente **1581 kg/día** de sorgo.

TABLA 3.2 LEYENDA BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE MALTEADO DEL SORGO

LEYENDA	
S	Granos de sorgo
I	Impurezas
S_L	Granos Limpios de Impurezas
S_H	Granos de sorgo húmedos
G	Granos Germinados
V	Agua Evaporada
M_S	Malta Seca
R	Raicillas
M_L	Malta Limpia Final

3.3- Selección y Diseño del Equipamiento para el Proceso de Malteado

Tanques de Almacenamiento

Los tanques apropiados para el almacenamiento de la materia prima son los denominados silos, ya que estos son los únicos utilizados para el almacenamiento de sólidos y además cumplen con los requisitos del proceso. **(Anexo 20)**

Cribas

En la actualidad el cribado industrial de materiales granulares de diversos tamaños se lleva a cabo por medio de cribas vibratorias, debido a que las mismas presentan gran capacidad y poco gasto de energía. Las cribas que se pueden usar miden 33 mm (13") de diámetro, y 47.5 mm (1 7/8") de profundidad, con agujeros circulares de 1/12" para semillas pequeñas o de triángulo con círculo inscrito de 5/64" (triángulo de 8/64"). **(Anexo 20)**

Tanques de Remojo

Para la etapa de remojo del grano de sorgo se seleccionó un tanque de fondo cónico ya que el material a trabajar es una mezcla de sólidos y líquidos, además esta forma geométrica facilita la aireación y además el cargue y descargue del contenido, así como la limpieza del tanque. **(Anexo 21)**

Germinador

La germinación usualmente es llevada a cabo por uno o dos métodos:

1. Método de Tambor
2. Método de Compartimentos

Como la calidad de la malta es la misma en ambos métodos, entonces se pretende utilizar el de Compartimento por presentar menor Costo de Inversión y Mantenimiento. **(Anexo 21)**

Secadero

En la etapa de secado en este caso pudiesen utilizarse o un Secadero de Bandejas o uno de Lecho Fluidizado, se opta por el Secadero de Bandejas por ser el más utilizado en el secado de estos granos a nivel mundial y además presentar menor costo de adquisición en el mercado. **(Anexo 22)**

El número de equipos a utilizar en esta planta aparece reflejado en la **TABLA 3.7** de la Sección de Economía.

3.4- Proceso de Producción de Cerveza

El proceso de producción de cerveza consta de varias etapas en su interior, las cuales se representan en el Diagrama de Bloques y de Flujo (**Anexos 13 y14**).

3.5- Balances de Materiales en la Producción de Cerveza

Para determinar los valores de las corrientes que se manejarán en el proceso es necesario realizar los balances pertinentes. En la ejecución se deben de tener en cuenta los criterios para el uso de los mismos, ya sea parcial como total, tomando en consideración los principios básicos de la Ingeniería Química.

TABLAS 3.3 y 3.4 LEYENDAS DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

LEYENDA BALANCE DE MASA	
M	Malta de Sorgo
M _M	Malta de Sorgo Molida
M _{ADJ}	Malta de Adjunto
M _{MAC}	Masa Mosto Macerado
M _{H₂O}	Masa de Agua Macerado
E _{H₂O}	Masa de Agua Evaporada
V _{H₂O}	Volumen de Agua Macerado
M _E	Masa de Enzima
M _A	Masa de Agua Filtrado
M _{F₁}	Masa Mosto Filtrado
A _f	Masa de Afrecho
M _{L1}	Masa de Lúpulo Amargo
M _{L2}	Masa de Lúpulo Aromático
M _C	Masa Mosto Cocido
M _{LEV}	Masa de Levadura
M _{SULF}	Masa de Sulfato de Amonio
M _{FERM}	Masa Fermento
M _{NITR}	Masa de Nitrato de Amonio
D _{FILT}	Desecho de Filtrado
F _{FILT}	Fermento Filtrado
M _{CERV}	Masa Cerveza
C	Volumen Cerveza
ρ _{H₂O}	Densidad del Agua
ρ _{ENZIMA}	Densidad de la Enzima
ρ _{CERVEZA}	Densidad de la Cerveza

LEYENDA BALANCE DE ENERGÍA	
T _i	Temperatura Entrada Macerador (°C)
λ	Calor Latente
T _f	Temperatura Salida Macerador (°C)
Q _c	Calor Cedido
Q _g	Calor Ganado
T _e	Temperatura Entrada Tacho (°C)
T _s	Temperatura Salida Tacho (°C)
ΔT	Variación de temperatura °C.
C _{p1}	Capacidad Calorífica Entrada Macerador
C _{p2}	Capacidad Calorífica Salida Macerador
V ₁	Masa Vapor necesaria en Macerador (kg)
V ₂	Masa Vapor necesaria en Tachos (kg)
V _{TOTAL}	Vapor Total del Proceso
M _{COMB}	Masa Combustible

Balances de Masa

TABLA 3.5 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA

BALANCE DE MASA (Base 1 día de Operación)								
EQUIPOS	DATOS		ECUACIONES (BALANCE TOTAL)	RESULTADOS				
FERMENTADOR	C (HL)	100	$C = 0.8 * V_{H_2O}$	V_{H_2O} (HL)	125			
	C (L)	10 000	$M_{CERV} = C * \rho_{CERVEZA}$	M_{CERV} (kg)	9 982,4			
	C (m ³)	10						
	$\rho_{CERVEZA}$ (kg /m ³)	998,24	$F_{FILT} = M_{CERV}$ $M_{FERM} = F_{FILT} + D_{FILT}$ $M_C = M_{FERM} - M_{LEV} - M_{SULF} - M_{NITR}$	F_{FILT} (kg)	9 982,4			
	M_{CERV} (kg)	9 982,4				M_{FERM} (kg)	12 323,95	
	$D_{FILT} = 19\% M_{FERM}$ (kg)	2 341,55						
M_{LEV} (kg)	12,5	M_C (kg)						12 286,45
M_{SULF} (kg)	12,5							
M_{NITR} (kg)	12,5							
TANQUE DE COCCIÓN	M_{L1} (kg)	12,5	$M_{F1} = M_C - M_{L1} - M_{L2}$	M_{F1} (kg)	12 261,45			
	M_{L2} (kg)	12,5						
FILTRO	M_{H_2O} (kg)	12 500	$M_{MAC} = M_{F1} + A_f - M_A$	M_{MAC} (kg)	11 962,51			
	ρ_{AGUA} (kg/ m ³)	1 000						
	$M_A = 20\% M_{H_2O}$ (kg)	2 500						
	$A_f = 94\% D_{FILT}$ (kg)	2 201,1						
MACERADOR	M_{H_2O} (kg)	12 500	$M_M = M_{MAC} - M_{H_2O} - M_E - M_{ADJ} + E_{H_2O}$	M_M (kg)	1 233,31			
	ρ_{ENZIMA} (kg/L)	1,26						
	Cant Enzima (L / L H ₂ O)	1,06E-03						
	M_E (kg)	16,695						
	M_{ADJ} (kg)	712,5						
$E_{H_2O} = 20\% M_{H_2O}$ (kg)	2 500							
MOLINO	M_M (kg)	1 233,31	$M_M = M$	M (kg)	1 233			

Balances de Energía

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

TABLA 3.6 BALANCE DE ENERGÍA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA

BALANCE DE ENERGÍA					
EQUIPOS	DATOS		ECUACIONES	RESULTADOS	
MACERADOR	Ti (°C)	50	$Q_g + Q_c = 0$	Qg (kJ)	154861
	Tf (°C)	80	$Q_g = - Q_c$	Qc (kJ)	-154861
	Cp1 (kJ/kg)	4,1854	$Q_g = M_M * Cp1 * \Delta T$		
	λ (kJ/kg °C)	2767.5	$Q_c = V_1 * \lambda$	V ₁ (kg)	55,96
	M _M (kg)	1233	$V_1 = Q_c / \lambda$		
TANQUE DE COCCIÓN	Te (°C)	30	$Q_g + Q_c = 0$	Qg (kJ)	3622661
	Ts (°C)	100	$Q_g = - Q_c$	Qc (kJ)	-3622661
	M _c (kg)	12286	$Q_g = M_c * Cp2 * \Delta T$		
	Cp2 (kJ/kg °C)	4,2121	$Q_c = V_2 * \lambda$	V ₂ (kg)	1309,01
	λ (kJ/kg)	2767,5	$V_2 = Q_c / \lambda$		
CALDERAS	P (MPa)	0,784	$V_{TOTAL} = V_1 + V_2$	V _{TOTAL} (kg)	1364,97
	η	0,8	$Q_g + \eta * Q_c = 0$	Qg (kJ)	3778376
	P _{COMB} (kJ/kg)	43064	$Q_g = - Q_c / \eta$	Qc (kJ)	-3022701
	$\Delta H_{VAP SAT}$ (kJ/kg)	2768,1	$Q_g = V_{TOTAL} * \Delta H_{VAPOR}$ $Q_c = M_{COMB} * P_{COMB}$	M _{COMB} (kg)	84,12

3.6- Selección y Diseño del Equipamiento para la Etapa de Producción de Cerveza

El diseño de los equipos empleados se realizó a partir de la propuesta de instalación de una planta piloto de producción cerveza de sorgo con capacidad de 100 HL. Para este caso se toman como referencias el **(Rosabal and V. 1989)**, **(Ulrich 1985)**, **(Pavlov 1981)**, **(Kern 1988)**, entre otros.

Se deben seleccionar Equipos para las siguientes operaciones:

1. Reducción de Tamaño
2. Transporte de sólidos
3. Calentamiento y cocción a presión de la masa
4. Enfriamiento de la masa
5. Filtración

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** del **(Peters 1991)**, 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 Alta Velocidad 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. **(Anexos 16)**

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, por lo que para la selección de los mismos se compara si utilizar una chaqueta o un serpentín **(Anexo 17)**. Para estas dos etapas del proceso se escogen tanques enchaquetados con agitación, debido a las cantidades de calor que se debe manejar, a pesar de ser recipientes relativamente pequeños, no importó el alto costo de las chaquetas, frente a la gran eficiencia de las mismas en dicho proceso. **(Anexo 23)**

Agitador

En la selección de los agitadores se tuvo 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. **(Anexo 17 y 24)**

Filtros

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, tomándose la decisión de seleccionar un filtro de marcos y placas. Al ser seleccionado un filtro de marcos y placas de acción continua por las características del mismo, uno de los parámetros más importantes en el diseño y operación del mismo es el área y el espesor del sedimento. **(Anexo 16)**

Fermentador y Tanques de Reposo del Producto Final

Este equipo es uno de los más importantes en el proceso pues en él ocurre la transformación del mosto lupulizado en cerveza. En el caso del fermentador y de los tanques de almacenamiento del producto final es necesario uno 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 trabajan en un intervalo de -250 a 800°C, con una presión máxima de 14 atm. **(Anexo 25)**

Transportadores

Los transportadores son usados para trasladar la malta y los adjuntos desde su recepción hasta los elevadores. Para la selección de ellos se tuvieron en cuenta parámetros tales como diámetro o anchura, longitud, capacidad máxima de sólidos expresado en m³/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 sinfín, 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. **(Anexo 18)**

Bombas

Existen diversas variedades de bombas dentro de las que se destacan para el uso industrial las bombas centrífugas y las recíprocante o de desplazamiento positivo. Tomando como patrón las características de los fluidos a tratar las bombas seleccionadas fueron centrífugas de flujo axial. Además estas sirven para mover grandes volúmenes de líquido, con bajos diferenciales de presión. **(Anexo 19)**

Válvulas

Para realizar la selección de la válvula, se compara entre válvulas de globo, válvulas de compuerta y válvulas de cheque, y de acuerdo a las características de cada una, se selecciona la válvula de globo **(Anexo 19)**.

3.7- Análisis Económico del Proceso

3.7.1- Cálculo del Costo de Adquisición del Equipamiento

Índice Actual..... **553,1 (ChemicalEngineering mayo 2017)**

Índice Original..... **576,1 (ChemicalEngineering 2014)**

El costo Original del Equipamiento fue calculado a través la metodología propuesta por **(www.matche.com/equipcost 2014)**.

$$COSTO_{ACTUAL} = COSTO_{ORIGINAL} * \frac{ÍNDICE_{ACTUAL}}{ÍNDICE_{ORIGINAL}}$$

TABLA 3.7 CÁLCULO COSTO TOTAL DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPAMIENTO

ÍNDICE DE COSTO ORIGINAL (Chemical Engineering 2014)				576,1
ÍNDICE DE COSTO ACTUAL (Chemical Engineering Enero 2017)				553,1
EQUIPAMIENTO	Nº EQUIPOS	COSTO ORIGINAL (\$)	COSTO ACTUALIZADO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Tanque de Almacenamiento	4	8 800	8 448,67	33 794,69
Transportador (Tornillo Sin Fin)	3	5 300	5 088,4	15 265,21
Cribas	3	7 000	6 720,53	20 161,60
Tanques de Remojo	2	11 400	10 944,87	21 889,74
Germinador	2	6 000	5 760,46	11 520,92
Secadero	2	8 500	8160,65	16 321,3
Molino de Martillos	1	9380	9005,52	9005.52
Condensador	1	25 00	2 400,19	2 400,19
Agitador	1	4 600	4 416,35	4 416,35
Tanque Macerador	1	10 000	9 600,76	9 600,76
Tanque Cocción	1	10 000	9 600,76	9 600,76
Filtro de Placas	2	1304	1251,94	2503,88
Fermentador	1	9 000	8 640,69	8 640,69
Tanques de Reposo	2	8 800	8 448,67	16 897,34
Válvulas	10	79	76	760
Bomba Centrífuga	4	4 600	4 416,35	17 665,41
COSTO TOTAL DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPAMIENTO (\$)				\$ 200 444,36

3.7.2- Cálculo del Costo Total de Inversión

La estimación del Costo Total de Inversión se realizó utilizando los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes a la **TABLA 17** del **(Peters 1991)**, adaptándolas a las características de la Inversión propuesta en este proyecto.

$$\text{CTI} = \text{Costo Fijo de Inversión (CFI)} + \text{Inversión de Trabajo (IT)}$$

$$\text{CTI} = \text{CFI} + \text{IT}$$

$$\text{IT} = 15 \% \text{ CTI}$$

CFI = Costos Directos+ Costos Indirectos + Derecho de Contrato + Contingencia

CFI = CD + CI + DC + C

TABLAS 3.8, 3.9 y 3.10 CÁLCULOS DEL COSTO TOTAL DE INVERSIÓN

COSTOS DIRECTOS		
COMPONENTE	%	COSTO (\$)
Costo del equipamiento (E)	E	\$ 200 444 ,36
Instalación	39% E	\$ 78 173,30
Instrumentación	13% E	\$ 26 057,77
Electricidad	10% E	\$ 20 044,44
Tuberías	30% E	\$ 60 133,31
Facilidades de Servicio	55% E	\$ 110 244,40
CD		\$ 294 653,21

COSTOS INDIRECTOS		
COMPONENTE	%	COSTO (\$)
Ingeniería y supervisión	35% E	\$ 70 155,53
CI		\$ 70 155,53
CD + CI		\$ 364 808,74

OTROS COMPONENTES	%	COSTO (\$)
Derecho de Contrato	5% (CD + CI)	\$ 18 240,44
Contingencia	10% (CD + CI)	\$ 36 480,87
Inversión de trabajo (IT)		0,15*CTI
Costo Fijo de Inversión (CFI)		\$ 419 530,05
Costo Total de Inversión (CTI = IT+ CFI)		\$ 493 564,76

El Costo Total de Inversión de la planta de Malteado y la de producción de cerveza de sorgo es de \$ 493 564,76.

3.7.3- Cálculo del Costo Total de Producción

1.1- 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 1991)**. Los precios de venta de los productos obtenidos se toman de los valores reportados por la Cervecería "**ANTONIO DÍAZ SANTANA**".

CTP = Costo de fabricación (CF) + Gastos Generales (GG)

CTP = CF+ GG

CF = Costos directos (CD) + Cargos Fijos (Cf) + Costos Indirectos (CI)

CF= CD + Cf + CI

GG = Distribución y Venta (DV) + Admón. (A) + Inves. Y Des (ID)

$$DEPRECIACIÓN = \frac{CFI - VR}{Vd}$$

VR: valor residual (VR=0)

Vd: vida útil igual a 15 años

TABLA 3.11 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL DE LAS MATERIAS PRIMAS

MATERIAS PRIMAS	PRECIO (\$/kg)	CANTIDAD (kg/año)	COSTO (\$/año)
Granos de sorgo	0,1839	474 300	87 223,77
Enzima Alfa-Amilasa	4	5 008,5	20 034
Lúpulo Aromático	28,6	1 780	50 885,26
Lúpulo Amargo	22,2	1 465	32 467,19
Levadura	7,5	3 750	28 125
Nitrato de Amonio	13,5	3 750	50 625
Sulfato de Amonio	16,2	3 750	60 862,5
Gas Carbónico	0,35	314	108,74
COSTO TOTAL DE LA MATERIA PRIMA (\$/año)			\$ 330 331,46

TABLA 3.12 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL DE LOS REQUERIMIENTOS

COSTO DE LOS REQUERIMIENTOS						
REQUERIMIENTOS	PRECIO		CANTIDAD		RESULTADO	
	VALOR	UM	VALOR	UM	VALOR	UM
Electricidad	0,09	\$ / kW h	40 000	kW/año	3 600	\$ / año
Combustible	0,66	\$/kg	25 236,8	kg/año	16 656,3	\$ / año
Agua	0,32	\$/m ³	4500	m ³ /año	1440	\$ / año
COSTO TOTAL REQUERIMIENTOS (\$/año)					\$ 21 696,3	\$ / año

**TABLA 3.13 CÁLCULO DEL COSTO
TOTAL DE LA MANO DE OBRA**

COSTO MANO DE OBRA	
INDICADORES	CANTIDAD
Obreros por turnos	10
Turnos por días	2
\$/horas, operador	1.8
Días de trabajo	300
Costo Total de Mano de Obra (\$/año)	\$ 259 200

**TABLA 3.14 CÁLCULO DE LA
DEPRECIACIÓN**

CÁLCULO DE LA DEPRECIACIÓN	
INDICADORES	CANTIDAD
Costo Fijo de Inversión (CFI)	\$ 419 530,05
Valor Residual (VR)	0
Vida Útil (VD) (años)	15
DEPRECIACIÓN	\$ 27 968,67

TABLA 3.15 CÁLCULO DE LOS COSTOS DIRECTOS

COSTOS DIRECTOS		
INDICADORES	%	COSTO \$/año
Materias Primas	-	\$ 330 331,46
Mano de Obra	-	\$ 259 200
Supervisión	15 % MO	\$ 38 880
Requerimientos	-	\$ 21 696,3
Mantenimiento y Reparaciones	2 % CFI	\$ 8 390,60
Suministro	0,5 % CFI	\$ 2 097,65
Laboratorio	1 % MO	\$ 2 592
TOTAL COSTOS DIRECTOS (\$/año)		\$ 663 188,01

TABLA 3.16 CÁLCULO DE LOS CARGOS FIJOS

CARGOS FIJOS		
Depreciación	CFI / Vida útil	\$ 27 969,67
Seguros	0,4 % CFI	\$ 1 678,12
Impuestos	1 % CFI	\$ 4 195,30
TOTAL CARGOS FIJOS (\$/año)		\$ 33 842,09

TABLA 3.17 CÁLCULO DE LOS GASTOS GENERALES

GASTOS GENERALES		
INDICADOR	FÓRMULA	COSTO \$/año
Administración	2 % CTP	\$ 16 210
Distribución y Venta	2 % CTP	\$ 16 210
Investigación y Desarrollo	5 % CTP	\$ 40 250,06
TOTAL GASTOS GENERALES (\$/año)		\$ 72 945,01

TABLA 3.18 CÁLCULO DE LOS COSTOS INDIRECTOS Y EL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

COSTOS INDIRECTOS		
Costos Indirectos	5%CTP	\$ 423 361,38
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN (\$/año)		\$ 810 500,11

El Costo Total de Producción de la planta de Malteado y la de producción de cerveza de sorgo es de **810 500,11 \$/año**.

3.7.4- Cálculo de la Ganancia

Para el cálculo de la Ganancia del Proceso Productivo se utiliza la siguiente ecuación:

$$G = PVP - CTP$$

Donde

G: Ganancia

PVP: Precio de Venta del Producto

CTP: Costo Total de Producción

TABLA 3.19 CÁLCULO DE LA GANANCIA DEL PROCESO

Producto	Precio	Cantidad Anual	Valor del Producto (\$/año)
Cerveza	1,3 (\$/L)	3 000 000 (L /año)	\$ 3 900 000
Afrecho	0,4 (\$/Kg)	660 317 (kg/año)	\$ 264 126,91
Precio de venta de los productos finales (\$)			\$ 4 164 126,91
Costo Total de Producción (\$)			\$ 810 500,11
Ganancia (\$/año)			\$ 3 353 626,80

La Ganancia del Proceso Productivo es de \$ 3 353 626,80 por lo que puede concluirse que esta planta de producción de cerveza es rentable para la capacidad seleccionada de 100 HL/día.

3.7.5- Indicadores Dinámicos de Factibilidad

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los más importantes indicadores económicos que se tuvo en cuenta, ya que es el valor obtenido cuando se termina la vida útil y es la forma de comprobar si la inversión propuesta en este planta productiva es rentable o no.

$$VALOR ACTUAL NETO = \sum_{k=1}^n \frac{FLUJO DE CAJA}{(1+i)^k} - INVERSIÓN TOTAL$$

TABLA 3.20 CÁLCULO DE LOS INDICADORES DINÁMICOS DE FACTIBILIDAD

Valores Dinámicos de la Factibilidad	
Valor Actual Neto (VAN)	14 760 706,1 \$
Tasa Interna de Rend. (TIR)	250,1 %
Ganancia	3 353 626,80 \$/año
Costo Unitario	0,27 \$/kg
Costo Unitario (botella de 300 mL)	0,0851 \$/botella

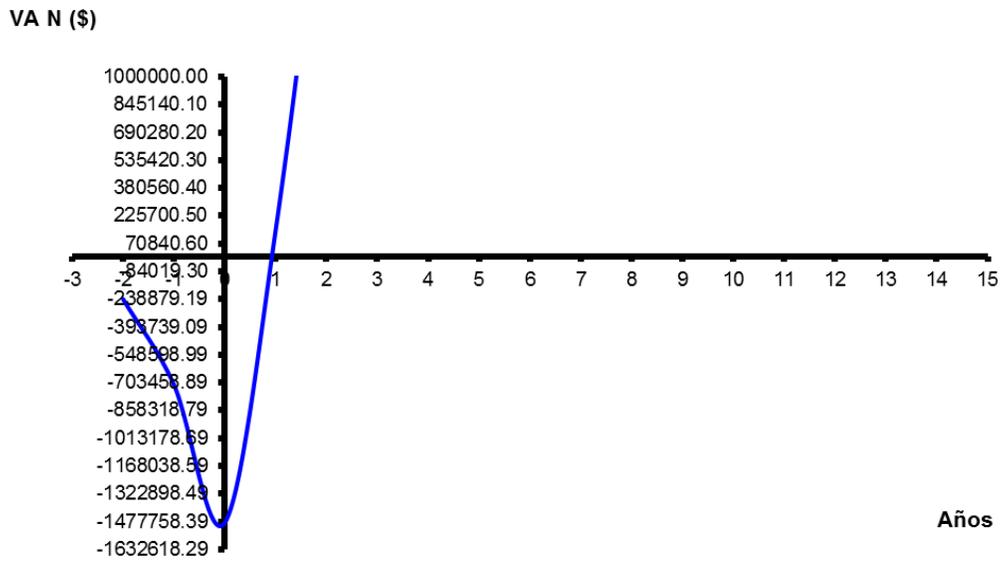


FIG. 3.1 PERFIL DEL VAN PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA DE SORGO

De acuerdo al perfil obtenido se puede concluir que la Inversión propuesta en este proyecto puede ser recuperada en aproximadamente 1 año, aunque su objetivo fundamental es social, brindar una bebida para los enfermos celíacos.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. En el estudio de malteado del sorgo, se obtienen valores de 46 % de humedad en el remojo, 62 % de granos germinados, 6,34% de pérdidas en el malteado y un contenido de extracto de 0,93 g/100mL como promedio, valores bajos para la germinación y el contenido de extracto, lo que refleja resultados deficientes en el malteado, debido a la mala calidad del sorgo empleado.
2. En el proceso de maceración de la malta los valores de ART son elevados dada la concentración de enzima añadida, la cual no fue significativa en el estudio, por lo que se puede evaluar disminuir su concentración combinado con el tiempo de acción de la misma. La variable significativa fue el tipo de adjunto, resultando mejor el de arroz debido al contenido de almidón presente en este cereal.
3. El ajuste de la curva cinética de la maceración permitió con los Grados Brix estimar el comportamiento de los ART para cada tipo de adjunto empleado, los cuales difieren al final de la maceración con los reales en un rango de 6,0% como promedio.
4. De las dos variables independientes estudiadas en la etapa de fermentación, la concentración de enzima Bialfa T fue la única significativa en las variables respuesta principales seleccionadas (Consumo de ART, Grado Alcohólico y Rendimiento). Resultando el de mejores resultados en cuanto a Grado Alcohólico la réplica del experimento 3 con la mayor concentración de enzima y usando sorgo como adjunto.
5. En la etapa de fermentación debieron ser ajustados los ART a los valores con que trabaja la levadura y no siguiendo los valores de Brix, debido al comportamiento que tiene esta variable para este tipo de sustrato y para la enzima empleada.
6. Las propiedades organolépticas de las cervezas obtenidas para las mejores muestras están acordes con las elaboradas por otros autores empleando los mismos sustratos y enzimas exógenas, aunque con un menor desarrollo del sabor y capacidad espumante que las elaboradas convencionalmente a partir de malta de cebada.
7. El análisis económico de la inversión de una planta de producción de malta y otra de cerveza a partir de sorgo, para un precio de venta de 1,3 \$/kg la cerveza, y el afrecho a 0,40 \$/kg, dio rentable, dada la capacidad seleccionada de 100 HL/día, para un Período de Recuperación de la Inversión de aproximadamente **1 año**, lo cual puede satisfacer el consumo de los 250 000 adultos celíacos que hay en el país.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de la variación del Brix con los azúcares reductores para este tipo de sustrato que contiene almidones empleando para los ART los métodos de Eynon-Lane y el del 3-5 Dinitrosalicílico.
2. Continuar estudiando la etapa de maceración combinando la concentración de enzimas exógenas con el tiempo de acción de la misma y empleando una enzima sacarificante.
3. Estudiar con mayor profundidad la etapa fermentativa, ajustando los ART a los valores establecidos para la levadura, para la obtención de mejores resultados en cuanto a Grado Alcohólico y Rendimiento.
4. Realizar el estudio de inhibición enzimática en el proceso fermentativo para esta variedad de sorgo como sustrato.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLOGRAFÍA

1. ([http://cerveceros-caseros.com/index.php/articulos/ingredientes/224-los adjuntos-2](http://cerveceros-caseros.com/index.php/articulos/ingredientes/224-los-adjuntos-2))."
2. Agu,R.C. and G. H.Palmer (1996). "Enzymatic breakdown of endosperm proteins of sorghum at different malting temperatures."J.Inst. Brew. 102:415- 418.
3. Aisien, A. O. and G. H. Palmer (1983). "The sorghum embryo in relation to the hydrolysis of the endosperm during germination and seedling growth." J. Sci. Food Agric. 34: 113-121.
4. Alemán, L. (2007). Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de lasVillas.
5. BAXTER, E. D. (1981). "The importance of barley protein in malting." Journal of the Science of Food and Agriculture: 409-410.
6. Boffill-Rodríguez, Y. G.-A., Irenia (septiembre-diciembre, 2014). "Ventajas de la producción de cerveza a partir de malta de sorgo. Revisión bibliográfica." Tecnología Química vol. XXXIV.
7. Bohemia, R. (Marzo 2017).
8. Carvajal, N. (2014). Perfeccionamiento del proceso de producción de cerveza a partir de malta de sorgo. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas.: 61.
9. Cedeño, I. (2015). Utilización integral del grano de sorgo para la obtención de etanol.
10. . Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
11. Chaviano, M. (2005). "El sorgo: Contribución al desarrollo sostenible y ecológico de la producción popular de arroz." Agricultura Orgánica 1: 8-11.
12. ChemicalEngineering (2014).
13. ChemicalEngineering (mayo 2017).
14. Dewar, J., et al. (1997). "Determination of improved steeping conditions for sorghum malting." J. Cereal Sci. 26: 129-131.
15. Díaz, Y. (2014). Perfeccionamiento del proceso de malteado de sorgo para la producción de maltinas para enfermos celíacos. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara,Cuba, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas 77.
16. DICKO, M. H. G., H.; TRAORE, A. S.; VORAGEN, A. G. J.; BERKEL, W. J. H. (2006). ""Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities"." African Journal of Biotechnology 5: 384-395.
17. Fabelo, J. A. (1999). Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando mezcla de diferentes sustratos. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
18. FRENCH, B. J. and G. R. MCRUER (1990). "Malt quality as affected by various steep aeration regimes. ." Techn. Q. Master Brew. Assoc. Am. 27: 10-14.
19. Gallardo, I. (2012). "PRODUCCIÓN DE BEBIDAS USANDO SORGO MALTEADO COMO MATERIA PRIMA PARA ENFERMOS CELIACOS." Avances en Ciencias e Ingeniería: 61-73.

20. García and M. Garibay (1994). "Fermentación para la producción de cervezas." *Bebidas Mexicanas*. 3: 11.
21. GONZÁLEZ, G. 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*)."
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. <http://www.ellahoy.es/salud/articulo/8-bebidas-alcoholicas-para-celiacos-sin-gluten/256249/>.
24. IGYOR, M. A. O., A. C.; PALMER, G. H, Ed. (2001). "Effect of malting temperature and mashing methods on sorghum wort composition and beer flavour". *Process Biochem*.
25. KAYODÉ, A. P. P. H., J. D.; NOUT, M. J. R.; NIEHOF, A. (2007). "'Household production of sorghum beer in Benin: technological and socio-economic aspects." *J. Consum. Stud*: 258-264.
26. Kern, D. (1988). "Procesos de Transferencia de Calor."
27. Lymugabe, F., et al. (2012). "Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review." *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*. 4(16): 509-530.
28. Nieblas, C. (2015). Análisis de la producción de almidón y jarabes glucosados a partir del sorgo para la industria alimenticia. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
29. Novellie, L. (1959). "Kaffircorn malting and brewing studies. III. Determination of amylases in kaffircorn malts." *Journal of Science of Food and Agriculture* 10: 441-449.
30. Novellie, L. (1962). "Kaffircorn malting and brewing studies XI. Effect of malting conditions on the diastatic power of kaffircorn malts." *J. Sci. Food Agric*. 13: 115-120.
31. Novielle, L. (1966). "Kaffircorn malting and brewing studies. Mashing with kaffircorn malt: Factors affecting sugar production. ." *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 17: 354-361.
32. NZIGAMASABO, A. N., A. (2009). "'Traditional fermented foods and beverages in Burundi." *Food Res. Int*. 42: 588-594.
33. Ogbeide, S. (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.
34. Ohta, B. D. Y. (1992). "Malt characteristics of Sorghum vulgare varieties from Ghana" *J. Sci. Food Agric* 59: 457-462.
35. Okolo, B.N. and L.I. Ezeogu (1996). "Duration of final warm water steep as a crucial factor in protein modification in sorghum malts." *J. Inst. Brew*. 102: 167-177.
36. Okungbowa, J., et al. (2002). "Sorghum β -amylase production: relationship with grain cultivar, steep regime, steep liquor composition and kilning temperature." *J. Inst. Brew* 108: 362-370.
37. Ortega, M. (2001). Elaboración de cerveza tipo lager a partir de malta y adjuntos cerveceros de sorgo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.: 22-25.
38. Ortega, M. (2016). Producción de cerveza empleando integralmente el grano de sorgo. Ing Química, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

39. OWUAMA, C. I. (1997). ""World Journal of Microbiology and Biotechnology". Sorghum: a cereal with lager beer brewing potential." 253-260.
40. Pargas,M.(1994).Estudios de Germinación del sorgo para producir malta. Ingeniería Química. Santa Clara, Cuba, Universidad Central de las Villas.
41. Pavlov, K. (1981). Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química.
42. Peters,M.(1991).Plant Desing and Economics for Chemical Engineers. Pino, M. S. (2016). Estudio del malteado de sorgo UDG-110 con aditivo químico y de la producción de cerveza para enfermos celiacos.
43. Reed, J. D., et al. (1987). "Phenolics, fibre and fibre digestibility in the crop residue from bird resistant and non-bird resistant sorghum varieties." Sci Food Agric.: 113-121.
44. Reyes, S. (2013). Estudio de la producción de cerveza de sorgo y cebada, a escala de laboratorio, para la implementación de una Planta Piloto adjunta a la Cervecería de Manacas. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. trabajo de Diploma.
45. Rodríguez, L. (2005). Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo. INGENIERIA QUIMICA. Santa Clara UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.
46. Rosabal, J. and M. V. (1989). "Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas."
47. 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).
48. Serna, S. (1996). "Almacenamiento e Industrialización de los cereales."
49. Serna, S. (2005). Bioconversión de almidones en jarabes dextrinizados, maltosados, glucosados y fructosados. Uruguay.
50. Taylor, J. R. N. (1992). ""Mashing with malted grain sorghum". ." J. Am. Soc. Brew. Chem.: 1-34.
51. TAYLOR, J. R. N. y. B., H. K. (1986). ""Free a-amino nitrogen production in sorghum beer mashing". " Journal of the Science of Food and Agriculture.: 1109-1117.
52. Ulrich, G. (1985). "Diseño y Ecocomía de los Procesos de Ingeniería Química."
53. Vicente, F. (2013). "Bebida fermentada a base de sorgo." Desarrollo de nuevos productos.
54. www.es.wikipedia.org/wiki/Sorgo.
55. www.matche.com/equipcost (2014).

ANEXOS

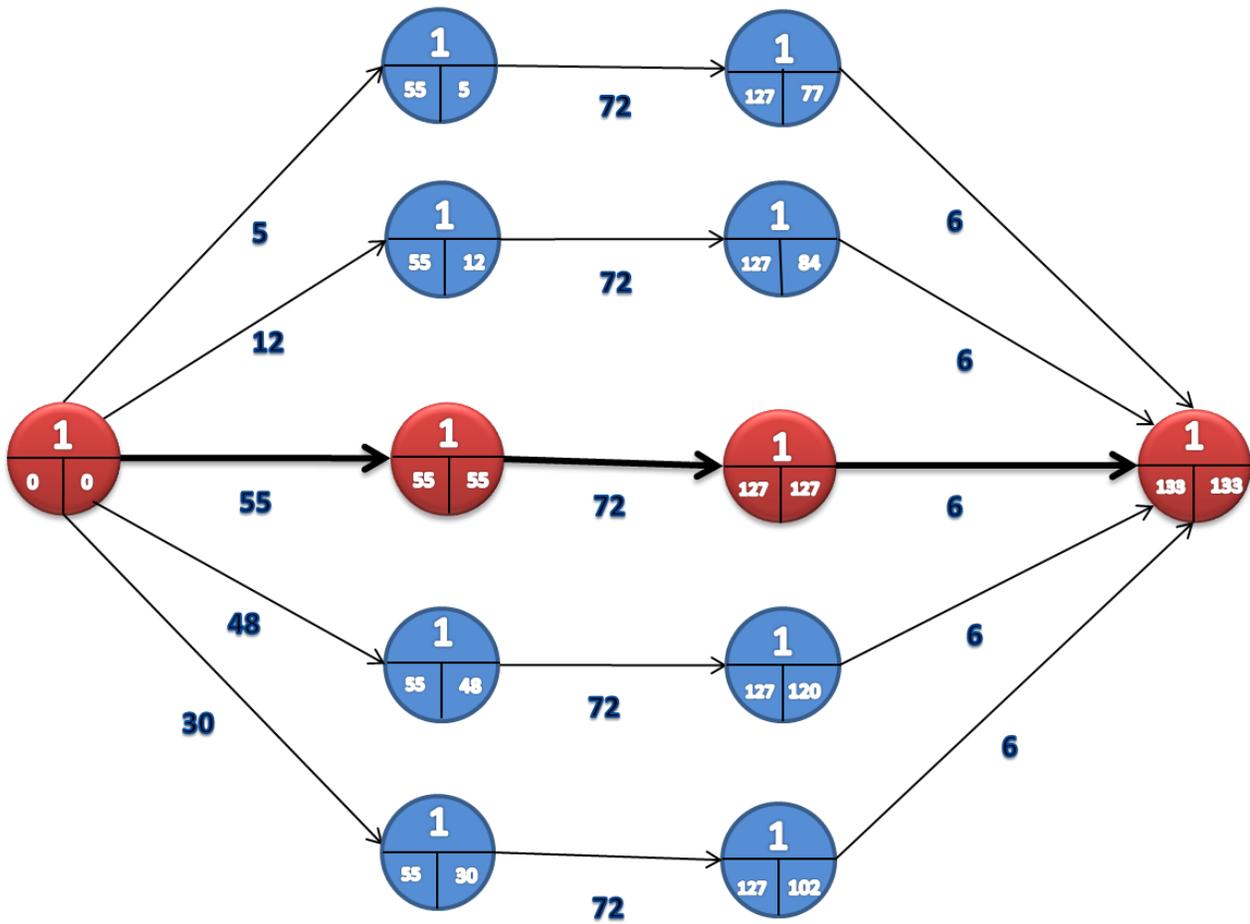
ANEXOS

ANEXO 1: SECUENCIA EXPERIMENTAL PARA EL MALTEADO DEL SORGO UDG-110

SOLUCIÓN	N° Exp	MIÉRCOLES			JUEVES			VIERNES			SÁBADO			DOMINGO			LUNES						
		6AM	12PM	6PM	12AM	6AM	12PM	6PM	12AM	6AM	12PM	6PM	12AM	6AM	12PM	6PM	12AM	6AM	12PM	6PM			
		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	66	72	78	84	66	72	78	
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							

LEYENDA	
	Solución de NaOH al 0.0155%
	Solución de NaOH al 0.03%
	Solución de NaOH al 0.065%
	Solución de NaOH al 0.1%
	Solución de NaOH al 0.1145%
	Remojo
	Germinación
	Secado

ANEXO 2: RUTA CRÍTICA DEL MALTEADO DEL SORGO UDG-110



ANEXO 3: DECODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES OBTENIDAS EN EL SOFTWARE STATGRAPHICS

VARIABLE	Xc	X ₁	X ₂	X ₀	ΔX	X
CONCENTRACIÓN NaOH (% PESO)	-1.4142	0.10	0.03	0,065	0,035	0.0155
	1.4142					0.1145
	0.36					0.0776
TIEMPO REMOJO (h)	-1.4142	48	12	30	18	5
	1.4142					55

$$Xc = (X - X_0) / \Delta X$$

$$\Delta X = (X_1 - X_2) / 2$$

Xc	Variable Codificada
X	Variable Decodificada
X ₀	Punto Central

ANEXO 4: TÉCNICA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE EXTRACTO

Las muestras de 6.0 g molidas se incuban en 54 ml con agua destilada en tubos de centrifugas con cierre hermético a 60°C por 2 h., a intervalos de 10 min, el contenido de los tubos es mezclado por inversión. Después de la incubación, los tubos son enfriados en agua (20–23°C) por 30 min, y centrifugados a 1,500 rev por 2 min. Se extrae 40 ml del sobrenadante claro y se transfiere a un beaker de 50 mL. La gravedad específica se mide por métodos gravimétricos el cual se pesan un picnómetro vacío, con agua y con solución para emplear la fórmula siguiente

$$S = 0,99913 * \frac{C - A}{B - A}$$

Donde

A: Peso picnómetro vacío

B: Peso picnómetro con agua destilada.

C: Peso picnómetro con la solución.

El extracto se calcula como un porcentaje en peso y se determina por la tabla de platos

A (PICN VACÍO (g))			21.04
B (H2O DESTILADA (g))			45.945
CORRIDAS	C (SOLUCIÓN (g))	S	EXTRACTO
1	45.99	1.00094	0.244
2	46.055	1.00354	0.911
3	45.969	1.00009	0.026
4	46.083	1.00467	1.193
5	46.148	1.00727	1.869
6	46.09	1.00495	1.27
7	46.077	1.00443	1.42
8	46.091	1.00499	1.283
9	46.038	1.00286	0.732
10	45.98	1.00053	0.141
11	46.01	1.00174	0.45
12	46.04	1.00294	0.757
13	45.988	1.00086	0.219
14	46.078	1.00447	1.142
15	46.152	1.00743	1.91
16	46.1	1.00535	1.732
17	46.08	1.00455	1.168
18	46.095	1.00515	1.321
19	46.042	1.00302	0.77
20	45.97	1.00013	0.039

ANEXO 5: TABLA DE PLATOS PARA EL CONTENIDO DE EXTRACTOS

Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución
1.00000	0.000	1.00280	0.642	1.00500	1.283	1.00760	1.923
1.00005	0.013	1.00255	0.655	1.00505	1.286	1.00755	1.935
1.00010	0.026	1.00260	0.668	1.00510	1.308	1.00760	1.948
1.00015	0.039	1.00265	0.680	1.00515	1.321	1.00765	1.961
1.00020	0.052	1.00270	0.693	1.00520	1.334	1.00770	1.973
1.00025	0.064	1.00275	0.706	1.00525	1.347	1.00775	1.986
1.00030	0.077	1.00280	0.719	1.00530	1.360	1.00780	1.999
1.00035	0.090	1.00285	0.732	1.00535	1.372	1.00785	2.012
1.00040	0.103	1.00290	0.745	1.00540	1.385	1.00790	2.025
1.00045	0.116	1.00295	0.757	1.00545	1.398	1.00795	2.038
1.00050	0.129	1.00300	0.770	1.00550	1.411	1.00800	2.051
1.00055	0.141	1.00305	0.783	1.00555	1.424	1.00805	2.065
1.00060	0.154	1.00310	0.796	1.00560	1.437	1.00810	2.078
1.00065	0.167	1.00315	0.808	1.00565	1.450	1.00815	2.090
1.00070	0.180	1.00320	0.821	1.00570	1.462	1.00820	2.102
1.00075	0.193	1.00325	0.834	1.00575	1.475	1.00825	2.114
1.00080	0.206	1.00330	0.847	1.00580	1.488	1.00830	2.127
1.00085	0.219	1.00335	0.859	1.00585	1.501	1.00835	2.139
1.00090	0.231	1.00340	0.872	1.00590	1.514	1.00840	2.152
1.00095	0.244	1.00345	0.885	1.00595	1.526	1.00845	2.165
1.00100	0.257	1.00350	0.898	1.00600	1.539	1.00850	2.178
1.00105	0.270	1.00355	0.911	1.00605	1.552	1.00855	2.191
1.00110	0.283	1.00360	0.924	1.00610	1.565	1.00860	2.203
1.00115	0.296	1.00365	0.937	1.00615	1.578	1.00865	2.216
1.00120	0.309	1.00370	0.950	1.00620	1.590	1.00870	2.229
1.00125	0.321	1.00375	0.962	1.00625	1.603	1.00875	2.241
1.00130	0.334	1.00380	0.975	1.00630	1.616	1.00880	2.254
1.00135	0.347	1.00385	0.988	1.00635	1.629	1.00885	2.267
1.00140	0.360	1.00390	1.001	1.00640	1.642	1.00890	2.280
1.00145	0.373	1.00395	1.014	1.00645	1.655	1.00895	2.292
1.00150	0.386	1.00400	1.026	1.00650	1.668	1.00900	2.305
1.00155	0.399	1.00405	1.039	1.00655	1.681	1.00905	2.317
1.00160	0.411	1.00410	1.052	1.00660	1.694	1.00910	2.330
1.00165	0.424	1.00415	1.065	1.00665	1.707	1.00915	2.343
1.00170	0.437	1.00420	1.078	1.00670	1.718	1.00920	2.356
1.00175	0.450	1.00425	1.090	1.00675	1.731	1.00925	2.369
1.00180	0.463	1.00430	1.103	1.00680	1.744	1.00930	2.381
1.00185	0.476	1.00435	1.116	1.00685	1.757	1.00935	2.394
1.00190	0.488	1.00440	1.129	1.00690	1.769	1.00940	2.407
1.00195	0.501	1.00445	1.142	1.00695	1.782	1.00945	2.419
1.00200	0.514	1.00450	1.155	1.00700	1.795	1.00950	2.432
1.00205	0.527	1.00455	1.168	1.00705	1.807	1.00955	2.445
1.00210	0.540	1.00460	1.180	1.00710	1.820	1.00960	2.458
1.00215	0.552	1.00465	1.193	1.00715	1.833	1.00965	2.470
1.00220	0.565	1.00470	1.206	1.00720	1.846	1.00970	2.483
1.00225	0.578	1.00475	1.219	1.00725	1.859	1.00975	2.496
1.00230	0.591	1.00480	1.232	1.00730	1.872	1.00980	2.508
1.00235	0.604	1.00485	1.244	1.00735	1.884	1.00985	2.521
1.00240	0.616	1.00490	1.257	1.00740	1.897	1.00990	2.534
1.00245	0.629	1.00495	1.270	1.00745	1.910	1.00995	2.547

ANEXO 6: TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE °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.

Expresión de resultados

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

TABLA DE LECTURA DE °BRIX EN DIFERENTES ETAPAS						
CORRIDAS	Maceración T=50-55°C	Maceración (30 min) T=69-72°C	Maceración (60 min) T=80°C	Maceración final (120 min) T=80°C	Cocimiento (Pre fermentación)	Cerveza
1	0,5	1	2,6	6,5	6,3	5,5
2	0,9	1,2	3,5	5,4	8	5
3	0,6	1	3	6,5	9	6
4	0,4	1	3,1	6,4	8,5	5,4
5	0,5	2	3,2	6,5	8,6	5,5
6	0,6	3	3,3	6,6	8,7	5

ANEXO 7: TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA 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.

$$S = 0,99913 * \frac{C - A}{B - A}$$

S - Gravedad Relativa

A – Peso Del Picnómetro Vacío

B – Peso Del Picnómetro Con el Agua Destilada y Hervida

C – Peso Del Picnómetro Con el Destilado

DETERMINACIÓN DEL GRADO ALCOHÓLICO								
CORRIDA	Picnómetro Vacío	Pic. Agua Destilada	P. Destil (15°C)	S (Gravedad Específica)	Alc % p/p	Alc %v/v (°GL)	Gramos alcohol en 100 cc	g/L
1	21,039	46,038	45,965	0,9962	2,02	2,58	2	20
2	21,039	46,038	45,982	0,9969	1,64	2,04	1,63	16,3
3	21,039	46,038	45,946	0,9955	2,45	3,07	2,43	24,3
4	21,039	46,038	45,952	0,9957	2,31	3	2,3	23
5	21,039	46,038	45,923	0,9945	3,02	3,78	3	30
6	21,039	46,038	45,971	0,9965	1,89	3,1	2,16	21,6

ANEXO 9: TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS AZÚCARES REDUCTORES TOTALES

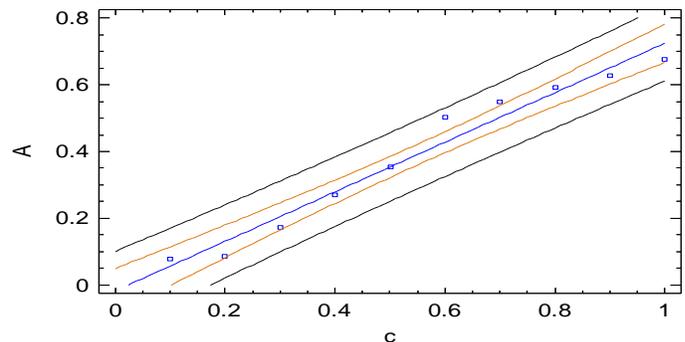
Fundamento del método

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 espectro fotocolorímetro a 240 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria.

Para la confección de la curva de calibración se prepararon 10 soluciones a diferentes concentraciones de glucosa, midiéndose la absorbancia de las mismas.

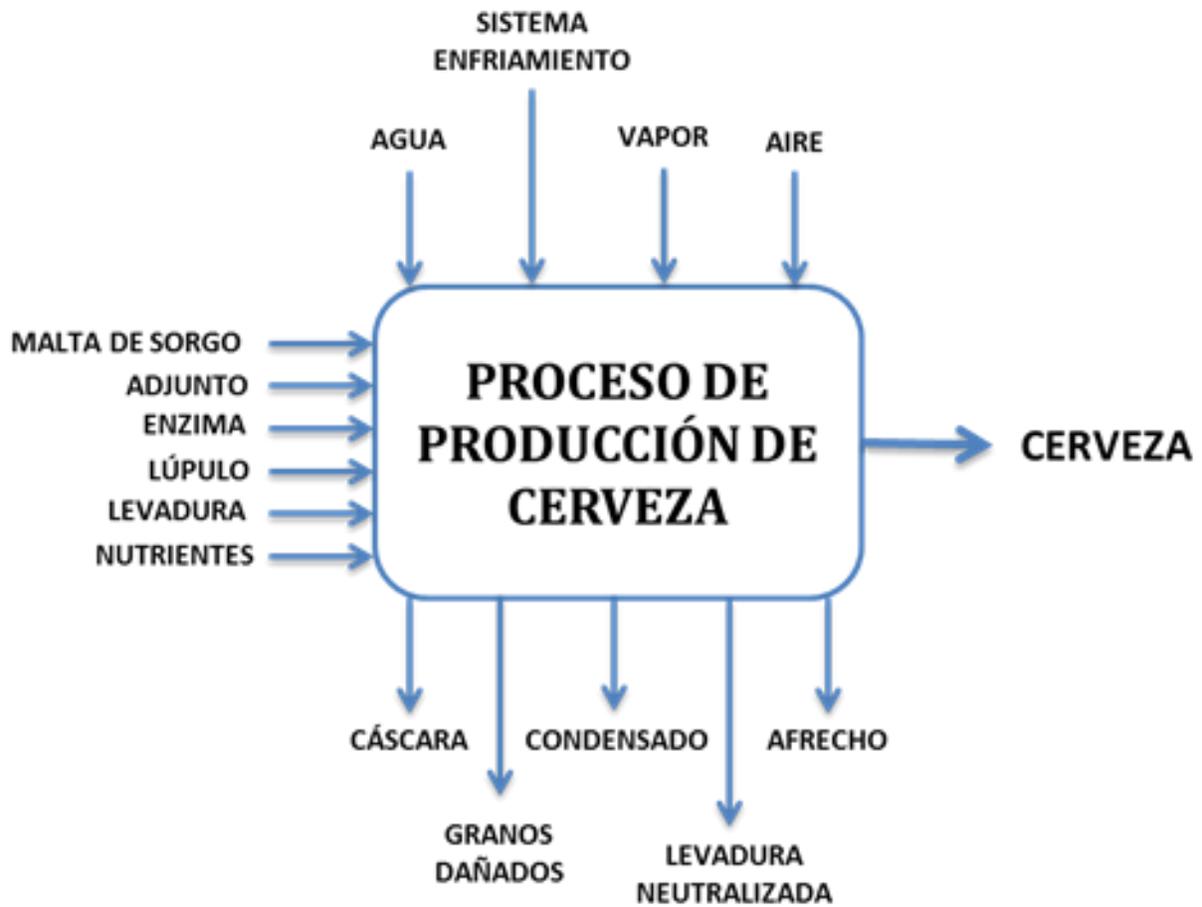


Ecuación del Modelo Ajustado

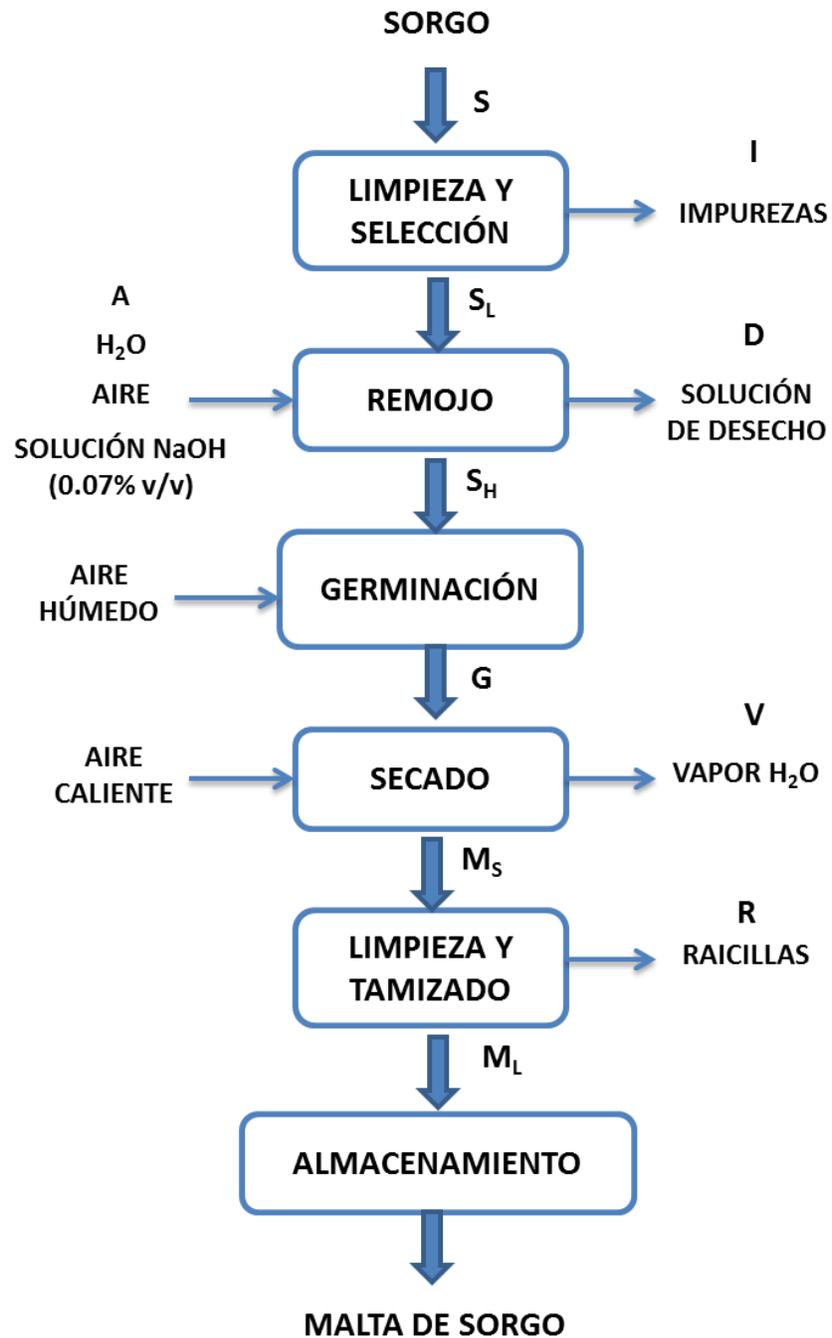
$$A = 0,743152 * C - 0,0179333$$

TABLA DE LECTURA DE LOS ART EN LAS DIFERENTES ETAPAS						
CORRIDAS	Maceración (final) T=80°C		Cocinado		Cerveza	
	ABSORBANCIA	ART (g/L)	ABSORBANCIA	ART (g/L)	ABSORBANCIA	ART (g/L)
1	0,165	222,05	0,194	261,07	0,042	56,54
2	0,122	164,19	0,176	236,85	0,035	47,12
3	0,125	168,23	0,189	254,35	0,049	65,96
4	0,145	195,14	0,218	293,37	0,065	87,49
5	0,143	192,45	0,165	222,05	0,038	51,16
6	0,188	253,00	0,168	226,09	0,043	57,89

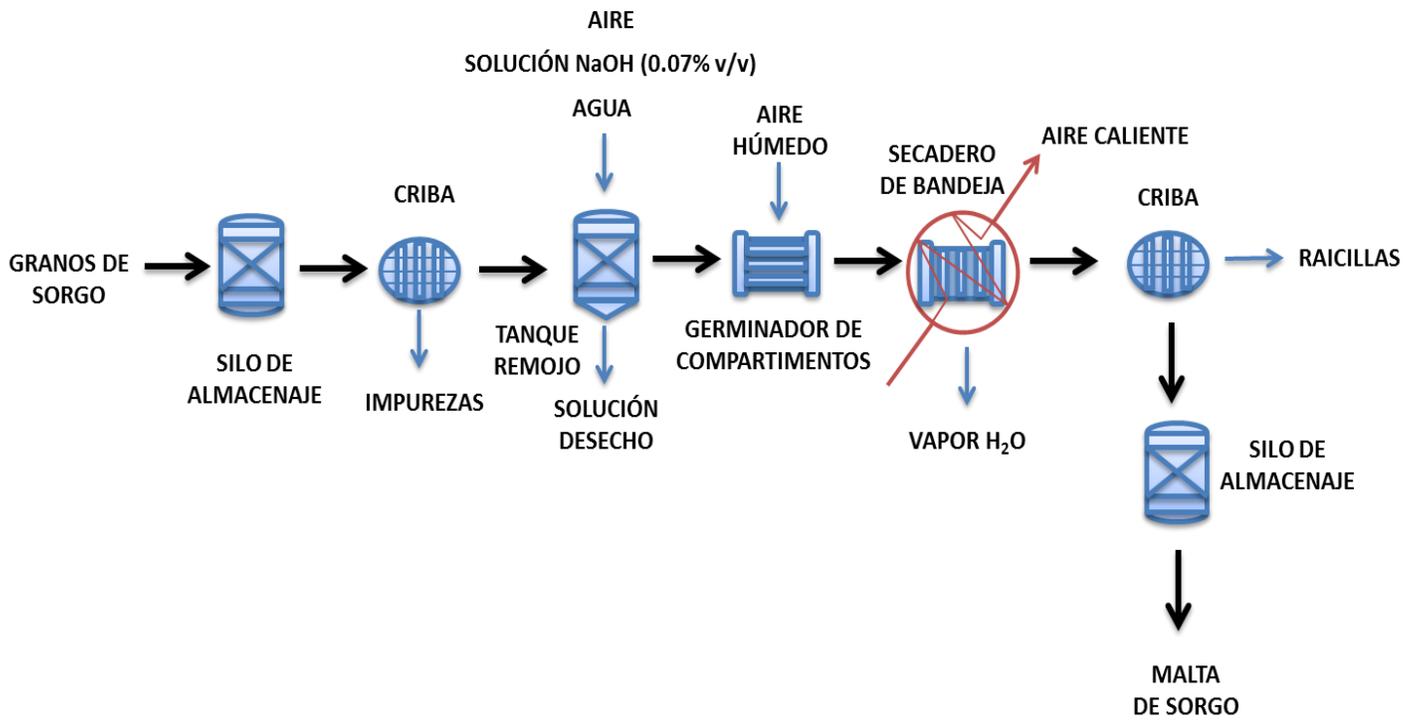
ANEXO10: FUNCIÓN TOTAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA



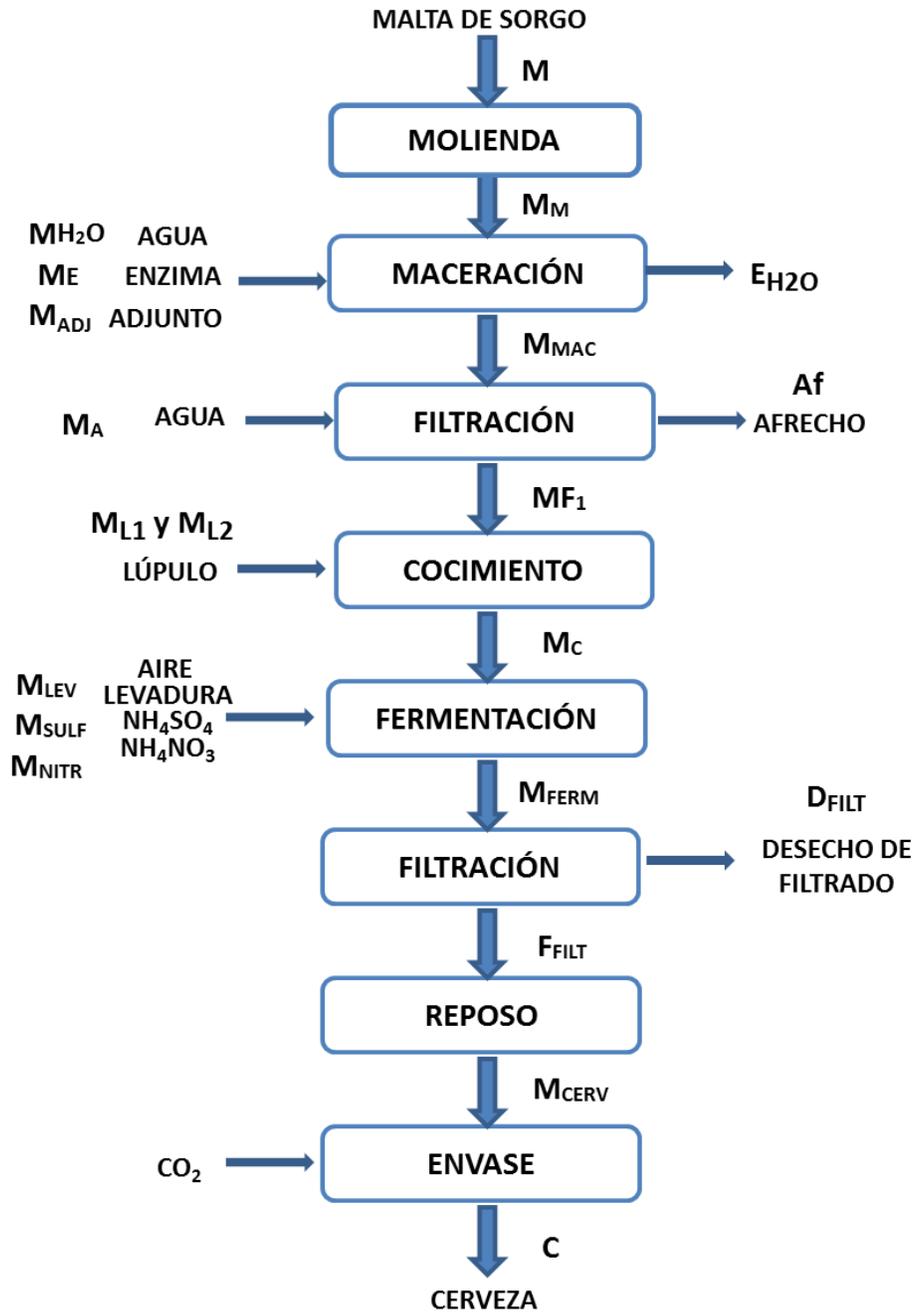
ANEXO 11: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE MALTEADO



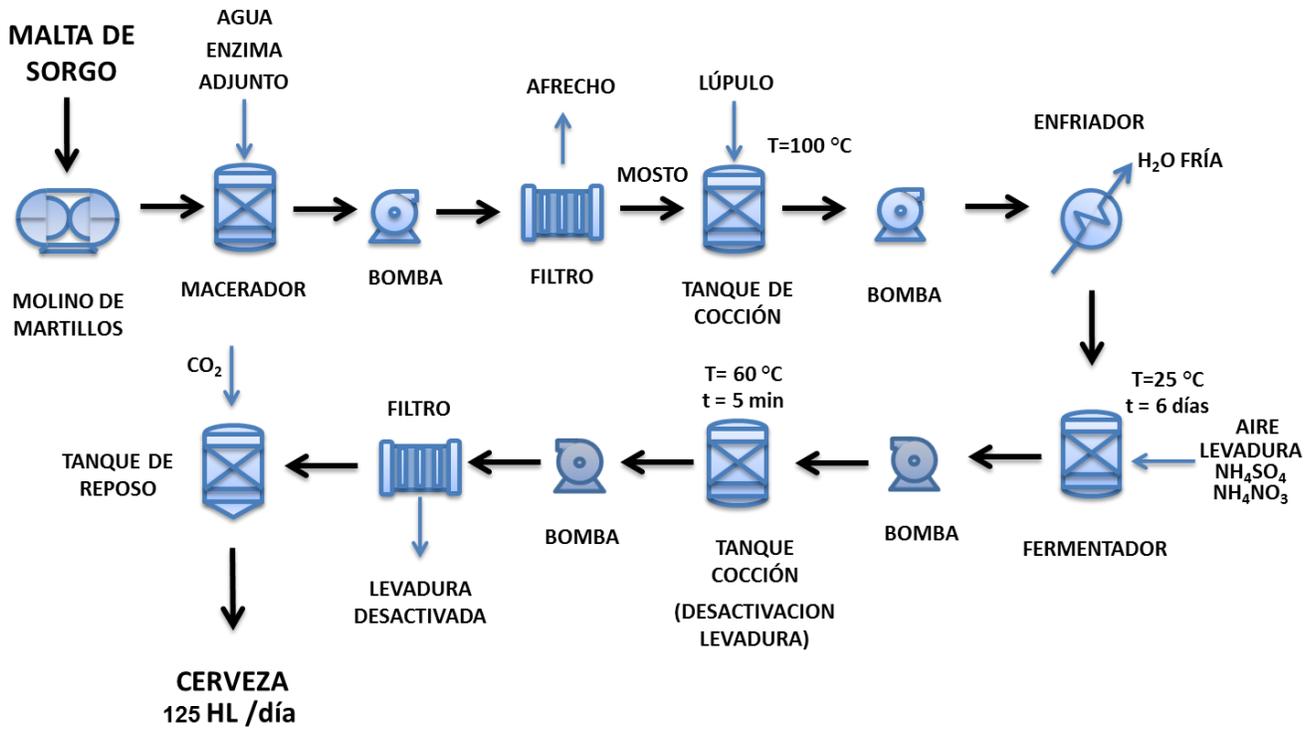
ANEXO 12: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE MALTEADO



ANEXO 13: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA



ANEXO 14: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA



ANEXO 15: EQUIPOS Y ACCESORIOS PRINCIPALES UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA



TANQUE DE ALMACENAMIENTO



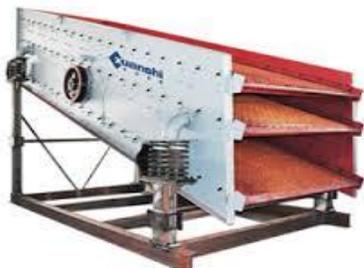
CRIBAS VIBRATORIAS



TANQUE REMOJO



GERMINADORES



SECADERO DE BANDEJA



MOLINO





TORNILLO SIN FIN



TANQUE MACERADOR ENCHAQUETADO



VÁLVULA DE GLOBO



AGITADORES



FILTRO DE PLACAS Y MARCOS



BOMBAS CENTRÍFUGAS



TANQUE DE REPOSO

ANEXO 16: TABLAS DE SELECCIÓN DEL MOLINO Y EL FILTRO A UTILIZAR EN EL PROCESO

TIPOS DE MOLINOS			
CRITERIOS	Molinos de rotación de bolas	Martillos de alta velocidad	Energía de fluidos
Relación de Reducción	10 cm a 1 mm	10 cm a 10 μm	1 mm a 1 μm
Cap. máxima, m(kg/s)	0,1	2	1
Compatibilidad materiales (sólidos pegajosos)	Limitado	Excelente	Limitado
Costo	Bajo	Moderado	Alto

TIPOS DE FILTROS			
CRITERIOS	Marco y Placa	Prensa	De Criba
Tamaño de las partículas disueltas	Pequeñas	Pequeñas	Grandes
Caídas de presión	Grandes	Muy Grandes	Bajas
Costo	Alto	Alto	Bajo
Contenido de Sólidos	No depende	Medio	Alto
Volumen de Filtrado	Relativamente pequeños	Relativamente pequeños	Grandes
Suspensiones	Cualquier Rango	Hasta 80 % masa de sólidos	Admite solo altos contenidos de sólidos
Fluidos a tratar	Jarabes, licores, suspensiones concentradas	Aceites y sustancias viscosas	Suspensiones con partículas de tamaño considerable

ANEXO 17: TABLAS DE SELECCIÓN DEL MEDIO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO Y DEL AGITADOR A UTILIZAR

TIPOS DE MEDIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO		
CRITERIOS	Chaqueta	Serpentín
Volumen del Recipiente	No Ocupa	Ocupa
Consumos	Bajos	Altos
Área de transferencia para un mismo volumen	Mayor	Menor
Costo de fabricación	Mayor	Menor
Mantenimiento	Más Difícil	Fáciles de Limpiar
Cantidad de calor a extraer	Mayor	Menor
Fluidos medio enfriante o calefactor	Aceites, Vapor, Agua, etc...	Vapor, Agua, etc...

TIPOS DE AGITADOR			
CRITERIOS	Hélice o Propela	Turbina	De Paleta
Velocidad de rotación	300-1000 rpm	300 rpm máx.	150 rpm máx.
Veloc. circunferencial en función de la viscosidad	3,8-16 (100 Cp) 3,8-10 (4000 Cp)	2,5-10 (100 Cp) 2,5-7 (4000Cp)	1,5-5 (500 Cp) 1,5-3 (3000Cp)
Costo	Bajo	Moderado	Bajo
Consumo Energético	Bajo (el más bajo)	Alto	Bajo
Volumen de agitación	Grandes	Menores de 2,5 m ³	Grandes
Suspensiones	Hasta 50% masa de sólidos	Hasta 80% masa de sólidos	Admite solo bajos contenidos de sólidos
Cantidad impelentes en el mismo eje	Varios	Varios	Varios

ANEXO 18: TABLA DE SELECCIÓN DEL TRANSPORTADOR A UTILIZAR EN EL PROCESO

TIPOS DE TRANSPORTADORES				
CRITERIOS	Banda	Sinfín (Tornillo Helicoidal)	Elevador de Cangilones	Flujo continuo (Cadena, Paleta)
D(m) Longitud , L(m)	0,5-2 10-50	0,15-0,50 5-25	0,15-0,50 8-25	0,2-1,0 10-50
Cap. Máxima de sólidos (m ³ /s)	0,06	0,007-0,08	0,02	0,01
Transporte hacia arriba plano inclinado	Limitaciones modestas	Excelente	Excelente	Limitaciones modestas
Elevación vertical	Inaceptable	Costo mayor para reducir los problemas al mínimo	Excelente	Excelente
Ángulo de Inclinación limitado	30°	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Costo relativo actual	Moderado	Alto	Moderado	Moderado
Compatibilidad con sólidos fibrosos	Limitaciones modestas	Excelente	Limitaciones modestas	Limitaciones modestas

ANEXO 19: TABLAS DE SELECCIÓN DE LAS BOMBAS Y VÁLVULAS A UTILIZAR EN EL PROCESO

TIPO DE BOMBA			
CRITERIO	Bomba Centrífuga (flujo axial)	Bomba Reciprocante	Requerimientos
Capacidad Máxima	5 m ³ /s	0,03 m ³ /s	-
Eficiencia	50 - 85 %	60 - 85 %	Mayor Eficiencia Posible
Viscosidad	Menores de 0.2 Pa*s	0.001 - 400 Pa*s	Fluidos pocos viscosos.
Tipo de Fluido a tratar	Dificultades con los corrosivos Bombean fluidos con sólidos en suspensión	Para fluidos corrosivos	Líquido claro, no corrosivo con sólidos en suspensión
Costo	Baratas	Caras	Menor Costo Posible

TIPO DE VÁLVULA		
Válvulas de globo	Válvulas de compuerta	Válvulas de cheque
Se usan para regular el flujo, no para interrumpirlo totalmente, en cualquier diámetro de tubería.	No para regular el flujo, el área de flujo varía demasiado rápido y resulta difícil el control. Se usan para interrumpir totalmente el flujo y en cualquier diámetro de tubería.	Permiten el paso del fluido en un solo sentido. Cuando la sustancia fluye en el sentido adecuado, permanece abierta, pero cuando el fluido tiende a invertirse, se cierra automáticamente por sí sola y corta el flujo de la sustancia.

ANEXO 20: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS SILOS DE ALMACENAMIENTO DEL SORGO Y DE LA CRIBA A UTILIZAR EN EL PROCESO

TANQUES DE ALMACENAMIENTO SORGO (SILOS)						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Volumen	$V_0 = S / \rho_{\text{SORGO}}$	S (kg / día)	1581	V_0 (m ³)	2,4	(Ulrich, G. D., 1985)
		ρ_{SORGO} (kg / m ³)	660			
		t(día)	1			
Altura	$V_{\text{CIL}} = V_0 / n$	n (tanques)	2	V_{CIL} (m ³)	1,2	
	$V_{\text{CIL}} = d^2 * h * \pi / 4$	V_{CIL} (m ³)	23,95	d (m)	0,91	
	$h = 2*d$					
Diámetro	$d = \sqrt[3]{\frac{2 * V_{\text{CIL}}}{\pi}}$	π	3,14	h (m)	1,8	

CRIBAS VIBRATORIAS							
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS	
Área de tamizado	$A_3 = \frac{Q_m}{K * q * \rho}$	Qm (t/h)	0,07	A (m ²)	0,03	(Rosabal J.M 1988)	
		dp ₃ (mm)	3,8				
		q ₃ (m ³ /h m ²)	7,5				
		k (t/kg)	8,80E-04				
		ρ_{SORGO} (kg / m ³)	380				
CRIBA (TABLA 9)							
Área = 1,28 m ²							
Ancho			800 mm				
Longitud			1600 mm				
Nº de tamices			1				
Capacidad (t/h)			56				
Frecuencia (rev/min)			1000				
Inclinación (Grados)			10 - 25				
Potencia del Motor			1,7				

ANEXO 21: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES DE REMOJO Y DE LOS GERMINADORES A UTILIZAR EN EL PROCESO

TANQUES DE REMOJO					
ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
$X = S_L / t$	S_L (kg/día)	1423,1	X (kg)	1423,05	(Pargas M. 1994)
	t (día)	1			
$\text{kg/templa} = 1,3 * X * \text{tr}$	X (kg)	1423,05	kg/templa	99898,37	
	tr (h)	54			
$\text{m}^3/\text{templa} = (\text{kg/templa})/\rho$	ρ_{SORGO} (kg / m ³)	660	m^3/templa	151,36	
$V_t = (\text{m}^3/\text{temp})/n$	n	2	$V_t = (\text{m}^3)$	75,68	
$V_t = V_{\text{cil}} + V_c$	$h_{\text{cono}} = d/0,46 * 2$		d (m)	3,44	
$V_t = (\pi * d^2 * h_{\text{cil}})/4 + (\pi * d^2 * h_{\text{cono}})/12$			h_{cono} (m)	3,74	
$d = \sqrt[3]{\frac{V_t}{1,854}}$	$h_{\text{cil}} = 2 * d$		h_{cil} (m)	6,89	
$h_{\text{cil}} = 2d$ $h_{\text{cono}} = d/0,46 * 2$					

GERMINADORES					
ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
$\text{kg/temp} = S_H * t_G$	S_H (kg/h)	86	kg/temp	6190	(Pargas M. 1994)
	t_G (h)	72			
$\text{m}^3/\text{temp} = (\text{kg/temp})/\rho$	ρ_{SORGO} (kg / m ³)	660	m^3/temp	9,38	
$V = (\text{m}^3/\text{temp})/n$	n	2	V (m ³)	4,69	
$V = a * b * z$	z (m)	1	a (m)	0,938	
			b (m)	5	

ANEXO 22: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS SECADEROS DE BANDEJA Y DE LOS SILOS DE ALMACENAMIENTO DE LA MALTA A UTILIZAR EN EL PROCESO

SECADERO DE BANDEJAS						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Superficie de Secado	$L_s = L^*(1-0,05)$	$L = S_H$ (kg/h)	85,98	As (m ²)	4,95	(Treybal R E, 1980)
		Ls	81,7			
	$(L_s / A_s) = \rho_{SORGO} * z$	ρ_{SORGO} (kg / m ³)	660			
	$A_s = L_s / (\rho_{SORGO} * z)$	z (m)	0,025			
Número de Bandejas	$N_b = A_s / A_b$	Ab(m ²)	0,36	Nb	14	

TANQUE ALMACENAMIENTO DE MALTA						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Volumen total	$V_T = V_i + V_{sd}$ $V_i = Q_v * t$ $V_{sd} = 0,2 * V_i$	M (kg/ día)	1233	Vi (m ³)	1,87	(Rosabal 1989)
		ρ_{SORGO} (kg / m ³)	660			
		Qv (m ³ / día)	1,87	Vsd (m ³)	0,37	
		t (días)	1	V _T (m ³)	2,24	
Diámetro	$d = \sqrt[3]{\frac{4 * V_T}{1,5 * \pi}}$	V _T (m ³)	2,24	d (m)	1,24	
Altura	$h = 1,5 * d$	d (m)	1,24	h (m)	1,9	
Material de Construcción	Acero Inoxidable					
Sustancia a Manipular	Granos Malteados					
Temperatura de Almacenamiento	30 °C					
Presión de Trabajo	1 atm					

ANEXO 23: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE MACERACIÓN Y DE LA CHAQUETA DE CALENTAMIENTO A UTILIZAR EN EL PROCESO

TANQUE MACERACIÓN						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Volumen total	$V_T = V_i + V_{sd}$	Q_v (m ³ / día)	12,5	V_i (m ³)	12,5	(Rosabal 1989)
	$V_i = Q_v * t$			V_{sd} (m ³)	2,5	
	$V_{sd} = 0,2 * V_i$	t (días)	1	V_T (m ³)	15	
Diámetro	$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_T}{\pi}}$	V_T (m ³)	15	D (m)	2,67	
Altura	$H = D$	D (m)	2,67	H (m)	3,67	

CHAQUETA DE CALENTAMIENTO						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Área de transferencia de calor	$A = (\pi * d * h) + \left(\frac{\pi * d^2}{4}\right)$	d (m)	2,34	A (m ²)	29,97	(Kern, 1988)
		h (m)	3,5			
U_c	$h_d = \frac{1}{R_d}$ $U_c = \frac{h_o * h_{io}}{h_o + h_{io}}$	R_d	0,005	h_d	200	
		h_{io} (Btu/ h pie ² °F)	1500	U_c	361,9	
U_d	$U_d = \left(\frac{U_c * h_d}{U_c + h_d}\right)$	h_d	200	U_d (J/s°C m ²)	128,81	
		U_c	361,9			

ANEXO 24: TABLA DE DIMENSIONAMIENTO DEL AGITADOR DE DOBLE PALETA A UTILIZAR EN EL PROCESO

AGITADOR DE PALETA (Z=2)						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Largo del rodete(d)	$d = 0,65 * D_{TANQUE}$	D_{TANQUE} (m)	2,67	d (m)	1,74	(Rosabal J.M 1988)
Ancho del rodete	$d/8$	d (m)	1,74	Ancho (m)	0,217	
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador	$0.25 * H_{TANQUE}$	h_{TANQUE} (m)	2,67	Altura (m)	0,67	
Arquímedes (Ar)	Dato obtenido del Rosabal TII pág 277			Ar	2,40E+04	
Reynold Modificado (Rem)	$Re_m = C * Ar * \left(\frac{Dp}{d}\right)^{0.5} * \left(\frac{D}{d}\right)^k$	C (Tabla 9.1) K (Tabla 9.1) d (m) Dp (m)	14,8 0 1,74 0,002	Rem	1,21E+04	
Revoluciones del Agitador (n)	$n = \frac{Re_m * \mu}{d^2 * \rho}$	$\rho_{LÍQUIDO}$ (kg / m ³) $\mu_{LÍQUIDO}$ (Pa*s)	1100 0,035	n(rpm)	0,12697	
Factor de potencia de Agitación (Kn)	Re_m Fig. 9.7			Kn	0,2	
Consumo de potencia del Agitador (N)	$N = Kn * \rho * n^3 * d^5$	Kn ρ_{AGUA} (Kg / m ³) n	0,2 1000 1,3E-01	N (kW)	6,49	
Consumo de potencia del Agitador(N _{inst})	$N_{inst} = \beta * N$	β	1,15	N _{inst} (kW)	7,46	

ANEXO 25: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL FERMENTADOR Y EL FILTRO DE PLACAS A UTILIZAR EN EL PROCESO

FERMENTADOR						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Volumen	$V = Q / t$ $V_{REAL} = 1,2 * V$	M_{FERM} (m ³ /día)	12,32	V (m ³)	12,324	O'Levenspiel
		t (días)	1	V_{REAL} (m ³)	14,79	
Diámetro	$H/D = 2$ $H = 2 * D$ $V = \frac{\pi * D^2}{4} * H$	V_{REAL} (m ³)	14,78	D (m)	2,11	
Altura				H (m)	4,22	

FILTRO DE PLACAS Y MARCOS						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Masa de sólidos en la torta /unidad de volumen de líquido	$X_t = \frac{x}{1 - x}$	x	0,38	Xt	0,61	(Rosabal J.M 1988)
Masa de sólidos /Masa de líquido(Xs)	$X_s = \frac{x}{1 - x}$	x	0,19	Xs	0,23	
Masa de sólidos en la suspensión /unidad de volumen de líquido	$C_s = X_s * \rho_s$	ρ_s (kg / m ³)	1050	C_s (kg / m ³)	246,3	
Masa de sólidos en la torta/unidad de volumen filtrado(C)	$C = \frac{C_s}{1 - \left(\frac{C_s}{X_t * \rho_t}\right)}$	ρ_t (kg / m ³)	948	C (kg / m ³)	427,5	
		C_s (kg / m ³)	246,3			
Superficie de filtración (S)	$S = \frac{(C * V)}{X_t * \rho_t * h}$	h_{MARCO} (m)	0,05	S (m ²)	147,16	
		$V_{FILTRADO}$ (m ³)	10			

ANEXO 26: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA A UTILIZAR EN EL PROCESO

TANQUE ALMACENAMIENTO DE AGUA						
PARÁMETRO	ECUACIÓN	DATOS		RESULTADOS		REFERENCIAS
Volumen total	$V_T = V_i + V_{sd}$	V_{H_2O} (m ³ / día)	12,5	V_i (m ³)	12,5	(Rosabal 1989)
	$V_i = Qv \cdot t$			V_{sd} (m ³)	2,5	
	$V_{sd} = 0,2 \cdot V_i$			t (días)	1	
Diámetro	$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_T}{1,5 \cdot \pi}}$	V_T (m ³)	15	d (m)	2,34	
Altura	$h = 2 \cdot d$	d (m)	2,34	h (m)	4,7	
Material de Construcción	Acero al Carbono					
Sustancia a Manipular	Agua					
Temperatura de Almacenamiento	30 °C					
Presión de Trabajo	1 atm					