

Universidad de Matanzas  
Sede “Camilo Cienfuegos”  
Facultad de Ciencias Técnicas  
Departamento de Química e Ingeniería Química



**Título:** Valoración del comportamiento energético de un macerador para la producción de cerveza.

Trabajo de diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico.

**Autor:** Eddy Martínez Padrón.

**Tutor:** Dr. Marcelo Marcet Sánchez.

Dr. Mario Yll Lavín

Matanzas

2018



**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del tribunal

---

Miembro del Tribunal

---

Miembro del Tribunal

---

Clasificación

---

Ciudad, fecha

## DECLARACION DE AUTORIDAD

Yo, Eddy Martínez Padrón, declaro ser el único autor de esta investigación; realizada en la Universidad de Matanzas, Sede "Camilo Cienfuegos", como requisito parcial para optar por el título de Ingeniería Química. Autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, firma:

---

Nombre y Apellidos

---

Firma

## **DEDICATORIA**

**A mis padres, Alba Rosa y Eduardo, sin ellos nada hubiera logrado, todo  
hubiera sido una simple utopía.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Muchos son los que están presentes en la realización de un gran sueño, pero siempre hay que ser mención especial a algunos, sin los cuales no se hubiera tenido un término feliz. Es por ello que quisiera agradecer:

A Enrique, amigo, guía certero y protagonista de la investigación.

A Mario, mi profesor, tutor. Gracias por las horas de trabajo y por todas sus enseñanzas. También por demostrarme que una investigación lleva sin sabores y que nunca se termina.

A Marcelo, padre, amigo, tutor y jefe. He aprendido tanto de usted que sus enseñanzas sobrepasan los marcos de la Planta Piloto.

A Manuel Alam por su ayuda y esfuerzo con los equipos de laboratorio.

A Raul Carrillo que gracias a su ingenio y dedicación se diseñó el equipo de esta investigación.

A Ariadna, mi peque, siempre has estado junto a mí, cuando creía que el tiempo se me acababa y no podía entregar o cuando regresaba abatido de los encuentros con Mayito.

A mi hermana, hermano y familia en general, por estar en la retaguardia. A Keyler, para quien quiero ser ejemplo. Y sobre todo a Alejandra, el sol y la alegría de la casa.

A Iván por el tiempo dedicado.

A mis cuñadas Melissa y Yamel porque si no las pongo no va a ver quién las aguante.

A mis profesores de la carrera, a todos los que de una manera u otra aportaron en mi formación.

A mis compañeros de aula, con quienes compartí tantos buenos y malos momentos.

Al tornero, por su apoyo, tan necesario y útil.

A mi cuñado Alejandro quien se ocupa del suministro de la graduación.

A mis suegros, a Carlitos, literalmente mi compañero de mil batallas.

Ana Paula o Eddy Alejando, en quienes ya pensamos.

## RESUMEN

En esta investigación se realiza la valoración energética de un macerador que se instala en la línea de producción de cerveza del laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Matanzas, pues se desconoce cuál es su desempeño en tal sentido. Lo que distingue este nuevo macerador con respecto a los tradicionales es la fuente de energía que es eléctrica. Se conocieron los parámetros involucrados en la transferencia de calor del equipo. Se hizo la caracterización energética del macerador, lo que demostró que el calor intercambiado y el calor por agitación fueron los más representativos en la valoración energética. Se cuantificaron las diferentes formas de calor que ocurren durante el macerado, demostrándose que la suma de los calores absorbidos por el mosto representa el 75% del calor total emitido, mientras que la suma de las pérdidas solo representa el 4% del total.



## **ABSTRACT**

In this research, the energy assessment of a macerator is carried out, which is installed in the beer production line of the Environmental Biotechnology Laboratory of the University of Matanzas, since its performance in this regard is unknown. What distinguishes this new macerator with respect to the traditional ones is the energy source that is electric. The parameters involved in the heat transfer of the equipment were known. The energy characterization of the macerator was made, which showed that heat exchanged and heat by agitation were the most representative in the energy assessment. The different forms of heat that occur during maceration were quantified, demonstrating that the sum of the heats absorbed by the must represents 75% of the total heat emitted, while the sum of the losses only represents 4% of the total.

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1: Análisis Bibliográfico.</b> .....	3
1.1 Proceso de fabricación de cerveza.....	3
1.1.1 Materias primas utilizadas en la producción de cerveza.....	5
1.1.2 Descripción del proceso de producción de cerveza .....	7
1.1.3 Descripción detallada de la etapa de maceración. ....	9
1.2 Sistemas básicos de macerado.....	14
1.3 Reactores enchaquetados con agitación .....	17
1.4 Procesos de transferencia de calor. ....	17
1.5 Tipos de intercambiadores utilizados en la industria cervecera.....	18
1.6 Criterio de evaluación de la transferencia de calor .....	20
1.7 Influencia de la rotación en la transferencia de calor.....	21
1.8 Modelación matemática de procesos. ....	22
<b>Capítulo 2: Materiales y métodos.</b> .....	24
2.1 Descripción del macerador.....	24
2.2 Ecuaciones básicas utilizadas para los balances de energía. ....	24
2.2.1 Para el calor intercambiado. ....	25
2.2.2 Para el calor por agitación. ....	31
2.3 Búsqueda de datos experimentales. ....	32
2.4 Obtención de una correlación empírica. ....	32
<b>Capítulo 3: Análisis de los resultados.</b> .....	34
3.1 Cálculo del calor intercambiado. ....	34
3.1.1 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor. ....	36
3.1.2 Cálculo del área de transferencia de calor. ....	37
3.2 Calor generado por la agitación. ....	38
3.3 Resultado energético del proceso de maceración. ....	38
3.4. Correlaciones empíricas resultantes para el incremento de la temperatura en la chaqueta y el mosto. ....	40
3.4.1 Temperatura de la chaqueta en función del tiempo.....	40
3.4.2 Temperatura del mosto en función del tiempo. ....	41
3.4.3 Correlación de temperatura entre el mosto y la chaqueta. ....	42
<b>Conclusiones</b> .....	44
<b>Recomendaciones</b> .....	45
<b>Bibliografía</b> .....	46
<b>Anexos</b> .....	50

## **Introducción:**

En cualquier proceso productivo, ya sea en pequeña o gran escala, dos aspectos fundamentales sintetizan la protección del medio ambiente y lo relacionado con la energía que se emplea en dicho proceso, porque esta es cada vez más escasa. Por lo tanto, ambos se deben tener en cuenta desde que se hace un proyecto hasta su ejecución y funcionamiento.

La parte ambiental está relacionada con lo que se denomina producción más limpia que se dedica a la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente y la parte energética va encaminada hacia la utilización cada vez más racional del consumo energético en las producciones.

A la ciencia y la técnica les corresponden la búsqueda y aplicación de nuevas vías que hagan eficientemente funcional estos dos aspectos que van muy unidos en el desarrollo productivo de un proceso.

Este trabajo de investigación está relacionado con la parte energética porque su problema científico surge por la adquisición de un nuevo biorreactor que se instala en la línea de producción de cerveza del laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Matanzas, y dadas las características poco tradicionales en cuanto a la transferencia de calor que debe ocurrir en este equipo, se desconoce cuál es su desempeño en tal sentido y así cumplir los requerimientos energéticos para el proceso en esta etapa de producción.

Lo que distingue este nuevo macerador con respecto a los tradicionales es que la fuente de energía es eléctrica para el intercambio térmico que debe ocurrir en el mismo y así asegurar las diferentes temperaturas a la que es sometido el proceso enzimático.

Por lo general en los maceradores industriales, el intercambio de calor se realiza con vapor, proveniente de fuentes destinadas particularmente para este tipo de mecanismo o por independización de líneas para ello; en el caso del laboratorio de biotecnología ambiental no existe posibilidad para ninguna de estas alternativas, por lo que se debe explotar el equipo con estas características;

donde también favorece la baja capacidad con que cuenta, ya que es dedicado a las investigaciones del laboratorio.

Actualmente, se desconoce el desenvolvimiento energético de este nuevo macerador, por lo que es necesario el establecimiento de medidas de control del proceso para que no se afecte la eficiencia y eficacia del mismo.

**El problema científico de esta investigación se formula de la forma siguiente:**

¿Cómo determinar el comportamiento energético del macerador del laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Matanzas?

**Esta anterior situación problemática puede ser respondida a través de la siguiente hipótesis:**

A través de la contabilidad de los parámetros que intervienen en la etapa de maceración se puede conocer el comportamiento energético del macerador.

**Objetivo general:**

Valorar del comportamiento energético de un macerador para la producción de cerveza.

**Objetivos específicos:**

- Caracterizar energéticamente el macerador.
- Cuantificar las diferentes formas de calor que ocurre en el macerador.
- Determinar el consumo general de energía en la etapa de maceración.

## Capítulo 1: Análisis Bibliográfico.

### 1.1 Proceso de fabricación de cerveza.

Según la reglamentación Técnico-Sanitaria Española, "la cerveza es la bebida resultante de la fermentación alcohólica, mediante levaduras seleccionadas de un mosto procedente de malta de cebada, sola o mezclada con otros productos amiláceos transformables en azúcares por digestión enzimática, adicionado con lúpulo y/o sus derivados y sometido a un proceso de cocción. La malta puede ser sustituida por malta de cereales, granos crudos que contengan féculas, así como azúcares, siempre que las sustancias añadidas no excedan del 50% en masa de la materia prima utilizada".

Existen fundamentalmente dos grandes tipos de cerveza, de acuerdo con el tipo de levadura que se usa (Briggs et al., 2004):

- Las cervezas tipo lager, elaboradas con levadura de floculación baja.
- Las cervezas tipo ale, elaboradas con levadura de floculación alta.

Dentro de cada uno de estos tipos básicos hay subtipos con diferentes características, cuya nomenclatura es variable y confusa.

Pilsener: Cerveza rubia tipo Pilsen, con un grado alcohólico de 4.2<sup>o</sup> G.L de fino sabor amargo y un pronunciado aroma de lúpulo.

Dortmunder: Casi no tiene espuma, y la poca que produce, blanco grisáceo, no se disipa. Tiene un cuerpo ligero a medio, de un color dorado perfecto, transparente y con buena carbonatación. El aroma es intenso con notas de malta y cereales y también ligeramente amargo. El sabor es muy fuerte, con mucho sabor a malta y bastante amargor, también posee un poquito de acidez. El final, bastante peculiar, es muy largo, y amargo, y, sobre todo, muy refrescante (Aquarone et al., 1983).

Dunkel: Cerveza de trigo tipo dunkel con muchísima espuma entre beige y marrón claro, compacta, que se disipa muy lentamente, pero siempre queda una cantidad importante. Tiene un cuerpo medio de color cobrizo, es turbia y totalmente opaca, con una carbonatación alta y chispeante. El aroma fuerte es impresionante, con notas de malta caramelizada, pan recién hecho y plátano. Su

sabor es menos intenso que el aroma, es una réplica del aroma al que hay que añadir algo de especias, un golpe fuerte de levadura al principio y un regusto amargo al final. El final es ligeramente agrio, se destaca la levadura, y afrutado, y deja recuerdos de plátano. Es una bebida muy refrescante (Aquirone et al., 1983).

Stout: Por sus ingredientes, clasifican como compuestas. Mucha espuma, beige, muy cremosa y compacta, que se disipa bastante rápido hasta quedar algo más de un centímetro. Su cuerpo es pleno, de color marrón muy oscuro casi negro, opaca, con algo de sedimentación y muy poca burbuja. Tiene poco aroma en el que se destacan maltas caramelizadas, algo de café y chocolate. El sabor es bastante complejo, con maltas tostadas, con un regusto ahumado, y algunas notas de café tostado intenso y algo de chocolate; también hay un ligero amargor inicial de un lúpulo que se diluye rápidamente. El final es seco, como un licor, a pesar de su poco alcohol, en el queda el regusto del café tostado intenso y algo de malta (Briggs et al., 2004).

Ale: Con espuma media, blanco mate y esponjosa, bastante duradera. Cuerpo de medio a pleno, de color rojo cobrizo bastante intenso, transparente y con poca burbuja. Aroma apenas imperceptible en el que podemos destacar maltas tostadas y algo de caramelo. El sabor, al contrario que el aroma, es una intensa explosión de matices en la boca, destacando de nuevo unas muy interesantes maltas tostadas, un lúpulo afrutado de intensidad media y un muy ligero, pero persistente, regusto a metal. El final es una continuación de los matices del sabor, destacando al principio el lúpulo, para dejar paso a la malta caramelizadas. Poco alcohol, 3.3 por ciento (Aquirone et al., 1983).

Bitter: Es un tipo de cerveza inglesa, derivada originalmente de la Pale Ale (cerveza inglesa pálida). Una versión más fuerte de la misma se ha convertido en una popular cerveza en botella. El ingrediente principal es cebada malteada, se le agrega lúpulo para mejorar las características, y para dar un olor y gusto distintivos. Las Bitter cubren una amplia variedad de sabor, aroma y aspecto. Estos incluyen cobre, malta, seca y dulce.

Bock: Es un tipo de cerveza originaria de la ciudad alemana de Einbeck. Esta cerveza es muy fuerte, con un extracto primitivo superior al 14 por ciento y de un

color oscuro. Es una cerveza de baja fermentación y posee un alto contenido de alcohol. Esta cerveza solo se produce durante la primavera y el otoño. El bock es una cerveza robusta, de color pardo, aunque también se elabora rubia, se consume en toda Alemania y en algunas partes de Holanda.

### **1.1.1 Materias primas utilizadas en la producción de cerveza:**

Las materias primas que se utilizan en la composición de la cerveza son: malta de cebada, agua, lúpulo, levadura y adjuntos (malta de otros cereales, granos crudos, azúcares y féculas).

**Malta de cebada:** La malta de cebada es la materia prima más importante como base para la producción del extracto y, al mismo tiempo, la única fuente esencial de enzimas (Figueroa, 2008).

. La cebada resulta ventajosa por las siguientes razones:

- El almidón en la cebada se gelatiniza a temperaturas de maceración normal y, por tanto, no requiere ebullición.
- La proporción de amilosa y amilopectina en la cebada es muy parecida a la de la malta.
- La proteína de la cebada es muy parecida a la de la malta.

Sin embargo, la malta es una materia prima cara, ya que el malteado requiere mucho tiempo y aporte de energía; por ello y con el fin de obtener un extracto más barato se utilizan productos no malteados preparados de granos de cereales, por ejemplo: arroz, la sémola de maíz o la cebada.

**Lúpulo:** Se cultiva solo en climas templados; uno de los principales productores es Inglaterra. Los conos femeninos poseen una serie de resinas amargas y aceites esenciales responsables del sabor amargo, cuya composición química es compleja. Se han identificado más de novecientos compuestos, los principales se llaman humulonas. Se ha demostrado que estas sustancias, además de modificar el aroma y el sabor de la cerveza, son inhibidores del crecimiento de microorganismos no deseados, por lo que ayuda a disminuir el riesgo de contaminación (Roberts and Wilson, 2006).

**Adjuntos:** Cuando se dispone de malta con alta actividad enzimática, se puede anexar otra fuente de almidón, en una proporción del 20 al 30 por ciento, con el

objetivo de bajar los costos. A estas otras fuentes de carbohidratos se les llama adjuntos y poseen un contenido bajo de proteínas y grasas.

Los adjuntos pueden ser sólidos o líquidos. Entre los sólidos se encuentran el arroz, el maíz y la harina de trigo; los líquidos son los jarabes de maíz, de cebada y de trigo, así como las soluciones concentradas de azúcar (Verhoef, 2003).

**La levadura:** Se denomina levadura a un grupo de hongos microscópicos unicelulares que se caracterizan por su capacidad de realizar la fermentación de hidratos de carbono, produciendo con esto dióxido de carbono y etanol. Estos microorganismos producen varias enzimas que tienen la capacidad de descomponer diversos sustratos, principalmente los azúcares (Lekkas et al., 2007).

En el área de cervecería, de acuerdo con el comportamiento de floculación, se han clasificado las levaduras en cuatro clases:

- Clase I: las que no floculan.
- Clase II: las que floculan al final de la fermentación en aglomerados no muy compactos asociados a las burbujas de dióxido de carbono.
- Clase III: las que floculan al final de la fermentación en aglomerados muy compactos no asociados a las burbujas del gas.
- Clase IV: las que floculan desde etapas tempranas de la fermentación, por su capacidad de formar ramificaciones.

Las operaciones que se llevan a cabo en la elaboración de cerveza dependen de la clase de levadura que se use.

**Los aditivos:** Son sustancias que normalmente no se consumen como alimento en sí, ni se usan como ingrediente característico, independientemente de que tengan o no valor nutritivo; se utilizan con un propósito tecnológico en la fase de fabricación, transformación, preparación, tratamiento, envase, transporte o almacenamiento y permanecen en el producto final.

Los coadyuvantes tecnológicos son materiales que se utilizan durante el proceso de elaboración, pero, a diferencia de los aditivos, no forman parte de la composición final del producto (tierras de filtración y clarificantes).



**Agua:** El agua empleada en la fabricación de la cerveza es su componente mayoritario. Debe tratarse de agua potable y disponer de sistemas de control que garanticen su potabilidad.

La composición del agua tiene una gran influencia en la calidad y el tipo de cerveza. Por eso, durante muchos años, varias de las cervezas de renombre atribuyeron sus características a la localidad del agua que había en sus fábricas; sin embargo, como no se conocía la composición de las sales del agua utilizada ni su influencia sobre la cerveza, no podían justificar con exactitud lo que pasaba. Hoy, se posee el conocimiento que permite acondicionar el agua de acuerdo con los requerimientos necesarios para el tipo de cerveza deseado.

### **1.1.2 Descripción del proceso de producción de cerveza:**

La selección de la malta es el primer paso de la producción de cerveza, la malta contiene almidón que es sacarificada por la actividad enzimática en el grano, el proceso de malteado incluye la germinación del grano seguido de un tratamiento térmico para detener la germinación. El fabricante selecciona el agua, la cual es muy importante para la calidad de la cerveza y la actividad de la levadura, lo que representa un 90 por ciento de la cerveza terminada. El agua debe tener algunos tipos de minerales en forma de sales e iones (Mg, Zn) que son determinantes para la velocidad de la fermentación. La concentración de sales e iones asociados a otros factores definen algunas características típicas de cervezas especiales (Comi and Manzano, 2008).

El aroma de la cerveza y en particular el amargor proviene del lúpulo que es usado en la cervecería desde la edad media. El lúpulo es añadido al mosto durante el proceso de ebullición donde se produce la isomerización de los  $\alpha$ -ácidos. Algunos productores añaden el lúpulo fresco (lúpulo seco) a la cerveza durante el proceso de la fermentación, para incrementar los ácidos volátiles responsables del aroma, los cuales se pueden perder durante la ebullición (Bamforth, 2003).

La selección de la levadura es un importante paso en la producción de cerveza, la cual posee un número de características importantes que afectan el sabor de la cerveza, la apropiada floculación y características de sedimentación, estabilidad genética, osmotolerancia, la tolerancia al alcohol y la habilidad de

producir ésteres, son las características más evaluadas a la hora de seleccionar el tipo de levadura (Hough, 2009).

La harina de malta es mezclada con el agua, es calentada para permitir la degradación enzimática del sustrato, los compuestos de alta masa molar son hidrolizados a moléculas más pequeñas, las cuales son usadas por las levaduras durante el proceso de fermentación.

El mosto se filtra para separar los residuos sólidos del líquido, el cual es recogido para ser hervido con el lúpulo para inactivar las amilasas, proteasas y las glucanasas. Las altas temperaturas dan como resultado la esterilización de la cerveza para el posterior proceso de fermentación. Después de hervir durante una o dos horas el mosto, las proteínas se coagulan y precipitan, esto juega un papel importante en la estabilización de la cerveza, finalmente, durante la ebullición el mosto se concentra en aproximadamente 8 a 10 por ciento (Comi and Manzano, 2008).

Antes de agregar la levadura, el mosto es filtrado para eliminar el residuo del lúpulo y todos los compuestos que puedan haber coagulado. Entonces el mosto es enfriado, oxigenado e inoculado con un cultivo puro de levadura.

Durante la fermentación la maltosa y cantidades más pequeñas de fructosa, glucosa, maltotriosa y sacarosa se convierten en etanol y en los sabores más importantes, durante la fermentación, los principales sabores incluyen ésteres (acetato de etilo, acetato de isoamilo) y alcoholes superiores (butanol, alcohol isoamílico, propanol). Todos ellos influyen en el carácter final de la cerveza (Comi and Manzano, 2008).

Al finalizar la fermentación las levaduras floculan y pueden ser utilizadas para producciones futuras, después de separar las levaduras, la cerveza es puesta a madurar. La maduración debe ser a temperaturas bajas del orden de los 2°C, el período de maduración puede durar entre dos semanas y dos meses, en dependencia del tipo de cerveza. En esta fase el azúcar restante puede fermentarse y transformarse en etanol y CO<sub>2</sub>, los cuales saturan la cerveza. La maduración clásica dura varias semanas y termina con una floculación completa

de la levadura que trae una clarificación total de la cerveza. Después de esta fase, la cerveza puede ser embotellada y preparada para el consumo.

### 1.1.3 Descripción detallada de la etapa de maceración.

El método que se emplea para extraer los azúcares y sustancias solubles presentes en la malta molida se conoce como maceración. La harina de malta es mezclada con agua para hidratarla y activar sus enzimas y que estas realicen la conversión del almidón en azúcares fermentables. El agua debe estar entre 60 °C y 70°C, nunca más de 75 °C porque se extraen taninos que dan sabores astringentes y se desnaturalizan las enzimas.

Además de la producción de azúcares, la maceración proporciona nutrientes útiles a la levadura, como aminoácidos, minerales, péptidos y vitaminas, que son extraídos por el agua caliente y por diversas enzimas producidas durante el malteado.

En la siguiente tabla se presentan las principales enzimas presentes en la malta, sus rangos de temperatura y pH (Guinjoan, 2009):

Tabla 1.1 Enzimas que actúan en el proceso de maceración.

Enzimas	Rango de Temp. Optimo (°C)	Rango de pH optimo	Función
<b>Fitasa</b>	30-52	5.0-5.5	Bajar el pH de maceración
<b>Desramificante</b>	35-45	5.0-5.8	Solubiliza los almidones
<b>Beta Glucanasa</b>	35-45	4.5-5.5	Rompe los glucanos de la pared celular
<b>Peptidasa</b>	45-55	4.6-5.3	Produce Nitrógeno Amínico Libre
<b>Proteasa</b>	45-55	4.6-5.3	Rompe proteínas que forman turbidez
<b>Beta Amilasa</b>	55-66	5.0-5.5	Produce maltosa
<b>Alfa Amilasa</b>	68-72	5.3-5.7	Produce dextrinas de varios tamaños

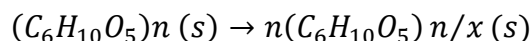
Estas enzimas son creadas por el embrión en crecimiento durante la germinación de la cebada en el proceso de malteado. Ellas le permiten proveerse de nutrientes del endospermo, hasta que la planta pueda fotosintetizar su propio alimento. En el malteado no se desea agotar todas las reservas de almidón del endospermo, así que se detiene en un punto adecuado del crecimiento del embrión mediante secado, para evitar el agotamiento de nutrientes y también para conservar las enzimas producidas en el grano (Lewis and Bamforth, 2006).

Estas enzimas, tienen un rango específico de temperatura y pH, en los cuales su actividad será óptima. Lo que se busca en la maceración es tratar de llegar a una solución de compromiso entre temperatura y pH para lograr los máximos de rendimiento de cada enzima.

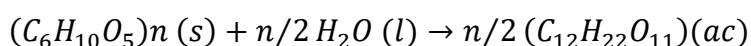
Las alfa y beta amilasas deben emplearse en estos rangos, si se desea obtener un mosto de fermentación adecuado. Estas enzimas hidrolizan el almidón de manera distinta.

Para la fórmula general del almidón  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , las principales reacciones que ocurren durante el cocimiento por acción de las amilasas son:

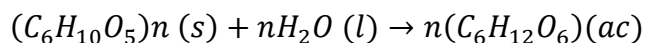
Formación de dextrinas:



Formación de maltosa:



Y en menor proporción formación de glucosa:



El almidón se encuentra en los granos de dos formas diferentes; amilosa y amilopectina.

La amilosa, es una molécula lineal de monómeros de glucosa (1000-4000) unidos mediante enlaces de tipo  $\alpha$  1-4, que, a temperatura ambiente, forman un espiral por donde se puede introducir el yodo y dar un color azul negrozco.

La amilopectina, también es un polímero de glucosa, pero de mayor tamaño. La mayoría de los enlaces son  $\alpha$  1-4, pero también existen puntos de ramificación, en donde son  $\alpha$  1-6. El yodo la tiñe de un color rojizo.

Ambas moléculas poseen en su extremo, un solo grupo reductor, lo que las iguala a como si fueran un azúcar simple como la glucosa en cuanto al poder reductor.

La alfa amilasa ataca a la amilopectina y la amilosa al azar, en cualquier punto de la molécula, menos cerca de los puntos de ramificación y tampoco cerca de los extremos no reductores. Por lo tanto, origina carbohidratos complejos llamados dextrinas, agregando con cada corte un extremo reductor a los productos de esta hidrólisis.

La beta amilasa, en cambio ataca a las dextrinas, amilopectinas y amilosas por sus extremos no reductores, cortando dos unidades de glucosa que se denominan maltosa. Por lo tanto, se le denomina enzima sacarificante y a la alfa amilasa dextrinificante. O sea que la alfa amilasa actúa generando lugares para que corte la beta amilasa y se produzca moléculas de maltosa.

La maltosa será el principal componente del mosto, pero se encuentran también azúcares preformados como glucosa, sacarosa, fructosa, que serán utilizados por la levadura durante la fermentación.

Del total de almidón del grano en una maceración se obtendrán aproximadamente 80% de azúcares fermentables y un 20% de dextrinas no fermentables que son las que le darán cuerpo a la cerveza y estabilidad a la espuma.

Las proteasas también actúan a 65 °C, degradando las proteínas que causan turbidez en el producto final, formando péptidos solubles más pequeños que también estabilizan la espuma de la cerveza.

Funciones de la maceración:

- Disolver los productos que se forman en el malteado.
- Usar las enzimas liberadas en el malteado para transformar el almidón en azúcares más simples.

- Usar las proteasas para continuar con la transformación de proteínas en péptidos y aminoácidos.

Factores que influyen en la maceración:

- Temperatura.
- pH.
- El tiempo de duración de las operaciones.
- Concentración de la mezcla.

La molienda es fundamental para producir la liberación de las enzimas y se hidrate bien el endospermo. La cáscara debe quedar lo más entera posible, para que pueda actuar como filtro en la etapa de lavado y para que no libere taninos de sabor áspero a la cerveza. La luz de rodillo empleado para moler la malta varia con cada tipo de esta y se usan a unos 0.9 mm de luz para las maltas bases.

Una maceración típica por infusión se realiza mezclando de 3 a 4 litros de agua por cada kg de malta molida.

Los procesos de infusión son la forma más simple de maceración, en donde el grano es mezclado con el agua caliente y se deja que se alcancen las temperaturas óptimas de las enzimas degradadoras del almidón. Todo esto se realiza en recipientes aislados térmicamente o con la ayuda de calentamiento externo.

La maceración por infusión tiene las siguientes ventajas:

- Puede ser fácilmente automatizada.
- Requiere de un 20% a 30% menos de energía que los procesos de decocción.
- Son más fáciles de monitorear.

Las ventajas de este método de maceración hacen que el sistema sea usado cada vez más en nuestros días.

Una mezcla con bajo contenido de agua produce una conversión del almidón más rápida, pero dan carbohidratos menos fermentables, que originarán una cerveza más dulce, con mayor carácter de malta.

Las mezclas con más agua, producen la conversión más lentamente, por dilución de las enzimas, pero dan azúcares más fermentables, y por lo tanto cervezas más secas o alcohólicas.

La temperatura a la que se debe llegar es de unos 62 °C a 68 °C. Normalmente se opera a 65 °C. En este rango de temperatura lo que se busca es favorecer a ambas enzimas para que degraden completamente el almidón por los mecanismos mencionados.

El pH es otro de los puntos importantes en una maceración. Se debe encontrar entre 5 y 5.5 empleando aguas blandas, con usar maltas bases ya se obtiene un pH que cae dentro del rango de maceración, mientras que, con aguas duras, se debe usar maltas oscuras que hagan descender más el pH para contrarrestar esta riqueza iónica del agua, sobre todo al  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonato). Esto se debe a que las maltas oscuras poseen compuestos ácidos naturales en mayor proporción que las maltas bases.

El tiempo de maceración será el que produzca una prueba negativa a la tintura de yodo. Como se mencionó antes, el yodo se introduce entre la cadena espiral de la amilosa, dando un color azul-negruzco. Si las amilasas actuaron y no dejaron moléculas de amilosa sin degradar, el yodo no producirá ninguna reacción de coloración. Esta prueba se debe realizar contra una superficie blanca y fría, tomando solo unas pocas gotas de mosto, sin ningún resto de grano.

Así, una prueba negativa de yodo indica que la maceración se concluyó, y el tiempo promedio de duración es de 1 hora y media, no teniendo sentido esperar más tiempo. Aquí concluye la etapa de sacarificación.

Los productos de degradación del almidón formados durante la maceración, difieren sustancialmente en su fermentabilidad por la levadura:

Tabla 1.2 Productos obtenidos por la degradación del almidón.

<b>Dextrinas</b>	<b>No fermentables</b>
<b>Maltosa</b>	Principal azúcar de fermentación
<b>Maltotriosa</b>	Se fermenta cuando la maltosa se agota
<b>Glucosa</b>	Azúcar de fermentación inicial

El porcentaje de azúcares fermentables en el extracto total determina el límite de atenuación, que establece la concentración de alcohol que estará presente en la cerveza final.

En el extracto soluble, que ahora se denomina mosto dulce, el 60% de las sustancias son fermentables (maltosa, maltotriosa, sacarosa, glucosa y fructosa), y serán utilizadas por la levadura para producir el alcohol y el CO<sub>2</sub> durante la fermentación (Gupta et al., 2010).

Luego viene la etapa de filtrado y lavado, en donde el mosto dulce es separado de los residuos de grano y donde estos también son lavados con agua caliente para asegurar la total extracción de los azúcares y nutrientes producidos durante la maceración.

El agua de lavado debe encontrarse a unos 80 °C para aumentar la fluidez de los azúcares, y para dejar que continúe la actividad enzimática de la alfa amilasa, con el corte de las cadenas de almidón que pudieran quedar y que están siendo extraídas por el agua de lavado.

El lavado debe terminarse cuando la densidad de salida del mismo llegue a unos 1.005 g/cm<sup>3</sup>. Normalmente para el lavado se utilizan 1.5 veces la cantidad de agua que se utilizó para la maceración.

## **1.2 Sistemas básicos de macerado:**

En la industria se utilizan varios sistemas de macerado, en dependencia de la cantidad de cerveza a producir o las condiciones de la instalación donde se fabricará la cerveza, estos sistemas serán explicados con mayor detalle a continuación:

### **➤ Sistema RIMS**

RIMS es el acrónimo de *Recirculating Infusion Mash System* (Sistema de Macerado por Infusión Recirculado), y supuso una nueva era en la cuestión de los equipos cerveceros. Lo más sorprendente del RIMS es la cantidad de características nuevas que aportaba. El diseño de un sistema tipo RIMS se parece a un sistema tradicional de macerado de tres cuerpos, con la olla para calentar agua (HLT, siglas de Hot Liquor Tank), una olla de hervido y un filtro-macerador convencional. Lo interesante es que su configuración permite que,



durante el macerado, se recircule el mosto de forma continuada mediante el bombeo, y calentado por una resistencia eléctrica. Esta resistencia mantiene la temperatura de macerado y en caso de necesitarse, puede elevarse la temperatura para hacer diferentes escalones de maceración. El mosto saldría por la parte inferior del filtro-macerador y es reintroducido por la parte de arriba.

Como la fuente de calor es eléctrica, es muy fácil acoplar controles automáticos, por lo que el diseño puede incluir medidores de temperatura y circuitos de control. Debido a que el RIMS recircula el mosto a través de la cama de grano, se produce un recirculado/filtrado continuo, y para empezar a recoger el mosto en la olla de hervido, solo habría que poner llaves de paso para dirigir el flujo del mosto en una dirección u otra. Cuando se comienza a hacer esto, se empieza también a lavar el grano. El uso de una bomba elimina la necesidad de configurar el equipo para que el trasvase del macerador a la olla de hervido sea por gravedad, así que solo serían necesarios dos niveles de altura (Alexander, 2003).

#### ➤ **Sistema HERMS**

HERMS es el acrónimo de *Heat Exchange Recirculating Mash System* (Sistema de Macerado Recirculado por Intercambiador de Calor), surgió como simplificación del RIMS, una década más tarde. Es parecido al RIMS, salvo que la resistencia eléctrica es remplazada por un intercambiador de calor y una válvula de bypass para controlar la temperatura. Los más típicos usan un serpentín, similar el que se usa para el enfriado del mosto por inmersión, dentro de la olla para calentar el agua, que hará las funciones de intercambiador de calor. Este sistema puede ser controlado eléctricamente, y al activarse, una válvula deriva el mosto al intercambiador de calor, aumentando su temperatura. En el HERMS no hay, entonces, ningún riesgo de quemar la malta como si lo había en el RIMS, y el diseño tipo HERMS puede usarse para elaborar lotes de gran tamaño. Una mejora sustancial en esta configuración sería un agitador en la olla de calentar el agua para lograr una buena transferencia de calor en el intercambiador (Alexander, 2003).

## ➤ Sistema DIMS

Otra variante es conocida como DIMS (*Drop In Manifold System*), es un sistema recientemente desarrollado en el que se elimina el falso fondo típico de los filtros-maceradores. En su lugar, se emplea una tubería ranurada que se coloca en el fondo del macerador en el momento de clarificar el mosto. Este sistema aprovecha la circunstancia de que un colector, a diferencia de un falso fondo, se puede poner en el macerador en el momento oportuno, para convertirlo, inmediatamente, en el típico filtro-macerador.

A diferencia de los otros sistemas que usan un filtro-macerador, el DIMS puede ser calentado aplicando calor directo, siempre y cuando se disponga de un agitador para evitar que se queme el grano. Después del *mashout* se retira el agitador y se instala el colector con una bomba en el fondo del macerador. El filtrado se lleva a cabo igual que en sistema RIMS.

A modo de comparación se puede decir que:

El sistema RIMS tiene como desventaja que no es sencillo de manejar si se quiere elaborar lotes muy grandes, puesto que requiere de un alto consumo de energía eléctrica. Otro inconveniente es que hay que poner atención para evitar una compactación del grano que impida el libre flujo del mosto. Otro problema es que, al aplicar calor, se queme parte del grano. Como ventaja se tiene que el RIMS es casi automático, y puede establecer escalones de temperatura complejos sin casi tener que prestar atención al proceso, y como resultado de la recirculación continua, el mosto queda extremadamente limpio.

El sistema DIMS tiene menos opciones de ser manejado de manera automatizada, pero reduce el riesgo de quemar el grano que existe cuando se aplica calor directo en un filtro-macerador convencional con falso fondo. El DIMS también proporciona mostos con la misma claridad que el RIMS y el HERMS, y puede ser fácilmente dimensionado para elaborar lotes grandes de cerveza. Una característica única para los equipos DIMS es que permite al productor bombear una parte del mosto a un recipiente independiente, retirar el colector y hacer un hervido de la parte principal del macerado directamente del macerador.

### 1.3 Reactores enchaquetados con agitación:

El macerador es considerado un reactor enchaquetado con agitación, estos reactores se utilizan cuando se precisa de una limpieza frecuente del tanque en cuestión, así como recipientes en los cuales sea difícil colocar serpentines internos. Este proporciona un mejor coeficiente de global de transferencia de calor que los serpentines externos. Contrariamente se dispone de área limitada para llevar a cabo la transmisión de calor, así como el fluido líquido no mantiene uniforme sus características en el interior de la camisa.

En la figura se muestra un recipiente enchaquetado estándar. Consiste en un recipiente y su chaqueta y los medios apropiados para circular el líquido dentro de la misma con un agitador de aspas planas.

Las dimensiones básicas para el cálculo de chaquetas son: altura de la porción húmeda del recipiente  $Z$ , diámetro del recipiente  $D$ , longitud de la paleta del agitador  $L$  y la altura desde el fondo de la paleta hasta el fondo del recipiente  $B$  (Kern, 1999).

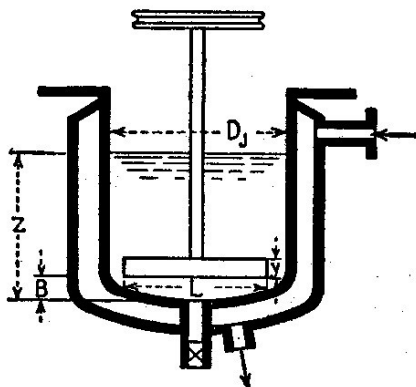


Fig. 1.1 Recipiente enchaquetado con agitación

Fuente: Kern, Donald Q. Procesos de Transferencia de Calor. Pág. 815

### 1.4 Procesos de transferencia de calor.

La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor.

En la industria, el proceso de transferencia de calor entre dos fluidos casi siempre se lleva a cabo en intercambiadores de calor, donde la transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la pared o la superficie de los tubos, a través de los tubos o placas por conducción, y finalmente por convección al fluido frío.

En el macerador, el calor se transmite al mosto mediante los mecanismos básicos de transferencia de calor, estos mecanismos son: conducción, convección y radiación.

En el proceso de macerado el calor es transferido por convección natural desde las resistencias hacia el agua presente en la chaqueta, esta energía es transferida mediante el mecanismo de conducción hacia el mosto y el exterior del macerador y por último ese calor es absorbido por el mosto mediante la convección forzada producida por la agitación del mismo. La radiación térmica también está presente durante la maceración cuando la temperatura de las paredes del macerador es superior a la temperatura presente en el ambiente.

### **1.5 Tipos de intercambiadores utilizados en la industria cervecera.**

Además de los equipos fundamentales presentes en el proceso de fabricación de cerveza, es posible encontrar otros equipos secundarios sin los cuales él no se podría elaborar cerveza. Entre estos equipos se encuentran los intercambiadores de calor:

Los equipos de intercambio térmico son estructuras o sistemas en los cuales se lleva a cabo el proceso de transmisión de calor desde una portadora hasta otra receptora (Galdo et al., 1999).

En la industria cervecera se han utilizado varios tipos de intercambiadores de calor entre los que se encuentran:

- Los intercambiadores de tubo y coraza: estos equipos se caracterizan por ofrecer grandes superficies de transferencia de calor, altos coeficientes de transferencia de calor, poco volumen para su instalación, facilidad de operación y operación con grandes flujos.

En la Figura 2.2 se puede observar un intercambiador de tubo y coraza utilizado en la industria cervecera que fue patentado por (Brauer and Widhopf, 1992).

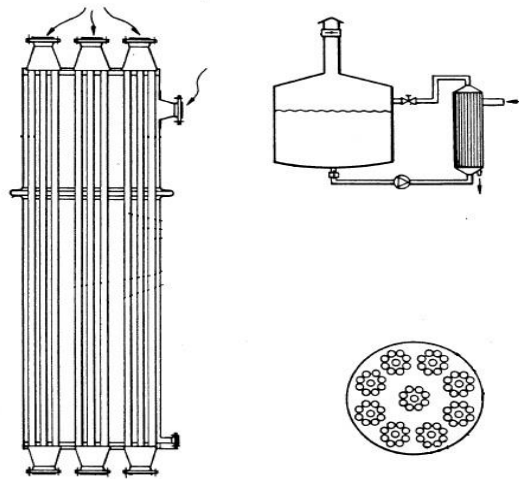


Figura 2.2 Intercambiador de tubo y coraza.

- Intercambiadores de calor espiral: Consiste en un serpentín colocado en un recipiente por el que circula agua de enfriamiento o calentamiento dependiendo del proceso. Sus principales usos se hacen en el enfriamiento de gases a alta presión y cuando se tiene interés en detectar fugas de forma sencilla.

En la Figura 2.3 se ve un intercambiador del tipo serpentín patentado por (Tonna and Shores, 1989)

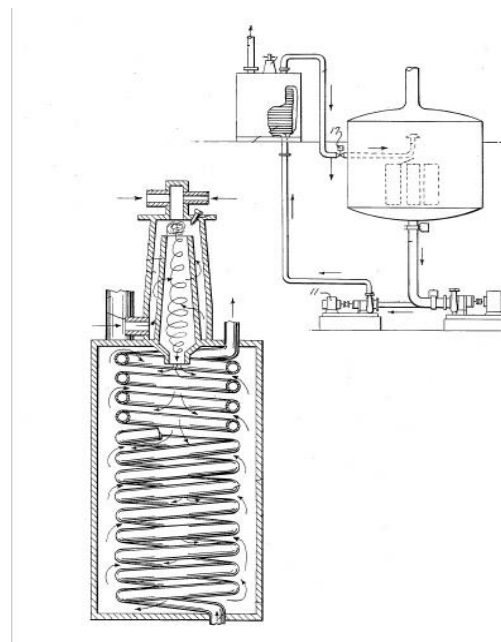


Figura 2.3 Intercambiador de Serpentín.

- Intercambiadores de placas: Este tipo de intercambiador es el más usado en la industria cervecera, se usan principalmente para enfriar el mosto de forma rápida e iniciar el proceso de fermentación. Como consecuencia de esta rapidez, se evita que el mosto pueda sufrir cualquier tipo de contaminación. Por norma general, este tipo de intercambiador de calor son muy compactos, muy prácticos y con los que se puede enfriar en un tiempo flash hasta 40 litros de mosto a una temperatura de 20°C, pasteurizar la cerveza de barril o enfriarla para su envasado.

En la Figura 2.4 se muestra una representación esquemática de un intercambiador de calor de tipo placa (Valdez, 2001).

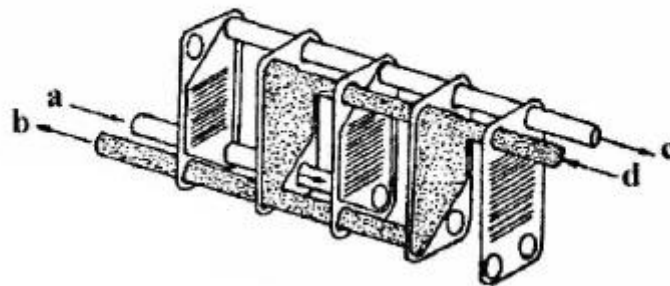


Figura 2.4 Intercambiador de Placas.

### 1.6 Criterio de evaluación de la transferencia de calor

La transferencia de calor en un intercambiador puede ser evaluada por diferentes métodos entre los que se destaca el método del número de unidades de transferencia o NTU, a continuación, se hará una breve descripción de este método:

#### **Método del número de unidades de transferencia (NTU-Rendimiento).**

El método del rendimiento ofrece muchas ventajas para el análisis de problemas en los que hay que comparar varios tipos de intercambiadores de calor, con el fin de seleccionar el tipo más adecuado para cubrir un objetivo de transferencia en particular. Se define el rendimiento del intercambiador de calor como, la transferencia de calor real entre la máxima transferencia de calor posible.

La transferencia de calor real se puede obtener calculando tanto la energía perdida por el fluido caliente, como la energía ganada por el fluido frío. Para determinar la máxima transferencia de calor posible para el intercambiador, se admite en primer lugar que este valor máximo se alcanzaría si uno de los fluidos experimentase una variación de temperatura igual a la diferencia máxima de temperaturas que se da en el intercambiador, que es la diferencia entre las temperaturas de entrada de los fluidos calientes y frío. El fluido que podría experimentar esta diferencia máxima de temperatura sería aquel que tuviese el valor mínimo de  $\dot{m}C$ , puesto que el balance de energía exige que la energía recibida por uno de los fluidos sea igual a la cedida por el otro; si fuese el fluido con mayor  $\dot{m}C$  el que alcanzara la máxima de temperatura, esto exigiría que el otro fluido experimentase una diferencia de temperatura mayor que la máxima, y esto es imposible (Holman, 1998).

### **1.7 Influencia de la rotación en la transferencia de calor.**

La influencia de la rotación en el incremento de la velocidad de transferencia de calor, dando lugar a una disminución en los tiempos de tratamiento, fue documentado por diversos estudios, como el realizado por (Chang y Toledo, 1990), en donde se determinó el coeficiente de conversión de transferencia de calor fluido-partícula, empleando para ello el registro de la evolución de la temperatura en función del tiempo en el centro de cubos de zanahoria de lado en un recipiente estacionario. El valor encontrado resultó ser mayor al reportado por otros autores, para las mismas partículas con diámetros similares en sistemas sin rotación.

De acuerdo con los datos recopilados por (Maesmans et al., 1992) de diversas investigaciones, al aumentar las revoluciones por minuto, el coeficiente de convección también presenta un aumento, por lo que puede decirse que la convección forzada da lugar a valores mayores del coeficiente de transferencia de calor fluido-partícula que la convección natural. Entre los sistemas que se reportan en dichas investigaciones se puede mencionar soluciones de sacarosa al 60%, agua, aceites y partículas como esferas de plomo, silicón, teflón y aluminio, con longitudes características de entre 0.95 y 3.81 cm.

## **1.8 Modelación matemática de procesos.**

La modelación matemática y la simulación por computadora son herramientas de mucha utilidad en los diferentes campos del saber. En la actualidad, la modelación es un instrumento muy común en el estudio de sistemas y el desarrollo acelerado de las técnicas de computación ha permitido un vertiginoso progreso de esta.

La modelación ha adquirido un carácter de método científico general, enriquecido por las conquistas de las matemáticas, la cibernética y el enfoque sistémico en la investigación científica.

Un modelo matemático es el reflejo de un proceso o sus partes, en forma de relaciones o formulaciones algebraicas. Según (Ortiz, 2000), el modelo es el resultado de estas formulaciones, mientras que la metodología constituye la modelación.

(Aguilar and Cañas, 1992) y (Torres, 1995) indican que un modelo es algo que representa una cosa. En términos generales, el modelo es la representación de un objeto, concepto o sistema, de forma tal que, aun siendo distinto a la entidad que representa, puede homologar su funcionamiento y uno o varios atributos de ella. Un modelo se diseña y construye, generalmente, con el propósito de entender, explicar o mejorar el funcionamiento del sistema real y el objeto que se representa.

Según (Torres, 1995) el diseño de un modelo se realiza en tres etapas:

- La primera se inicia en una idea y concluye en conceptos, lo cual implica crear algo que no ha existido previamente, por lo cual constituye algo entre imaginación y realidad.
- En la segunda etapa, la estructura se desarrolla en una forma dada.
- La tercera se lleva la definición final hasta sus últimos detalles, y constituye la etapa de llevar a la realidad el diseño.

Esta misma autora presenta un proceso de modelación más complejo y completo tomado de (Mertens, 1977), donde se muestran las interacciones entre etapas y se incorpora la validación y evaluación como parte del proceso.



La simulación de proceso ha sido de gran utilidad ya sea para estudiar o predecir el comportamiento de algunos procesos, así como para tareas de capacitación.

Diversas herramientas de cómputo han sido empleadas para la elaboración de simuladores. En (Rodman and Gerogiorgis, 2016) se presenta la simulación en Matlab del proceso de fermentación de la cerveza. En este trabajo, los autores muestran el efecto que tiene la selección del perfil de temperatura a utilizar, al igual que el ajuste correcto de las condiciones iniciales, sobre la calidad de la cerveza. En (Andres-Iglesias et al., 2015) el paquete de simulación Aspen es empleado para la simulación de un proceso de producción de cerveza sin alcohol. También ChemCAD ha sido empleado para la simulación de procesos de la industria de bebidas. En (Valderrama et al., 2012), los autores emplean este paquete de cómputo para simular tres distintos procesos de producción de bebidas alcohólicas y así demostrar la utilidad de la herramienta en esta área de la industria.

#### **Conclusiones parciales del capítulo:**

- La transferencia de calor tiene un papel fundamental en el proceso de producción de cerveza.
- En la industria cervecera se utilizan gran variedad de intercambiadores de calor, siendo el intercambiador de placas el más utilizado.
- Durante el proceso de maceración es de vital importancia el control de la temperatura para garantizar un rendimiento óptimo de las enzimas.

## **Capítulo 2: Materiales y métodos.**

### **2.1 Descripción del macerador:**

Para el caso base de la investigación se utiliza el macerador instalado en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Matanzas. El macerador tiene las siguientes características:

- Tanque circular de acero inoxidable AISI 316
- Volumen máximo de 100 L
- Un agitador de paleta colocado de forma concéntrica acoplado a un motor eléctrico que funciona con un voltaje de 220 V y hace girar el agitador a 100 rpm
- El tanque está recubierto por una chaqueta del mismo material que utiliza como medio de calentamiento dos resistencias de 220 V y una potencia de 3800 W cada una.
- El macerador cuenta con un sistema de nivel visual en la chaqueta que permite ver la cantidad de agua presente en su interior, con el fin de evitar que la resistencia quede sin un recubrimiento de agua lo que provocaría la rotura de la misma.
- Posee un control de presión con el propósito de evitar un aumento excesivo de la presión dentro de la chaqueta, este consta de un presostato conectado a un control magnético que regula el encendido y apagado de las resistencias eléctricas. Cuando la presión alcanza un valor superior al valor máximo fijado en el presostato este envía la señal para que se abra el control magnético y apague las resistencias, evitando así que pueda ocurrir un accidente que dañe el equipo y al personal que lo esté operando en ese momento.

En el Anexo 1 se puede apreciar el macerador utilizado para la investigación.

### **2.2 Ecuaciones básicas utilizadas para los balances de energía.**

El balance de energía en el macerador está representado por el balance de calor, donde la energía más distintiva viene dada por el calor intercambiado a través de la pared y el calor generado por agitación, que son la base de este trabajo.

### 2.2.1 Para el calor intercambiado.

Con el objetivo de determinar la distribución y el consumo total de energía por parte del macerador se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- Calor total absorbido por el líquido en la chaqueta:

$$Q_j = m_j C p_j (\Delta T) \quad (2.1)$$

Donde  $m_j$  es la masa de líquido en la chaqueta;  $C p_j$  es el calor específico del agua y  $\Delta T$  es la variación de temperatura.

- Calor total absorbido por el mosto:

$$Q_m = m_m C p_m (\Delta T) \quad (2.2)$$

Donde  $m_m$  es la masa de mosto;  $C p_m$  es el calor específico del mosto en el macerador y  $\Delta T$  es la variación de temperatura del mosto.

- Calor absorbido por el líquido en la chaqueta y el mosto para la evaporación del agua

$$Q_{evap-j} = m_{vapor} \lambda \quad (2.3)$$

$$Q_{evap-m} = m_{vapor} \lambda \quad (2.4)$$

$\lambda$  = es la entalpía de vaporización ( $J/kg$ ).

$m_{H_2O}$  = es la masa de agua evaporada ( $kg$ ).

- Calor absorbido por los metales del macerador

Para calcular el calor absorbido por el metal se utiliza la ecuación:

$$Q_{met} = m_{met} C p_{met} (T_f - T_o) \quad (2.5)$$

$m_{met}$  = es la masa de los metales del macerador ( $kg$ ).

$C p_{met}$  = es el calor específico del metal ( $J/kg s$ ).

- Pérdidas de calor:

Para el cálculo de las pérdidas de calor se utilizó la Ley de enfriamiento de Newton:

$$Q_p = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.6)$$

$h$  = es el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2K$ ).

$A$  = es el área de la superficie donde ocurre la transferencia ( $m^2$ ).

$T_w$  y  $T_\infty$  = representan las temperaturas de la pared y del medio que rodea el objeto respectivamente ( $K$ ).

### 2.2.1.1 Estimación del coeficiente global de transferencia de calor.

Para la estimación del coeficiente de transferencia de calor  $U$ , se utilizó la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} + Rf + \frac{\Delta x}{k} \quad (2.7)$$

$h_i$  = es el coeficiente de convección para el interior del macerador ( $W/m^2^\circ C$ ).

$h_j$  = es el coeficiente de convección para la chaqueta ( $W/m^2^\circ C$ ).

$\Delta x$  = es el espesor de la pared ( $m$ ).

$k$  = es la conductividad térmica del metal ( $W/m^\circ C$ ).

$Rf$  = es el coeficiente de incrustación ( $m^2K/W$ ).

- Estimación del coeficiente de convección en la chaqueta.

El coeficiente de convección en el interior de la chaqueta  $h_j$  se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$Nu = \frac{h_j h}{k} \quad (2.8)$$

$h_j$  = el coeficiente de transferencia de calor dentro de la chaqueta ( $W/m^2^\circ C$ ).

$h$  = la altura del líquido en el recipiente ( $m$ ).

$k$  = la conductividad térmica del líquido ( $W/m^{\circ}C$ ).

El número de Nusselt se calcula en dependencia del régimen presente en el interior de la chaqueta:

Para régimen laminar cuando ( $10^3 < Gr_{hfl}Pr_{fl} \leq 10^9$ ):

$$Nu = 0.76(Gr_{hfl}Pr_{fl})^{0.25} * \left[ \frac{Pr_{fl}}{Pr_p} \right]^{0.25} \quad (2.9)$$

Para régimen turbulento cuando ( $Gr_{hfl}Pr_{fl} > 10^9$ ):

$$Nu = 0.15(Gr_{hfl}Pr_{fl})^{0.33} * \left[ \frac{Pr_{fl}}{Pr_p} \right]^{0.25} \quad (2.10)$$

Donde: el subíndice  $fl$  representa la temperatura media del fluido,  $hfl$  simboliza que el número de Grashof se evalúa para la altura  $h$ , y el resto de las propiedades a la temperatura media del fluido, el subíndice  $p$  indica que el parámetro está referido a la temperatura de la pared.

El número de Grashof viene representado por la ecuación:

$$Gr = \frac{h^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (2.11)$$

$h$  = la altura del fluido en la chaqueta ( $m$ ).

$\rho$  = la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).

$g$  = la fuerza de gravedad ( $m/s^2$ ).

$\beta$  = el coeficiente de expansión térmico del fluido ( $1/^{\circ}C$ ).

$\Delta T$  = la diferencia de temperatura ( $^{\circ}C$ ).

$\mu$  = la viscosidad del fluido ( $kg/m s$ ).

El número de Prandtl es obtenido mediante:

$$Pr = \frac{Cp\mu}{k} \quad (2.12)$$

$C_p$  = es el calor específico del fluido dentro de la chaqueta ( $J/kg\ s$ ).

$\mu$  = es la viscosidad del fluido ( $kg/m\ s$ ).

$k$  = es la conductividad térmica del agua en la chaqueta ( $W/m^\circ C$ ).

- Estimación del coeficiente de convección en el interior del macerador.

Para la estimación del coeficiente de convección en el interior del macerador  $h_i$ , es necesario despejarlo de la ecuación de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k} \quad (2.13)$$

$D_i$  = es el diámetro interno del macerador ( $m$ ).

$k$  = es la conductividad térmica del fluido ( $W/m^\circ C$ ).

Para el cálculo del número de Nusselt la correlación más general tiene la siguiente forma:

$$Nu = a Re^b Pr^{1/3} \left[ \frac{\mu}{\mu_p} \right]^m \quad (2.14)$$

El cálculo del número de Reynold se calcula teniendo en cuenta las características del agitador, este viene dado por la ecuación:

$$Re = \frac{L^2 N \rho}{\mu} \quad (2.15)$$

$L$  = es el diámetro del agitador ( $m$ ).

$N$  = es el número de revoluciones por segundo ( $1/s$ ).

$\rho$  = es la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).

$\mu$  = es la viscosidad del fluido ( $kg/m\ s$ ).

Para el cálculo del número de Prandtl se utiliza la ecuación 2.6, y se realiza el mismo procedimiento de cálculo.

El coeficiente "a", y los exponentes "b" y "m", dependen del tipo de agitador utilizado en el macerador, para obtener estos valores es necesario utilización de la siguiente tabla encontrada en (Perry, 1999) Tomo III, sección 10, tabla 10.6:

Tabla 2.1 Valores de Constantes para utilizarlas en la ecuación 2.8.

Tipo de agitador	A	B	M	Re
Paleta	0,36	0,66	0,14	300 – 3.10 <sup>5</sup>

### 2.2.1.2 Determinación del área de transferencia de calor.

Para la obtención del área de transferencia de calor es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$A_t = (2\pi r) * h \quad (2.16)$$

Esta ecuación corresponde al área efectiva de transferencia de calor. Donde  $r$  (m) es el radio del tanque y  $h$  (m) es la altura de mosto en el macerador.

El área disponible de transferencia de calor puede calcularse despejando la expresión:

$$Q_{abs} = UA(\Delta T) \quad (2.17)$$

$U$  = es el coeficiente global de transferencia de calor ( $J/s m^2 K$ ).

$\Delta T$  = es la diferencia de temperatura dentro del recipiente ( $K$ ).

$Q_{abs}$  = es el calor absorbido por el mosto ( $J$ ).

Para calcular el área expuesta del macerador se deben utilizar las siguientes expresiones:

Para el cálculo en la tapa y el fondo:

$$Ae_{Tapa y fondo} = \pi r^2 \quad (2.18)$$

Para la superficie lateral del equipo:

$$Ae_{Lateral} = (2\pi r) * h \quad (2.19)$$

La suma de las tres áreas equivale al área expuesta total.

### 2.2.1.3 Determinación de los coeficientes de convección por radiación.

- **Coeficientes de convección**

Para el cálculo de las pérdidas de calor es necesario conocer los coeficientes de convección. Estos varían con la geometría y posición del elemento que transfiere su calor al aire:

Para placas verticales:

$$h = 0.3(\Delta T)^{0.25} \quad (2.20)$$

Para placas horizontales emitiendo hacia abajo:

$$h = 0.2(\Delta T)^{0.25} \quad (2.21)$$

Para placas horizontales emitiendo hacia arriba:

$$h = 0.38(\Delta T)^{0.25} \quad (2.22)$$

Donde  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{F}$ ) es la diferencia entre la superficie caliente y el fluido frío (en este caso aire).

- **Radiación**

El calor que es emitido por radiación se calcula mediante:

$$Q = F_a F_b A_e \sigma (T_w^4 - T_a^4) \quad (2.23)$$

Siendo  $F_a = 1$ ,  $F_b = \epsilon$  (emisividad del material),  $A_e (m^2)$  es el área expuesta,  $T_w (K)$  es la temperatura de la pared del macerador y  $T_a (K)$  es la temperatura del aire.

### 2.2.1.4 Energía cedida por la resistencia eléctrica.

La energía cedida por la resistencia eléctrica para satisfacer la demanda energética del equipo puede ser estimada mediante la siguiente relación:



$$E_{ced} = Q_j + Q_m + Q_{evap-j} + Q_{evap-m} + \sum Q_p \quad (2.24)$$

El tiempo de encendido de la resistencia puede obtenerse de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{E_{ced}}{VI} \quad (2.25)$$

$V$  = Voltaje de la resistencia ( $W/A$ ).

$I$  = Intensidad ( $A$ ).

$\theta$  = Tiempo de encendido ( $s$ ).

### 2.2.2 Para el calor por agitación.

- La potencia del motor puede ser calculada mediante la ecuación:

$$P = KN\rho D_i^5 n^3 \quad (2.26)$$

$K$  = Número de potencia.

$N$  = Números de impelentes del agitador.

$\rho$  = Densidad del mosto ( $kg/m^3$ ).

$D_i$  = Diámetro del impelente ( $m$ ).

$n$  = Revoluciones por minuto del impelente ( $s^{-1}$ ).

- Determinación del tiempo de mezclado requerido.

El tiempo de mezclado necesario para lograr una mezcla homogénea puede ser estimado utilizando la siguiente expresión:

$$t_m = \frac{C}{n} \quad (2.27)$$

$C$  = Constante del agitador.

$n$  = revoluciones por minuto del agitador ( $min^{-1}$ ).

### 2.3 Búsqueda de datos experimentales.

Para la obtención de la temperatura y tiempo en la maceración se realizan corridas experimentales en el macerador con el propósito de medir dichas variables. Los instrumentos que se utilizan son: (1) un sensor para obtener las mediciones de temperatura en el mosto; (2) un termómetro acoplado en la parte inferior del macerador para la medición de las temperaturas de la chaqueta y (3) un sensor de temperatura infrarrojo (Kendo) con una precisión de  $\pm 2$  °C para la obtención de las temperaturas en las paredes del equipo. Las corridas experimentales se ejecutan con un mosto cuyas propiedades termofísicas son similares a las del agua en cuanto a densidad, capacidad calórica, conductividad térmica, viscosidad, etc.

Las lecturas son realizadas a intervalos de tiempo equivalentes a cinco minutos debido a que es un proceso de naturaleza “lenta”, es decir, no ocurren cambios bruscos en las propiedades medidas.

Para la estimación del tamaño de la muestra se utiliza el método descrito por (Renckly, 1996) y (Cochran, 1997) donde se plantea la siguiente ecuación:

$$n = \frac{NZ^2 * 0.25}{[d^2(N - 1)] + (Z^2 * 0.25)} \quad (2.28)$$

Donde  $N$  es el número de lecturas tomadas en la muestra,  $Z$  es el número de unidades de la desviación estándar que puede ser obtenida del apéndice E pág. 57 del (Renckly, 1996) y  $d$  es el nivel de precisión, usualmente se utilizan valores de 0.05 y 0.10.

### 2.4 Obtención de una correlación empírica.

Para la obtención de una correlación experimental para predecir la temperatura de la chaqueta y del mosto en función del tiempo se utilizó la siguiente metodología:

1. Obtención de los resultados experimentales de temperatura en la chaqueta y en el mosto en función del tiempo.

2. Las temperaturas obtenidas, tanto en la chaqueta como en el mosto, fueron divididas entre la temperatura ambiente ( $\frac{T_x}{T_{ambiente}}$ ), resultando una fracción de temperaturas.
3. Finalmente, la fracción de temperatura en función del tiempo fue modelada matemáticamente utilizando el software Curve Expert v1.3.

### Capítulo 3: Análisis de los resultados.

Se establece que los términos determinantes para la valoración energética en el macerador son el calor por intercambio térmico y por agitación.

#### 3.1 Cálculo del calor intercambiado.

Para el cálculo del calor intercambiado se determinan los parámetros que se muestran Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Parámetros de operación para el cálculo del calor intercambiado.

Parámetro	Valor	UM
Mosto inicial (volumen efectivo)	80	L
Masa de agua en la chaqueta	39	Kg
Diámetro del área expuesta	0.61	M
Temperatura final en la chaqueta	106	°C
Temperatura inicial en la chaqueta	25	°C
Temperatura final en el mosto	100	°C
Temperatura inicial en el mosto	25	°C
Capacidad calórica del agua	3948	J/kg °C
Capacidad calórica del mosto	3948	J/kg °C
Área total expuesta al aire	1.73	m <sup>2</sup>
Coeficiente de radiación en las paredes	3.95	$W/m^2 K$
Coeficiente combinado de radiación-convección en las paredes	6.86	$W/m^2 K$

Las áreas expuestas en la Tabla 3.1 son calculadas por las ecuaciones mostradas en el subepígrafe 2.2.1.2.

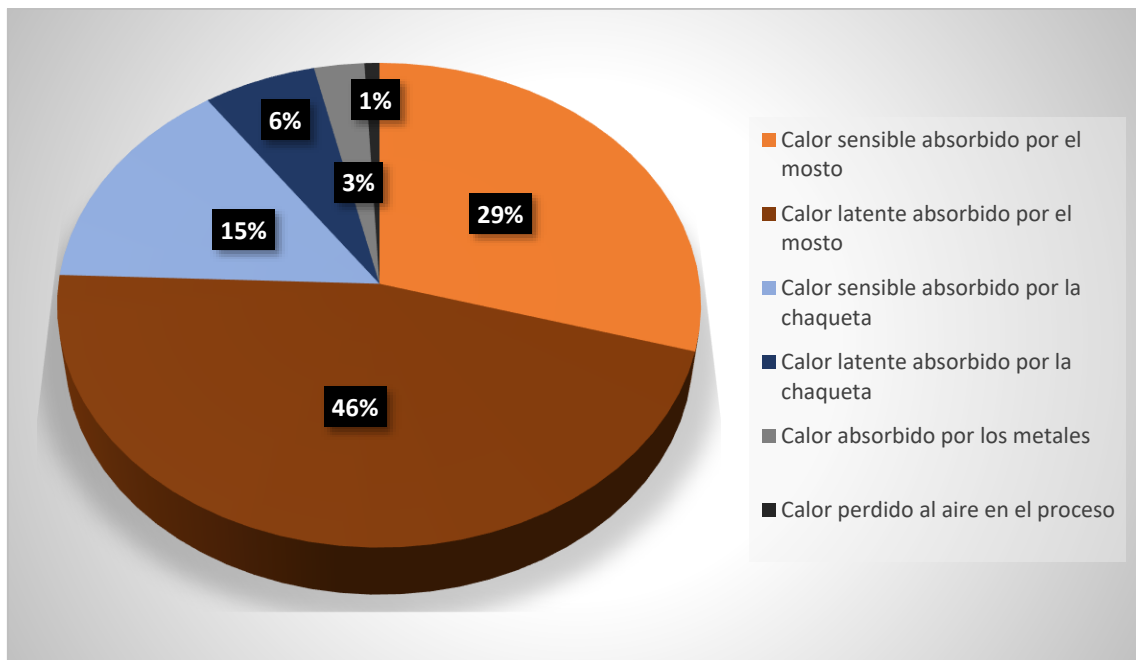
Según las ecuaciones de la 2.1 a la 2.6 y los datos que se presentan en la Tabla 3.1 se pueden llegar a los resultados de la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados de los balances de energía en el equipo para 80 L de mosto inicial.

		Valor	Unidad
Calor absorbido por el mosto	Calor sensible	25 586	kJ
	Calor latente	40 125	kJ
Calor absorbido por el líquido en la chaqueta	Calor sensible	12 756	kJ
	Calor latente	5 368	kJ
Calor absorbido por los metales del equipo		2 392	kJ
Calor perdido al aire en el proceso		710	kJ
Calor total emitido por la resistencia		86 937	kJ

El siguiente gráfico representa los valores de la Tabla 3.2, en la cual se puede observar que la suma de los calores absorbidos por el mosto representa el 75% del calor total emitido mientras que la suma de las pérdidas solo representa el 4% del total.

Gráfico 3.1 Resultado del balance de energía en el equipo.



### 3.1.1 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

Los resultados de los parámetros para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor se determinan a través de la temperatura promedio extraída de las mediciones experimentales y el software SteamTab:

Tabla 3.3 Resultados de parámetros para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

Temperatura promedio en la chaqueta	65.5	°C
Temperatura promedio en el mosto	63	°C
Densidad del agua a la temperatura de la chaqueta	980.24	$kg/m^3$
Coefficiente de expansión térmica	0.0005572	$^{\circ}C^{-1}$
Viscosidad a la temperatura de la chaqueta	430.146	$\mu Pa s$
Densidad del agua a la temperatura del mosto	981.592	$kg/m^3$
Viscosidad a la temperatura del mosto	446.009	$\mu Pa s$
Conductividad térmica en la chaqueta	0.659399	$W/m^{\circ}C$
Conductividad térmica en el mosto	0.657177	$W/m^{\circ}C$
Diámetro del tanque de macerado	0.50	M
Altura del tanque de macerado	0.60	M
Altura de líquido en la chaqueta	0.355	M

Con las ecuaciones mostradas en el epígrafe 2.2 y los datos de la Tabla 3.3 pueden ser calculados los coeficientes de transferencia de calor en el mosto y la chaqueta, con los cuales se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor.

Los valores de los números adimensionales y los coeficientes de convección en la chaqueta y el mosto, así como el coeficiente global de transferencia de calor se muestran a continuación.

Tabla 3.4 Resultados del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

Número de Grashof en la chaqueta	$1.027 * 10^{11}$	-
Número de Prandtl en la chaqueta	2.73	-
Número de Nusselt en la chaqueta	899.79	-

Coefficiente de convección en la chaqueta	1671.43	$W / ^\circ C m^2$
Número de Prandtl en el mosto	2.84	-
Número de Reynold en el mosto	184969	-
Número de Nusselt en el mosto	1521.38	-
Coefficiente de convección en el mosto	1999.75	$W / ^\circ C m^2$
Coefficiente global de transferencia de calor	769.41	$W / ^\circ C m^2$

Como se observa en la Tabla 3.4, el coeficiente de convección en la chaqueta es menor que el del mosto. Esto se debe, a que la convección dentro de la chaqueta ocurre de forma natural, mientras que en el mosto esta ocurre de manera forzada debido a la agitación impuesta. Por lo tanto, un aumento de la agitación, no traería un beneficio significativo desde el punto de vista de la transferencia de calor. Este hecho está fundamentado por la existencia de un coeficiente de convección numéricamente menor en la chaqueta que controla el proceso de transferencia de calor, impidiendo que una mayor cantidad de energía sea cedida desde el líquido de la chaqueta hacia el mosto. Los valores de la Tabla 3.4 para los coeficientes de convección, son consistentes con los reportados por (Pietranski, 2012a) y (Pietranski, 2012b) para reactores enchaquetados con agitación mecánica.

### 3.1.2 Cálculo del área de transferencia de calor.

El área de transferencia de calor disponible se calcula por la expresión 2.17 con los datos tomados de la Tabla 3.4 y 3.2, dando como resultado un área de transferencia disponible de 1.02 m<sup>2</sup>.

El área de transferencia de calor efectiva se obtiene mediante la ecuación 2.16, esta depende de la altura que ocupa el mosto dentro del macerador. Para el cálculo se toma el volumen efectivo del equipo lo que representa una altura de 0.41 m, teniendo como resultado un área de transferencia efectiva de 0.65 m<sup>2</sup>.

Como se observa en los resultados obtenidos, el área disponible es mayor que la efectiva lo que indica que todavía queda un área de transferencia que no está en uso, esto nos permite aumentar el volumen de producción en caso que sea necesario.

### 3.2 Calor generado por la agitación.

Tabla 3.5 Datos para el cálculo de la potencia de agitación

Número de potencia	6	-----
Número de impelentes del agitador	1	-----
Densidad del mosto	1000	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro del impelente	0.23	M
Revoluciones por minuto del agitador	1.66	s <sup>-1</sup>

Al ser sustituidos los datos de la Tabla 3.5 en la ecuación 2.26 se obtiene como resultado una potencia de agitación de 17.66 W la cual es multiplicada por el tiempo total de macerado, dando como resultado un calor absorbido por el mosto de 225.69 kJ.

Como se puede apreciar el calor por agitación es mucho menor que el calor intercambiado por lo tanto es un término que no influye significativamente en el balance de calor del macerador.

Según la ecuación 2.27 para una constante de agitación (C) de 96.5 y las revoluciones por minutos de la Tabla 3.5 el resultado es 0.965 minutos. Lo que asegura que para todo el tiempo de maceración que es igual a 213 min el mezclado se mantiene uniforme (Rosabal, 1998).

### 3.3 Resultado energético del proceso de maceración.

En la Tabla 3.6 se muestra resultados energéticos por parte de las 2 resistencias eléctricas instaladas en la chaqueta.

Tabla 3.6 Consumo de energía del macerador

Tiempo de encendido de la resistencia	213	Min
Intensidad	34.2964	A
Voltaje	220	V
Consumo energético	24.15	kW.h
Costo por concepto de consumo de energía	0.036	CUC/L



Como se refleja en esta tabla el costo de fabricación de 80 L de mosto para el nuevo macerador equivale a 0.036 CUC por cada litro de mosto producido teniendo en consideración el costo actual de la energía eléctrica para aquellas instituciones que comercializan en divisas (0.12 CUC/kW.h).

A continuación, se muestra una comparación de los costos de fabricación del nuevo macerador (atendiendo al consumo de energía) con respecto a cervecerías semi-industriales cubanas:

Tabla 3.7 Comparación de costos por cada litro de mosto inicial.

Instalación	Costo CUC/L	
Nuevo macerador ( $C_1$ )	0.036	
Cervecería Antiguo Almacén de la Madera y el Tabaco	0.011	<i>Promedio</i> $(C_2)$ <b>0.012</b>
Cervecería Plaza Vieja	0.016	
Cervecería Puerto del Rey	0.010	

Puede observarse que el costo por litro de mosto del nuevo equipo es prácticamente tres veces mayor ( $\frac{c_2}{c_1} = 2.93$ ) que los costos de fabricación de las cervecerías semi-industriales cubanas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el costo de la energía eléctrica resulta mayor que el del gas licuado del petróleo, combustible utilizado por estas cervecerías como fuente de energía calórica.

Para el caso de la evaporación en el equipo se obtienen los resultados siguientes:

Tabla 3.8 Evaporación en el macerador.

Agua evaporada	Valor	Porcentaje	Unidad
Chaqueta	2	5.1 %	kg
Mosto	15	19.0 %	kg

Como se muestra en la tabla 3.8, el porcentaje de evaporación del mosto representa un 19.0 % de la masa de mosto inicial (80 kg) que comparado con maceradores de cervecerías semi-industriales los porcentajes de evaporación se

encuentran sobre el 12% del mosto inicial. Este es un aspecto negativo desde el punto de vista del aumento del consumo energético (se consume una mayor cantidad de energía en la evaporación excesiva de agua) y la pérdida de contenido del mosto, principalmente durante el tiempo de ebullición.

La evaporación excesiva del agua del mosto implica comenzar el proceso de ebullición con un volumen superior, lo que provoca, por consiguiente, otro aumento en el consumo de energía.

Una de las causas del incremento en la evaporación es el uso desmedido de la fuente de energía calórica, en este caso, las resistencias eléctricas.

### **3.4. Correlaciones empíricas resultantes para el incremento de la temperatura en la chaqueta y el mosto.**

La correlación empírica que tiene lugar en dependencia de las corridas experimentales (Anexo 2) y ajustadas con el software Curve Expert se muestran a continuación.

#### **3.4.1 Temperatura de la chaqueta en función del tiempo**

Introduciendo los datos de temperatura y tiempo obtenidos de los experimentos para la chaqueta en el software Curve Expert este da como resultado, que la correlación que más se ajusta a la curva viene representada por el modelo logístico siguiente:

$$\frac{T_j}{T_{ambiente}} = \frac{a}{1 + be^{-ct}} \quad (3.1)$$

Donde,  $T_j$  en la temperatura de la chaqueta,  $t$  es el tiempo en minutos (tiempo de calentamiento),  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes experimentales.

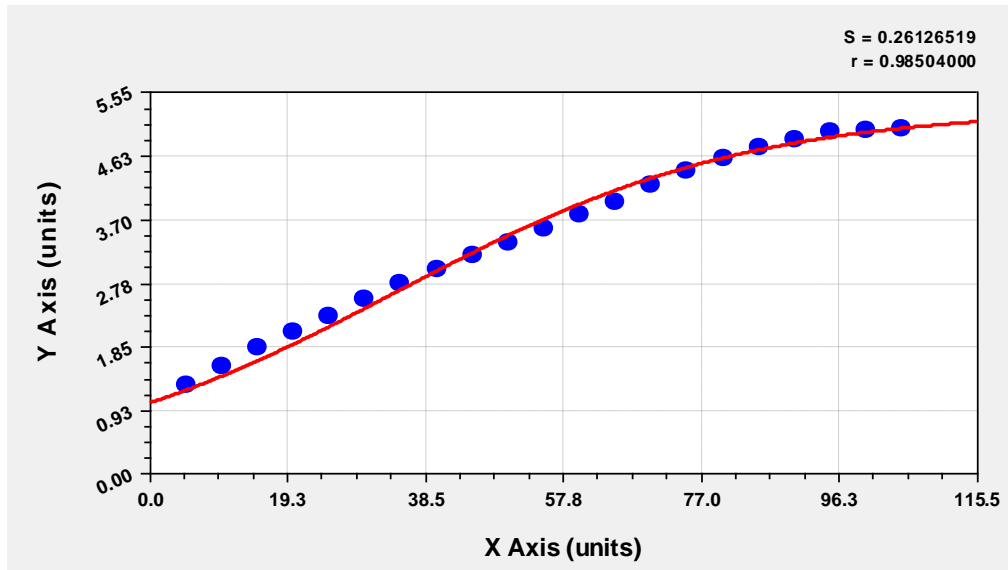
$$a = 4.4631979$$

$$b = 4.1110579$$

$$c = 0.04098721$$

Para el ajuste de la correlación presentado, el error estándar (S) equivale a 0.26 mientras que, el coeficiente de correlación (R) equivale a 0.985 (Fig.).

Figura 3.1 Gráfica obtenida de la correlación de temperatura de la chaqueta en función del tiempo.



### 3.4.2 Temperatura del mosto en función del tiempo.

Con la Temperatura y tiempo en el mosto, el software da como resultado la expresión 3.2 que corresponde a la correlación obtenida de un modelo logístico:

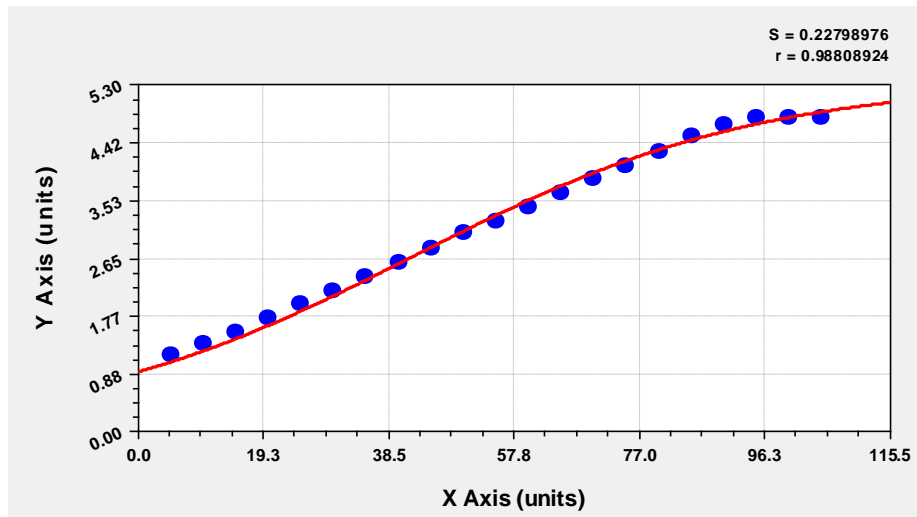
$$\frac{T_m}{T_{ambiente}} = \frac{a}{1 + be^{-ct}} \quad (3.2)$$

Donde,  $T_m$  es la temperatura del mosto,  $t$  es el tiempo en minutos,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes experimentales.

- $a = 4.4964122$
- $b = 4.8597591$
- $c = 0.037493622$

Para el ajuste de la correlación presentada, el error estándar (S) equivale a 0.227 mientras que el coeficiente de correlación (R) equivale a 0.988 (Fig.).

Figura 3.2 Gráfica obtenida de la correlación de temperatura del mosto en función del tiempo.



Las correlaciones obtenidas describen el comportamiento de las temperaturas de los líquidos contenidos en el macerador. El uso de correlaciones empíricas en este tipo de equipo permite conocer a partir de la diferencia de temperatura entre la chaqueta y el mosto, la cantidad de calor que se está transfiriendo en cualquier punto del proceso, lo que resulta de gran utilidad durante el macerado debido a las características propias de esta etapa. Otra importancia radica en la realización de futuros proyectos donde se implementarán sistemas de control automático asistidos por computadoras en el equipo, además de su utilización para estudios más avanzados en el equipo.

### 3.4.3 Correlación de temperatura entre el mosto y la chaqueta.

Una correlación que presenta una gran importancia para su aplicación en los equipos de automatización (autómata con sensor en la chaqueta) es aquella que relaciona las temperaturas del mosto con las temperaturas del líquido en la chaqueta. De los resultados experimentales se ajusta la correlación siguiente:

$$\frac{T_m}{T_{ambiente}} = a + b \cos\left(c \frac{T_j}{T_{ambiente}} + d\right) \quad (3.3)$$

$$a = 6.1686166$$

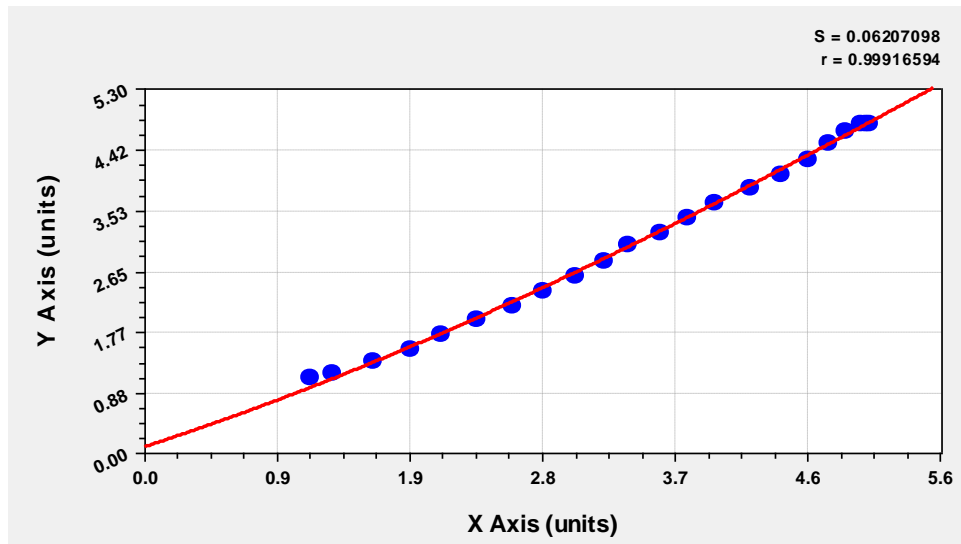
$$b = 7.4397149$$

$$c = 0.15745133$$

$$d = 3.7559006$$

Para el ajuste de la correlación presentado, el error estándar (S) equivale a 0.06 mientras que el coeficiente de correlación (R) equivale a 0.99 (Fig.).

Figura 3.3 Gráfica obtenida de la correlación de temperatura de la chaqueta contra temperatura del mosto.



Estas correlaciones, obtenidos de resultados experimentales, poseen dos limitaciones fundamentales y estas son:

- Los resultados experimentales son obtenidos utilizando un mosto con propiedades termofísicas similares a las del agua. Esto implica, que, para mostos con cambios apreciables en sus propiedades con respecto al agua, deberán ajustarse otras correlaciones.
- La aplicación de la correlación está limitada a la masa de mosto y agua en la chaqueta utilizada durante el proceso.

## Conclusiones:

- Se pudo obtener el comportamiento energético del macerador estudiado en esta investigación al conocer los parámetros involucrados en la transferencia de calor del mismo. Por tanto, queda verificada la hipótesis formulada en este trabajo.
- La caracterización energética del macerador demuestra que el calor intercambiado y el calor por agitación son los más representativos en una valoración energética, en este caso el valor del calor por agitación es despreciable frente al calor intercambiado.
- Se cuantifican las diferentes formas de calor que ocurren durante el macerado y se demuestra que la mayoría del calor es transferido al mosto, por lo que resultan muy bajas las pérdidas en el proceso.
- Se determinó el consumo general de energía en la etapa de maceración y con ello se llegó a la conclusión de que el costo por litro de cerveza es mayor que los costos de las cervecerías semi-industriales. Esto se debe a la fuente calórica utilizada por el macerador estudiado.

## **Recomendaciones:**

1. Continuar el estudio del comportamiento de la transferencia de calor en este equipo.
2. La instalación de un control de temperatura automático al cual se le puede programar las correlaciones obtenidas en este trabajo.

## **Bibliografía:**

- AGUILAR, G. C. & CAÑAS, C. R. 1992. Fundamentos de la modelación. *Simulación de sistemas. Aplicaciones en Producción Animal*. San Jose de Costa Rica: RISPAL.
- ALEXANDER, S. 2003. Evolution of Mashing Systems. *Zymurgy*.
- ANDRADE, J. W. R. 2015. *Cálculo y diseño de planta piloto para la obtención de fomiato de potasio como fluido de perforación*. Trabajo de Grado para la obtencion del título de ingeniero químico, Universidad Central de Ecuador.
- ANDRES-IGLESIAS, C., GARCIA-SRNA, J., MONTERO, O. & BLANCO, C. 2015. Simulation and flavor compound analysis of dealcoholized beer via one-step vacuum distillation. *Food Research International* Vol. 73 751-760.
- AQUARONE, E., LIMA, U. A. & BORZANI, W. 1983. *BIOTECNOLOGIA Alimentos e bebidas produzidos por fermentação*.
- BAMFORTH, C. 2003. *Tap Into the Art and Science of Brewing*, New York, Oxford University Press.
- BAREA, A. L. 2017. *Análisis Térmico de Procesos Industriales para uso de Energía Solar Térmica*. Proyecto de fin de grado, Universidad de Sevilla.
- BRAUER, H. & WIDHOPF, M. 1992. *Wort boiler apparatus with external boiler* United States patent application 714883.
- BRIGGS, D. E., BOULTON, C. A., BROOKES, P. A. & STEVENS, R. 2004. *Brewing Science and pactice*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press.
- COCHRAN, W. G. 1997. *Técnicas de muestreo*. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, S.A.
- COMI, G. & MANZANO, M. 2008. Beer Production.
- CORACE, J. J. 2009. Unidad V: Mecanismos de transferencia de calor. *Fisica II*.
- FIGUEROA, C. J. 2008. *Tecnología de bebidas*, Brasil.



- GALDO, E. C., HERNÁNDEZ, J. G. & CABEZA, O. J. 1999. Transferencia de calor e integración de proceso.
- GARCÍA, V. A. 2015. *Efectos de la maceración escalonada y de la temperatura de fermentación en las propiedades funcionales de la cerveza*. Grado en Biotecnología, Universidad Miguel Hernández de Elche.
- GEANKOPLIS, C. J. 1998. *Proceso de transporte y operaciones unitarias.*, Mexico, CECSA.
- GONZALEZ-MENDIZABAL, D. 2002. Guía de intercambiadores de calor: tipos generalidades y aplicaciones. Universidad Simón Bolívar.
- GUINJOAN, A. 2009. Elaboración de cerveza.
- GUPTA, M., ABU-GHANNAM, N. & GALLAGHAR, E. 2010. *Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting* [Online]. Available: <http://www.onlinelibrary.wiley.com>.
- HERNANDEZ, A. 2003. *Microbiología industrial*.
- HOLMAN, J. P. 1998. *Transferencia de calor*.
- HOUGH, J. S. 2009. *Biotecnología de la cerveza y la malta.*, Levaduras y bacterias.
- KERN, D. Q. 1999. *Procesos de transferencia de calor*, Mexico, McGraw Hill Book Company, INC.
- KOROLUK, C. A. 2002-2017. *Cerveza Argentina* [Online]. Available: <http://www.cervezadeargentina.com.ar/procesos/maceracion.html>.
- LEKKAS, C., STEWART, G. G., HILL, A. E., TAIDI, B. & HODGSON, J. 2007. Elucidation of role of nitrogenous wort components in yeast fermentation. *Inst. Brew*, 113.
- LEMUS, P. A. G. 2003. *Evaluación de alternativas para la recuperación de calor en un reactor de surfactante en la industria de agroquímicos*. Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- LEWIS, M. J. & BAMFORTH, C. W. 2006. *Essays in Brewing Science.*: SpringerScience +Business Media, LLG New York.
- LIENHARD, J. H. 2004. *A Heat Transfer Textbook*, Phlogiston Press Cambridge, massachusetts, U.S.A.
- MERTENS, D. R. 1977. Principals If modelling and simulation in teaching and research. *J. Dairy Sci*, 60:1176.
- ORTIZ, R. J. 2000. *Modelación y Simulación matemática del reciclaje de N, P y K en sistemas de pastoreo vacuno*. Tesis de Doctorado, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.
- PASTORE, M. W. 1971. *Electric boiler*. EE.UU patent application.
- PERRY, R. H. 1999. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*.
- PIETRANSKI, J. F. Heating and cooling of agitated liquid batches. 2012a.
- PIETRANSKI, J. F. Ower-all heat transfer coefficients in agitated vessels. 2012b.
- POTTS, D. M. 1959. *Electric double boiler*. EE.UU patent application.
- RENCKLY, T. R. 1996. *Sampling and Surveying Handbook*. Internet Edition, Maxwell AFB, AL (USA) : Air University, US Department of Defense, 99 p.
- ROBERTS, T. R. & WILSON, R. J. H. 2006. Hops. *In*: PRIEST, F. G. & STEWART, G. G. (eds.) *Handbook of Brewing*. Second ed.
- RODMAN, A. & GEROGIORGIS, D. 2016. Dynamic simulation and visualisation of fermentation: effect of process conditions on beer quality. *IFAC Papers on line*, Vol. 49, 615-620.
- ROMERO, M. A. 2003. Transferencia de Calor en Reactores. *Ingeniería de Reactores*.
- ROSABAL, J. M. 1998. *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*
- SALGADO, A. M. 2010. Tecnologia de Produção de Bebidas Fermentadas. Dep. Engenharia Bioquímica -EQ-UFRJ.

SIMÉUS, M.-D. 2011. *Posibilidades de utilización del bagazo de malta como materia prima en la obtención de una bebida con características organolépticas similares a la cerveza* Universidad de Matanzas

TONNA, A. & SHORES, G. P. 1989. *Method and apparatus of brewing*. United States patent application 730784.

TORRES, V. 1995. Contribución a la modelación de un área de pastoreo. *Seminario Científico Internacional*. La Habana, Cuba: XXX Aniversario Instituto de Ciencia Animal.

TOVAR, J. A. F. 2018. Simulación y Control del preproceso de maceración de una cervecería artesanal. *Pistas Educativas* No. 128, 19.

VALDERRAMA, J., TOSELLI, L. & FAÚNDEZ, C. 2012. Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. *Food and Bioproducts Processing* Vol. 90 832-840.

VALDEZ, J. F. S. 2001. Diseño de equipos de transferencia de calor. Master en Ciencias San Nicolas de los Garza

VERHOEF, B. 2003. La enciclopedia de la cerveza.

## Anexos:

### Anexo 1: Macerador de cerveza utilizado para la investigación.



**Anexo 2: Tabla de resultados obtenida de las corridas experimentales.**

t (min)	Temperatura Chaqueta	Temperatura mosto	Temperatura pared
0	24,333	23,519	24,250
5	27,500	25,093	24,333
10	33,333	28,519	24,550
15	39,000	32,222	24,767
20	43,500	36,759	25,050
25	48,667	41,204	25,317
30	53,833	45,556	25,533
35	58,333	50,000	25,583
40	63,000	54,722	25,783
45	67,333	59,074	26,017
50	70,833	64,259	26,350
55	75,500	67,778	26,467
60	79,333	72,222	26,667
65	83,500	76,852	26,833
70	88,667	81,481	27,167
75	93,167	85,370	27,033
80	97,000	90,185	27,200
85	100,167	95,000	27,400
90	102,500	98,981	27,550
95	104,833	100,833	27,583
100	105,500	101,204	28,100
105	106,000	101,204	28,217