



Universidad de Matanzas
“Camilo Cienfuegos”

Facultad de Ingenierías
Departamento de Química e Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Obtención de vinagre a partir de almidón de yuca y
residuos de la industria cervecera.

Trabajo presentado en opción del título de Ingeniería Química.

Autor: Antonio Enrique Soto Palau.

Tutores: MSc. Milagros Beatón Berenguer.
Dr.Sc. Marcelo Marcel Sánchez

Matanzas, 2011

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jefe del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro de Tribunal

Firma

Provincia: _____ Fecha: _____ Calificación: _____

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar debo agradecer a Dios que me haya dado y que me mantenga la vida para estar aquí para hacer y presentar este trabajo.

A mi tutora Milagro por toda su ayuda y todo el tiempo y dedicación que ha brindado en el desarrollo de este trabajo.

A los profesores de la Facultad de Ingenierías, y al departamento de Química de la Universidad de Matanzas.

A todas mis amistades que en alguna manera o la otra me han dado algún apoyo o han estado allí por mí durante el tiempo de mis estudios.

A todos

Muchas Gracias

RESUMEN

En este proyecto de investigación se obtuvo vinagre, a partir de la degradación enzimática del almidón de yuca y la adición de residuos de la industria cervecera, ya que estos residuales contienen azúcares, aminoácidos, proteínas, minerales y otros elementos que sirven como nutrientes para el desarrollo a las bacterias acéticas, encargadas estas, de producir el ácido acético, componente principal del vinagre. Se realizó la extracción del almidón, a escala de laboratorio, obteniéndose, de 4.54 Kg de yuca, una masa de almidón de 608.20g. Se analizó la influencia de los precios de las enzimas, y el costo de la energía durante el proceso de maceración. La composición química de las muestras analizadas se determinó mediante la aplicación de un diseño de experimento, empleando el paquete estadístico StatGraphic Plus 5.0, como factores independientes se analizaron la concentración extracto de afrecho y trub y concentración de etanol. El mejor vinagre obtenido presenta una acidez de 4.8 g/100ml, pH = 2.7, coloración carmelita oscuro, sabor y olor característicos, similares a los parámetros de calidad del vinagre que se comercializa actualmente en el país. Se realizó un análisis económico preliminar, donde se determinó el precio de un litro de vinagre, dando el Beneficio Bruto positivo, de \$14.45, por lo que es factible su producción. Se propone un esquema tecnológico, para la obtención de vinagre, a es cala de Planta Piloto donde se diseñó un intercambiador de placa (Comeval Tipo S1 - 9TLA PHE, $A_t = 0.5 \text{ m}^2$ y $N = 25$ Placas), se seleccionó la bomba Larox Flowsys LPP-T25.

ABSTRACT

In this investigation project, vinegar was obtained, using waste from enzymatic degradation from *cassava* starch as raw material for beer production (bran) residual ones contain sugars, amino acids, ethanol, proteins, minerals, volatile components and other elements that are good as nutrients for the growth and development of the acetic bacteria in charge of producing the acetic, constituent characteristic acid of the vinegar. The extraction of starch was done at a lab scale, 608,20 g of starch was obtained from 4.54 Kg of cassava raw material. The influence of the enzymes prices and the cost of energy during the maceration process was analyzed. The chemical composition of the analyzed samples was determined by means of the application of an experiment design, using the statistical package StatGraphic Bonus 5.0, as factors the Extract of Bran-Trub, and ethanol were analyzed. The best vinegar obtained presents an acidity of 4.8 g/100ml, pH = 2.7, Carmelite dark coloration, flavor and characteristic scent, similar to the parameters of quality of the vinegar that is marketed at this moment in the country. It was carried out an analysis economic preliminary, where the found price of a liter of vinegar, and the Brute Benefit was positive the \$14.45, for what is feasible its production. A technology schemer at the Pilot Plant level for vinegar production was given where a plate heat exchanger (Comeval Tipe S1 - 9TLA PHE, $A_t = 0.5 \text{ m}^2$ y $N = 25$ Plates), and a pump was Larox Flowsys LPP-T25.

INDICE

RESUMEN.....	
ABSTRACT.....	
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I. Análisis Bibliográfico.....	3
1.1. El Vinagre.....	3
1.1.1. Tipos de vinagres.....	3
1.1.2. Características de los residuales de industria cervecera.....	4
1.1.3. Producción de vinagres en Cuba.....	5
1.1.3.1. Reacciones típicas para la obtención de vinagre.....	6
1.1.3.2. Microorganismos encargados de la respiración acética.....	6
1.1.3.3. Métodos de elaboración de vinagre.....	8
1.1.3.4. Propiedades y usos del vinagre.....	11
1.2. Proceso de obtención del Etanol.....	11
1.2.1. Materias primas para la producción de etanol.....	11
1.3 Generalidades del Almidón.....	12
1.3.1. Estructura Química del almidón.....	13
1.3.2. Degradación del almidón.....	14
1.3.3. Generalidades de las enzimas.....	14
1.3.4. Tratamiento enzimático del almidón.....	15
1.3.5. Fermentación.....	15
1.3.6. Microorganismos presentes en la fermentación.....	16
1.4. Destilación.....	17
1.5. Origen e historia de la yuca	17
1.5.1. Descripción botánica de la yuca.....	18
1.5.2. Importancia económica y alimenticia de la yuca.....	18
1.5.3. Usos y variedades de la yuca en Cuba.....	19
1.5.4. Época de plantación.....	20
1.5.5. Análisis de la raíz.....	20
1.6. Conclusiones del capítulo.....	21

CAPITULO II. Materiales y métodos.....	22
2.1. Metodología para la elaboración de vinagre a partir de almidón de yuca y residuos de la industria cervecera.....	22
2.1.1. Extracción del almidón a escala de laboratorio.....	24
2.1.2. Maceración.....	24
2.1.3. Proceso de fermentación a escala de laboratorio.....	26
2.1.4. Determinación de azúcares reductores.....	26
2.1.5. Conteo de microorganismos.....	27
2.1.6. Determinación de los ° Brix.....	27
2.1.7. Pesada de las muestras.....	28
2.1.8. Destilación.....	28
2.1.9. Proceso de obtención del extracto de afrecho y trub.....	29
2.1.10. Obtención de vinagre a escala de laboratorio.....	31
2.1.11. Separación del vinagre de la capa madre.....	32
2.1.12. Embotellado y almacenamiento.....	32
2.2. Propuesta de un esquema tecnológico para la obtención a escala de planta piloto de vinagre a partir de almidón de yuca y residuos de la industria cervecera.....	34
2.3. Propuesta de diseño de equipos para obtener vinagres.....	34
2.3.1. Diseño de una bomba.....	35
2.3.2. Diseño de un enfriador.....	37
2.3.3. Cálculo del beneficio bruto.....	43
CAPITULO III. Análisis de los resultados.....	44
3.1. Resultados del proceso de extracción del almidón a escala de laboratorio.....	45
3.2. Balance de masa.....	54
3.3. Selección de la bomba y el enfriador.....	58
3.4. Resultados del beneficio bruto.....	61
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	65
ANEXOS.....	69

INTRODUCCIÓN

El vinagre es un condimento muy utilizado en la elaboración, preparación y conservación de alimentos, por lo que presenta una alta demanda en el mercado. El vinagre está constituido por una solución diluida de ácido acético, obtenido a partir de dos procesos bioquímicos que son el resultado de la acción de microorganismos.

- El primer proceso consiste en la acción de los fermentos que transforman el azúcar en etanol y en dióxido de carbono; esta es la fermentación alcohólica.
- El segundo, es el resultado de la acción de un amplio grupo de acetobacter que tienen el poder de combinar el oxígeno con el etanol para formar ácido acético; esta es la fermentación acética o acetificación.

Las materias primas para su obtención deben presentar altos contenidos de azúcares. En nuestro país se obtiene a partir de diversas mezclas como son el de aguardiente de caña con un contenido de 75%, vino de azúcar con un 24.99% y fosfato de amonio con un contenido de 0.01% (Sanders 2010). Actualmente los precios del azúcar en el mercado internacional se han incrementado considerablemente lo que ha traído consigo que el volumen de producción de vinagre haya disminuido considerablemente.

Investigadores de la Universidad de Matanzas, perteneciente al grupo de Biorrecursos, se han dado la tarea de buscar posibles fuentes de azúcares. Según Sanders 2010, se pueden emplear residuales de la industria cervecera para la obtención de vinagre, ya que contiene almidón y nutrientes necesarios para el crecimiento de las bacterias acéticas, sin embargo se requieren de grandes volúmenes de residuales para la obtención de 1 litro de etanol, lo cual indica la necesidad de la búsqueda de otras fuentes de obtención de etanol.

Los azúcares se pueden obtener a partir de la degradación enzimática del almidón, presentes en diferentes cultivos como son: papa, boniato, plátano, yuca, entre otros.

La yuca es un cultivo de ciclo corto aproximadamente desde noviembre hasta febrero, (Cubaciencias, 2011), con un alto contenido de almidón de 96%, pudiéndose utilizar hasta en condiciones no aceptables para el consumo humano (Wheatley, 1999). En nuestro país el proceso de obtención de almidón de yuca se realiza de forma manual y a escala de laboratorio, para uso alimenticio como espesante y textil, generalmente.

Ante esta situación se plantea como **problema de investigación:**

- ¿Cómo obtener vinagre a partir de almidón de yuca y residuales de la industria cervecera?

Como vía de solucionar este problema se plantea la siguiente **hipótesis**:

- Se podría obtener vinagre a partir de la fermentación alcohólica y acética del producto obtenido de la degradación enzimática del almidón de yuca, con la adición de residuales de la industria cervecera.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone como **objetivo general**:

- Elaborar vinagre a partir de almidón de yuca y residuales de la industria cervecera.

Para dar cumplimiento al objetivo general deberán ser acometidas las siguientes **tareas**:

- Analizar estado del arte en cuanto a procesos de obtención, caracterización y tratamiento enzimático del almidón de yuca.
- Obtener almidón de yuca y caracterizarlo.
- Realizar proceso de tratamiento enzimático del almidón para su transformación en azúcares.
- Realizar proceso de fermentación de los azúcares obtenidos.
- Realizar diseño de experimentos para determinar variables significativas en el proceso de elaboración del vinagre.
- Obtener vinagre a partir del etanol y residuales de la industria cervecera.
- Proponer un esquema tecnológico para la obtención de vinagre a partir de almidón de yuca y de residuales de la industria cervecera.
- Realizar valoración económica del proceso de obtención de vinagre.

CAPÍTULO I: Análisis Bibliográfico

En este capítulo se realiza un análisis del estado del arte en Cuba y en el mundo, sobre los procesos de obtención de almidón de yuca, tratamiento enzimático, proceso de fermentación alcohólica y de obtención de vinagre.

1.1. El vinagre

Según la Reglamentación Técnico Sanitaria correspondiente (Presidencia del Gobierno, 1993) con la denominación genérica de vinagre se designa “el líquido apto para el consumo humano resultante de la doble fermentación, alcohólica y acética del producto de origen agrario que contengan azúcares o sustancias amiláceas, con una riqueza mínima de 50g/l”. Se entiende por acidez de los vinagres su acidez total expresada en gramos de ácido acético por 100ml, a 20 °C. El contenido permitido por la norma para los vinagres, expresado en ácido acético, no será inferior a 50g/l, excepto el vinagre de vino, que será menor, de 60g/l.

1.1.1. Tipos de vinagre

Cualquier sustrato azucarado o amiláceo puede ser utilizado en la elaboración de vinagres. Asimismo los métodos de elaboración serán diferentes. Por tanto, los vinagres se pueden clasificar en función del tipo de sustrato empleado o del método usado en su elaboración.

Según Presidencia del Gobierno, 1993: la materia prima originaria se establecen los siguientes tipos:

- Vinagre de vino: Es el producto obtenido exclusivamente por fermentación acética de vino.
- Vinagre de frutas: Es el producto obtenido a partir de frutas o bayas.
- Vinagre de alcohol: Es el producto obtenido por la fermentación acética de alcohol destilado de origen agrario.
- Vinagre de cereales: Es el producto obtenido sin destilación intermedia por el procedimiento de doble fermentación alcohólica y acética, de cualquier cereal en grano, cuyo almidón se ha desdoblado en azúcares mediante un procedimiento distinto de la diastasa de la cebada malteada.

- Vinagre de malta: Es el producto obtenido sin destilación intermedia por el procedimiento de doble fermentación alcohólica y acética a partir de la cebada malteada, con o sin adición de grano, cuyo almidón se ha desdoblado en azúcares mediante la diastasa de la cebada malteada.
- Vinagre de miel: Es el producto obtenido a partir de la miel.
- Vinagre de suero de leche: Es el producto obtenido a partir de suero de leche.

Otras fuentes de obtención de vinagre lo constituyen los residuales de la industria cervecera, como es el afrecho aportando este, una variedad de minerales, vitaminas, aminoácidos y otros elementos necesarios para el proceso de elaboración del vinagre.

1.1.2. Características de los residuales de la industria cervecera.

Los residuales del proceso de elaboración de la cerveza, son ricos en elementos nutritivos y se comercializan como alimento animal.

La mayoría de vitaminas del grupo necesitan unas de otras; así la levadura de cerveza aporta el grupo entero de vitaminas B. El número de vitaminas que contiene son más de diecisiete, además de vitaminas del grupo B, aporta un gran número de minerales, aminoácidos (sobre todo glutación) y oligoelementos, como son: (Solange, 2007).

Tabla 1.1. Composición química del afrecho

Componente	(%p/p)
Celulosa (glucana)	16.78
<i>Hemicelulosa</i>	28.42
Xilana	19.94
Arabinosa	8.48
<i>Lignina total</i>	27.78
Lignina Klason	22.96
Lignina soluble en acido	4.82
Cenizas	4.60
Grupos acetil	1.35

Proteínas	15.25
Extractivos (por diferencia)	5.82
Minerales	(mg/kg)
Calcio	3515,0
Sodio	309.3
Potasio	258,1
Magnesio	1958
Aluminio	36,0
Hierro	193,4
Bario	13.6
Estroncio	12.7
Manganeso	51.4
Cobre	18.0
Zinc	178
Fósforo	5186.0
Azufre	1980
Cromo	5.9
Silicio	10740

También presenta otras vitaminas: como *biotina* (0.1), *colina* (1800), *ácido fólico* (0,2), *niacina* (44), *ácido pentanóico* (8.5), *riboflavina* (1.5), *tiamina* (0.7) y *vitamina b6* (0.7) (Huige, 1994).

Todas las vitaminas, proteínas y minerales mencionadas anteriormente pueden ser utilizadas como sustrato por las bacterias acéticas. (Solange, 2007).

1.1.3. Producción de vinagre en Cuba

Cuba cuenta solamente con la existencia de tres plantas para la producción de vinagre a escala industrial, una ubicada en Ciudad de la Habana, otra en Villa Clara y la tercera en Camagüey, estas abastecen a las redes de tiendas del Cimex y los puntos de ventas en moneda nacional (Sanders, 2010). El vinagre registrado con la marca el Pinche es el producto líder de la fábrica La Espirituana, perteneciente a la empresa de bebidas y

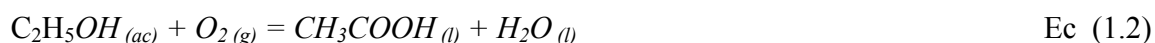
refrescos de Sancti Spiritus. A pesar de contar con un proceso manual y poseer equipamiento obsoleto, el centro elabora más de 72000 litros mensuales del líquido con destino a la población red hotelera de Ciudad Habana y Varadero.

1.1.3.1. Reacciones típica para la obtención de vinagre

Según Wood, (1985) la transformación del azúcar por la levadura *saccharomyces cerevisiae* está representada químicamente por la siguiente reacción:



La oxidación del etanol por las bacterias *acetobacter* se realiza en dos etapas, en la primera se oxida el etanol a acetaldehído y en la segunda el acetaldehído a ácido acético. La reacción general es:



1.1.3.2. Microorganismos encargados de la respiración acética

Las bacterias acéticas son los microorganismos encargados del proceso de obtención de ácido acético, fueron observadas por primera vez al microscopio por Kutzing en 1837. Estas bacterias constituyen un grupo ecológico que comprende bacterias gram-negativas (gram-positivas en cultivos viejos), aerobias estrictas y muy sensibles al SO₂. Son catalasa positiva y oxidasa negativa, pueden presentar pigmentación en cultivos sólidos y producir diferentes tipos de polisacáridos (De Ley et al., 1984).

Según Suárez e Iñigo, 1990 al microscopio óptico las bacterias acéticas se presentan como pequeñas células cilíndricas, frecuentemente en parejas *cocobacilares*, cortas y algo gruesas, alineadas o en cadenas, y a menudo agrupadas en forma de ocho. Constituyen un grupo de morfología variable, que se presentan en forma elipsoidal o de bastoncillos. Las bacterias acéticas crecen en medios azucarados y alcoholizados, ligeramente diluidos como flores, frutas, cerveza, vino, sidra, vinagre, zumos de frutos agrios y miel. En estos sustratos, las bacterias acéticas oxidan los azúcares y los alcoholes, produciendo una acumulación de fluidos orgánicos como producto final. Cuando el sustrato es etanol,

producen ácido acético, lo que ha originado el nombre que reciben estas bacterias. La oxidación del etanol tiene lugar en dos pasos. Las primeras clasificaciones de bacterias acéticas se hicieron atendiendo exclusivamente a criterios morfológicos y se propuso un sistema de clasificación del género *Acetobacter* en cuatro grupos, basado en los caracteres bioquímicas siguientes: producción de catalasa, oxidación de acetato y lactato a carbonato, formación de compuestos *cetónicos*, producción de ácido glucónico y capacidad para crecer en un medio con alcohol y sales de amonio como única fuente de nitrógeno (medio de Hoyer). Propuso los siguientes grupos: *Acetobacter peroxydans*, *Acetobacter mesoxydans*, *Acetobacter oxydans* y *Acetobacter suboxydans*. El nombre de grupo alude fundamentalmente a su capacidad para oxidar el etanol a ácido acético. Durante largo tiempo se aceptó que las bacterias acéticas móviles, pertenecientes al género *acetobacter*, tenían flagelos polares monotricos, y dicho género estaba incluido por lo tanto en la familia *Pseudomonodaceae*. Sin embargo, Leifson (1954) descubrió que 30 cepas de *Acetobacter nonomsostraban* este tipo de flagelos, poniendo de manifiesto otro tipo de disposición de flagelos: flagelación periférica. Propuso entonces separar *Acetobacter* en dos géneros: *Acetobacter* y *Acetomonas* género nov., incluyendo en este último las especies con flagelos polares multitricos y las no flageladas, todas incapaces de oxidar el acetato y el lactato a CO₂ y H₂O.

Las bacterias acéticas pertenecen al orden *Pseudomonodales*, familia *Pseudomonodaceae*, incluyendo en esta última dos géneros distintos al género *Pseudomonas* (sobre todo por su capacidad de crecimiento a pH inferior a 4.5): el género *Gluconobacter* y el género *Acetobacter*, que incluye a su vez tres especies importantes: *Acetobacter aceti*, *Acetobacter pasteurianus* y *Acetobacter peroxydans*. El pH óptimo para el crecimiento es de 5.4-6.3 (De Ley et al., 1984). Sin embargo, estas bacterias pueden crecer a pH bajos, entre 3-4. En el año 1997, a los dos géneros mencionados, *Acetobacter* y *Gluconobacter*, hay que sumarle la definición de dos nuevos géneros de bacterias acéticas: *Gluconoacetobacter* y *Acidomonas* (Yamada et al., 1997); y en los últimos años se han definido otros dos nuevos géneros más: (Kozakia, Lisdiyanti et al., 2002) y Guillamón et al., 2003 describe que por tanto, en estos momentos, la familia *Acetobacteriaceae* está formada por 6 géneros y 34 especies de bacterias acéticas. *Acetobacter* y *Gluconoacetobacter*, con 14 y 11 especies respectivamente, son los géneros donde existe una mayor diversidad de especies. El

conocer que cepas y bacterias acéticas están implicadas en la transformación de etanol en ácido acético es de gran importancia por su repercusión y aplicación a la producción industrial. En general, la producción de vinagres sólo se ha asociado con las especies: *A. aceti*, *A. pasteurianus*, *Ga. europaeus* Gax.

1.1.3.3. Métodos de elaboración de vinagre

En el mercado existen dos tipos de vinagres (García-Parilla et al., 1998).

- 1) El primero se obtiene como producto de la fermentación o acetificación con cultivo superficial, las bacterias acéticas se encuentran en contacto directo con oxígeno gaseoso, situadas bien en la interfase fluido/gas o bien fijadas a soportes de materiales tales como virutas, elaborándose así la mayoría de los vinagres tradicionales.
- 2) El segundo tipo se elabora por la acetificación fermentación con cultivo sumergido, donde las bacterias acéticas están sumergidas libremente en el seno del fluido a fermentar, en el que constantemente se introduce aire, (solo o enriquecido con oxígeno), en condiciones que permitan la mínima transferencia posible desde la fase gaseosa a la fase fluida. Así se obtienen de forma rápida los vinagres comerciales actuales de menor precio.

Estos métodos se nombran de acuerdo al lugar y nombre de la persona que lo descubrió,

1). Métodos tradicionales de acetificación con cultivo superficial.

- **Método de Orleáns**

Es uno de los métodos más antiguos para fabricar vinagres. Emplea toneles de aproximadamente 250-300 litros de capacidad, que se colocan tumbados en filas horizontales y superpuestas, provistos de 2 agujeros de aproximadamente 5 cm. en cada extremo de los fondos de cada barril a 2/3 de la altura del fondo, que se rellenan con estopa para evitar la entrada de las moscas del vinagre, pero que dejan pasar aire. Además, en el lateral superior se hace otro orificio que se tapa con un corcho por donde penetra un tubo de vidrio, recto, que llega casi hasta el fondo del fluido permitiendo renovar el sustrato sin alterar el velo bacteriano situado en la superficie. Se trata de un procedimiento estático donde el fluido a acetificar es una mezcla de vino de bajo grado alcohólico con un 20% de

vinagre turbio. Los rendimientos de la transformación de etanol en acético son bajos y el proceso dura de 8 a 10 días una vez comenzada la acetificación, la velocidad depende de la temperatura, ya que la temperatura de 30°C es la óptima para el crecimiento de la bacteria acética.

- **Método Luxemburgués**

El fundamento de este método, y su diferencia fundamental con el método de Orleáns estriba en emplear virutas de haya que periféricamente quedan sumergidas en el fluido que está acetificándose. Así se consigue aumentar la superficie de acetificación de la bacteria y mejorar la transferencia de oxígeno, por lo que aumenta la velocidad de acetificación. La cuba giratoria muy elemental se prepara con un orificio grande en el centro de uno de los fondos, para procurar la entrada de aire. En uno de los costados de esta cuba, en la parte más alejada de la abertura, se practica un orificio estrecho, que puede obturarse con un tapa; es una canilla de madera o vidrio para vaciado del envase. El tonel está dividido en dos partes desiguales por un falso fondo, agujereado, con numerosos y finos orificios. La parte menor del tonel está llena de virutas de haya. En este compartimiento penetra un largo termómetro para controlar la temperatura, aspecto muy interesante para todo método rápido o semirápido. Se obtienen cantidades de vinagre, que pueden llegar como mínimo, cada cuarenta y ocho horas, a la cuarta parte del contenido de un tonel. El vinagre elaborado, que se extrae de las cubas, se sustituye por porciones iguales de vino, continuando la elaboración indefinidamente. (Xandri-Taguera, 1977)

- **Método de Schützenbach o Método Alemán**

Asimismo se describieron que se emplean toneles o generadores verticales de encina con doble fondo sobre el primero, agujereado, se colocan una serie de capas de virutas de madera de haya, impregnadas de vinagre de buena calidad. Sobre el borde superior lleva un diafragma perforado, con los orificios obturados con algodón. Al pasar el vino por el diafragma, burbujea aire que existe entre las virutas. El vinagre se extrae por la parte inferior. Se pueden emplear barriles de robles giratorios, parcialmente llenos de virutas, consiguiéndose así una mejor aireación. Las ventajas que se destacan de este proceso son la regulación de oxígeno y su uso para la producción continua de vinagre. El vinagre obtenido

con el método de cultivo superficial tiene el aroma y el gusto propio por el simultáneo envejecimiento. (Llaguno y Polo, 1991)

2). Métodos de acetificación con cultivo sumergido

Este es aquel método en la que no se utiliza material poroso o soporte, sino que se hacen circular pequeñas burbujas de aire a través de la biomasa, con lo que se favorece el proceso fermentativo. . La acetificación es muy rápida. Este proceso se utiliza ampliamente en la actualidad. Los rendimientos de la transformación del alcohol en ácido acético (hasta el 94%) resultan ser muy elevados. (Llaguno y Polo, 1991)

- **Modelos Frings**

En 1878, Heinrich Frings fundó en Aquisgran una sociedad productora de vinagre, que más tarde, en 1950, incorpora las patentes de invención resultantes de la investigación del proceso de fermentación sumergida, alcanzando un alto grado de desarrollo. Nacidas del Acetator Frings, base de la biotecnología vinagrera actual. El fundamento es la presencia de cultivo sumergido en el seno del fluido a acetificar, que se satura constantemente de pequeñas burbujas de aire. Una mayor población bacteriana así como la disponibilidad de oxígeno para los microorganismos permiten obtener un mayor rendimiento de la transformación de etanol en ácido acético (del 94%) y una mayor velocidad del proceso (25-30 horas).

La temperatura de la fermentación debe estar comprendida dentro del intervalo entre 30-31°C (Ormaechea, 1991) que es la temperatura óptima para obtener un mayor rendimiento. Es obvio que la oxidación de etanol a ácido acético es una reacción exotérmica que puede producir alrededor de 8.4 MJ(Megajoule) por cada litro de etanol que se oxida (Adams, 1985) elevando la temperatura del depósito. Por otra parte, cuando la temperatura es elevada aumentan las pérdidas de alcohol y productos volátiles y, en menor cuantía, de ácido acético, pero quizás lo más importante, es que puede ocurrir la parada del proceso por la muerte de bacterias, compuestos volátiles se ha desarrollado un sistema cerrado (Cantero et al., 1996), mejorando sensiblemente los resultados del proceso fermentativo. El fermentador consta de un sistema de recirculación de aire y un sistema de control

automatizado que inyecta oxígeno en dicha corriente a medida que este es consumido por la biomasa. Se alcanzan así rendimientos cercanos al 100% (Gómez et al., 1993).

1.1.3.4. Propiedades y usos del vinagre

El vinagre, tan ácido como una manzana verde, combate las bacterias y hongos; quita la comezón que producen las picaduras de mosquitos y alivia las quemaduras de sol. También puede calmar el estómago revuelto, prevenir la otitis externa, abrillantar el cabello y suavizar la piel. Algunas personas dicen que el vinagre mezclado con miel y agua caliente alivia el dolor de los calambres en las piernas. Otras usan vinagre para secar el herpes labial. Además, si alguien se desmaya, el vinagre es una opción útil en lugar de las sales de olor. También está indicado para el tratamiento del acné, las caspas y las quemaduras del sol. (Llaguno, 1991)

El vinagre es un arma eficaz contra las bacterias. Las curas de vinagre han exterminado los bichos infecciosos una y otra vez. En la Primera Guerra Mundial, las heridas de los soldados se limpiaban con vinagre e incluso en la actualidad, si se puede tolerar el ardor, es un desinfectante muy adecuado para un rasguño o una úlcera. Es igualmente pernicioso con los hongos que causan infecciones. La mayoría de éstos ceden cuando se los ataca con una dosis de vinagre. (Llaguno, 1991).

1.2. Proceso de obtención de etanol

1.2.1. Materias primas para la producción de etanol

La materia prima esencial en la producción de etanol está constituida por la fuente de carbono, la que proporciona la energía requerida para la formación del mismo. En la producción de etanol por fermentación se pueden emplear materias primas azucaradas, amiláceas y lignocelulósicas. Las materias primas azucaradas tienen la ventaja de que sus carbohidratos componentes están en forma de monosacáridos y oligosacáridos, por lo que el sustrato puede ser fermentado directamente por los microorganismos productores. Las melazas de caña y remolacha, los jugos de caña y los jugos de frutas son materiales que pertenecen a este grupo. En Cuba, al igual que en la mayoría de los países tropicales, las melazas de caña son la materia prima más utilizada en la producción de etanol (Martín, 2002).

Las materias amiláceas contienen almidón, el cual no es fermentable directamente, por lo que requiere ser hidrolizado previamente por vía química o enzimática con el fin de obtener azúcares que puedan ser fermentados por las levaduras. Entre estas materias primas se encuentran cereales, tubérculos y raíces. En los países de clima templado las materias primas amiláceas son las preferidas para la producción de etanol. (Mays, 1990).

Los carbohidratos contenidos en las materias lignocelulósicas son la celulosa y las hemicelulosas, polisacáridos que pueden ser hidrolizados a azúcares simples, muchos de los cuales a su vez pueden ser fermentadas a etanol por las levaduras.

1.3. Generalidades del almidón

Según Luallen, 1988, Buléon y Col., 1990, el almidón es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores constituyendo una fuente de energía esencial para muchos organismos, especialmente el hombre. Según Guilbot y Mercier, 1985, el almidón representa una fracción importante en un gran número de productos agrícolas como los cereales maíz, trigo, arroz, cuyo contenido de almidón va del 30 al 80%, leguminosas frijol, chícharo, haba con un 25 a 50% de almidón y tubérculos papa, yuca en los que el almidón representa entre un 60 y 90% de la materia seca. La producción mundial total de almidón se estima en 18 millones de toneladas que se extraen principalmente de maíz 10 millones y papa 3 millones, el resto del trigo, arroz, yuca y sorgo. Se estima que aproximadamente el 50% de esta producción se destina a la preparación de alimentos. Según Biliaderis, 1991, desde el punto de vista nutricional, el almidón es el principal componente de la dieta humana. Según Guzmán-Maldonado, 1992, además de su aplicación en la industria alimentaria, también el almidón es utilizado para la fabricación de pegamentos, pinturas como agente floculante, material de relleno y como materia prima en la industria farmacéutica. Según Jane y Col., 1992, Doane, 1994, también en el ámbito ecológico el almidón ha empezado a jugar un papel importante en la fabricación de plásticos biodegradables. Según Zhao y Whistler, 1994, en fechas recientes se ha planteado el uso del como un material que se puede encapsular sustancias como proteínas, sabores y olores, entre otras, para su posterior liberación dentro de un producto alimenticio. Según Singhal y Kulkarni, 1988, el tamaño de partícula, incluyendo la distribución de tamaño, es una de las características que más afectan las propiedades funcionales de los gránulos de

almidón. Se ha reportado que los gránulos pequeños tienen una mayor solubilidad en agua y una alta capacidad de absorción de agua. Según Guilbot y Mercier, 1985, los gránulos de almidón cuando se extraen y se secan tienen la apariencia de un polvo blanco y son insolubles en agua fría. En forma general presentan una composición química con 0.06-0.45% de proteínas, 0.05-0.8% de lípidos y 0.08-0.5% de cenizas y el resto lo forma almidón propiamente dicho.

1.3.1. Estructura química del almidón

El almidón está compuesto de un polímero de D - glucosa. Químicamente, el almidón consiste en dos polímeros de diferente estructura, amilosa y amilopectina, además de que en algunos almidones se ha identificado un tercer componente denominado material intermedio. (Biliaderis, 1991). La proporción de estos dos polímeros y su organización física dentro de la estructura granular le confiere propiedades fisicoquímicas y funcionales características a los diferentes almidones.

Se define la amilosa como un polímero lineal, formado por unidades de D-glucopiranosas unidas por enlaces α -(1 \rightarrow 4), sin embargo, se ha demostrado la presencia de ciertos enlaces α - (1 \rightarrow 6) en esta macromolécula. Moore et al (1984), agregaron que la molécula de amilosa contiene de 500 a 6000 unidades de D-glucosa repartida en un número de cadena que va desde 1 a 20. Por su contenido de amilosa, los almidones se pueden clasificar en diferentes grupos como son los almidones cerosos que tienen poca cantidad de amilosa, alrededor del 1-2%, los normales contienen de 17-24% de amilosa, y los altos en amilosa que contienen 70% o más de este polímero. Debido a su carácter esencialmente lineal y a la presencia exclusiva de enlaces α -(1 \rightarrow 4). (Bello-Pérez, 2005)

La amilosa es susceptible de formar complejos con moléculas hidrofóbicas como el yodo, los ácidos grasos o los hidrocarburos. La reacción de complejamiento de la amilosa con el yodo es la base para la caracterización analítica y determinación cuantitativa de esta macromolécula. (Bello-Pérez, 2005)

Amilopectina, es el componente ramificado del almidón, está formado por cadenas de residuos D-glucopiranosidos (entre 17 y 23 unidades) unidos principalmente por enlace α -(1-4). También presenta entre 5-6% de enlace α - (1 \rightarrow 6) en los puntos de ramificación. Dependiendo de la fuente la amilopectina es el principal componente en la mayoría de los

almidones (entre 70-80 %) alcanzando en ciertos niveles de hasta un 98-99 % en los almidones de tipo ceroso. Debido a esto, la amilopectina, es quizás el componente que tiene mayor importancia en términos de las propiedades del almidón. La presencia de los componentes estructurales, amilosa y amilopectina se identifican mediante una reacción de acomplejamiento de estos con el yodo, dando un color azul cuando hay presencia de amilosa, y púrpura cuando hay amilopectina. (Filho, 2005)

1.3.2. Degradación del almidón

La degradación del almidón ocurre en tres etapas: gelatinización, licuefacción, y sacarificación. (Kunze, 1999)

Gelatinización: es el proceso de calentamiento de agua donde esta se incorpora a las moléculas de almidón, aumentando el volumen e hinchando los gránulos de almidón, hasta que se revientan y se forma una solución viscosa. Las temperaturas de gelatinización reportados en algunos almidones son: papa (55-66 °C), trigo (52-63 °C), maíz (62-72 °C), arroz (66-77 °C) y yuca (61-71 °C). (Guilbot y Mercier 1985).

Licuefacción: las largas cadenas de glucosa en el almidón (amilosa y amilopectina) se rompen rápidamente para formar cadenas más cortas bajo la acción de la α -amilasa, lo que provoca una reducción rápida de la viscosidad de la solución gelatinizada.

Sacarificación: es la etapa final de ruptura de las cadenas de amilosa y amilopectina por la α -amilasa para formar dextrinas obteniéndose de 7 hasta 12 residuos de glucosa, para verificar la presencia de almidón se realiza prueba con yodo.

1.3.3. Generalidades de las enzimas

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sean termodinámicamente posibles: Una enzima hace que una reacción química que es energéticamente posible pero que transcurre a una velocidad muy baja, sea cinéticamente favorable, es decir, transcurra a mayor velocidad que sin la presencia de la enzima. Asimismo Smith, 1997. Grisham y Reginald, 1991, aludieron en estas reacciones, las enzimas actúan sobre unas moléculas denominadas sustratos, las cuales se convierten en moléculas diferentes denominadas productos. Casi todos los procesos en las células necesitan enzimas para que ocurran a unas tasas significativas. A las reacciones mediadas

por enzimas se las denomina reacciones enzimáticas. Al igual que ocurre con otros catalizadores, las enzimas no son consumidas por las reacciones que catalizan, ni alteran su equilibrio químico. Sin embargo, las enzimas difieren de otros catalizadores por ser más específicas. (Bairoch, 2000)

Las enzimas catalizan alrededor de 4.000 reacciones bioquímicas distintas. Desde finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, se conocía la digestión de la carne por las secreciones del estómago y la conversión del almidón en azúcar por los extractos de plantas y la saliva. Sin embargo, no había sido identificado el mecanismo subyacente. (Lilley, 2005)

1.3.4. Tratamiento enzimático del almidón

En la industria alimenticia, las más utilizadas son Amilasas de hongos y plantas, estas catalizan la degradación del almidón en azúcares sencillos. En la elaboración de cerveza, las enzimas de la cebada son liberadas para degradar el almidón y las proteínas para generar azúcares sencillos. En la industria del almidón las *Amilasas*, *Amiloglucosidasas* y *glucoamilasas*, convierten el almidón en glucosa y diversos azúcares simples.

Generalmente esta modificación se realiza con el almidón gelatinizado para garantizar un mejor ataque enzimático. Dependiendo del tipo y fuente, las enzimas tienen diferentes niveles óptimos de pH y rango de temperatura para su máxima actividad. Una de las conversiones más ampliamente usada es la modificación enzimática para la conversión de almidón a maltodextrinas, siropes y azúcares. Las enzimas más comúnmente usadas son α y β - *amilasas*, *glucoamilasas*, enzimas desramificadoras y ciclo-dextrin- glicosiltransferasa. (Goñi y col., 2000)

1.3.5. Fermentación

Es un proceso que degrada moléculas para transformarlas en otras moléculas más simples. En la elaboración del pan las levaduras transforman el almidón (un azúcar complejo) en glucosa. Lo hacen mediante la enzima amilasa (otras enzimas: *glucosidasas* y *amiloglucosidasas*). La mayor parte de los azúcares que desdobla la levadura los utiliza la propia levadura para vivir y desarrollarse.

En ese proceso se producen unos deshechos: Alcohol (por eso se dice que la fermentación de la levadura es alcohólica).

1.3.6. Microorganismos presentes en la fermentación

Las levaduras son cualquiera de los diversos hongos microscópicos unicelulares que son importantes por su capacidad para realizar la fermentación de hidratos de carbono, produciendo distintas sustancias. Las levaduras son abundantes en la naturaleza, y se encuentran en el suelo y sobre las plantas. La mayoría de las levaduras que se cultivan pertenecen al género *Saccharomyces*, como la levadura de la cerveza, que son cepas de la especie *Saccharomyces cerevisiae*. (Déak y Beuchat, 1996)

Los diferentes usos de las levaduras son: como fuente de vitaminas del complejo B y de tiamina, en algunas fases de la producción de antibióticos y hormonas esteroideas, y como alimento para animales y seres humanos.

Las cepas puras de levaduras se cultivan en un medio con azúcares, compuestos nitrogenados, sales minerales y agua. El producto final puede aparecer en forma de células secas de levadura o prensado en pastillas con algún material excipiente. Cuando se termina de utilizar un lote de levaduras destinadas a la fabricación del pan, a usos médicos, o para fabricación de alimentos, el medio de cultivo en el que han crecido se desecha. Sin embargo en la elaboración de vinos, cervezas, licores y alcoholes industriales, el medio de cultivo es el producto final, y en este caso son las propias levaduras las que se desechan, o bien se utilizan como pienso o alimento para animales. (Déak y Beuchat, 1996)

- **Condiciones necesarias para que se produzca una fermentación.**

Las levaduras necesitan unas determinadas condiciones de alimento, humedad y temperatura para poder vivir y desarrollarse.

Sin humedad no pueden activarse, ya que la levadura necesita que su alimento esté disuelto en agua para poderlo asimilar. Su alimento base son los azúcares (lo que “más le gusta” es la glucosa, es el azúcar que puede utilizar), también necesita algo de nitrógeno (que toma

de las proteínas) y algunos minerales. No se alimenta del azúcar de mesa, la sacarosa, ya que es un azúcar muy complejo para ella al no tener enzimas para desdoblarlo. Las levaduras utilizan los azúcares de los alimentos que fermentan, transformándolos.

En cuanto a la temperatura: por debajo de 26° C no actúan (o con dificultad) y por encima de 35° C se debilitan demasiado. A 60° C, mueren. Necesita oxígeno (para la combustión u oxidación de la glucosa).

1.4. Destilación

Destilación, proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles. En la evaporación y en el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente menos volátil; el componente más volátil, casi siempre agua, se desecha. Sin embargo, la finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil en forma pura. Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos. (Treybal, 1986).

Si los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla sólo difieren ligeramente, no se puede conseguir la separación total en una destilación individual. Un ejemplo importante es la separación de agua, que hierve a 100 °C, y alcohol, que hierve a 78,5 °C. Existen varios tipos de destilación como son: destilación por vapor, destilación al vacío, destilación molecular centrifuga, sublimación y destilación destructiva. (Treybal, 1986)

1.5. Origen e Historia de la yuca

La yuca (*Manihot esculenta crantz*) era cultivada en toda América Tropical a la llegada de los conquistadores españoles. Las evidencias históricas demuestran que la yuca es un cultivo que se ha desarrollado en una amplia área de tierras bajas y calientes de los trópicos americanos, que va desde el noroeste de Suramérica (Venezuela y Colombia), hasta el noroeste de Brasil. Se estima que esta especie tiene dos centros geográficos de dispersión,

uno en México y en América Central, y otro en el noroeste de Brasil, que alcanza desde el oeste hasta Matto Grosso e incluye partes de Paraguay. Según, la evidencia arqueológica más antigua, se encuentra en Perú, y según otros historiadores en la parte norte de Sudamérica, Colombia y Venezuela. Por ejemplo hay evidencias de la presencia del cultivo de la yuca que datan de 2700 A C y que fueron encontradas en las cuencas del lago Maracaibo. En las cuevas de la sierra de Tamaulipas, en el noroeste de México, se encontraron semillas y restos de hojas de yuca en la cultura La Laguna, de hace cerca de 2100 años. Actualmente, los cultivares de *Manihot Esculenta* se encuentran distribuidos principalmente en las tierras bajas y calientes de los trópicos. Sin embargo, hay algunos cultivares en las tierras altas y frías de Bolivia. (FDA, 1997).

1.5.1. Descripción botánica de la yuca

División: Fanerógamas

Subdivisión: Angiospermas

Clase: Dicotiledóneas

Subclase: Choripetales

Suborden: tricoccae

Familia: Euphorbiaceae

Subfamilia: crotonidae

Tribu: Manihoteae

Género: *Manihot*

Especie: *Esculenta*

1.5.2. Importancia económica y alimenticia de la yuca

La yuca es la cuarta fuente mundial de calorías en la alimentación humana. Es ampliamente producida en América Tropical, debido a la gran cantidad de carbohidratos que almacena en sus raíces. Las raíces tienen 30 a 40% de materia seca, una proporción más alta que la de otros tubérculos. El contenido de materia seca depende de factores como la variedad, la edad de las raíces al momento de la cosecha, el suelo, las condiciones climáticas y la sanidad de la planta. El almidón y los azúcares son los componentes predominantes de la materia seca aproximadamente un 90%, siendo el almidón el más importante. La energía

metabolizable de la yuca seca, de 3,500 a 4,000 Kcal /g, es similar a la harina de maíz. El contenido de proteína cruda de las raíces es de 2 a 3% con base en la materia seca. Sin embargo, el contenido de proteína verdadera es menor, ya que hasta la mitad del nitrógeno de las raíces no es nitrógeno proteico. La calidad de la proteína es razonablemente buena, a pesar de que hay deficiencia de aminoácidos azufrados. Las raíces contienen cantidades significativa de vitamina C, tiamina, riboflavina, y niacina. Una persona que consuma diariamente más de 250 calorías de yuca, satisface los requerimientos diarios de vitamina C, sin embargo, el contenido de esta vitamina se reduce en un 50 o 70% al cocinarla. Nutricionalmente, la yuca es de mucho valor para la dieta, ya que se aprovecha la raíz y el follaje. Las raíces ricas en carbohidratos y el follaje es uno de los materiales vegetales verdes con mayor riqueza proteica (FDA, 1997).

1.5.3. Utilización de la yuca

Las raíces de de yuca constituyen aproximadamente el 50% del peso total de las plantas al momento de la cosecha, entre los nueve y doce meses de edad del cultivar. Las raíces pueden ser utilizadas en su totalidad para alimentación animal, especialmente, para aves, cerdos y ganado en forma de harina (FDA, 1997). Esta harina se obtiene después de picar las raíces completas en trozos o astillas, secarlos al sol y luego moler los trozos secos para incorporarlos como harina en los alimentos balanceados.. A pesar de las cualidades nutricionales de las diferentes partes de la planta, en especial de las raíces, su utilización en la alimentación animal en la mayoría de los países de América Latina y, en especial, el nuestro, es relativamente restringido. En resumen, los usos generales de la yuca son:

Alimentación humana: Consumo fresco: raíces, hojas. Consumo seco: casabe, yuca seca, harina, tapioca, yuca frita

Alimentación animal: yuca cruda (raíces); yuca salcochada (raíces); harina de raíces de yuca; heno de hojas.

Industria: almidón, dextrinas, glucosa, alcohol.

1.5.4. Usos y variedades de la yuca en Cuba

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) constituye la cuarta fuente de energía en la alimentación humana producida en el trópico. En Cuba se ha cultivado a través de los años

y forma parte del surtido de raíces y tubérculos que el pueblo cubano denomina viandas, algunas de las variedades que se cultivan son:

- Señorita
- Jagüey Dulce
- Selección Holguín
- Cemsa 74-725
- Enana Rosada
- CMC – 40
- Cemsa 74-6329

1.5.5. Época de plantación.

De noviembre hasta el 15 de Febrero es la época óptima en nuestras condiciones y se cultiva en suelos de media y baja fertilidad y con un pH ácido entre 4,4 y 5,5. (Cubaciencias, 2011).

1.5.6. Análisis de la raíz.

La raíz de la yuca se compone de tres tejidos, el periderma, (cascarilla), el parénquima (corteza) y el parénquima interior.

- El 80% del peso fresco de la raíz aproximadamente, corresponde al parénquima o pulpa, que es el tejido que la planta almacena almidón.
- El contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre 3% y 4 %.
- La materia seca del parénquima está constituida en su mayor parte (90 % a 95 %), por la fracción no nitrogenada, es decir `por carbohidratos (almidón y azúcares).
- El resto de la materia seca corresponde a fibra (1 % a 2 %), grasas (0.5 % a 1.0%), cenizas o minerales (1.5 % a 2.5 %) y proteínas (2.0 %).
- El almidón representa además la mayor parte de los carbohidratos (96 %) y es por tanto el principal componente de la materia seca de la raíz (Wheatley,1999)

1.6. Conclusiones del Capítulo.

Después de analizar las diferentes fuentes bibliográficas en relación con el objeto de la investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

- Para obtener vinagre se debe partir de etanol, oxígeno, bacterias *acetobacter* y nutrientes para su crecimiento y desarrollo. Se aplican dos métodos para su elaboración: superficial y sumergido.
- Los residuales de la industria cervecera aportan nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las bacterias acéticas, por lo que se pueden emplear en el proceso de elaboración de vinagre.
- Los organismos más usados en la obtención de etanol por fermentación son las levaduras del género *Saccharomyces* y crecen en forma anaerobia realizando la fermentación alcohólica.
- El rango óptimo de pH para que las levaduras se multipliquen es entre 7.5 y 5.0, pero la mayoría toleran un rango de pH entre 3 y 10 y la temperatura óptima adecuada suele situarse entre 20 y 30°C, la incubación a 30 °C suele ser satisfactoria
- La transformación del almidón en azúcares se puede realizar a partir de tratamientos enzimáticos.

CAPÍTULO II: Materiales y Métodos.

En este capítulo se describen las técnicas analíticas, métodos y procedimientos para la obtención, caracterización y tratamiento del almidón de yuca y posteriormente la obtención del vinagre.

El trabajo experimental se desarrolló en el laboratorio de Biotecnología Ambiental, perteneciente a la Planta Piloto, ubicada en la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". La investigación se realizará primero a escala de laboratorio y luego se propondrá la metodología para su obtención a escala de planta piloto.

2.1. Metodología para la elaboración de vinagre a partir de almidón de yuca y residuos de la industria cervecera, a escala de laboratorio

El proceso se realiza en cuatro etapas fundamentales, ver esquema 2.1.

1. Obtención del almidón.
2. Tratamiento enzimático del almidón.
3. Proceso de obtención de etanol a partir de los azúcares obtenidos.
4. Elaboración del vinagre empleando extracto de afrecho y trub, y el etanol producido.

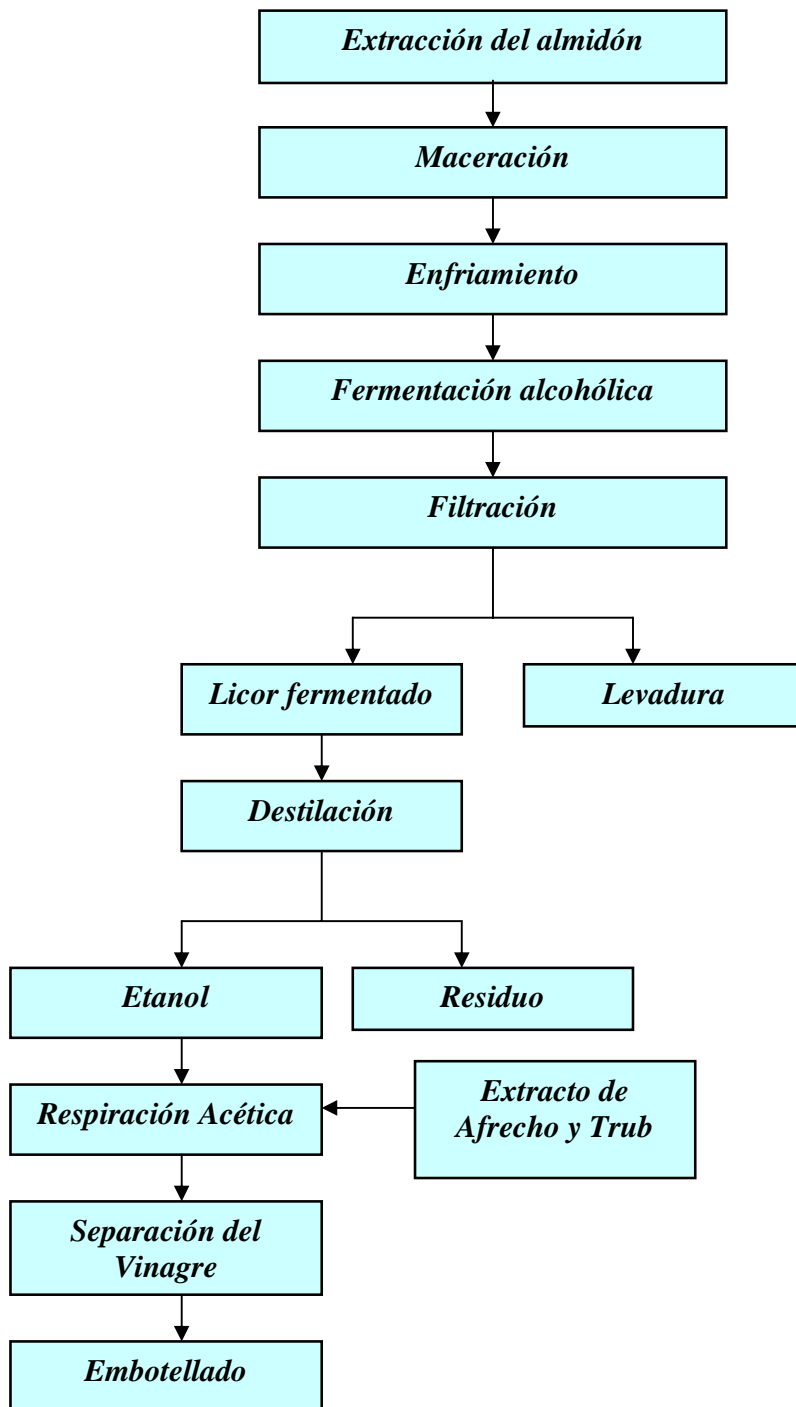


Figura 2.1 esquema del proceso para la obtención de vinagre a partir de almidón de yuca y residuales de la industria cervecera.

2.1.1. Extracción del almidón de yuca a escala de laboratorio.

El proceso de obtención del almidón de yuca se realiza a través de los siguientes pasos:

- Recolección de la yuca
- Lavado de las raíces
- Pelado
- Rallado y separación del almidón.

Esta investigación constituye el inicio del estudio del proceso de obtención de almidón de yuca para producir vinagre, a escala de laboratorio, por lo que se partió de 10 libras de yuca, cantidad necesaria para garantizar una masa considerable de almidón. Las yucas fueron adquiridas directamente del mercado estatal.

- Lavado de la raíces.

El proceso de lavado se realiza con el objetivo de eliminar elementos indeseables para el proceso como: tierra, microorganismos, productos químicos y otros cultivos.

- Pelado

Las yucas se pelan y trocean de forma manual. La cáscara obtenida y la raíz pelada se pesan de forma independiente, para su análisis posterior.

- Rallado y separación del almidón.

Este proceso se realiza con el objetivo de disminuir el tamaño de las fibras que permitan la separación de los granos de almidón de estas, mediante su mezclado con agua. La separación del almidón de la fibra se realiza en tres momentos: primero se separa la fibra del almidón con el empleo de un tamiz mallas de 200 μ m 100 μ m y 50 μ m 1, la pulpa obtenida se filtra al vacío y la torta resultante se seca a 60 °C, para su conservación y posterior tratamiento, con el empleo de una Estufa - incubadora digital AASET YLD-6000 Alemana, con control térmico, de 0,1 °C de sensibilidad, por espacio de 24 horas.

2.1.2. Maceración

Generalmente esta modificación se realiza con el almidón gelatinizado para garantizar un mejor ataque enzimático, la enzima a emplear es la α -amilasa. En este proceso se desdoblan los enlaces, de *amilosa* y *amilopectina* presente en el gránulo de almidón, y formándose *maltosa* y *dextrinas*, esta maltosa obtenida esta compuesta por dos moléculas

de glucosa (azúcares fermentables). Para analizar la relación entre la cantidad de enzimas a emplear y el consumo energético durante el proceso, se seleccionaron 3 variantes de muestras:

Muestra 1- 1L de suspensión, con 200g de almidón y 0.5 ml de enzimas α -amilasa.

Muestra 2- 1L de suspensión, con 200g de almidón y 1 ml de enzimas α -amilasa.

Muestra 3- 1L de suspensión, con 200g de almidón y 1.5 ml de enzimas α -amilasa.

Procedimiento para la realización del tratamiento enzimático.

Se realizan 3 réplicas a cada experimento de cada muestra. A las muestras inicialmente se les mide el °Brix, con el empleo de un refractómetro manual ABBE, luego se calientan dichas disoluciones, revolviéndolas constantemente hasta una temperatura de 75 °C, a la cual se le medirá nuevamente los °Brix.

Posteriormente se adiciona 0.5ml, 1ml y 1.5mL de enzima alfa amilasa termoestable a cada muestra y se continua agitando, se mantiene por 5 minutos a la temperatura entre 75-80 °C, se mide otra vez los °Brix y se realiza las pruebas de determinación de almidón (yodometría) a las disoluciones cada 5 minutos. Las pruebas pertinentes con Iodo se hacen hasta que desaparezca el almidón.

Luego se hierve por diez minutos a la temperatura de 90 °C con el objetivo de desnaturalizar las proteínas, se enfría y se ajusta el volumen al inicial.

Posteriormente se enfrían las mezclas hasta la temperatura de 30 °C obtenidas para evitar la destrucción de los microorganismos, presentes en la fermentación.

Utensilios necesarios para el montaje de los experimentos

Refractómetro de Abbe.

Vasos de precipitado de 100 mL

Balanza analítica digital Sartorius BS 124 S. Máx 2200g, con una precisión de 0.1mg.

Hornilla

Termómetro

Cronómetro

Micro pipeta

Placa de porcelana con depresiones

Agitador

Caldero

Reactivos químicos:

Enzima alfa amilasa termoestable

Solución de Yodo

Ácido fosfórico (H_2PO_4)

Enzima alfa – amilasa termoestable BIALFA – T (Termamil 120)

Al producto obtenido de la maceración se le determina la densidad, aplicando el método picnométrico, según la norma RTCR-109:1991. Bebidas alcohólicas.

2.1.3. Proceso de fermentación a escala de laboratorio

Inicialmente se les ajusta el pH a cada muestra a un valor de 5, valor óptimo para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, con la adición de ácido fosfórico, el cual aportaría fósforo para el desarrollo de la carga microbiana, haciendo uso de un pH metro MV 88 con electrodo de combinado. Los experimentos se realizan en pomos de suero de 500 ml, tapados con tapón de gasa y algodón, para facilitar la salida del CO_2 que se desprende de la reacción de fermentación. A cada pomo se le añade 10 ml de inóculo de levadura.

Para el análisis del comportamiento del proceso de fermentación se realizan diferentes mediciones como: pesada de los frascos con las muestras, medición del pH, $^{\circ}Brix$, azúcares reductores totales y conteo de microorganismos. Las pesadas se les realiza a los frascos A, B y C de cada muestra, sin embargo las demás mediciones se le realizan al contenido del frasco D de cada muestra. La distribución de las muestras a analizar es:

1. Muestra 1(0,5 mL enzima)- 1A, 1B, 1C, 1D
2. Muestra 2 (1mL enzima)- 2A, 2B, 2C, 2D
3. Muestra 3 (1,5 mL enzima)- 3A, 3B, 3C, 3D

2.1.4. Determinación de azúcares reductores totales

La determinación de los azúcares reductores totales, se realiza con el objetivo de conocer la cantidad de azúcares que hay en la disolución.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

Micropipetas de 10, 250, 500 y 1000 microlitros.

Tubos de ensayo.

Baño de María, Midingen / Sitz Freital, Alemania.

EspectrofotómetroUV-4200

Reactivos químicos

Ácido 3,5-dinitrosalicílico.

Disoluciones patrón de glucosa.

Procedimiento:

La determinación se realiza utilizando ácido 3,5 dinitrosalicílico como desarrollador de color. Se preparan patrones de glucosa a 0.1, 0.25, 0.4, 0.6, 0.7, y 1.0 mg/ml de concentración, se realizan las lecturas de absorbancia a una longitud de onda de 546 nm, para la confección de una curva de calibración. El contenido de ART se determina contra la curva patrón y los resultados son expresados en g / L. La ecuación pertinente para determinar azúcares reductores es la siguiente:

$$\text{ART} = \text{Absorbancia} / 1.001 * 10$$

2.1.5. Conteo de Microorganismos

Se realiza con el objetivo de conocer el desarrollo de los microorganismos presentes en la fermentación. Según (Déak y Beauchat, 1996) se puede estimar que:

$$1 \text{ ABS (absorbancia) } \longrightarrow 1.66 * 10^7 \text{ UFC (unidades formadoras de colonias)}$$

Aparatos, utensilios y medios de medición:

EspectrofotómetroUV-4200

Micropipetas de 10, 250, 500 y 1000 microlitros.

Tubos de ensayo.

2.1.6. Determinación del ° Brix

Esta medición se realizará con el objetivo de determinar la cantidad azúcares sin fermentar durante el proceso.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

Refractómetro de Abbe

Gotero.

Procedimiento:

Se limpia con agua destilada y se seca con papel de filtro cuidadosamente la tapa y el prisma antes de comenzar la medición, se le adicionará una fracción de cada ensayo (D), de cada muestra, en dicho prisma. Se sostiene el refractómetro y se leen los °Brix donde se encuentre la línea que divide una zona clara de otra oscura.

2.1.7. Pesada de las muestras

Esta se realiza con el objetivo de determinar el inicio y final del proceso de fermentación (cuando los valores de las pesadas se mantienen constantes). Las muestras se pesan cada 24 horas. Nos permite comprobar el tiempo de fermentación mediante el indicador en el proceso de la pérdida de peso.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

Pipeta

Balanza digital Sartorius, máximo 2200g, con una precisión de 0.1mg.

2.1.8. Destilación

Destilación, proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

Balón de destilación

Torre de relleno con anillos de cristal

Condensador de espiral o serpentín

Trampa de vapor

Hornilla

Probeta de 250mL.

Alcoholímetro con escala hasta 10% de alcohol y referido a 15⁰C (288⁰K).

Termómetro.

Procedimiento:

Se toman 250 ml de muestra y se colocan en un balón de destilación, que esta conectado a una fuente de calor, cuando se alcanza los 78.5 ° C comienza a evaporarse el etanol, dichos vapores se condensan en un condensador, conectado al final de la columna. Al producto obtenido se le mide el grado alcohólico.

2.1.9. Proceso de obtención del extracto del afrecho y trub

Procedimiento

Se toma una masa sólida de extracto de afrecho, aproximadamente 3 Kg. y se hidroliza en 20 litros de agua, este extracto de afrecho contiene de 15% – 20 % de proteína, se hidroliza con *papaína* (la *papaína* constituye una enzima *proteolítica*, ya que transforma la proteína hasta aminoácidos, que constituye el nutriente adecuado para el desarrollo de las bacterias acéticas). Este proceso se realiza durante una hora a una temperatura de 60 °C, posteriormente a 85 °C se le añade la enzima *α-amilasa-termamil*, esta enzima termoestable, se utiliza para aprovechar cualquier resto de almidón que haya quedado, se pone a hervir durante una hora.

Posteriormente se filtra y se enfría a 30 °C.

Tratamiento del trub.

El trub está compuesto por lúpulo residual y es un licor rico en componentes nutritivos. La eliminación del lúpulo residual se realiza mediante el proceso de filtración, empleando un embudo Buchner acoplado a una bomba de vacío.

Insumos

Entre los principales reactivos químicos y microbiológicos empleados en la obtención del extracto de afrecho y trub están:

- *Papaína.*
- *α -amilaza.*

Los equipos e instrumentos utilizados en el proceso fueron:

- Recipiente metálico de 2 L de capacidad
- Resistencia eléctrica, de una potencia de 1005 Watt
- Termómetro

Composición de las muestras para la obtención del vinagre a escala de laboratorio.

Para la determinación de la composición de las muestras se realizó un diseño de experimento del tipo mezcla, donde los factores independientes son el contenido de extracto de Afrecho y Trub, y contenido de Etanol, ya que son las materias primas que van a variar sus composiciones en las bandejas. Como variable respuesta se escogió la acidez debido a que es un parámetro determinante en la composición del vinagre, para ello se utilizó el software “*StatGraphics Plus 5.0*”. (Ver anexo 3)

Tabla 2.2 – Base del diseño de experimento.

Factores	Valor mínimo	Valor máximo
Afrecho	5	15
Etanol	85	95

El software *StatGraphics Plus 5.0*’, tiene como basamento los siguientes aspectos:

Diseño de mezclas

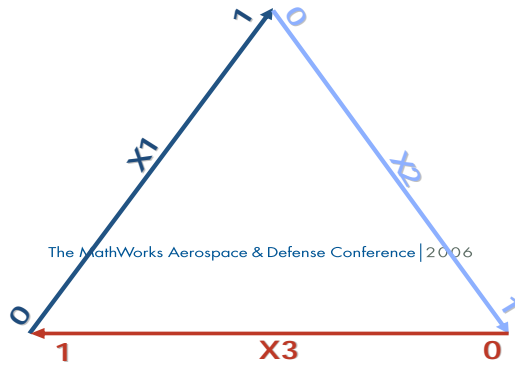
- Los factores son componentes o ingredientes de una mezcla.
- Los niveles de cada factor dependen de los niveles de los restantes factores.

$$0 \leq X_i \leq 1$$

Para $i = 1$ hasta K

$$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_k = 1$$

Sistema de Coordenadas Trilineal



6

Figura 2.2 Sistema de Coordenadas Trilineal.

Notación

Los diseños de mezcla se representan como:

$(k; m)$

Donde

k = Número de factores

m = Número de niveles para cada factores

Diseño de celosía simple

Tamaño de la muestra

$$n = \frac{(k + m - 1)!}{m!(k - 1)!}$$

Donde: m = Niveles y k = Factores; generalmente $m=2$

2.1.10. Obtención del vinagre a escala de laboratorio

Procedimiento

Para la obtención del vinagre, se emplea el método superficial, con el uso de bandejas plásticas de capacidad 1L. La cantidad y contenido de las muestras a emplear se determina con la realización de un diseño de experimentos tipo mezclas, con la ayuda del software Statgraphis Plus. 5.0.

Del producto obtenido de la fermentación se enfría y por cada litro de fermento se le adiciona 50 ml de extracto de afrecho y trub.

Se coloca en una bandeja, se tapa con una tela metálica y se le va midiendo la variación del pH, ya que esta es la medida con la que se forma el ácido acético. Por último se le añade a cada bandeja 100ml de nata de vinagre, encargada de iniciar la actividad bacteriana.

A este vinagre obtenido se le realizará las pruebas pertinentes de calidad de vinagre

Insumos

Entre los principales insumos empleados en la elaboración y análisis del vinagre están:

- Madre del vinagre
- Bandejas plásticas para fermentación.

El tiempo de formación del vinagre puede variar en cada caso hasta 7días. Durante este tiempo se le deben efectuar pruebas al vinagre en formación para determinar la calidad y terminación del mismo.

2.1.11. Separación del vinagre de la capa madre.

En esta etapa se procede a extraer el vinagre mediante la decantación. La capa madre del vinagre se conserva para su posterior uso.

2.1.12. Embotellado y almacenamiento.

El producto, cuando se presente a granel, debe ser almacenado en locales debidamente acondicionados para el caso. El vinagre puede ser almacenado a temperatura ambiente (NMX-F-122).

Pruebas de calidad al vinagre obtenido

Según las normas internacionales y cubanas de calidad al vinagre se le realizan al vinagre obtenido las pruebas de calidad siguientes:

Medición de pH

La medición de pH se realiza siguiendo la norma mexicana para la determinación de pH por método potenciométrico (NMX-AA-25).

Determinación de ácido acético en vinagre

La determinación de ácido acético en vinagre se realizó mediante la Norma Cubana: Vinagre. Determinación de acidez (NC/ISO 8334). (Ver anexo 4)

Determinaciones de densidad relativa, extracto seco y cenizas al vinagre obtenido

Estas pruebas se realizaron según las normas:

(NGO 33 010 h1) Determinación de la densidad relativa y de la densidad absoluta.

(NGO 33 010 h3) Determinación del extracto seco.

(NGO 34 003 h30) Determinación de cenizas.

Los valores obtenidos al realizar las determinaciones anteriormente mencionadas deben de estar dentro de los rangos escritos en la tabla 2.3

Tabla 2.3–Especificaciones del vinagre según (NMX-F-122).

Especificaciones	Mínima	Máxima
Densidad relativa a 15°C	1.013	1.025
Extracto seco %	1.8	4.52
Cenizas %	0.25	0.45

Análisis físicos a realizar:

Al vinagre se le realizará la siguiente prueba física:

Apariencia

El vinagre debe ser limpio, brillante, transparente sin presentar turbidez (NMX-F-122).

Organolépticas.

Al vinagre se le realizaron las siguientes pruebas organolépticas.

Olor.

Será el característico del producto, de acuerdo con la materia prima usada o los aromatizantes naturales empleados (NMX-F-122)

Sabor.

El característico de la materia prima de la que provenga (NMX-F-122).

2.2. Propuesta de un esquema tecnológico para la obtención, a escala de planta piloto, de vinagre a partir de almidón de yuca y residuos de la industria cervecera.

La planta que se propone se quiere instalar en el laboratorio de biotecnología ambiental perteneciente a la planta piloto, con el objetivo de obtener vinagre tomando como base la producción de 30 litros.

2.3. Propuesta de diseño de equipos para obtener vinagre.

Par poder producir vinagre en el laboratorio de Biotecnología Ambiental, perteneciente a la Planta Piloto, ubicada en la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", es necesario diseñar algunos equipos que no se encuentran en la misma.

2.3.1. Diseño de una bomba

Es necesario instalar una bomba que sea capaz de transportar el fluido que sale desde el macerador, hasta el enfriador. Debido a que la viscosidad y densidad del producto macerado es cercana a la del agua y no hay presencia de partículas sólidas en suspensión se propone diseñar una bomba del tipo centrífuga. La elección del tipo se hace a partir de los siguientes aspectos:

1. Cálculo de la carga que debe garantizar la bomba.
2. Comprobar si la bomba cavita o no.
3. Para seleccionar según los catálogos la bomba adecuada es necesario calcular la carga de la misma.
4. En la planta piloto se dispone solo un tipo de tubería de acero sin costuras, de diámetro 1/8 de pulgadas la cual se instala en todo el proceso o sea antes y después de la bomba por lo que las velocidades son iguales y se simplifican.
5. Z_1 se encuentra a flote con el líquido en el macerador y Z_2 se encuentra en el borde de entrada del enfriador, ambos a presión atmosférica por lo que se simplifican las presiones.
6. El punto 1 (Z_1) tiene una altura de 0.6m y el punto 2 se encuentra al nivel de todo el proceso por lo que Z_2 es 0.

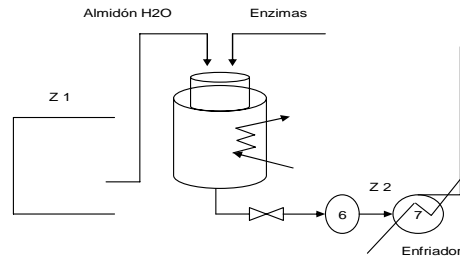


Figura 2.3 Esquema del proceso donde va ubicada la bomba:

Balance de energía mecánica. Planteamiento de la ecuación de Bernoulli.

Para calcular las pérdidas por fricción en tuberías es necesario conocer el régimen de flujo y la rugosidad de las tuberías.

Se calcula la velocidad que se calcula con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{q}{A} = \frac{4q}{\pi d^2} \quad \text{Ec (2.2)}$$

Luego se tiene que conocer el valor del número de Reynolds para saber cómo es el régimen, y con este determinar el factor de fricción. Se calcula el número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu} \quad \text{Ec (2.3)}$$

El factor de fricción depende del resultado del número de Reynolds y (ϵ/d) .

$\varepsilon = 0.2$ tubo de acero sin costura (Rosabal; 2006).

ε – rugosidad en tubos.

Las pérdidas por fricción se calculan por la siguiente ecuación:

$$\Sigma hf = hf_{Tuberia} + hf_{Accesorios} \quad \text{Ec (2.4)}$$

Para este cálculo se debe saber que en el sistema existen:

3 codos de 90° ($K = 0,75$) (Rosabal; 2006).

1 válvula de compuerta abierta ($K = 0,17$) (Rosabal; 2006).

Teniendo todo lo necesario para calcular las pérdidas se pasará a calcular por separado cada una de ellas:

Pérdidas en tuberías, donde:

$$Hf_{tuberia} = f \frac{Lv^2}{2gd} \quad \text{Ec (2.5)}$$

Pérdidas en los accesorios.

$$Hf_{accesorios} = \frac{\Sigma Kv^2}{2g} \quad \text{Ec (2.6)}$$

El cálculo de la bomba quedará:

$$Hb = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \Sigma hf - \frac{P_1}{\rho \cdot g} - z_1 \quad \text{Ec (2.7)}$$

Con los valores de la carga y del flujo se selecciona la bomba en la gráfica del catálogo de bombas.

2.3.2. Diseño de un enfriador

La etapa de fermentación alcohólica requiere que el producto que va a ser fermentado posea determinadas condiciones iniciales, para que esta sea efectiva, una de los requerimientos es que dicho producto posea una temperatura entre 25 °C y 30 °C. El producto que sale del macerador posee una temperatura de 90 °C, por ello es necesario instalar un enfriador.

Flujo de fluidos y transferencia de calor.

Las velocidades de escurrimiento promedio en los PHE (Plate heat exchangers) son menores que en los THE (Tubular heat exchangers). Así, se encuentra en ellos un rango de velocidades entre 0.5 a 0.8 m / sec contra los 1.2 a 2 m /seg que se presentan en los intercambiadores de casco y tubos Sin embargo, pese a estas bajas velocidades se obtienen coeficientes totales de transferencia de calor muy superiores a los de casco y tubos con relación a las condiciones de termotransferencia y fluidodinámicas en estos equipos, es posible manejarse dentro de los siguientes valores. (Raju K.S., Chand Jagdish).

- ✓ Flujo másico por unidad: 0.13 a 800 kg / sec (flujo de agua).
- ✓ Presión de trabajo: vacío a 30 bar (máximo).
- ✓ Temperatura de trabajo (PHE): - 40 a 180°C.
- ✓ Temperatura de trabajo (BHE) (Brazed heat exchangers): - 195 a 225°C.
- ✓ Coeficiente total de transferencia de calor (K): 3500 a 7000 Kcal. / h.m².°C (agua -agua).
- ✓ Coeficiente total K: 800 a 2800 Kcal / h.m². °C (soluciones acuosas – agua).

La caída de presión en los PHE (Plate heat exchangers) es uno de los más importantes parámetros a definir en el proyecto de estos equipos, ya que ella puede estar restringida por aspectos económicos (costos de bombeo) o por consideraciones de procesos o una combinación de ambos. Esta caída de presión ocasionada por el flujo de los fluidos a través de la superficie de calefacción y de las conexiones de entrada / salida del equipo, es utilizada para generar elevados coeficientes de convección y por ende altas transferencias de calor. A los fines de relacionar la pérdida de carga con la aptitud del equipo para transferir calor, se introduce el concepto de caída específica de presión, también llamada Número de Jensen (Je). Este concepto permite relacionar diferentes superficies intercambiadoras de calor y representa la pérdida de carga experimentada por el fluido durante su pasaje a través del equipo con relación al número de unidades de transferencia NTU obtenido, esto es. (Raju K.S., Chand Jagdish).

$$J_e = \Delta P / NTU \text{ (kg / m}^2\text{)} \quad \text{Ec (2.8)}$$

La pérdida de carga en los intercambiadores de placas puede ser calculada por la ecuación de Cooper, que establece.

$$\Delta P = (2.f.G^2.L) / (g. D. \rho_e) \quad \text{Ec (2.9)}$$

$$f = 2.5 / Re^{0.3} \quad \text{Ec (2.10)}$$

$$Re = [De (G / \rho)] / \mu \quad \text{Ec (2.11)}$$

ΔP : pérdida de carga en el equipo en kg. / m².

G: flujo másico en kg. / h.m².

L: longitud del canal de pasaje en m.

D: diámetro equivalente del canal de flujo en m.

ρ : densidad del fluido en kg / m³.

g: constante gravitacional en m / h².

Re: Número de Reynolds.

f: factor de fricción.

La elevada transmisión de calor en los equipos está también asociada a las diferentes disposiciones en las que los flujos pueden ser dispuestos. Esto posibilita aprovechar las diferencias de temperaturas de manera eficiente y optimizar el proceso. (Raju K.S., Chand Jagdish).

Como vimos las disposiciones posibles de flujos en estos equipos pueden ser diversas, a saber

- ✓ Flujo en serie, en el cual la corriente cambia de dirección verticalmente.

- ✓ Flujo paralelo, donde la corriente se divide y luego converge sobre un mismo colector.
- ✓ Sistema Loop, en el que ambos fluidos circulan en flujo paralelo.
- ✓ Sistema complejo, que presenta una combinación de los anteriores (serie - paralelo).

Condiciones de trabajo.

Temp. Entrada agua: 25 °C. Temp. Salida agua: 80°C.

Método de Raju & Chand.

Este procedimiento presenta dos caminos: el primero hace uso del factor de corrección (Ft) de la diferencia de temperaturas media logarítmicas (Δt_m) y el segundo hace uso de la eficiencia de la transferencia de calor (ϵ) como función del NTU. Para ambos métodos se asume que. (Raju K.S., Chand Jagdish).

- ✓ Las pérdidas de calor son despreciables.
- ✓ No se presentan espacios con aire en el equipo.
- ✓ El coeficiente global de transferencia de calor se mantiene constante dentro del equipo.
- ✓ Los perfiles de temperaturas varían solo en la dirección del flujo.
- ✓ Las corrientes se distribuyen uniformemente en cada canal en el caso de flujo paralelo.

Si N es el número de placas, el número de canales formados será N+1. El procedimiento de diseño, puede explicarse por medio de ejemplos típicos de problemas. Dados los siguientes datos la metodología seguida para cada caso será.

- ✓ Caudal y temperaturas de entrada y salida del líquido caliente.

- ✓ Caudal y temperatura de entrada del líquido frío.
- ✓ Propiedades físicas de los fluidos.
- ✓ Características físicas de la placa.

Método del factor de corrección (Ft).

1. Cálculo del calor intercambiado: $q = G \cdot c_p \cdot \Delta t$ Ec (2.12)

2. Determinación de las propiedades físicas de los fluidos a la temperatura media entre las de entrada y salida.

3. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica Δt_m .

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln (\Delta t_1 / \Delta t_2)$$
 Ec (2.13)

4. Cálculo del NTU.

$$(t_f - t_c) / \Delta t_m = K_s \cdot A_t / G_c \cdot c_p$$
 Ec (2.14)

5. Determinación del factor de corrección de temperatura media Ft.

6. Cálculo el número de Reynolds para cada corriente: Para flujo en serie, el caudal circula en una corriente única para cada fluido y se calcula por la fórmula conocida. Para flujo en paralelo, se asume un número de placas para determinar el número de subcorrientes para cada líquido. Así n_f y n_c representan las subcorrientes fría y calientes. El número de Reynolds vendrá dado entonces para este caso por la ecuación siguiente.

7. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor de cada lado, atendiendo al régimen de flujo.

Coeficiente para flujo turbulento:

$$h = 0.2536 (k / D_e) (Re_m)^{0.65} (Pr_m)^{0.4}$$
 Ec (2.15)

Coefic. para flujo laminar ($Re < 400$): Ec (2.16)

$$h = 0.742 \text{ cp G (Rem)}^{-0.62} (\text{Prm})^{-0.667} (\mu\text{m} / \mu\text{w})^{0.14} \quad \text{Ec (2.17)}$$

8. El flujo laminar se presenta en fluidos muy viscosos y materiales poliméricos. En la ecuación para el flujo turbulento el diámetro equivalente (De) es definido como.

$$De = (4W) / (2W + 2b) \quad \text{Ec (2.18)}$$

En esta ecuación por lo general el De resulta igual a $2b$, dado que la separación entre placas (b) es despreciable frente al ancho (W) de las mismas.

9. Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor K_s .

$$K_s = 1 / (1 / \alpha_w + 1 / \alpha_a) \quad \text{Ec (2.19)}$$

10. Cálculo de la superficie total de transferencia de calor At .

$$As = Q / K_t \cdot \Delta t_m = G_w \cdot c_p \cdot \Delta t / K_t \cdot \Delta t_m \quad \text{Ec (2.20)}$$

11. Cálculo del número de placas.

$$N = At / Ap \quad \text{Ec (2.21)}$$

12. Para flujo paralelo, con el N calculado en el paso 11, determinar el número de subcorrientes de fluido caliente y frío. Si N es impar, nc y nf son iguales. Si N es par nc y nf serán distintos.

13. Comparar los valores de nc y nf del paso 12 con los valores utilizados en el paso 7 (Valores supuestos). Si los valores no son coincidentes, deben repetirse los pasos del 7 al 13 los pasos de 1 a 11 son comunes tanto para flujo en serie como en paralelo. Los pasos 12 y 13 son exclusivamente aplicables a flujo paralelo.

2.3.3. Cálculos del Beneficio bruto.

Este cálculo consiste en determinar el costo de las materias primas a emplear en la obtención de 30 litros de vinagre.

$$B.B=VP-\Sigma CMP \quad \text{Ec (2.22)}$$

$$CMP=p.u.p_{(MP)} * m_{(MP)} \quad \text{Ec (2.23)}$$

$$VP=p.u.p * V_{(mL)} \quad \text{Ec (2.24)}$$

VP:.

CMP: Costos de las materias primas consumidas en la producción.

p.u.p: Precio unitario de la materia Prima.

Parámetros y cálculos para el diseño.

Pérdidas de calor despreciables.

Medio de enfriamiento (agua).

La separación entre las placas es despreciable frente al ancho para el cálculo del De (diámetro equivalente).

Separación entre las placas (b) es de 3mm.

Espesor de las placas es de 1mm.

Ancho de las placas (W) es de 350mm.

Largo de las placas (L) es 472 mm.

Se asume flujos a contracorriente.

Las juntas que se eligieron son de Gomas Nitrilicas de temp. hasta 135 °C.

Datos para el diseño:

La temperatura de entrada del licor macerado 90 °C.

La temperatura de salida del licor macerado es de 27 °C.

La temperatura de entrada del agua de 30 ° C.

La temperatura de salida del agua es de 80 °C.

El Cp. del agua a la temperatura media es de 228978 j/kmol°C.

La viscosidad del agua a la temperatura media (μm) es de 0.74 mPa.s.

La viscosidad del licor macerado la temperatura media (μm) es de 0.38 mPa.s.

Pr del agua a la temp. media es de 4.67.

Pr del licor macerado a la temp. media es de 5.29.

Conductividad térmica del agua a la temp. media. (K) es de 0.6246 W/m.K.

Conductividad térmica del afrecho a la temp. media. (K) es de 0.6402 W/m.K.

Gravedad específica (ge) de una solución azucarada es de 1.06968.

Densidad (ρ) del agua a la temperatura media es de 992.9 kg/m³.

El flujo de licor macerado a enfriar es de 0.30 m³/h.

CAPÍTULO III. Análisis de los resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados, de las metodologías de cálculo expuestas y de la valoración económica planteada en el capítulo 2.

3.1. Resultados del proceso de extracción del almidón a escala de laboratorio.

Para obtener un volumen aceptable de almidón de yuca, se procesaron 4.54 Kg. de yuca, volumen este, capaz de generar la cantidad necesaria de almidón, para satisfacer la demanda requerida para los experimentos.

De las 4.54 Kg. de yuca procesada se obtuvieron:

m (yuca pelada): 3.06 Kg

m (cáscara de la yuca): 1.47 Kg

m (almidón obtenido): 608.20 gramos.

Análisis de los resultados del proceso de maceración

En la siguiente tabla se ilustra el comportamiento de las enzimas, y del consumo de electricidad, se analiza en donde se pudo constatar la variante más factible en el proceso de maceración cuanto a concentración de enzimas vs energía eléctrica, con esto se comprueba que la variante más económica, es la muestra 1, ya que los costos de consumo y de enzimas son menores, que el de las muestras 2 y 3.

Tabla 3.1 Datos generales del proceso de maceración.

Muestra	Contenido de enzimas (ml)	Tiempo de maceración (min)	Tiempo de maceración (h)	Costo de la energía (\$)	Consumo Kw/k * Costo (\$)	Costo de las enzimas (\$)
1	0.5	48	0.8	0.3	0.24	0.32
2	1.0	34	0.56	0.3	0.17	0.64
3	1.5	20	0.33	0.3	0.10	0.96

$$\text{Costo de la energía} = Kw.h * \$ / Kw.h$$

Análisis del proceso de fermentación

En el proceso de fermentación se miden una series de parámetros, indicadores estos de la culminación de este proceso como serán: pH, variación de los ⁰Brix, conteo de microorganismos, azúcares reductores totales y pesadas de las muestras, a continuación se muestran el comportamiento de dichos parámetros con respecto al tiempo.

1- Pesadas de las Muestras

Arrojó que al transcurso de 7 días posterior al proceso de fermentación las muestras disminuyeran su peso aproximadamente de alrededor de 2 a 3 gramos por días hasta que el peso permaneció casi constante lo que indica la culminación del proceso fermentativo. (Ver anexo 1).

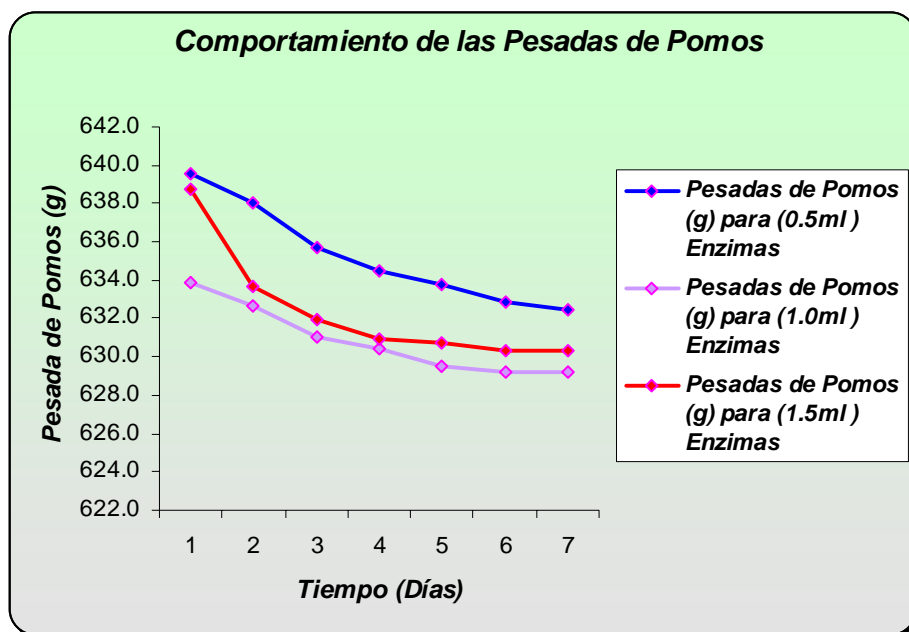


Figura 3.1 Comportamiento de las pesadas de los pomos.

2- Medición de pH

Estas mediciones se llevan a cabo con el objetivo de mantener en un rango óptimo el pH, necesario este, para el posterior desarrollo de las bacterias acéticas en el proceso de obtención de vinagre. (Ver anexo 1).

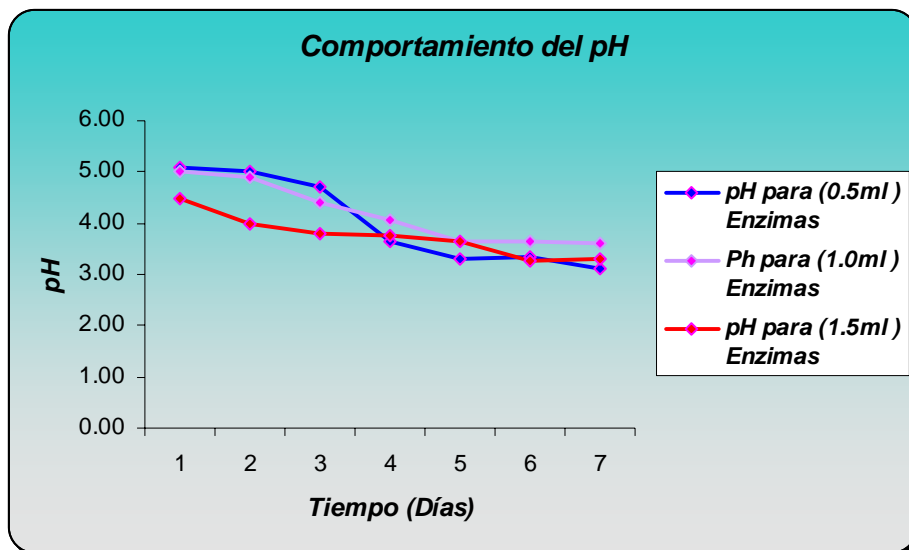


Figura 3.2 Comportamiento del pH.

En la figura 3.3, se puede apreciar claramente la variación de los °Brix, y el comportamiento, que tuvo en los siete de duración del proceso de fermentación.

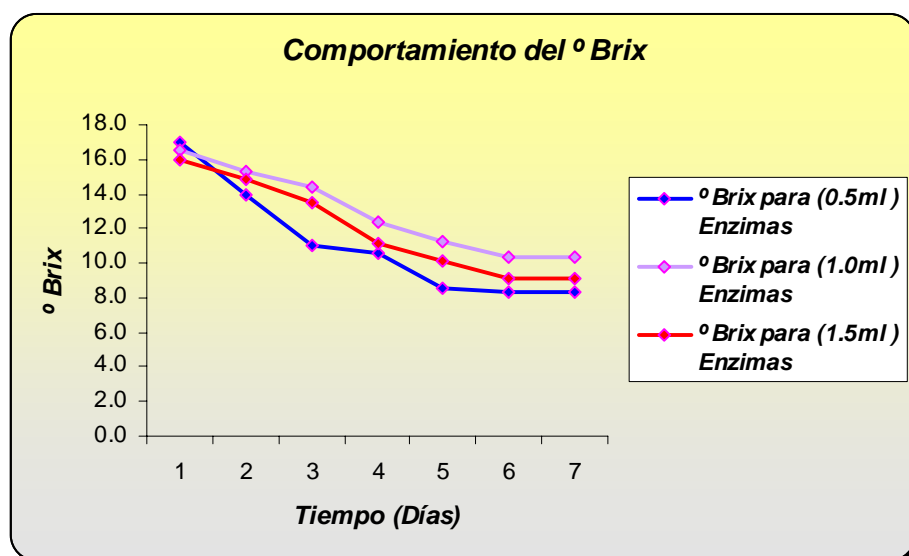


Figura 3.3 Comportamiento de los °Brix.

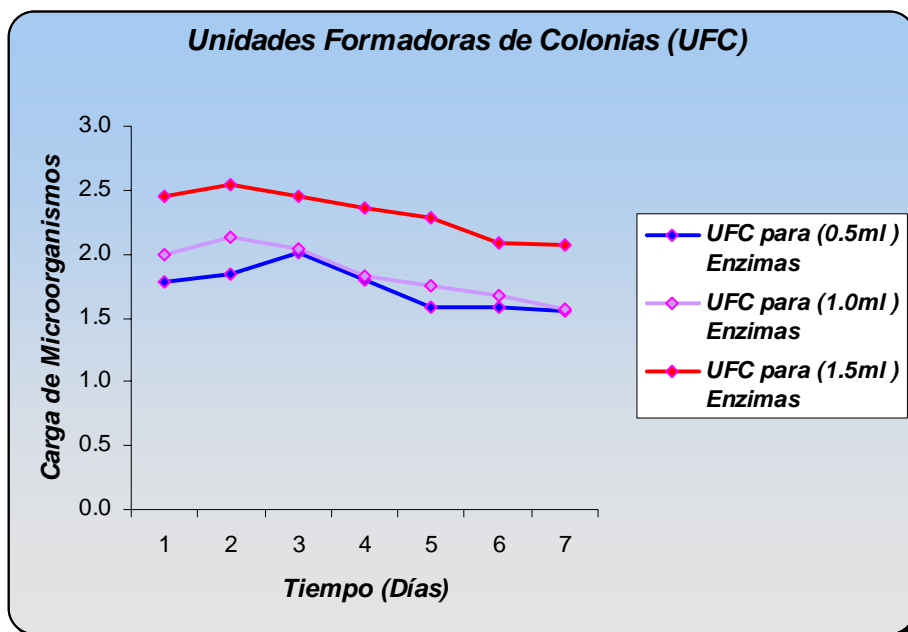


Figura 3.4 Comportamiento de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

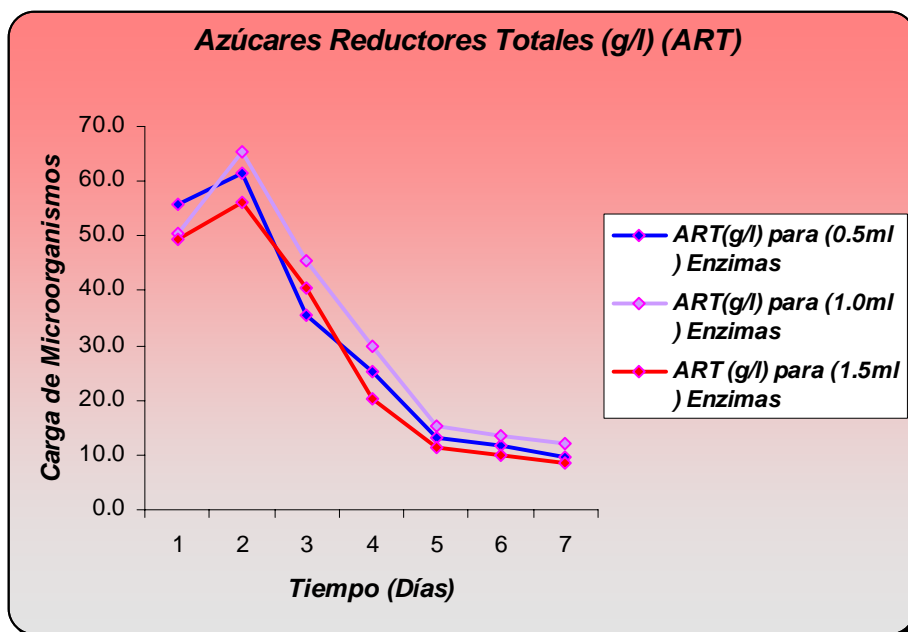


Figura 3.5 Comportamiento de los Azúcares Reductores Totales (ART).

En la gráfica (3.4), de unidades formadoras de colonias (UFC), se puede apreciar un súbito crecimiento de la actividad microbiana, la cual va disminuyendo al transcurrir los días, e indica la culminación del proceso de fermentación. (Ver anexo 1).

En la figura (3.5), se graficó el comportamiento de los azúcares reductores totales (ART). Y en donde se observa un descenso de este, debido a que fueron consumidos por los microorganismos, convirtiéndolos en etanol. (Ver anexo 1).

Composición de las muestras para la obtención del vinagre a escala de laboratorio utilizando el Software “StatGraphics Plus 5.0”

Los resultados del diseño de experimento para mezclas realizado arrojaron los siguientes resultados, ver tabla 3.2.

Tabla 3.2 – Resultado del Diseño de experimento

No de muestra	Extracto de Afrecho y trub (%)	Etanol	Acidez
1	12.5	87.5	6.0
2	5.0	95.0	6.5
3	7.5	92.5	6.4
4	10.0	90.0	6.3
5	15.0	85.0	5.9
6	15.0	85.0	5.8
7	5.0	95.0	6.6

Se obtuvo que para los rangos de contenido de extracto de afrecho y trub y etanol analizados, ejercen influencia significativa sobre la acidez ($p \text{ value} < 0.05$). La correlación obtenida indica 96.65% de confiabilidad, lo cual indica la influencia de las variables

analizadas sobre la variable de respuesta. El modelo que relaciona la influencia de las variables analizadas (% trub y % extracto de afrecho y contenido de etanol) sobre la variable de respuesta (acidez) es:

$$\text{Acidez} = 5.85873 * \text{AB} * + 6.56948 * \text{C}$$

Donde:

A B: extracto de afrecho- trub

C: etanol

Base del diseño

Número de factores experimentales: 2

Números de respuestas: 1

Números de corridas: 7

Aleatorias: Si

Análisis de la calidad del vinagre obtenido.

A los vinagres obtenidos se le realizaron los análisis de calidad siguientes: pH, acidez, densidad relativa, extracto seco, sólidos solubles y características físicas y organolépticas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Análisis de pH.

El pH final de las muestras analizadas fluctúa entre 5 y 3.5, los cuales indican la formación de ácido acético. Este rango está dado por las diferentes composiciones que presentan las muestras analizadas, correspondiendo los valores más bajos, a las muestras que mayor contenido de extracto de afrecho y trub presentan.

Como se observa en el gráfico 3.6, el pH va disminuyendo a medida que el vinagre se va formando lo que indica la formación del ácido. Las variantes de vinagre con los valores de pH más bajo son las de las bandejas 2, 3 4, y 7 que tienen el pH por debajo e igual a 3, lo cual indica mayor acidez y por lo tanto mayor formación de ácido acético.

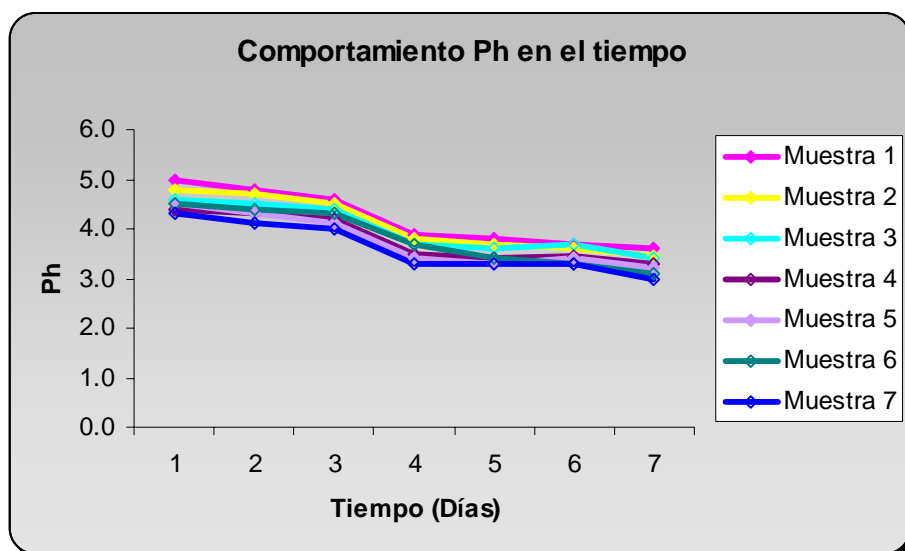


Figura 3.6 – Comportamiento del pH en el tiempo.

Determinación de acidez.

Los datos de la acidez total de las siete muestras se reflejan en la figura 3.7, los mismos presentan un comportamiento creciente, con valores máximos que oscilan entre 3.9 - 4.8 g/100ml, expresados como ácido acético. Las muestras 2 (4.6), 3 (4.5), 4 (4.7) y la 7 (4.8), contienen ácido acético según lo normado (4.5 – 10 g/100ml), mientras que las muestras 1 (4), 5 (3.9) y 6 (4.1), se quedan por debajo de los valores establecidos. (Ver anexo 1).

Las diferencias significativas encontradas en los dos casos anteriores, pH y acidez, se atribuyen principalmente a la composición de las mezclas utilizadas en los siete tratamientos, con respecto a las cantidades de las mezclas afrecho- trub y etanol.

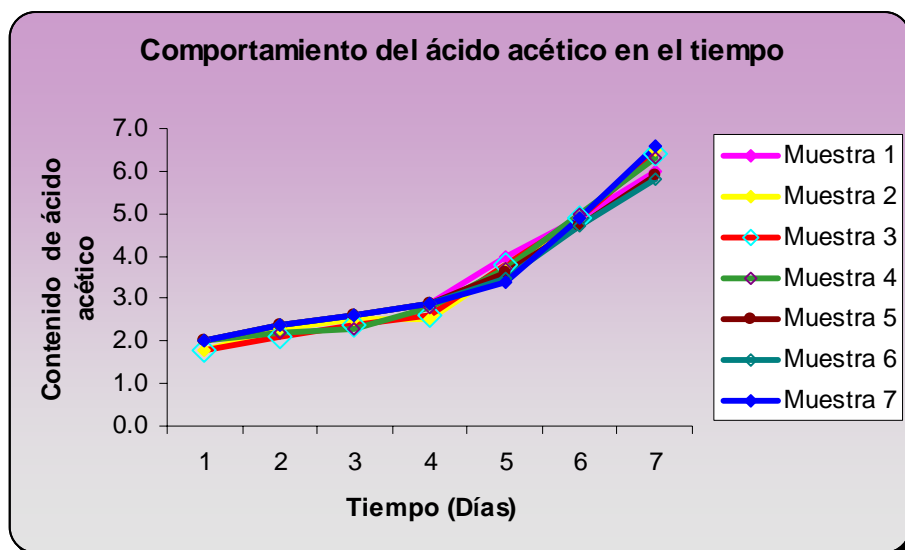


Figura 3.7 – Comportamiento del ácido acético.

Análisis de los resultados de la densidad relativa, extracto seco, cenizas y sólidos solubles del vinagre obtenido.

En la tabla 3.3 se observa que las muestras 2, 3, 4, y 7, presentan valores que se encuentran dentro de los normados, y las muestras 1, 5 y 6, los valores son inferiores a los establecidos. Esto se debe a que no presentan el contenido necesario de las mezclas de extracto de afrecho- trub y etanol. (Ver anexo 1).

Tabla 3.3 – Valores de densidad relativa, extracto seco, cenizas y sólidos solubles del vinagre obtenido.

Muestras	1	2	3	4	5	6	7
Densidad relativa a 15°C	1.010	1.025	1.021	1.024	1.011	1.009	1.022
Extracto seco %	1.5	4.4	3.9	4.2	1.7	1.0	3.9
Cenizas	0.21	0.44	0.40	0.43	0.20	0.24	0.42

Apariencia.

Las muestras 2, 3, 4, y 7, tienen un aspecto semitransparente, libre de turbidez y partículas en suspensión. Presentan coloración carmelita oscura debido a la presencia de la cebada malteada en el afrecho.

Olor.

Todas las muestras obtenidas presentan el olor típico del vinagre, acentuándose en las muestras 2, 3, 4, y 7

Sabor

Las muestras analizadas presentan el sabor característico del vinagre, siendo más agudo en las muestras 2, 3, 4, y 7, las cuales presentan mayor contenido de ácido acético.

Comparación del vinagre obtenido con el producido industrialmente en Cuba.

Uno de los vinagres que se produce en Cuba a escala industrial se comercializa con el nombre "El Pinche". En la tabla 3.2 se comparan las características del mejor vinagre obtenido (muestra 7) con el comercializado en Cuba.

Tabla 3.3 – Resultados de las mediciones realizada al vinagre "El Pinche"

Determinación de ácido acético en vinagre	4.8 g/100mL	5 g/100mL
Densidad relativa a 15°C	1.022	1.018
pH	2.7	2.6
Color	Pardusco, libre de turbidez	Semitransparente
Olor	Característico	Característico
Sabor	Característico	Característico

Se puede observar que el mejor vinagre obtenido presenta características muy similares a las de "El Pinche" por lo que se puede decir que nuestro vinagre tiene calidad.

3.2. Balance de masa

Para determinar el volumen inicial de yuca a procesar, para obtener 30 litros de vinagre, se comenzó el balance de masa, a partir de la cantidad del producto, para esto se tuvieron en cuenta varias consideraciones tomadas a partir de las búsquedas bibliográficas realizadas, y de los resultados de laboratorio obtenido. Para este balance de masa se tienen en cuenta varias consideraciones:

1. El proceso de conversión de glucosa en etanol es de 85%. (Kunze. 1999).
 2. Se conoce que durante el proceso del tratamiento enzimático del almidón de yuca, se logra una conversión del 90%, dado el alto contenido de amilosa, presente en la estructura de este almidón, el cual es degradado por la enzima α -amilasa. (Bello-Pérez. 2005).
 3. 1 kg de yuca pelada contiene 0.9% de almidón, y la masa de cáscara, en 1kg de yuca constituye entre un 20% y 30%.(Bello- Pérez. 2005).
- 1 litro de vinagre \rightarrow 5% ácido acético (según NC/ ISO- 8340. Determinación de la acidez)

Entonces en 30 litros de vinagre hay un volumen de 1500 ml de ácido acético.

- $m(\text{Hac}) = 1500\text{cm}^3 * 1.0041\text{g/cm}^3$ $\mu(\text{Hac}) = 1.0041\text{g cm}^3$

Entonces m (ácido acético) para 30 litros es de 1.51 kg.

Cantidad de etanol para producir esa cantidad de ácido acético por estequiometría.

- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(L)} + \text{O}_2_{(g)} = \text{CH}_3\text{COOH}_{(l)} + \text{H}_2\text{O}_{(L)}$ $\text{MM}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 42\text{G/MOL}$
- $$\frac{m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})}{m(\text{CH}_3\text{COOH})} = \frac{n(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \cdot \text{MM}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})}{n(\text{CH}_3\text{COOH}) \cdot \text{MM}(\text{CH}_3\text{COOH})}$$
$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = \frac{n(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \cdot \text{MM}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})}{n(\text{CH}_3\text{COOH}) \cdot \text{MM}(\text{CH}_3\text{COOH})} \cdot m(\text{CH}_3\text{COOH})$$
- $m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 1.53\text{g}$

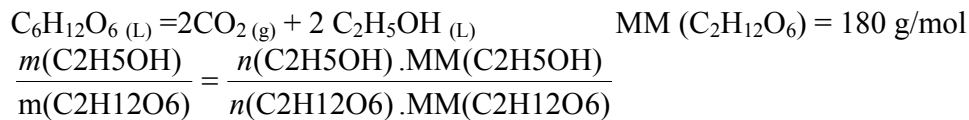
Cantidad de etanol para producir una masa de ácido acético de 1500g para 30 litros de vinagre.

Para una conversión de un 100 % en ácido acético escala de planta piloto según literatura el proceso de conversión de etanol en ácido acético oscila entre un 90 y 95 %.

Para un 95 % de conversión

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2189.19\text{g}$$

Proceso de fermentación por estequiometría.



$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 0.51\text{g}$$

Para un 95 % de conversión de glucosa en etanol

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 0.48\text{g}$$

1 g de glucosa \rightarrow 0.48 g de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Masa de glucosa = 4560.81 g = 4.8 kg

Maceración

Para un 100 % de conversión se obtiene que para 1g de almidón \rightarrow 1 g de glucosa.

Para un 90 % de conversión se obtiene una masa de glucosa de 0.90 g.

1g de almidón \rightarrow 0.90g de glucosa.

- $m(\text{almidón}) = 55.55 \text{ kg}$ para producir 30litros de vinagre

1 Kg de yuca pelada \rightarrow 0.9 kg de almidón

- $m(\text{yuca pelada}) = 61.72 \text{ kg}$

Por datos experimentales asumidos, se tiene que para 4.54 kg de yuca, se obtiene, 3.06 kg de yuca pelada.

Entonces inicialmente, se obtienen 82.41 kg de yuca con cáscara, para producir 30 litros de vinagre.

Según (FDA, 1997), en el proceso de lavado de la yuca, se utiliza una relacion agua-fruto, de: 5 litros de agua por kg de yuca por lo que para el proceso se requiere un volumen de 412.05 litros de agua

$$m(\text{agua lavado}) = V_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}$$

$$m(\text{agua lavado}) = 82055.63 \text{ kg/m}^3$$

$$m(\text{cáscara de la yuca}) = m(\text{yuca}) - m(\text{yuca pelada})$$

$$m(\text{cáscara de la yuca}) = 20.69 \text{ kg}$$

$$m(\text{H}_2\text{O en la yuca pelada}) = 0.01 * m(\text{yuca pelada})$$

$$m(\text{H}_2\text{O en la yuca pelada}) = 0.61 \text{ kg/cm}^3$$

$$m(\text{H}_2\text{O en la cáscara de la yuca}) = 0.01 * m(\text{cáscara de la yuca})$$

$$m(\text{H}_2\text{O en la cáscara de la yuca}) = 0.20 \text{ kg}$$

$$m(\text{residuos}) = 0.01 * m(\text{yuca con cáscara})$$

$$m(\text{residuos}) = 0.82 \text{ kg}$$

$$m(\text{H}_2\text{O residual}) = m(\text{H}_2\text{O lavado}) - m(\text{H}_2\text{O en la yuca pelada}) - m(\text{H}_2\text{O en la cáscara de la yuca})$$

$$m(\text{H}_2\text{O residual}) = 82054.84 \text{ kg/cm}^3$$

Molino + Criba Según (FDA, 1997), en la molienda húmeda del almidón de yuca se emplean 1.5 litros de H₂O/kg de yuca pelada.

$$m(\text{agua inicial}) = 1.5 \text{ litros de H}_2\text{O} * m(\text{yuca pelada})$$

$$m(\text{agua inicial}) = 92.78 \text{ kg/cm}^3$$

$m(\text{pulpa de yuca de almidón}) = m(\text{H}_2\text{O en la yuca pelada}) + m(\text{yuca pelada})$

$m(\text{pulpa de yuca de almidón}) = 37.64 \text{ kg}$

$m(\text{residuos sólido}) = 0.15 * m(\text{yuca pelada})$

$m(\text{residuos sólido}) = 9.25 \text{ kg}$

$m(\text{H}_2\text{O residuo}) = 0.08 * m(\text{residuos sólido})$

$m(\text{H}_2\text{O residuo}) = 0.74 \text{ kg/cm}^3$

$m(\text{residuos sólido-húmedo}) = m(\text{residuos sólido}) + m(\text{H}_2\text{O residuo})$

$m(\text{residuos sólido-húmedo}) = 9.99 \text{ kg}$

Macerador

Del molino+ criba sale $m(\text{pulpa de yuca de almidón}) = 37.64 \text{ kg}$, que entra al macerador

Volumen = $m(\text{pulpa de yuca de almidón}) * \mu \text{ almidón de yuca}$

Volumen = 30.04 litros

$\mu \text{ almidón de yuca} = 0.7982 \text{ g/cm}^3$

Propuesta de diseño de equipos para obtener vinagre a escala de Planta Piloto. (VER ANEXO 2)

Se emplearán equipo que están en la planta piloto y que tienen capacidad de 30 litros por ejemplo:

- Máquina lavadora, peladora y troceadora de yuca (1)
- Molino de martillo (2).
- Cribas (3)
- Bomba (4)

- Macerador (5)
- Enfriador (6)
- Fermentador (7)
- Torre empacada (8)
- Condensador (9)
- Bandejas perforadas (10)

3.3. Selección de la bomba y el enfriador

Según Rosabal, (2006) el diámetro tabulado es 6.83mm.

$$V=0.7m/seg$$

Reynolds=13689.36 régimen turbulento

$$e/d= 0.03. \quad f = 0.058$$

Resultado del factor de fricción.

Para los números de Reynolds:

Se escoge tubo de acero sin costura y tubos soldados no corroídos.

Resultados del cálculo de pérdidas en tuberías.

La longitud total de las tuberías es 3.5m.

- $Hf_{tubería} = 0.74m$

Pérdidas en accesorios.

- $Hf_{accesorios}=0.093$
- $\Sigma Hf_{total}=13.34m$
- $Hb=12.90m$

Tabla 3.4 – Modelo de bomba seleccionado

Bomba	Larox Flowsys
Serie	LPP-T25
Caudal Máximo	Hasta 2,2 m ³ /h
H (carga)	Hasta 22m
Temperatura del líquido	90°C
Presión Máxima	6 atm

Buscado en (Catálogo de Bombas Peristálticas; 2009).

Al no encontrar datos sobre el NPSH ni las revoluciones por minutos de la bomba en el catálogo no se pudo determinar si la bomba cavita o no con el flujo y la carga del sistema.

Asumiendo todos estos parámetros, conociendo los otros y siguiendo la metodología de cálculo que da Raju & Chand se arrojaron los resultados siguientes:

$$\Delta T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{LMTD} = 14.65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{\text{licor}}} 77.5 \text{ }^\circ\text{C} = 156955.28 \text{ J/kmol}^\circ\text{C}.$$

$$\Delta T_{\text{licor}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{Agua}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q = -4300 \text{ kJ/h}$$

$$\rho_{\text{licor}} 77.5 \text{ }^\circ\text{C} = 980.9 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{\text{licor}} = 89.82 \text{ kg/h}$$

$$R = 0.69$$

$$S = 0.56$$

$$F_t = 0.79$$

$$Re_{licor} = 710.5 \text{ Turbulento}$$

$$Re_{Agua} = 1378.38 \text{ Turbulento}$$

$$h_{licor} = 7520.43 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_{Agua} = 10736.35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$A_t = 0.5 \text{ m}^2$$

$$N = 25 \text{ Placas.}$$

$$\Delta P_{licor} = 1428.4 \text{ kg/m}^2$$

$$\Delta P_{Agua} = 12632.15 \text{ kg/m}^2$$

$$NTU_{Agua} = 1.71$$

$$Je_{Agua} = 7387.23 \text{ kg/m}^2$$

El intercambiador diseñado tiene un área de transferencia de calor de 0.5m^2 , un número de placas igual a 25, una caída de presión por la parte del fluido frío que es el agua de 12632.15 kg/m^2 .

Se eligió el intercambiador de placas Comeval Tipo S1 - 9TLA, con una temperatura de diseño hasta 130°c .

3.4. Cálculo del beneficio bruto.

Para el cálculo del Beneficio Bruto se tuvo en cuenta solo el costo de las materias primas utilizadas para la producción del vinagre obtenido de la muestra 7 (ver tabla 3.5). Se utilizó la metodología ya referida en el Capítulo II.

Tabla 3.5 - Costo de las materias primas.

Costo del vinagre industrial (1L)			
Materia prima	PUP	M	CMP
Azúcar cruda	0.15 \$/lb	0.37 lb	0.06\$
Agua	65 c/m ³	0.125 L	8.125. 10 ⁻³ c
Levadura	1.25 \$/paquete 11g	1g	1.25
Aguardiente de caña	0.46 \$/L	0.75 L	0.35 \$
Fosfato de amonio	0.012 \$/lb	0.001 kg	2.64. 10 ⁻⁵

Tabla 3.6 – Costo del vinagre obtenido

Costo del vinagre obtenido (1L)			
Materia Prima	pup	Cantidad	CMP
Agua	65 c/m ³	0.4 L	2.6 .10 ⁻⁴ c
Etanol	0.46 \$/L	0.4 L	0.18 \$
Bacterias ácidas	0.46\$/L	0.75 L	0.35\$
α-amilasa	0.32\$/	0.01 L	2.64 .10 ⁻⁵ c
Papaina	16.36 \$/kgL	0.01 L	2.96 .10 ⁻⁵ c

Tabla 3.7 – Resultado del BB

	CMP _{total}	Vp _{total}	BB
Vinagre de Cuba	\$ 0.65		
Vinagre propuesto	\$ 0.47	13,8	14.45 \$

Para producir 1L de vinagre en la industria se gasta \$ 0.65 mientras que el costo del vinagre propuesto es de \$ 0.49. El valor de BB es de \$14.45, se obtuvo como resultado después de haber realizado todos los cálculos que la elaboración del vinagre obtenido es factible económicamente su producción.

CONCLUSIONES.

1. Se puede obtener vinagre, a partir del licor obtenido del tratamiento enzimático del almidón de yuca, con la adición de extracto de afrecho.
2. La variante más aceptable económicamente del tratamiento enzimático del almidón de yuca, teniendo en cuenta los precios actuales de las enzimas y de la energía eléctrica, es la muestra 1.
3. Para obtener extracto de almidón de la yuca, se necesita del empleo de un molino de martillo y Cribas con un diámetro de orificio de 0.043 mm.
4. Para lograr la temperatura adecuada del licor macerado, para el proceso de fermentación a escala de planta piloto se diseñó un intercambiador de placa (Comeval Tipo S1 - 9TLA PHE, $A_t = 0.5 \text{ m}^2$ y $N = 25$ Placas).
5. Se diseñó una bomba para impulsar el almidón hasta el macerador tipo Larox Flowsys LPP-T25
6. Para obtener 30 litros de vinagre a escala de planta piloto, se necesita procesar 82.1 kg de yuca.
7. El vinagre de mejor calidad se obtuvo con la composición de 95% de extracto de afrecho y 15% de trub (muestra 7), lográndose una concentración de ácido acético de 4,8 g/100ml, $\text{pH} = 2.7$, coloración carmelita oscuro, olor típico y sabor característico.
8. Para la producción del mejor vinagre de calidad se obtiene un beneficio bruto de \$ 14,45 lo que indica que su producción es económicamente factible.

RECOMENDACIONES.

1. Realizar el escalado del proceso de producción de vinagre a escala industrial para su futura implementación.
2. Realizar VAN y TIR a todo el proceso de producción de vinagre con el objetivo de realizar un análisis económico riguroso del mismo, para su aplicación industrial.

BIBLIOGRAFIA.

1. Adams. (1985). Vinegar. En: Microbiology of fermented food. Wood, J. B. Ed. pp 1-23. Elsevier Applied Science Publisher. Great Yarmouth.
2. Bairoch A (2000). The Enzyme database in 2000. Nudik Acids Res: pp 304-305.
3. Bello - Pérez, L.A. (2005). Almidón y fibra dietética: Química, Tecnología y biodisponibilidad. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Desarrollo de productos bióticos. Yautepec, Morelos. 59-60.
4. Biliaderis, C.G.(1991). The Structure and Interactions of Starch with food constituents. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 69, 60-78.
5. Buleón, A, Colona. P et Leloup, V (1990). Les Amidons et leurs dérivés dan les industries des céréalés. Industries alimentaires et agro industrielles Juin 515- 532.
6. Cantero. D; Caro. I; Macias. M (1996). Patente P9600181. Fermentados cerrados para la acetificación en medios alcohólicos con control automático de las condiciones de operación.
7. De Ley, J.; Gillis, M.; Swings, J. (1984). Bergeys Manual of Systematic Bacteriology. 9ª Edition pp 267- 278. The Williams and Wilkins co, Baltimore.
8. Déak T, Beuchat LR. (1996). Handbook of Food Spoilage Yeasts. CRC Press, Boca Ratón, Florida.
9. Doane, W.M. (1994). Opportunities and challenges for new industrial uses of Starch. Cereal food World, 39, 556- 563.
10. Filho, W,G.V. (2005), Tecnología de bebidas 1ª Ediciao Editor Edgard Blucher. Brasil.
11. Fundación de Desarrollo Agropecuario, Inc. (FDA) Octubre (1997).Serie Cultivos, Guía Técnica No. 31. Santo Domingo Republica Dominicana. p 1 -5, 37 - 42, 48 - 49.
12. García, Parrilla, M, C.; Heredia, F.M., Troncoso, A.M. (1998). The influence of acetificación process an the phenolic composition of wine vinegars. Science des aliments 18, 211 - 221.
13. Goñi, I, Garcia Alonso, A;. Martin-Canon, N; Saura Calixto, F. (2000) In vitro fermentation of different types of alpha-amylase resistant corn starch. European food research and technology. P 211 (5). 316 – 321.

14. Gómez, J. M.; Romero, L. E.; Caro, I.; Cantero, D.(1993). Optimización de un sistema de fermentación acética con reutilización de aire. *Alimentación, Equipos y Tecnología*. 10, 55-59.
15. Guilbot, A. and Mercier. C. (1985).Starch. In *The polysaccharide*, ed. O. Aspinall. Academic Press, New Yord, pp 209 -282.
16. Guillamon, J.M.; Gonzales, A; Hierro, N; Rozes, A; Mas, A; Pobbet, M. (2003). Técnicas de identificación de bacterias acéticas. En: primeras jornadas en I+D+i en la elaboración de vinagre de vino. Mas, A; Guillamon, J.M. Eds pp 25-30. *Serves de Publications*. Tarragona.
17. Guzmán-Maldonado, H. (1992). Optimización de un procedimiento enzimático para la licuefacción y sacarificación del almidón mediante la metodología de superficie de respuesta. Tesis de Maestría. Cinvesta-IPN. Irapuato, México.
18. Grishan, Charles M.; Reginald H. Garret. (1991). *Biochemistry*. Philadelphia Saunders Collage. Pp 426-427.
19. Instituto de Investigaciones en viandas Tropicales - INIVIT (2011). El cultivo de la yuca [On line]. [Febrero 2011.]. http://cubaciencias.cu/instructivo/cultivo_de_la_yuca.htm.
20. Jane, J-L and Chen, J-F (1992). Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on paste properties of Starch. *Cereal Chemistry* , 69, 60- 65.
21. Kunze, Wolfgang. (1999). *Technology Brewing and Malting*. International Edition. VLB Berlin, Germany.
22. Llaguno, C. (1991). Antecedentes históricos. En: *El vinagre de vino*. Llaguno, C. Polo, M, C. Eds. Pp 1-23 Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
23. Llaguno, C. Polo, M. C (1991). La composición química de los vinagres vínicos. En: *El vinagre de vino*. Llaguno, C; Polo, M.C. Eds Pp150-132 Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
24. Leifson, G. H. (1954) Estudio de las cepas *Acetobacter nonomsostraban*. Universidad de Harvard. New York. p 22-24
25. Lisdiyanyi, P.; Kawasaki. H; Widyastuti, Y; Saono; S.; Seki, T.; Yamada,Y.; Uchimura, T.; Komagata, K.(2002). *Kosakia baliensis*. Gen. NOV.; Sp Evolut. *Microb* 52(3), 813-818.

26. Lilley, D. (2005) Structure foldin and mechanisms of ribozymes. *Curr opin struct boil* 15(3) pp 313-323.
27. Luallen, T.E, (1988) Structure, Characteristic, and use of some typical carbohydrate food ingredients. *Cereal Food World*, 33, 924-927.
28. Martin. C. O., (2002). Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.
29. Mays, D. G., (1990). *Iniciación a la cervecería y aprovechamiento de sus residuos*. Universidad Politécnica. Madrid.
30. NC- RTCR-109: (1991). *Determinación de la densidad. Bebidas alcohólicas*. Norma de Cuba.
31. NGO 33 010h1: (1984). *Productos elaborados a partir de frutas y hortalizas. Determinación de la densidad relativa y de la densidad absoluta*, Norma de Guatemala.
32. NGO 33 010h3: (1984). *Productos elaborados a partir de frutas y hortalizas. Determinación del extracto seco*, Norma de Guatemala.
33. NGO 34 003 h30: (1982). *Productos elaborados a partir de frutas y hortalizas. Determinación de cenizas*, Norma de Guatemala.
34. NMX-AA-25: (1984). *Protección al ambiente - Contaminación del suelo. Residuos sólidos - Determinación del pH – Método potenciométrico*. Normas mexicana. Dirección general de normas, México, p. 2-3
35. NMX-AA-25: (2003). *Normas de calidad para producción y embotellado de bebidas alcohólicas*. Dirección general de normas, México, p. 4-6
36. Ormachea, A. R (1991). *Proceso industrial de fabricación del vinagre*. En: *El vinagre de vino*. Llaguno, C.; Polo, M.C. Eds, pp 49-64 Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
37. Presidencia del gobierno (1993). *Real Decreto 2070/1993 del 26 de Noviembre por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración y comercialización de los vinagres*. B.O.E, Núm 293, del 8 de Diciembre, Madrid.
38. Rosabal, M, J., Puyans, G, L., (2006) *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*, tomo1. Editoria Felix Varela p235-294.

39. Sanders, G. S. (2010), "Obtención de vinagre a partir de residuos de la industria cervecera a escala piloto en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos." Universidad de Matanzas. Facultad de Ingeniería Química.
40. Singhal, R.S. and Kulkarni, P. R. (1988) Review: Amaranths and under utilized resource International Journal of food science and technology, 23, 125- 139.
41. Solange, I. M. (2007), "Aproveitamento integral de subproduto de la industria cervejeira em procesos químicos e biotecnológicos," Universidad de Sao Paulo. Escola de Ingeniería de Lorena.
42. Suarez Lepe; J.A; Inigo Gal.B., (1990) Micobiologie Enologices. Fundamentos de vinificación. Mundi – Prensa, Madrid.
43. Smith AL (Ed) et al (1997). Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology. Oxford (Oxfordshire): Oxford University Press.
44. Treybal. R. E. (1986). Separación con transferencia de masa. Ed Alfredo López Ministerio de cultura. Pág. 326-436.
45. Ulrich. D. G., (1985). Diseño y economía de los procesos de ingeniería química. Ed Félix Varela. P 24-289
46. Wheatley. C. C. (1999). Calidad de las raíces de yuca y factores que intervienen en el. En. Herscheys. C.H (ed) Mejoramiento Genético de la yuca en América latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical. (CIAT). Cali. Colombia. p 267-291.
47. Wood, B. (1985). '*Microbiology of fermented foods*', Elsevier Applied Science Publishers, London y New York, p 371.
48. Xandri – Tagueña, JM. (1977). Fermentación Vínicas. Iniciación a la cervecería y vinagrería vínica. Universidad Politécnica. Madrid.
49. Yamada, Y; Hocino, K. I.; Ishikawa, T. (1997). The phylogenic of acetic acid bacteri based an the partial sequences of 16S ribosomal RNA: the elevations of the subgenus glucono- aceto- bacter to the generic level, Biossci. Biotecham. 61.
50. Zhao, J. and Whistler, R.L . (1994). Spherical aggregates of Starch granules as flavour carries. Food tecnology, 48 (7) 104 - 105.

ANEXOS.

Anexo 1. Tablas.

Tabla - 1 Comportamiento de Pesadas de Pomos con (0.5ml), (1.0ml), (1.5ml).			
Tiempo (Días)	Pesadas de Pomos (g) para (0.5ml) Enzimas	Pesadas de Pomos (g) para (1.0ml) Enzimas	Pesadas de Pomos (g) para (1.5ml) Enzimas
1	639.6	633.9	638.8
2	638.1	632.7	633.7
3	635.7	631.0	631.9
4	634.5	630.4	630.9
5	633.7	629.5	630.7
6	632.9	629.2	630.4
7	632.5	629.2	630.3

Tabla - 2 Comportamiento del ° Brix			
Tiempo (Días)	° Brix para (0.5ml) Enzimas	° Brix para (1.0ml) Enzimas	° Brix para (1.5ml) Enzimas
1	17.0	16.5	16.0
2	14.0	15.3	14.9
3	11.0	14.4	13.5
4	10.6	12.4	11.1
5	8.5	11.3	10.1
6	8.3	10.4	9.1
7	8.3	10.4	9.1

Tabla - 3 Comportamiento del pH			
Tiempo (Días)	pH para (0.5ml) Enzimas	Ph para (1.0ml) Enzimas	pH para (1.5ml) Enzimas
1	5.10	5.00	4.50
2	5.00	4.90	4.00
3	4.70	4.40	3.80
4	3.65	4.07	3.75
5	3.30	3.65	3.65
6	3.33	3.63	3.25
7	3.10	3.60	3.29

Tabla - 4 Unidades Formadoras de Colonias para (0.5ml), (1.0ml), (1.5ml) Enzimas.

Tiempo (Días)	UFC para (0.5ml) Enzimas	UFC para (1.0ml) Enzimas	UFC para (1.5ml) Enzimas
1	1.7800	2.0000	2.4500
2	1.8500	2.1300	2.5400
3	2.0100	2.0400	2.4500
4	1.7900	1.8300	2.3600
5	1.5900	1.7500	2.2800
6	1.5800	1.6800	2.0900
7	1.5500	1.5700	2.0700

Tabla - 5 Azúcares Reductores Totales para (0.5ml), (1.0ml), (1.5ml) Enzimas.

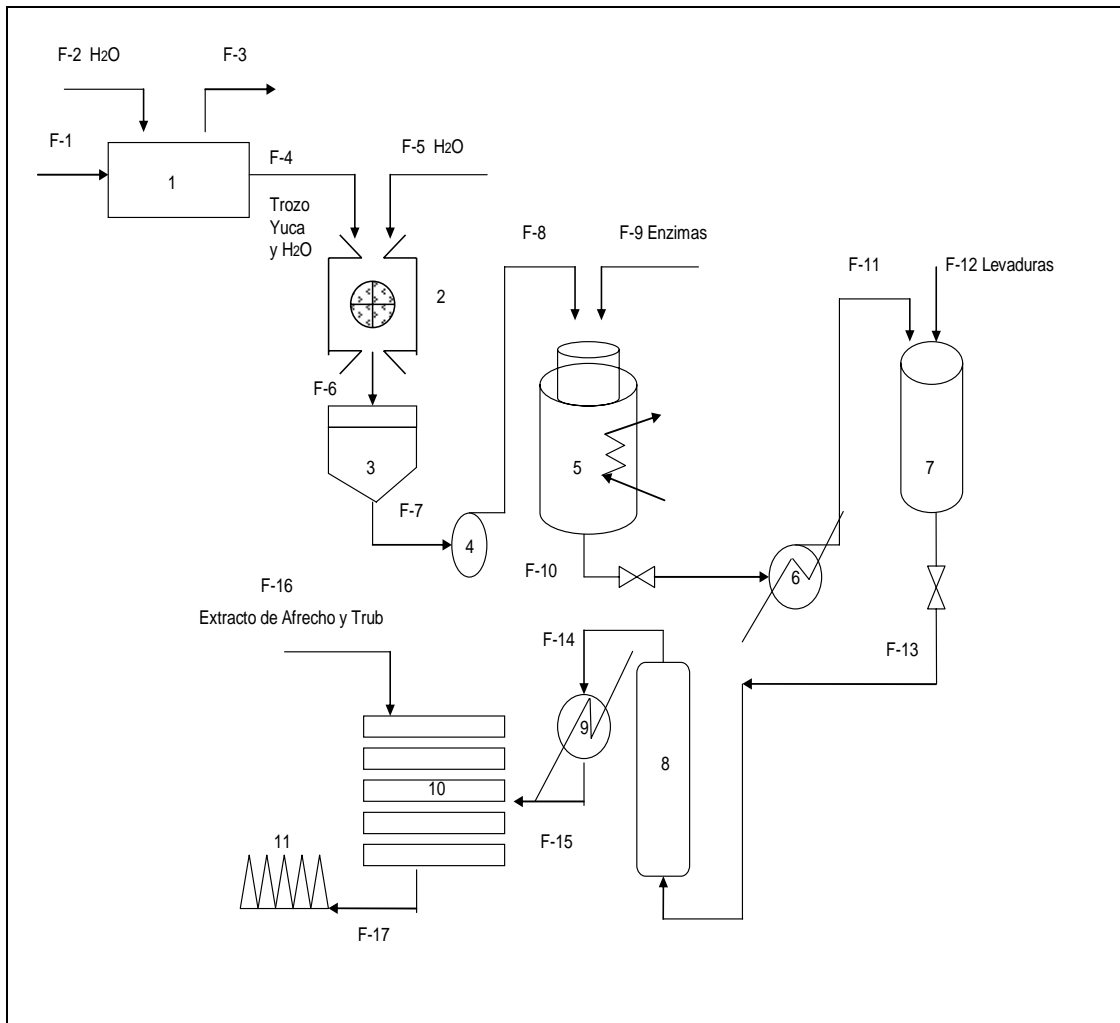
Tiempo (Días)	ART(g/l) para (0.5ml) Enzimas	ART(g/l) para (1.0ml) Enzimas	ART (g/l) para (1.5ml) Enzimas
1	55.6100	50.3000	49.3200
2	61.4000	65.3000	56.3000
3	35.6000	45.6000	40.5000
4	25.3000	29.7800	20.3600
5	13.0000	15.3800	11.2800
6	11.6000	13.5600	10.0100
7	9.7000	11.9800	8.5000

Tabla - 6 Comportamiento del ácido acético

Tiempo (Días)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
1	2.0	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0
2	2.4	2.3	2.1	2.2	2.4	2.4	2.4
3	2.6	2.5	2.4	2.3	2.6	2.6	2.6
4	2.9	2.5	2.6	2.8	2.9	2.9	2.9
5	4.0	3.7	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4
6	4.9	4.9	4.9	5.0	4.7	4.7	4.9
7	6.0	6.5	6.4	6.3	5.9	5.8	6.6

Tabla - 7 Comportamiento del ph							
Tiempo (Días)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
1	5.0	4.8	4.6	4.4	4.4	4.5	4.3
2	4.8	4.7	4.5	4.3	4.3	4.4	4.1
3	4.6	4.5	4.4	4.2	4.1	4.3	4.0
4	3.9	3.8	3.7	3.5	3.4	3.7	3.3
5	3.8	3.7	3.6	3.4	3.3	3.4	3.3
6	3.7	3.6	3.7	3.5	3.4	3.3	3.3
7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0

Anexo 2. Esquema de diseño tecnológico de la planta, según metodología del Ulrich(1985).



- Máquina lavadora, peladora y troceadora de yuca (1), molino de martillo (2), cribas (3), bomba (4), macerador (5), enfriador (6), fermentador (7), torre empacada (8), condensador (9), bandejas perforadas (10).

Anexo 3. StatGraphics Plus 5.0

Resumen del análisis

Modelo Completo de Efectos Estimados para Acidez

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Medio Cuadrado	F-Ratio	P-Valor
Media	270,321	1	270,321		
Lineal	0,568889	1	0,568889	144,52	0,0001
Cuadrático	0,00335404	1	0,00335404	0,82	0,4160
Cúbico	0,00111111	1	0,00111111	0,22	0,6717
Error	0,0152174	3	0,00507246		
Total	270,91	7			

Modelo Completo de Resultados

Modelo	SE	R-Cuadrado	R-Cuadrado Ajust.
Lineal	0,0627416	96,66	95,99
Cuadrático	0,0638915	97,23	95,84
Cúbico	0,0712212	97,41	94,83

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de haber adaptado modelos distintos a los datos en acidez. El modelo medio consta de una sola constante. El modelo lineal consta de términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático añade productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico agrega otros términos de tercer orden. Cada modelo se muestra con un p-valor que comprueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se compara al cuadrado medio para el término más bajo. Normalmente, seleccionaría el modelo más complicado con un p-valor inferior a 0.05, asumiendo que está operando al 95% de nivel de confianza. Según este criterio, parece que el modelo de lineal es el adecuado para los datos. El actual modelo seleccionado es el modelo lineal.

En la parte inferior de la salida se ha tabulado, para cada uno de los modelos, el error normal de la estimación y el estadístico R-cuadrado. Algunos análisis prefieren seleccionar el modelo que aumenta al máximo el R-cuadrado adaptado.

ANOVA para Acidez

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	F-Ratio	P-Valor
Modelo Lineal	0,568889	1	0,568889	144,52	0,0001
Error Total	0,0196825	5	0,00393651		
Total (corr.)	0,588571	6			

R-cuadrado = 96,6559 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,9871 por ciento
 Error Estándar de Est. = 0,0627416
 Error absoluto de la media = 0,0471655
 Estadístico Durbin-Watson = 1,34857
 Autocorrelación residual Lag 1 = 0,167947

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo lineal seleccionado actualmente. Dado que el p-valor para este modelo es inferior a 0.01, hay una relación estadísticamente significativa entre Acidez y los componentes al 99% de nivel de confianza.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 96,6559% de la variabilidad en Acidez. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 95,9871%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,0627416. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0471655 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicios de una posible correlación de serie. Represente los residuos frente al orden de la fila para ver si hay cualquier modelo que pueda ser visto.

Lineal Resultados del Modelo ajustado para Acidez

Parámetro	Error Estimación	Estadístico Estándar	T	P-Valor
A:AfrechoTrub	5,85873	0,0379096		
B:Etanol	6,56984	0,0379096		

R-cuadrado = 96,6559 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,9871 por ciento
 Error Estándar de Est. = 0,0627416
 Error absoluto de la media = 0,0471655
 Estadístico Durbin-Watson = 1,34857

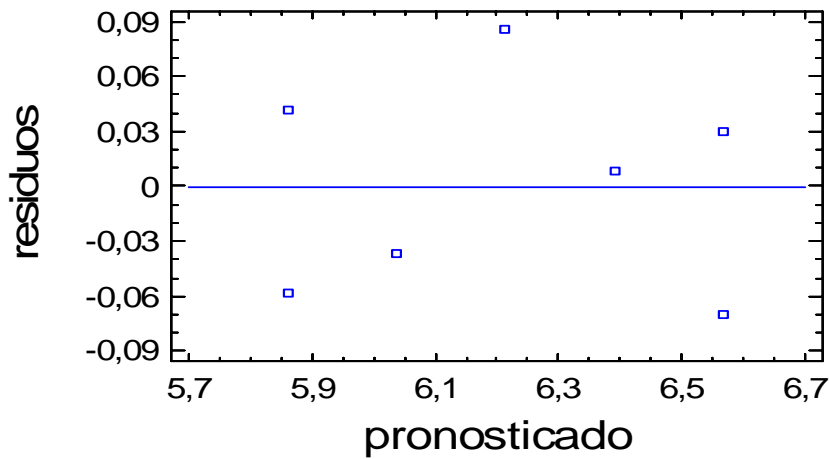
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,167947

El StatAdvisor

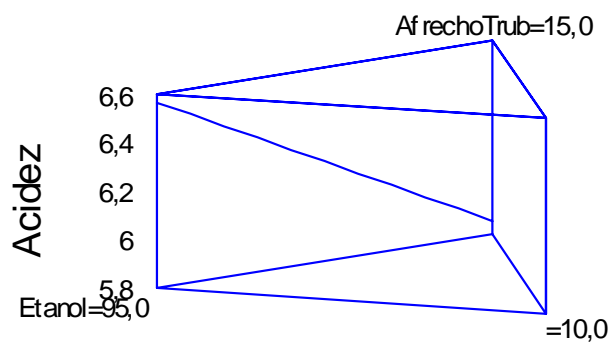
Esta ventana muestra la ecuación del modelo lineal ajustado. La ecuación del modelo ajustado es $\text{Acidez} = 5,85873 * \text{AfrechoTrub} + 6,56984 * \text{Etanol}$ donde los valores de los componentes son especificados en pseudo componentes. Para que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para trazar la función, seleccione Gráfico de Respuesta de la lista de Opciones

Gráficas.

Gráfico de residuos para Acidez



Superficie de Respuesta estimada



Anexo 4. Determinación de la acidez

Como la acidez de un vinagre es producida por el ácido acético, la determinación se reduce a valorar directamente el acético contenido en la muestra. Se trata entonces de una volumetría de neutralización de un ácido débil (el acético, $pK = 4.8$) frente a una base fuerte (el hidróxido sódico).

Materiales:

- pipeta graduada de 10ml
- matraz erlenmeyer de 250 ml
- frasco lavador con agua destilada
- probeta de 50 ó 100 ml
- bureta de 50 ml
- solución valorada de hidróxido sódico 0,1 N.
- solución de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico.
- solución problema: cualquier vinagre de los que se adquieren normalmente en el comercio.

Procedimiento:

Se parte de un vinagre comercial cualquiera, del que se pipetea cuidadosamente 10ml que se llevan a un matraz erlenmeyer de 250 ml y se diluyen con 100ml de agua destilada exenta de anhídrido carbónico (basta con haberla hervido recientemente y enfriada). Esta puede ser algo mayor si el vinagre tiene demasiado color, con objeto de percibir claramente el viraje del indicador. Se añaden unas gotas de fenolftaleína y se adiciona desde una bureta gota a gota solución valorada de hidróxido sódico 0,1N hasta aparición de la primera tonalidad rosa preexistente. Anotar el volumen gastado V.

Cálculos:

Se puede verificar la fórmula:

$$\frac{V_x N_x f_m}{1000 P_{.eq} .Acético}$$

En donde:

V = Volumen gastado de hidróxido sódico.

f = Factor de la solución de hidróxido sódico.

N = Normalidad del hidróxido sódico (0,1).

m = Gramos de ácido acético en la muestra.

P. eq. Acético = Peso molecular del ácido acé