

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de una unidad móvil para la pasteurización de jugo de
pulpa de cacao

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

Ingenieros en Alimentos

Presentado por:

Pedro Pablo Paredes Meza
José Andrés Paucar Pantaleón

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2022

DEDICATORIA

A mi esposa e hijo, que son mi mayor Bendición y me han apoyado para poder alcanzar este logro. A mi padre, mi mayor ejemplo y guía. Mi abuelito Pedro (+) y mi abuelita Gladys, sus enseñanzas siempre están presentes.

Pedro Pablo Paredes Meza

DEDICATORIA

A mi madre quien gracias a esfuerzo paciencia y amor he podido cumplir una de mis metas. A mis hermanos Bruno y Marcelo, así como a mi abuelita Piedad por su apoyo continuo durante esta etapa.

José Paucar Pantaleón

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero que nada a Dios por todas sus Bendiciones, a mi esposa, Caren Sánchez, mi hijo y mi padre, su apoyo incondicional y consejos son los que me han ayudado a alcanzar esta meta.

A nuestro tutor PhD Patricio Cáceres, por su invaluable guía a lo largo de este proyecto.

A la ESPOL y sus docentes, por todos los conocimientos y valores compartidos durante la carrera universitaria.

Mis compañeros de curso, gracias por tantas anécdotas

Pedro Pablo Paredes Meza

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la ESPOL y a los docentes de la carrera, quienes, con sus conocimientos, paciencia y dedicación incentivaron la vocación por la ingeniería en alimentos, es grato para mi recordar y agradecer a mi maestra la MsC. María Fernanda Morales (+) quien con su pasión por la investigación me inculco valores éticos que hicieron de mi un curioso y mejor estudiante.

A nuestro tutor PhD Patricio Cáceres, por su mentoría para lograr esta meta académica.

A mi madre le agradezco infinitamente este logro es por ella y para ella. Siempre me demostró su apoyo y cariño durante esta extensa travesía.

A mis hermanos y mi abuelita que con su incondicional apoyo estuvieron siempre a mi lado, han estado conmigo en momentos importantes.


José Paucar Pantaleón

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Pedro Pablo Paredes Meza* y *José Andrés Paucar Pantaleón* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Pedro Pablo
Paredes Meza



José Andrés
Paucar Pantaleón

EVALUADORES

.....
MSc. Galo Chuchuca Morán

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD Patricio Cáceres

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el presente trabajo se definieron los parámetros del proceso de pasteurización de una unidad móvil para la elaboración de jugo de pulpa de cacao con el objeto de inactivar el agente deteriorador más termorresistente y eliminar cualquier actividad enzimática posible que pueda deteriorar la calidad del producto. Se realizó la revisión literaria necesaria para seleccionar los valores D y Z más altos de los posibles microorganismos presentes, se ejecutó la caracterización fisicoquímica del jugo de pulpa de cacao de la cual se obtuvieron resultados experimentales del porcentaje de humedad, cantidad total de cenizas, densidad y pH que fueron necesarias para la determinación teórica de las propiedades de transferencia de calor del jugo de cacao. Los resultados de la caracterización fisicoquímica, propiedades termodinámicas y análisis microbiológico permitieron ajustar los parámetros del proceso térmico de la unidad móvil para eliminar la actividad enzimática del agente más termorresistente encontrado, la polifenoloxidasasa (PPO), para inactivar la actividad PPO fue necesario fijar la temperatura de pasteurización a 90 °C por un tiempo de 4,09 segundos, con este parámetros definidos se pudo calcular la longitud y el número de las tuberías para realizar el proceso de calentamiento, retención y enfriamiento. Se implementó una zona de regeneración en el calentamiento y otra en el enfriamiento para aprovechar de mejor manera el fluido de servicio y hacer el proceso térmico más eficiente y económico.

Palabras clave: pasteurización, proceso térmico, unidad móvil

ABSTRACT

In the present work, the parameters of the pasteurization process of a mobile unit for the elaboration of cocoa pulp juice were defined with the objective of inactivating the most heat-resistant agent and eliminating any possible enzymatic activity that could deteriorate the quality of the product. The necessary literary review was made out to select the highest D and Z values of the possible microorganisms in the product, a physicochemical characterization of the cocoa pulp juice was carried out from which experimental results of the percentage of humidity, total amount of ashes, density and pH were obtained. which were necessary for the theoretical determination of the heat transfer properties of cocoa juice. The results of the physicochemical characterization, thermodynamic properties and microbiological analysis allowed to adjust the parameters of the thermal process of the mobile unit to eliminate the enzymatic activity of the most heat-resistant agent, polyphenoloxidase, to inactivate the activity it was necessary to set the pasteurization temperature at 90 °C and a time of 4,09 seconds. With this parameter defined, it was possible to calculate the length and number of pipes to carry out the heating, retention, and cooling process. A regeneration zone was implemented in heating and another in cooling to take better advantage of the service fluid and make the thermal process more efficient and economical.

Keywords: *pasteurization, thermal process, mobile unit*

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco Teórico.....	2
1.4.1 Generalidades del cacao	2
1.4.2 Jugo de Pulpa de Cacao.....	3
1.4.3 Microorganismos y enzimas por considerar en la pulpa de Cacao.	4
1.4.4 L. monocytogenes.....	5
1.4.5 E. coli	5
1.4.6 Salmonella spp.	6
1.4.7 Cryptosporidium parvum.....	6
1.4.8 Polifenoloxidasas.....	6
1.4.9 Valores D y Z	7
1.4.10 Pasteurización	8
CAPÍTULO 2.....	9

2.	METODOLOGÍA	9
2.1	Formulación del jugo de cacao	9
2.2	Análisis Fisicoquímico de la pulpa de cacao	9
2.2.1	Análisis del pH del Cacao	9
2.2.2	Porcentaje de Humedad	9
2.2.3	Densidad del Producto.....	10
2.2.4	Determinación de Cenizas	10
2.2.5	Viscosidad.....	11
2.3	Agentes termorresistentes.....	11
2.3.1	Determinación del Factor Deteriorador más termorresistente.....	11
2.4	Determinación propiedades de transferencia de calor	12
2.4.1	Cálculo de Composición Alimenticia del Jugo de Pulpa de Cacao	12
2.4.2	Determinación de propiedades térmicas del jugo de mucílago de cacao por Ecuaciones de Choi y Okos.	13
2.4.3	Ecuación para la densidad.....	13
2.4.4	Cálculo del calor específico.	14
2.4.5	Cálculo de la Conductividad.....	14
2.4.6	Selección del intercambiador de calor	15
2.4.7	Ecuación de transferencia de calor en un intercambiador de calor.....	15
2.4.8	Diferencia media logarítmica de temperatura (MLTD).	16
2.4.9	Número de Reynolds	16
2.4.10	Número Prandtl.....	17
2.4.11	Número de Nusselt.	17
2.4.12	Coeficiente de convección	18
2.4.13	Factor de incrustación.....	18
2.4.14	Coeficiente total de transferencia de calor	19

2.4.15	Razón de Transferencia de Calor en un Intercambiador.....	20
2.4.16	Regeneración.....	21
2.5	Determinación de Tiempo de Pasteurización	21
2.6	Flujo al interior del intercambiador.....	22
2.6.1	Flujo másico.....	22
2.6.2	Flujo volumétrico.....	22
2.6.3	Velocidad máxima de un fluido	22
2.6.4	Distancia recorrida al interior de una tubería	23
2.7	Porcentaje de error relativo	23
CAPÍTULO 3.....		24
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
3.1	Diagrama de procesos y equipos	24
3.2	Diagrama de equipos	26
3.3	Resultados y análisis fisicoquímicos	26
3.3.1	Porcentaje de humedad.....	26
3.3.2	Densidad del Producto.....	27
3.3.3	Determinación de Cenizas	27
3.4	Cálculo de Propiedades Físicas por Ecuaciones de Choi y Okos	28
3.4.1	Cálculo de Densidad.....	28
3.4.2	Cálculo de calor específico (Cp)	30
3.4.3	Cálculo de conductividad (k)	31
3.5	Elección del agente deteriorador más termorresistente	32
3.6	Diseño de proceso de térmico para la pasteurización de jugo de pulpa de cacao tomando en cuenta el MO más termorresistente.....	33
3.6.1	Cálculo de Valor de Pasteurización para inactivar la actividad de la Polifenoloxidasa en un Corto Periodo de Tiempo	33

3.6.2	Calentamiento.....	33
3.6.3	Zona de Regeneración.	42
3.6.4	Tubo de Retención.....	50
3.6.5	Zona de Enfriamiento.....	52
3.7	Resumen de Resultados	55
3.7.1	Caracterización fisicoquímica	55
3.7.2	Resultados del diseño térmico	56
CAPÍTULO 4.....		59
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
4.1	Conclusiones.....	59
4.2	Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PPO	Polifenoloxidasas
UNOCACE	Unión Campesina de Cacaoteros del Ecuador
CCN - 51	Cacao Castro Naranjal - 51
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
SPP	Especies
OMS	Organización Mundial de la Salud
PET	Tereftalato de Polietileno

SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
l	Litros
s	Segundos
ml	Mililitros
m	Metros
g	Gramos
Cp	Calor Específico
cP	Centipoise
K	Conductividad Térmica
ρ	Densidad
X	Cenizas
pH	Potencial de Hidrogeno
Δ	Delta
μ	Viscosidad
h	Entalpia
Re	Número de Reynolds del fluido
MLDT	Diferencia de temperatura media logarítmica
Nu	Número de Nusselt del fluido
Rd	Factor de incrustación
Qm	Flujo másico
J	Joules
W	Watts
T	Temperatura
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro cuadrado
A _{tc}	Área de Transferencia de calor
Pr	Numero de Prandtl
d	Diámetro
Uc	Coeficiente de transferencia de calor limpio
Ud	Coeficiente de transferencia de calor global

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un intercambiador de tubo en tubo	15
Figura 2.2 Distribución de velocidad de un fluido laminar al interior de una tubería	23
Figura 3.1 Línea de procesamiento de jugo de cacao	24
Figura 3.2 Línea de procesamiento y equipos	26
Figura 3.3 Esquema del proceso de pasteurización de pulpa de cacao	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Requisitos microbiológicos para los productos pasteurizados.....	4
Tabla 2.1 Formulación seleccionada para el jugo de cacao	9
Tabla 2.2 Valores de viscosidad de distintos tipos de jugos.....	11
Tabla 2.3 Valores D y Z de factores degradadores de interés.....	12
Tabla 2.4 Composición del jugo de cacao	12
Tabla 2.5 Composición final de jugo de pulpa de cacao.....	13
Tabla 2.6 Cálculo de densidad por ecuaciones de Choi y Okos.....	14
Tabla 2.7 Cálculo de calor específico por ecuaciones de Choi y Okos	14
Tabla 2.8 Cálculo de la conductividad por ecuaciones de Choi y Okos	15
Tabla 3.1 Tabla de datos para realizar el calentamiento	34
Tabla 3.2 Relaciones de flujo para cálculo de MLDT zona de calentamiento.....	36
Tabla 3.3 Datos de temperaturas para el cálculo de MLDT zona de calentamiento.....	36
Tabla 3.4 Dimensiones de tuberías	37
Tabla 3.5 Tabla de datos para realizar la regeneración del proceso térmico	43
Tabla 3.6 Datos de las temperaturas para cálculo de MLDT zona de regeneración	44
Tabla 3.7 Parámetros del agente más termorresistente	50
Tabla 3.8 Tabla de datos para parte de enfriamiento	52
Tabla 3.9 Valores de temperaturas para el cálculo de MLDT zona de pre enfriamiento.....	53
Tabla 3.10 Resumen de resultados de caracterización fisicoquímica	55
Tabla 3.11 Composición final del jugo de pulpa de cacao.....	56
Tabla 3.12 Propiedades de transferencia de calor	56
Tabla 3.13 Resumen resultados del diseño de proceso térmico	58

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

El grano de cacao es un producto insignia del Ecuador, famoso a nivel mundial por su calidad y que es comercializado a más de 40 países distintos, logrando en el 2021 exportar más de trescientos treinta mil toneladas de cacao en grano (MAG 2022). La pulpa o mucílago de cacao es una sustancia vegetal viscosa y se ha evidenciado efectos positivos en la salud humana por su consumo (Flores & Peñafiel, 2019). De una tonelada cosechada de cacao se obtiene alrededor de 70 kg de mucílago (Arciniega & León, 2020). El presente trabajo propone el diseño de una unidad móvil para la elaboración de jugo de pulpa de cacao con la finalidad de transportarla a las distintas haciendas productoras de cacao, así, cuando se realice el cortado y despulpado de la mazorca, se pueda procesar la pulpa remanente in situ lo más fresco posible.

1.1 Descripción del problema

El mucílago o pulpa de cacao es un subproducto del agro que puede aprovecharse por sus características nutricionales y sensoriales, sin embargo, se necesita diseñar las condiciones de procesos que aseguren la obtención de un alimento seguro y de vida útil prolongada en el mismo sector donde se utiliza primariamente la mazorca de cacao. Este producto es retirado sumergiendo el grano de cacao en agua para ablandarlo y facilitar su desprendimiento para luego ser desechado. Para aprovechar este subproducto se plantea el diseño de una unidad móvil de pasteurización para procesar la pulpa de cacao por medio de la elaboración de una bebida que cumpla con las normativas vigentes de calidad y que aseguren la inocuidad del producto.

1.2 Justificación del problema

El mucílago de cacao es un subproducto obtenido de la extracción de los granos de cacao, posee un gran aporte nutricional pero que no es aprovechado de la manera correcta, según encuestas realizadas, se estima que el 94 % de los agricultores de la provincia del Guayas desecha o desperdicia este producto, por falta de tecnificación para obtener elaborados derivados de la pulpa (Arteaga,

2013). Para lograr una comercialización adecuada del jugo de pulpa de cacao, se necesita un proceso que garantice la calidad e inocuidad del producto y que cumpla no solo con parámetros nacionales, si no también internacionales. Para esto, se realiza un énfasis en el diseño térmico de la unidad móvil, ya que en esta parte del proceso es donde se eliminará los agentes causantes de la deterioración del alimento y de patógenos nocivos para el consumidor.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar los parámetros del proceso térmico en el diseño de una unidad móvil para el procesamiento de jugo de pulpa de cacao

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización fisicoquímica del jugo de pulpa de cacao para seleccionar el equipo más eficiente para el proceso térmico de la unidad móvil.
- Definir el agente deteriorador más termorresistente como objetivo del proceso tomando en consideración los valores de tiempo de reducción decimal (D) y la termorresistencia característica (Z).
- Calcular el tiempo y temperatura de pasteurización por medio del diseño de proceso térmico de la unidad móvil en base al agente de interés escogido.
- Definir las operaciones y equipos necesarios para la unidad móvil elaboradora de jugo de pulpa de cacao.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Generalidades del cacao

La mazorca del cacao es el fruto producido por el árbol *Theobroma Cacao*, originario de regiones tropicales de América del Sur. El fruto, que se lo conoce normalmente como mazorca de cacao, es una drupa, que es un fruto carnosos que rodea la semilla (León, 2000).

De forma tradicional se conocen 3 variedades de cacao, criollo, forastero y trinitario, aunque existen otras como Cacao Castro Naranjal. El criollo es un cacao de bajo rendimiento, pero debido a su alta calidad, es utilizado para la elaboración de los chocolates más finos. Su producción solo representa un 10 % de la producción mundial de cacao (Motamayor et al., 2008).

En Ecuador se producen básicamente 2 variedades, el criollo y el CCN-51 o Cacao Castro Naranja. El segundo es el de mayor producción en el Ecuador y tiene un rendimiento de 2500 a 4200 kg por hectárea en comparación de los 300 a 800 kilogramos por hectárea del criollo (Barrezueta-Unda, 2019).

Ecuador produce cerca del 63 % del cacao fino y de aroma a nivel mundial, esta variedad representa el 75 % del cacao exportado, mientras que el 25 % restante pertenece a otras variedades como la variedad tipo CCN-51 (López, 2015).

El cacao es un alimento que aporta muchos beneficios para la salud, aunque estos no se concentran solamente en el grano seco de cacao, el mucílago o pulpa cuenta también con estas propiedades, en investigaciones realizadas por el INIAP - Quito, se encontró que la pulpa de cacao posee un 5,41 % de proteínas y un 8,22 % de fibra (Arteaga, 2013), por lo que es un alimento que le aporta una gran cantidad de energía al consumidor, así como también influye de manera positiva a la salud intestinal y reduce niveles de colesterol (Morales et al., 2018).

El mucílago del cacao es utilizado para la fermentación del grano de cacao, pero en la mayoría de las ocasiones existe un exceso de mucílago que es retirado y desechado, sin incurrir en ningún procesamiento posterior. En Ecuador, el 94 % de agricultores que siembran cacao desechan la pulpa del fruto por falta de conocimiento o por falta de equipos necesarios para el aprovechamiento de esta materia prima. La relación de aprovechamiento de la pulpa con la mazorca de cacao es que, de 800 kilogramos de granos de cacao, se puede obtener alrededor de 40 litros de pulpa (Morales et al., 2018).

1.4.2 Jugo de Pulpa de Cacao

De acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 337:2008 de jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de frutas y vegetales define como el jugo de fruta como “el producto líquido sin fermentar, pero susceptible de fermentación, obtenido por procedimientos tecnológicos adecuados, conforme a prácticas correctas de fabricación; procedente de la parte comestible de frutas en buen estado, debidamente maduras y frescas”; y a la pulpa de fruta como “el producto carnoso y comestible de la fruta sin fermentar, pero susceptible a fermentación, obtenido por procesos tecnológicos adecuados, a partir de la parte comestible y sin eliminar el jugo, de frutas enteras o peladas en buen estado”. En esta norma también se encuentran los requisitos microbiológicos de productos pasteurizados

Tabla 1.1 Requisitos microbiológicos para los productos pasteurizados [NTE INEN 2 337:2008]

	n	m	M	c	Método de ensayo
Coliformes NMP/cm ³	3	< 3	---	0	NTE INEN 1529-6
Coliformes fecales NMP/cm ³	3	< 3	---	0	NTE INEN 1529-8
Recuento estándar en placa REP UFC/cm ³	3	< 10	10	1	NTE INEN 1529-5
Recuento de mohos y levaduras UP/ cm ³	3	< 10	10	1	NTE INEN 1529-10

Donde:

NMP : número más probable

UFC : unidades formadoras de colonias

UP : unidades propagadoras

n : número de unidades

m : nivel de aceptación

M : nivel de rechazo

c : número de unidades permitidas entre m y M

1.4.3 Microorganismos y enzimas por considerar en la pulpa de Cacao.

La pulpa o mucílago de cacao, es un producto de acidez considerable, alcanzando valores de pH entre 3 y 4,5 (Romero & Zambrano, 2012). Según la guía de plan HACCP de Jugos, peligros y controles de la FDA (2004) considera que los jugos con un pH inferior a 4,6 pueden contener microorganismos patógenos como *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* y el parásito *Cryptosporidium parvum*.

Los jugos de frutas no tratados térmicamente causan un importante problema de salud en los consumidores. Los patógenos más implicados en brotes causados por jugos de frutas fueron las cepas de *E. coli* y *Salmonella*. Debido a su tolerancia a medios ácidos, *E. coli* ya se ha asociado con brotes causados por jugos. Por otro lado, *Salmonella* es otro patógeno importante que se ha asociado con brotes causados por jugos en las últimas tres décadas, se asocia con una mala higiene de los manipuladores de alimentos (Rajauria & Tiwari, 2018)

L. monocytogenes no está bien establecida como patógeno relevante transmitido por jugo de frutas en comparación con *Salmonella* y *E. coli* O157:H7 (Rajauria & Tiwari, 2018), sin embargo, se puede considerar que este patógeno es motivo de preocupación en frutas frescas y jugos de frutas, ya que tiene una notable capacidad para sobrevivir en una variedad de condiciones adversas. La *L. monocytogenes* es capaz de sobrevivir y crecer en las superficies de los equipos (García et al., 2018), algunos patógenos transmitidos por los alimentos pueden desarrollar sistemas de adaptación ácida que inducen protección cruzada y los hacen más resistentes contra otros estreses ambientales aumentando así su capacidad de supervivencia en el jugo. *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. y *C. parvum* pueden tolerar valores bajos de pH y sobrevivir en jugos de frutas y concentrados de jugo por más tiempo que las células que no pueden adaptarse (García et al., 2018). La adaptación ácida de la *Salmonella* spp., *L. monocytogenes* y *E. coli* O157:H7 también aumenta la resistencia al calor de estas bacterias en jugos de manzana, naranja, uva blanca, sidra de manzana, mezclas de jugo, melón y jugo de sandía (Rajauria & Tiwari, 2018).

1.4.4 *L. monocytogenes*

La *Listeria monocytogenes* es un microorganismo anaerobio facultativo, Gram positivo que tiene un amplio rango de temperatura para su crecimiento que va desde los 4 °C hasta los 45 °C y tiene su rango óptimo entre 30 °C - 37 °C, el rango de pH para su crecimiento va desde 3,3 - 9,5. La *Listeria*, en contraste con otros patógenos esporulados, puede sobrevivir periodos considerables en situaciones no favorables, llegando a soportar incluso la congelación. Según estimaciones, el valor del tiempo de reducción decimal de la *Listeria* a 70 °C sería de 20 segundos, con un valor z de entre 6 °C y 7,5 °C. Por ende, para lograr una reducción logarítmica de 6 unidades para este microorganismo, a 70 °C, se necesitaría de 2 min, o bien 76°C por 12 segundos (Bover & Garriga, 2014).

1.4.5 *E. coli*

Microorganismo de mayor proliferación en la flora intestinal, la mayoría de sus cepas no producen efectos adversos, sin embargo, la cepa *E. coli* O157:H7 es productora de una toxina denominada Shiga, que produce diarrea, calambres abdominales, vómitos y fiebre. Las frutas y verduras suelen presentar contaminación con *E. coli* debido a que en algún momento sufrieron la

contaminación de las heces de un animal. Este microorganismo crece en temperaturas de entre 7 a 50 °C, su temperatura de crecimiento óptima es de 37 °C y soporta ambientes ácidos de hasta un pH de 4,4. Para erradicar este microorganismo la vía térmica, el alimento debe alcanzar una temperatura de 70 °C (OMS, 2018).

1.4.6 *Salmonella spp.*

Microorganismo causante de la salmonelosis, causante de diarrea, vómito y fiebre (Instituto Nacional de Salud de Colombia, 2011). Es un microorganismo que corresponde a la familia de las *Enterobacteriaceae*, Gram negativo, no esporulado y anaerobio facultativo. Su desarrollo se puede dar en temperaturas de 2 °C hasta 54 °C. Su temperatura óptima de crecimiento es de 35 °C y puede sobrevivir en alimentos con una actividad de agua inferior a 0,2. Su pH óptimo de desarrollo es de 6,5 - 7,5 pero soporta un rango de pH de 4-9 (González et al., 2014). El valor D de la *Salmonella* a 71 °C es de 1,2 segundos con un valor Z de 5,3 °C (Lound et al., 2017).

1.4.7 *Cryptosporidium parvum*

Es un protozoario parásito intracelular obligado. Su principal vía de contagio es de manera oral y es el responsable de la enfermedad criptosporidiosis, que, dependiendo del estado inmunológico del afectado, puede causar una diarrea autolimitada como crónica, esta última pone en riesgo la vida del paciente (De La Parte, 2005). Condiciones similares a la pasteurización HTST de la leche de 71 °C durante 15 segundos aseguran la destrucción de este parásito (Vergara & Quillez, 2004).

1.4.8 Polifenoloxidasas

La polifenoloxidasas (PPO) es una de las principales enzimas responsables del deterioro de productos vegetales, fomentando distintos procesos como pardeamiento enzimático, reacción de Maillard, caramelización, generación de pigmentos no agradables para el consumidor, que termina en rechazo y no comercialización del producto. La PPO contiene dos átomos de cobre, que sirven de catalizadores y al oxígeno como agente oxidante. Para evitar estas reacciones químicas, se suele añadir compuestos antioxidantes, agentes reductores, tratamientos térmicos, etc. (Arrázola-Paternina, 2016).

1.4.9 Valores D y Z

Diversos factores afectan el crecimiento de los microorganismos, uno de los principales, es la temperatura, ya que produce varios cambios estructurales, como la desnaturalización de las proteínas de las membranas, procesos oxidativos irreversibles, etc. La capacidad del microorganismo para resistir un proceso térmico es conocido como termorresistencia, a mayor termorresistencia, mayor tiempo y/o temperatura de un proceso térmico debe ser aplicado para reducir la cantidad de microorganismos presentes.

El valor D (tiempo de reducción decimal) se considera al tiempo requerido para lograr la destrucción del 90 % de una población microbiana de un microorganismo específico a una temperatura determinada. El valor D se puede calcular empleando la siguiente ecuación de Pérez-Chabela et al. (2016):

$$D = \frac{x}{\log\left(\frac{No}{Nx}\right)} \quad (1.1)$$

Donde

D : Tiempo de Reducción Decimal.

X : Tiempo que se aplicó el Tratamiento Térmico.

No : Número de Células al Inicio del Tratamiento

Nx : Número de Células al Final del Tratamiento

El valor Z es el cambio de temperatura requerido para aumentar o reducir en un 90 % los microorganismos en un determinado tiempo específico (Rajauria & Tiwari, 2018).

$$Z = \frac{\Delta(t_2 - t_1)}{\log\left(\frac{DT_1}{DT_2}\right)} \quad (1.2)$$

Donde:

Z : Cambio de Temperatura Requerido.

t_2 : Temperatura del Proceso Térmico Mayor.

t_1 : Temperatura del Proceso Térmico Menor.

D_{T_1} : Tiempo de Reducción Decimal Requerido con el Proceso de Menor Temperatura.

D_{T_2} : Tiempo de Reducción Decimal Requerido con el Proceso de Mayor Temperatura.

1.4.10 Pasteurización

El uso del calor para conservar los alimentos es una operación unitaria que tiene muchos años de aplicación y que todavía es de uso común en los procesos térmicos en la producción de alimentos. Las características del tratamiento térmico y la vida útil resultante están determinadas en gran medida por las condiciones iniciales del alimento, como el estado post cosecha del producto. El tiempo y temperatura del tratamiento depende principalmente de la termorresistencia del microorganismo, la carga microbiana inicial y las características de transferencia de calor del producto (Peng et al., 2015).

La palabra pasteurización se originó a partir del trabajo de Pasteur y se refiere a un tratamiento térmico suave utilizado para conservar los alimentos, diseñado principalmente para mantener la calidad de los alimentos y extender el tiempo de vida útil al inactivar o destruir la posible presencia de microorganismos encargados de alterar un alimento (Peng et al., 2015). Una excepción son los alimentos ácidos, con un valor de pH menor a 4.6, que son almacenados en condiciones ambientales después de la aplicación del proceso térmico ya que el nivel de acidez previene la reproducción de microorganismos alterantes. Si se requiere de un almacenamiento refrigerado, es indispensable una pasteurización más moderada para lograr el mismo efecto en la vida útil del producto. La refrigeración es necesaria para mantener la calidad del producto durante su corta vida útil. Las condiciones de pasteurización deben permitir la inactivación de microorganismos, bacterias, levaduras, mohos y enzimas. Por lo general, se requiere una temperatura un tiempo relativamente corto para inactivar los microorganismos y enzimas alterantes hasta el punto de garantizar un producto de fruta seguro mientras se mantiene la calidad durante un largo período de tiempo durante todo el proceso (Peng et al., 2015).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Formulación del jugo de cacao

Se tomo en consideración la propuesta de formulación para jugo de pulpa de cacao de Arciniega-Alvarado & Espinoza (2020), los cuales recomiendan por lo menos el 50 % de pulpa de cacao para mantener las propiedades sensoriales y nutricionales del producto, por lo que la formulación escogida para llevar a cabo esta investigación se puede observar en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Formulación seleccionada para el jugo de cacao [Elaboración propia]

Producto	Pulpa de cacao	Agua
Jugo De Pulpa	65 %	35 %

2.2 Análisis Físicoquímico de la pulpa de cacao

2.2.1 Análisis del pH del Cacao

Se realizo el análisis de pH por medio de un equipo medidor de pH marca BOECO BT- 600, el cual se verificó previamente la calibración del equipo sumergiendo el electrodo en agua destilada. Una vez certificado, se sumergió el electrodo en la formulación del jugo de pulpa de cacao y se esperó unos segundos hasta que la medición se estabilice.

2.2.2 Porcentaje de Humedad

Para la determinación del porcentaje de Humedad del jugo de Pulpa de Cacao se aplicó el procedimiento estipulado en la norma NTE INEN 49, donde se colocó la muestra a 110 °C hasta tener 2 mediciones consecutivas sin variación de peso. Se utilizará la ecuación 2.1 para conocer el contenido de humedad de un producto alimenticio

$$H = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} * 100 \% \quad (2.1)$$

Donde:

H : Porcentaje de Humedad de la muestra

P_1 : Masa del crisol en gramos

P_2 : Masa del crisol más la muestra en gramos

P_3 : Masa del crisol más la muestra desecada.

2.2.3 Densidad del Producto

Para la determinación de la densidad del producto, se aplicó la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.2)$$

Donde:

ρ : Densidad del Producto ($\frac{kg}{m^3}$)

M : Masa del Producto (kg)

V : Volumen del Producto (m^3)

Se debe pesar un vaso precipitado vacío, para después colocarle un volumen pre establecido de jugo, para posteriormente volver a pesar el vaso precipitado con el jugo, la diferencia de masa entre el vaso con jugo y el vacío es la masa contenida de jugo. La medición del jugo fue de 192 mL.

2.2.4 Determinación de Cenizas

Para la determinación de cenizas, se utilizó el procedimiento indicado en la NTE INEN 401:2013, en donde se utilizó un crisol pesado en vacío, posteriormente pesado con la muestra del jugo de mucílago. Luego se procede a colocar el crisol y la muestra en una mufla a 550°C durante 4 horas, una vez concluido el tiempo en la mufla se retira el crisol con precaución y se debe pesar la muestra obtenida. Para el cálculo de cenizas se utiliza la ecuación 2.3 del contenido de cenizas:

$$X_c = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \% \quad (2.3)$$

Donde

X_c : Contenido de Ceniza, en porcentaje de masa.

m_1 : Masa de la capsula vacía en gramos (305,26 g).

m_2 : Masa de la cápsula con muestra, en gramos (367,18g).

m_3 : Masa de la cápsula con ceniza, en gramos (305,50 g).

2.2.5 Viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido al movimiento, es una propiedad física de todos los fluidos (Massey, 2006). La viscosidad influye directamente en el tipo de flujo al interior de una tubería, y por ende influye en la transferencia de calor por convección, ya que el intercambio de calor varía según el movimiento de las partículas al interior de una tubería (Cengel & Ghajar, 2011). Para la viscosidad del jugo de pulpa de cacao, se presenta en la tabla 2.2 un listado de valores de viscosidad de distintos jugos de pulpa, y se seleccionará en base al jugo de pulpa con las características físicas de mayor similitud para poder realizar el diseño del proceso térmico.

Tabla 2.2 Valores de viscosidad de distintos tipos de jugos [Elaboración propia]

Fluido	Viscosidad (cP)	Referencia
Jugo De Maracuyá Pre filtrado	6,36	(Forero & Vélez, 2013)
Jugo de Pulpa de Naranja	9,15	(Salehi, 2020)
Jugo de Pera	3,06	(Salehi, 2020)
Jugo de Manzana	9,71	(Olegario et al., 2021)
Jugo de Melocotón	6,4	(Ruiz et al., 2010)

Debido a la falta de estudios sobre la viscosidad del jugo de pulpa de cacao, se utilizará la viscosidad del jugo de pulpa de naranja de 9,15 cP para este estudio, debido a que al igual que el jugo de pulpa de cacao, presenta fibras en la solución característicos de sus frutos.

2.3 Agentes termorresistentes

2.3.1 Determinación del Factor Deteriorador más termorresistente

Para el desarrollo del diseño térmico es indispensable tomar en cuenta todos los posibles microorganismos y enzimas presentes y que puedan causar algún deterioro a la calidad del producto o a la salud del consumidor, por esto se presenta en la tabla 2.3 dichos microorganismos y sus parámetros de termorresistencia, los cuales se deben considerar para elegir el microorganismo o

enzima de interés. Los valores D y Z son indicadores directos que se relacionan con la temperatura del proceso, aquel microorganismo que posea el valor mayor de estos indicadores será, por ende, el agente más termorresistente.

Tabla 2.3 Valores D y Z de factores degradadores de interés [Elaboración propia]

Microorganismo	D (°C)	z (C)	Fuente
<i>L. Monocytogenes</i>	D ₇₅ = 4,0	7,5	FDA, 2018
<i>E. Coli</i>	D ₇₁ = 2,0	4,5	FDA, 2004
<i>Salmonella Spp.</i>	D ₇₁ = 1,2	5,3	Lound et al., 2017
<i>Cryptosporidium Parvum</i>	D ₇₅ = 2,0	8,4	Vergara, 2004
Polifenoloxidasa	D ₇₀ = 300	7,8	Arrázola-Paternina et al., 2016

2.4 Determinación propiedades de transferencia de calor

2.4.1 Cálculo de Composición Alimenticia del Jugo de Pulpa de Cacao

Según Romero & Zambrano (2010) la pulpa de cacao cuenta con la composición demostrada en la tabla 2.4:

Tabla 2.4 Composición del jugo de cacao [Elaboración propia]

Composición	Porcentaje
Agua	82,84 %
Proteína	0,78 %
Grasa	0 %
Carbohidrato	15,83 %
Ceniza	0,55 %

Los valores observados en la Tabla 2.4 son bastantes parecidos a los obtenidos experimentalmente en el cálculo de contenido de agua y cenizas, por lo que tomaremos en consideración valores de la tabla 2.5 para llevar a cabo el cálculo de las ecuaciones de Choi y Okos (1986). Como el jugo posee en su formulación estimada un 65 % de pulpa y 35 % de agua, se calcula el proporcional de cada componente para la obtención de la composición final del mucílago de cacao.

Tabla 2.5 Composición final de jugo de pulpa de cacao [Elaboración propia]

Composición	Porcentajes Pulpa de Cacao	Porcentaje de Pulpa de Cacao en el Jugo	Porcentajes Agua	Porcentaje de Agua en el Jugo	Composición Final Jugo de Pulpa de Cacao
Agua	82,84 %	65 %	100 %	35 %	88,85 %
Proteína	0,78 %		0		0,507 %
Grasa	0 %		0		0,00 %
Carbohidrato	15,83 %		0		10,29 %
Ceniza	0,55 %		0		0,3575 %

2.4.2 Determinación de propiedades térmicas del jugo de mucílago de cacao por Ecuaciones de Choi y Okos (1986).

Para el cálculo del diseño térmico se necesitan propiedades físicas propias del producto como el calor específico (Cp) y la conductividad térmica (k). Para los casos en que no se pueda calcular los valores de manera experimental, están los modelos matemáticos que calculan dichos parámetros en base a la composición de los alimentos y la temperatura a la cual se encuentra el alimento. Para esto usaremos las ecuaciones de Choi y Okos (1986) que están basados en una solución numérica. En las ecuaciones, estas propiedades también varían con la temperatura, motivo por el cual se utilizará el valor de la temperatura de pasteurización para los cálculos que es de 75 °C. La formulación de jugo de pulpa de cacao es un 65 % pulpa y 35 % agua, por lo que, al momento de realizar el cálculo numérico, se debe considerar estos valores de formulación.

2.4.3 Ecuación para la densidad

A pesar de que se puede calcular de manera simple experimentalmente la densidad, se la calculará por medio de esta ecuación presentada en la tabla 2.6 para comparar el margen de error que existe entre el valor teórico y el experimental.

Tabla 2.6 Cálculo de densidad por ecuaciones de Choi y Okos [Vargas-Zambrano et al., 2020]

Componente	Expresión
Agua	$\rho = 997,18 + 3,1439 * 10^{-3} * T - 3,7574 * 10^{-3} * T^2$ (2.4)
Carbohidratos	$\rho = 1599,1 - 0,310T$ (2.5)
Proteína	$\rho = 1329,9 - 0,5184T$ (2.6)
Cenizas	$\rho = 2423,8 - 0,28063T$ (2.7)
Formulación	$\rho = \sum \rho_i * X_i$ (2.8)

2.4.4 Cálculo del calor específico.

Se utilizarán las ecuaciones de la tabla 2.7 para poder calcular la densidad por los componentes del jugo de cacao, esta característica es fundamental para escoger el tipo de intercambiador de calor para el proceso térmico

Tabla 2.7 Cálculo de calor específico por ecuaciones de Choi y Okos [Vargas-Zambrano et al., 2020]

Componente	Expresión
Agua	$Cp = 4,1762 - 9,0864 * 10^{-5} * T + 5,4731 * 10^{-6} * T^2$ (2.9)
Carbohidratos	$Cp = 1,5488 + 1,9625 * 10^{-3}T - 5,9399 * 10^{-6}T^2$ (2.10)
Proteína	$Cp = 2,0082 + 1,2089 * 10^{-3}T - 1,3129 * 10^{-6}T^2$ (2.11)
Cenizas	$Cp = 2,0082 + 1,2089 * 10^{-3}T - 1,3129 * 10^{-6}T^2$ (2.12)
Formulación	$Cp = \sum Cp_i * X_i$ (2.13)

2.4.5 Cálculo de la Conductividad.

Para obtener el valor teórico de la conductividad térmica del jugo de pulpa de cacao se utilizarán las ecuaciones de la tabla 2.8

Tabla 2.8 Cálculo de la conductividad por ecuaciones de Choi y Okos [Vargas-Zambrano et al., 2020]

Componente	Expresión
Agua	$k = 0,57109 + 1,7625 * 10^{-3}T - 6,7063 * 10^{-6}T^2$ (2.14)
Carbohidratos	$k = 0,20141 + 1,3874 * 10^{-3}T - 4,3312 * 10^{-6}T^2$ (2.15)
Proteína	$k = 0,17881 + 1,1958 * 10^{-3}T - 2,7178 * 10^{-6}T^2$ (2.16)
Cenizas	$k = 0,32962 + 1,4011 * 10^{-3}T - 2,9069 * 10^{-6}T^2$ (2.17)
Formulación	$k = \sum k_i * X_i$ (2.18)

2.4.6 Selección del intercambiador de calor

Para el diseño del pasteurizador, se ha considerado un pasteurizador de tubo en tubo, ya que el jugo de pulpa de cacao tiene una viscosidad media y este tipo de pasteurizador es el óptimo para este tipo de fluidos (Richardson, 2004).

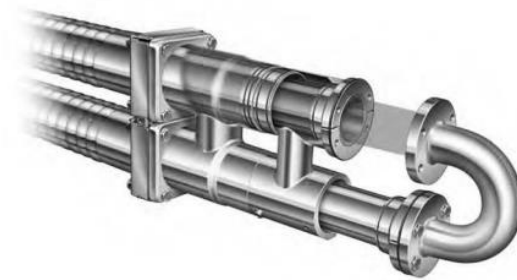


Figura 2.1 Esquema de un intercambiador de tubo en tubo [Richardson, 2004]

2.4.7 Ecuación de transferencia de calor en un intercambiador de calor

En un volumen de control, la razón de transferencia de calor hacia adentro o hacia afuera del sistema, está definido por la ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2.19)$$

Donde:

\dot{m} : Representa el flujo másico en $(\frac{kg}{s})$

C_p : Calor específico del fluido en el volumen de control $(\frac{kJ}{kg^{\circ}C})$

ΔT : Diferencia de temperatura entre el ingreso del fluido al volumen de control y a la salida ($^{\circ}\text{C}$)

La ecuación 2.19 es de las más utilizadas en flujo estacionario. En las condiciones de un intercambiador de tubo en tubo, se considera una transferencia de calor ideal, en donde el calor ganado de un flujo es igual al calor cedido del otro flujo. (Cengel & Ghajar, 2011).

2.4.8 Diferencia media logarítmica de temperatura (MLTD).

La diferencia media logarítmica de temperatura es la representación adecuada de la diferencia de temperatura promedio a utilizarse en los análisis de intercambiadores de calor. Este método es el más acertado para dimensionar un intercambiador cuando se conocen las temperaturas de entrada y salida de los fluidos (Cengel & Ghajar, 2011). La ecuación de MLTD está definida por la ecuación 2.20:

$$\Delta T_V = MLDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.20)$$

Donde:

ΔT_V : Diferencia promedio de temperatura de los dos fluidos ($^{\circ}\text{C}$).

ΔT_1 : Es el mayor valor de diferencia de temperatura en un extremo entre el fluido de trabajo y el de proceso ($^{\circ}\text{C}$).

ΔT_2 : Es el menor valor de diferencia de temperatura entre un extremo en el fluido de trabajo y el de proceso ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.9 Número de Reynolds

Según Cengel & Ghajar (2011) el número de Reynolds es un valor adimensional que expresa el comportamiento del régimen del flujo. Para valores $Re < 2100$, se considera un flujo laminar, que es cuando el fluido se desplaza en forma ordenada, mientras que $Re > 3000$, se considera un régimen turbulento, que es cuando las partículas se desplazan en forma caótica y aleatoria. La ecuación 2.21 del Número de Reynolds, tomada de (Cengel & Ghajar, 2011), está dada por:

$$Re_{ju.go} = \frac{\rho V L_{eq}}{\mu} \quad (2.21)$$

Donde:

ρ : Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)

V : Velocidad ($\frac{m}{s}$)

L_{eq} : Longitud equivalente donde se transporta el fluido.

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\frac{kg}{m.s}$)

Utilizando la ecuación 2.22 del flujo másico:

$$\dot{Q} = \rho V A_{Flujo} \quad (2.22)$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo másico ($\frac{kg}{s}$)

A_{Flujo} : Área de la sección donde circula el fluido (m^2)

Se despeja el valor de densidad y reemplazando en la ecuación 2.21, se obtendría la nueva ecuación 2.23 para el número de Reynolds:

$$Re_{juogo} = \frac{\dot{Q} L_{eq}}{\mu A_{Flujo}} \quad (2.23)$$

2.4.10 Número Prandtl

El número de Prandtl es un coeficiente adimensional que sirve para indicar la relación de espesor entre las capas límites de calor y velocidad de un fluido (Cengel & Ghajar, 2011).

Está definido por la siguiente ecuación:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.24)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\frac{kg}{m.s}$)

C_p : Calor específico del fluido ($\frac{kJ}{kg^\circ C}$)

k : Conductividad térmica del fluido ($\frac{W}{m^\circ C}$)

2.4.11 Número de Nusselt.

Es la representación del mejoramiento del calor transferido a través de una capa de fluido, debido a la relación de la convección en comparación a la conducción a través de la misma capa. El cálculo del número de Nusselt cuando existe una

diferencia significativa entre la temperatura de la superficie y del fluido, en régimen laminar, se calcula por (Cengel & Ghajar, 2011):

$$Nu = 1,86 * (Re * Pr * \frac{De}{L})^{\frac{1}{3}} * (\frac{\mu}{\mu_w})^{0,14} \quad (2.25)$$

Donde:

De : Diametro equivalente.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

μ_w : Viscosidad del medio convectivo en la pared de la tubería.

L : Dimension característica de la superficie, longitud del tubo (5,8 m).

Para el cálculo de flujo turbulento ($Re \geq 10000$) en tubos lisos, se utiliza la ecuación 2.26:

$$Nu_{agua} = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

2.4.12 Coeficiente de convección

La convección se define como la transferencia de calor entre un gas o líquido en movimiento con una superficie sólida. El coeficiente de convección h no es una propiedad del fluido, si no que se determina de manera experimental y depende de todos los parámetros que influyen en la convección como: velocidad del fluido, configuración geométrica del fluido, naturaleza del movimiento, etc. (Cengel & Ghajar, 2011).

El número de Nusselt, se define por la ecuación:

$$Nu = \frac{hL_{eq}}{k} \quad (2.27)$$

Despejando la ecuación 2.27 para el coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu k}{L_{eq}} \quad (2.28)$$

2.4.13 Factor de incrustación

Con el paso del tiempo, el rendimiento de un intercambiador de calor decrece debido a la acumulación de depósitos en la superficie donde se lleva a cabo la transferencia de calor. Esta capa de depósitos que se va acumulando, representa una resistencia extra R_d , el cual es una medida de resistencia térmica debido a la

incrustación. En la tabla 2.9 se menciona el factor de incrustación de algunos fluidos

Tabla 2.9 Factores de incrustación representativos [Tubular Exchange Manufacturers Association, 1988]

Componente	Valor $\frac{m^2 \cdot C}{W}$
Agua destilada por debajo de los 50 °C	0,0001
Agua destilada por debajo de los 50 °C	0,0002
Agua de la ciudad o pozo	0,002
Purga de calderas	0,002
Alimentación tratada para calderas	0,001

Debido a que no existen datos de factor de obstrucción de jugo de pulpa de cacao, usaremos el mismo factor de obstrucción que para el agua de ciudad, mismo fluido que se utilizará como fluido de servicio.

2.4.14 Coeficiente total de transferencia de calor

El coeficiente total de transferencia de calor es una unidad de medida que indica de qué manera se transfiere el calor a través de una serie de medios con resistencia térmica (Cengel & Ghajar, 2011). En tuberías con espesor de pared pequeñas, se puede considerar una resistencia térmica igual a 0. En un sistema ideal, donde no hay incrustaciones, el coeficiente total de transferencia de calor, se denomina coeficiente de transferencia de calor limpio U_c y depende netamente de los valores de coeficientes de entalpía de los fluidos involucrados en el proceso (Cengel & Ghajar, 2011). Está definido por la ecuación 2.29:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.29)$$

La ecuación 2.29 se puede reescribir despejando U_c , para obtener la ecuación 2.30:

$$U_c = \frac{h_i h_o}{h_i + h_o} \quad (2.30)$$

Donde:

U_c : Coeficiente de transferencia de calor limpio $(\frac{W}{m^2 \cdot C})$

h_i : Coeficiente de convección del fluido en la tubería interna $(\frac{W}{m^2 \cdot C})$.

h_o : Coeficiente de convección del fluido en la tubería externa $(\frac{W}{m^2 \cdot C})$.

Debido a que las incrustaciones con el pasar del tiempo sólo seguirán aumentando, se debe obtener un coeficiente de transferencia de calor real U_D , donde se considera las incrustaciones de los fluidos de servicio. Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor real se utilizará la ecuación 2.31 tomada de Cengel & Ghajar (2011):

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + \sum_{i=1}^n R_{Di} \quad (2.31)$$

Donde:

U_D : Coeficiente de transferencia de calor real $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

U_C : Coeficiente de transferencia de calor limpio $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

$\sum_{i=1}^n R_{Di}$: Sumatoria de factores de obstrucción presentes $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right)$

2.4.15 Razón de Transferencia de Calor en un Intercambiador

Para el cálculo de la razón de transferencia de calor en un intercambiador \dot{Q} se puede utilizar una ecuación análoga a la ley de Newton de enfriamiento, la cual consiste en:

$$\dot{Q} = U_D A_{TC} \Delta T_V \quad (\text{Cengel, \& Ghajar 2011}) \quad (2.32)$$

Donde:

U_D : Coeficiente de transferencia de calor real $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

A_{TC} : Área de transferencia de calor donde se procesa el fluido de interés (m^2)

ΔT_V : Diferencia promedio de temperatura de los dos fluidos ($^\circ C$).

El A_{TC} varía según la forma geométrica del intercambiador utilizado, en este caso nos regimos con tubos que se puede clasificar como una forma cilíndrica, por lo que la ecuación de A_{TC} es:

$$A_{TC} = \pi D_O L \quad (\text{Cengel, \& Ghajar 2011}) \quad (2.33)$$

Donde:

π : Constante pi (3,141592)

D_O : Diámetro externo del tubo interno del sistema.

L : Longitud del tubo (5,8 metros).

2.4.16 Regeneración

La regeneración tiene como finalidad el ahorro energético en un intercambiador de calor, aprovechar la energía que tiene un fluido para precalentar o pre enfriar otro. Actualmente los intercambiadores de calor alcanzan porcentajes sumamente altos de regeneración que llegan al 95 %. Para la determinación de la regeneración de un intercambiador de calor, de acuerdo con Tetrapack (1996) se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} * 100 \% \quad (2.34)$$

Donde:

% R : Regeneración

T_1 : Temperatura previa a regeneración

T_2 : Temperatura de posterior a regeneración

T_3 : Temperatura de pasteurización

Despejando la temperatura posterior a la regeneración de la ecuación 2.34, se obtiene la ecuación 2.35:

$$T_2 = \% R(T_3 - T_1) + T_1 \quad (2.35)$$

Para el análisis de este caso, se ha seleccionado un porcentaje de Regeneración conservador de solo el 85 %.

2.5 Determinación de Tiempo de Pasteurización

Para alcanzar un valor de pasteurización se necesita alcanzar un lapso de 5 veces el tiempo de reducción decimal 5D (Silva et al., 2014). El tiempo de reducción decimal varía conforme cambia la temperatura del medio, para determinar el tiempo de Pasteurización requerido, hacemos uso de la ecuación:

$$F_{T_2} = 10^{\left(\frac{T_1 - T_2}{Z}\right)} * F_{T_1} \quad (2.36)$$

Donde:

F_{T_2} : Valor de tiempo de pasteurización buscado

F_{T_1} : Valor de tiempo de pasteurización conocido ($5 * D$)

T_2 : Temperatura a la que se desea efectuar el tratamiento

T_1 : Temperatura de referencia para el tratamiento térmico

Z: Valor Z de la enzima o microorganismo más termorresistente.

2.6 Flujo al interior del intercambiador

2.6.1 Flujo másico

El flujo másico está definido como la cantidad de masa de un fluido que pasa a través de una superficie en una unidad de tiempo, está definido por la ecuación 2.37:

$$\dot{Q} = Q\rho \quad (\text{Orozco \& Bedoya, 2007}) \quad (2.37)$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo másico ($\frac{kg}{s}$)

Q : Flujo volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

ρ : Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)

2.6.2 Flujo volumétrico

El flujo volumétrico Q está definido como el volumen de un fluido que atraviesa cierta superficie en una unidad de tiempo, se puede obtener por medio de la ecuación de Pedroza et al. (2016):

$$Q = AV \quad (2.38)$$

Donde:

Q : Flujo Volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

A : Área de la Tubería donde circula el fluido (m^2)

V : Velocidad del Fluido Promedio al Interior de la Tubería ($\frac{m}{s}$)

2.6.3 Velocidad máxima de un fluido

Las partículas de fluido que transitan en el centro de la tubería se desplazarán más rápido que las partículas que se encuentran cerca de la superficie.

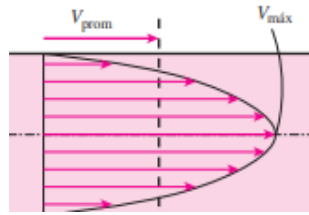


Figura 2.2 Distribución de velocidad de un fluido laminar al interior de una tubería [Cengel, & Ghajar 2011]

Para calcular la velocidad máxima al interior de una tubería se utiliza la ecuación:

$$V_{max} = 2V_{prom} \quad (\text{Cengel \& Ghajar, 2011}) \quad (2.39)$$

2.6.4 Distancia recorrida al interior de una tubería

Para la obtención de la distancia recorrida del fluido al interior de la tubería, se aplica la ecuación 2.40:

$$d = V * t \quad (\text{Young \& Freedman, 2009}) \quad (2.40)$$

Donde:

d : Distancia recorrida

V :Velocidad del fluido

t : Tiempo de requerido.

2.7 Porcentaje de error relativo

Los desaciertos ocurren cuando se utilizan expresiones de proximidad para simbolizar operaciones matemáticas precisas ya que uno de los desafíos que enfrentan estos métodos numéricos es definir las estimaciones de error en carencia de valores teóricos exactos, la expresión que permite calcular el error relativo relaciona los valores aceptables del experimento realizado con los valores teóricos disponibles (Chapra & Canale, 2007); el error relativo está dada por la ecuación 2.41:

$$\% \text{ Error}_{relativo} = \frac{|\text{Valor Aceptable} - \text{Valor Exacto}|}{\text{Valor Exacto}} * 100 \% \quad (2.41)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diagrama de procesos y equipos

El siguiente diagrama de proceso indica los pasos que se han escogido para la elaboración del jugo de cacao tomando en cuenta las buenas prácticas de manufactura, la eficiencia del proceso y la disponibilidad de equipos y mano de obra

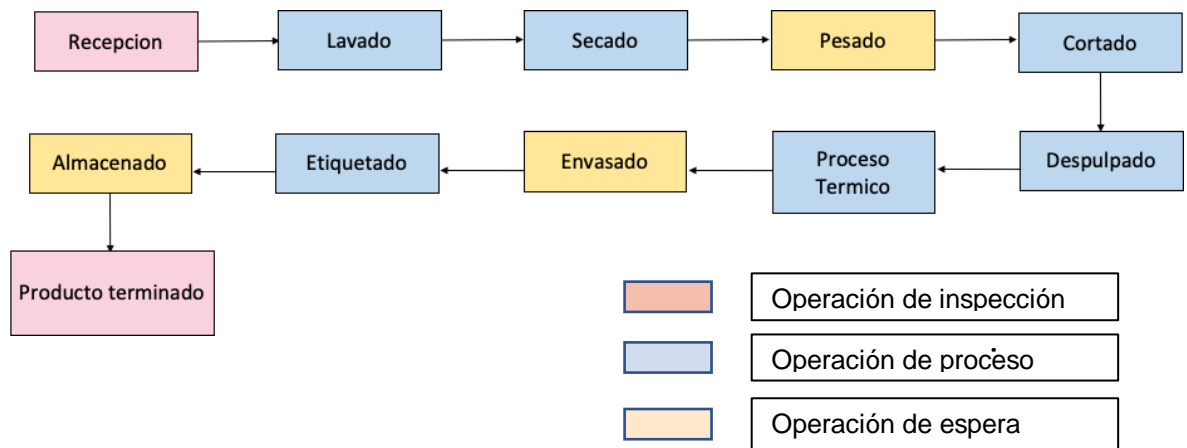


Figura 3.1 Línea de procesamiento de jugo de cacao [Elaboración propia]

Recepción. - En esta etapa se reciben todas las mazorcas de cacao que van a ser utilizadas para la elaboración de jugo de cacao, en esta etapa se realiza la primera revisión de calidad para determinar que mazorcas se encuentran lo suficiente maduras para este proceso, la operación de clasificación y rechazo es visual y manual por parte de los operadores los cuales deben tener experiencia previa en esta operación. Es la primera operación que genera desechos

Lavado. - En esta operación se va a utilizar una banda móvil con inmersión, como medio de limpieza una solución clorada al 0,015 % para poder eliminar cualquier suciedad o impureza que contengan las mazorcas de cacao. En esta fase también se generan desechos

Secado. - Para esta operación se utilizará un ventilador industrial para poder eliminar toda la cantidad de humedad que esté presente en la mazorca

Pesado. - En esta etapa se pesarán las mazorcas de cacao una vez limpias y sin materiales extraños presentes en ellas

Cortado. - Para el cortado de las mazorcas se realizarán cortes transversales a las mazorcas para poder retirar los granos de cacao recubiertos con la pulpa, se utilizará una cortadora para esta operación con el fin de que sea más eficiente y prevenir accidentes

Despulpado. - Debido a que la pulpa del cacao es nuestra materia prima es necesaria obtener el del grano de cacao en su mayor porcentaje, para esto una despulpadora hará el trabajo más fácil y de esta manera se podrá aprovechar la mayor cantidad de pulpa.

Proceso Térmico. - El jugo de cacao debe ser pasteurizado para así poder inactivar todas las bacterias que estén presentes y que puedan causar algún deterioro a la calidad del producto o algún daño a la salud del consumidor; así como actividad enzimática que puede resultar en cambios a las características organolépticas del jugo. Para esto se lo va a procesar a una temperatura elevada en un intervalo de tiempo que asegure la inocuidad del jugo con la ayuda de un intercambiador de tubo en tubo, el mismo que también realizara el proceso de enfriamiento del jugo para que este sea envasado de manera aséptica en las botellas de plástico PET. El proceso de enfriamiento es necesario para poder preservar ciertas características del producto.

Envasado. - Se utilizará una maquina envasadora aséptica con el fin de que esta actividad se desarrolle de manera efectiva y no existan riesgos de contaminación. La temperatura a la cual el jugo será envasado es de 25 °C.

Almacenado. - El jugo una vez que ya sea envasado y etiquetado será almacenado en cámaras frigoríficas a temperaturas ambiente. Sera almacenado en cajas de cartón de 12 unidades.

3.2 Diagrama de equipos

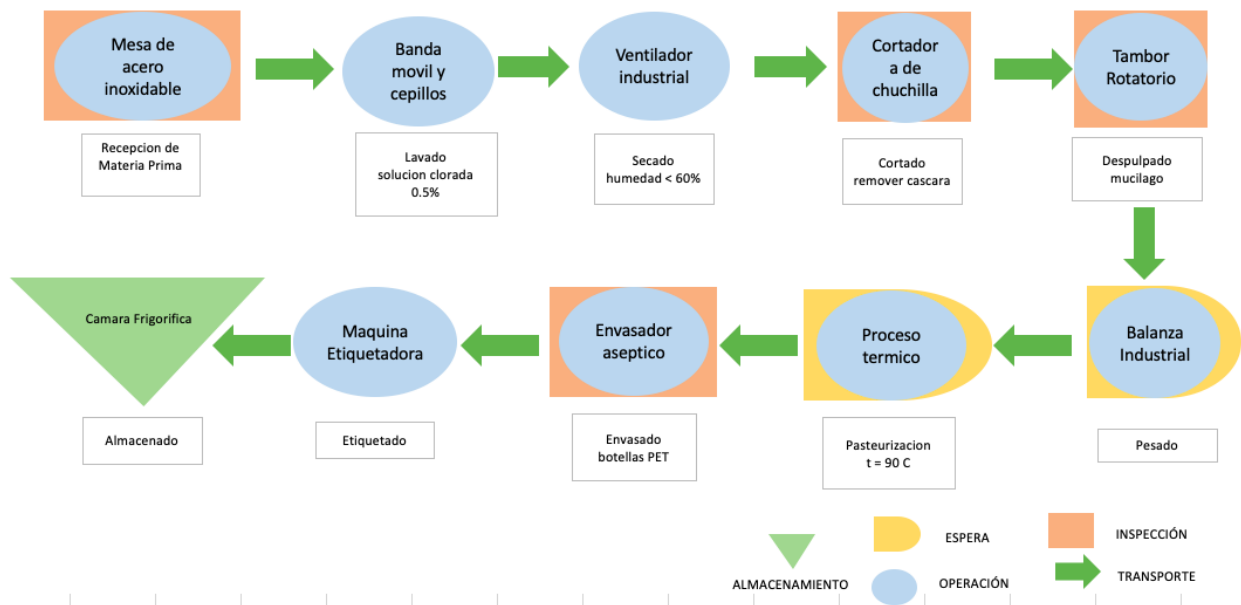


Figura 3.2 Línea de procesamiento y equipos [Elaboración propia]

3.3 Resultados y análisis fisicoquímicos

3.3.1 Porcentaje de humedad

Para obtener de manera experimental el porcentaje de humedad que posee el jugo de pulpa de cacao se utilizó la ecuación 2.1

$$H = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} * 100 \% \quad (2.1)$$

Donde

H : Porcentaje de humedad de la muestra

P_1 : Masa del crisol en gramos

P_2 : Masa del crisol más la muestra en gramos

P_3 : Masa del crisol más la muestra desecada.

Se reemplazan las variables de la ecuación 2.1 con los datos obtenidos experimentalmente, dando como resultado el siguiente valor de humedad:

$$H = \frac{367,2 - 311,4}{367,2 - 305,26} * 100 \%$$

$$H = 90,08 \%$$

Podemos comparar los resultados obtenidos vía experimental con los valores calculados teóricamente por medio del % error relativo con la ecuación 2.41

$$\% Error_{relativo} = \frac{|Valor Aceptable - Valor Exacto|}{Valor Exacto} * 100 \% \quad (2.41)$$

$$\% Error_{relativo} = \frac{|88,85 - 90,08|}{90,08} * 100 \%$$

$$\% Error_{relativo} = 1,37 \%$$

El error relativo es sumamente bajo, e incluso cabe acotar que no necesariamente la humedad del producto siempre va a ser del 90 %; ya que, dentro de las mismas especies de cacao, el contenido nutricional de su mucílago va a presentar variaciones, por lo que este valor experimental de 90,08 % de humedad puede ser en ocasiones un poco superior o inferior.

3.3.2 Densidad del Producto

Se utilizó la ecuación 2.2 que relaciona la masa del jugo con su volumen con el fin de determinar experimentalmente el valor de la densidad del jugo de cacao:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{(314,87 - 117,10) g}{192 ml}$$

$$\rho = 1,03 \frac{g}{ml}$$

3.3.3 Determinación de Cenizas

$$X_c = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \% \quad (2.3)$$

$$X_c = \frac{(305,50 - 305,26)g}{(367,18 - 305,26)g} * 100 \%$$

$$X_c = 0,3876 \%$$

Así mismo, podemos calcular el porcentaje de error relativo entre el valor experimental calculado y el teórico esperado.

$$\% Error_{relativo} = \frac{|Valor\ Aceptable - Valor\ Exacto|}{Valor\ Exacto} * 100\ \% \quad (2.41)$$

$$\% Error_{relativo} = \frac{|0,3575 - 0,3876|}{0,3876} * 100\ \%$$

$$\% Error_{relativo} = 7,76\ \%$$

De igual manera este valor se considera como aceptable, el porcentaje de cenizas al igual que la humedad es variable, esta variables se ven influenciadas por factores externos que son difíciles de controlar, motivo por el cual no se puede establecer que este valor de la cantidad de cenizas será un valor fijo para el jugo de mucílago de cacao.

3.4 Cálculo de Propiedades Físicas por Ecuaciones de Choi y Okos (1986)

3.4.1 Cálculo de Densidad

Se utilizará la ecuación 2.4 de Choi y Okos (Vargas-Zambrano et al., 2020) para realizar el cálculo de la densidad del producto utilizando el contenido de agua

$$\rho_{agua} = 997,18 + 3,1439 * 10^{-3} * T - 3,7574 * 10^{-3} * T^2 \quad (2.4)$$

$$\rho_{agua} = 997,18 + 3,1439 * 10^{-3} * (25) - 3,7574 * 10^{-3} * (25)^2$$

$$\rho_{agua} = 994,91 \frac{kg}{m^3}$$

Se utilizará la ecuación 2.5 de Choi y Okos (Vargas-Zambrano et al., 2020) para calcular la densidad del producto utilizando el contenido de carbohidratos

$$\rho_{carbohidratos} = 1599,1 - 0,3105(T) \quad (2.5)$$

$$\rho_{carbohidratos} = 1599,1 - 0,3105(25)$$

$$\rho_{carbohidratos} = 1591,34 \frac{kg}{m^3}$$

La ecuación 2.6 de Choi y Okos (Vargas-Zambrano et al., 2020) será de ayuda para poder calcular la densidad del producto utilizando el contenido de proteínas

$$\rho_{proteinas} = 1329,9 - 0,5184(T) \quad (2.6)$$

$$\rho_{proteinas} = 1329,9 - 0,5184(25)$$

$$\rho_{proteinas} = 1316,94 \frac{kg}{m^3}$$

La ecuación 2.7 de Choi y Okos (Vargas-Zambrano et al., 2020) se usará para poder calcular la densidad del producto utilizando el contenido total de cenizas calculado con la ecuación 3.4

$$\rho_{cenizas} = 2423,8 - 0,28063(T) \quad (2.7)$$

$$\rho_{cenizas} = 2423,8 - 0,28063(25)$$

$$\rho_{cenizas} = 2416,78 \frac{kg}{m^3}$$

Para poder determinar el valor de la densidad real del producto, se utilizará la ecuación 2.8 (Vargas-Zambrano et al., 2020) la cual relaciona el resultado de las ecuaciones 2.4; 2.5; 2.6 y 2.7 de la densidad por componente del jugo de cacao.

$$\rho_{Pulpa\ de\ Cacao} = \rho_{agua} * X_{agua} + \rho_{proteína} * X_{proteína} + \rho_{ceniza} * X_{ceniza} + \rho_{carbohidratos} * X_{carbohidratos} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{Pulpa\ de\ Cacao} \\ &= (994,1)(0,8885) + (1316,94)(0,00507) + (2416,78)(0,003575) \\ &+ (1591,34)(0,1029) \end{aligned}$$

$$\rho_{Pulpa\ de\ Cacao} = 1062,99 \frac{kg}{m^3}$$

Este valor es bastante parecido al obtenido de manera experimental ($1030 \frac{kg}{m^3}$).

Calculando el porcentaje de error con la ecuación 2.41

$$\%E\ rror_{relativo} = \frac{|Valor\ Aceptable - Valor\ Exacto|}{Valor\ Exacto} * 100\ \% \quad (2.41)$$

$$\%E\ rror_{relativo} = \frac{1062,99 - 1030}{1030} * 100\ \%$$

$$\%E\ rror_{relativo} = 3,20\ \%$$

Este cálculo nos indica que, a pesar de no ser exactas, los valores obtenidos de las ecuaciones de Choi y Okos (1986) son bastante aceptables para realizar los

futuros cálculos para obtener valores de características físicas que no podemos calcular de manera experimental como lo es el calor específico y la conductividad.

3.4.2 Cálculo de calor específico (Cp)

Para el cálculo del valor del calor específico se utilizarán las ecuaciones de Choi y Okos (1986) utilizando sus componentes principales: agua contenida, carbohidratos, cenizas y proteínas; la ecuación 2.9 (Vargas-Zambrano et al., 2020) nos dará el resultado del calor específico por el contenido de agua

$$Cp_{agua} = 4,1762 - 9,0864 * 10^{-5}T + 5,4731 * 10^{-6}T^2 \quad (2.9)$$

$$Cp_{agua} = 4,1762 - 9,0864 * 10^{-5}(25) + 5,4731 * 10^{-6}(25)^2$$

$$Cp_{agua} = 4,175 \left(\frac{J}{g^{\circ}C} \right)$$

Para obtener el resultado del calor específico por el contenido de carbohidratos se utilizará la ecuación 2.10 (Vargas-Zambrano et al., 2020)

$$Cp_{carbohidratos} = 1,5488 + 1,9625 * 10^{-3}T - 5,9399 * 10^{-6}T^2 \quad (2.10)$$

$$Cp_{carbohidratos} = 1,5488 + 1,9625 * 10^{-3}(25) - 5,9399 * 10^{-6}(25)^2$$

$$Cp_{carbohidratos} = 1,594 \left(\frac{J}{g^{\circ}C} \right)$$

Se utilizará la ecuación 2.11 (Vargas-Zambrano et al., 2020) para obtener el valor del calor específico del producto por su contenido de cenizas

$$Cp_{cenizas} = 1,0926 + 1,8896 * 10^{-3}T - 3,6817 * 10^{-6}T^2 \quad (2.11)$$

$$Cp_{cenizas} = 1,0926 + 1,8896 * 10^{-3}(25) - 3,6817 * 10^{-6}(25)^2$$

$$Cp_{cenizas} = 1,137 \left(\frac{J}{g^{\circ}C} \right)$$

Para conocer el resultado del calor específico por el contenido de proteínas del jugo de cacao se utilizará la ecuación 2.12 (Vargas-Zambrano et al., 2020)

$$Cp_{proteinas} = 2,0082 + 1,2089 * 10^{-3}T - 1,3129 * 10^{-6}T^2 \quad (2.12)$$

$$Cp_{proteinas} = 2,0082 + 1,2089 * 10^{-3}(25) - 1,3129 * 10^{-6}(25)^2$$

$$Cp_{proteinas} = 2,037 \left(\frac{J}{g^{\circ}C} \right)$$

Para la obtención del Cp final del producto, se multiplica el Cp obtenido por cada composición del producto, por la fracción (X_a) de estos en el producto con la ayuda de la ecuación 2.13 (Vargas-Zambrano et al., 2020)

$$Cp_{Pulpa\ de\ Cacao} = Cp_{agua} * X_{agua} + Cp_{proteína} * X_{proteína} + Cp_{ceniza} * X_{ceniza} + Cp_{carbohidratos} * X_{carbohidratos} \quad (2.13)$$

$$Cp_{Pulpa\ de\ Cacao} = (4,175)(0,8885) + (2,0376)(0,00507) + (1,1375)(0,003575) + (1,5941)(0,10289)$$

$$Cp_{Pulpa\ de\ Cacao} = 3,8878 \left(\frac{J}{g^{\circ}C} \right)$$

3.4.3 Cálculo de conductividad (k)

De la misma manera que se ha calculado el calor específico y la densidad, se utilizarán las ecuaciones de Choi y Okos (1986) para obtener el resultado de la conductividad térmica del jugo de cacao por sus componentes principales; la ecuación 2.14 (Vargas-Zambrano et al., 2020) se aplicará para conocer el valor de la conductividad por el contenido de agua

$$k_{agua} = 0,57109 + 1,7625 * 10^{-3}T - 6,7063 * 10^{-6}T^2 \quad (2.14)$$

$$k_{agua} = 0,57109 + 1,7625 * 10^{-3}(25) - 6,7063 * 10^{-6}(25)^2$$

$$k_{agua} = 0,6109 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

La ecuación 2.15 (Vargas-Zambrano et al., 2020) se empleará para conocer el valor de la conductividad por el contenido de carbohidratos presentes en el jugo de cacao

$$k_{carbohidratos} = 0,20141 + 1,3874 * 10^{-3}T - 4,3312 * 10^{-6}T^2 \quad (2.15)$$

$$k_{carbohidratos} = 0,20141 + 1,3874 * 10^{-3}(25) - 4,3312 * 10^{-6}(25)^2$$

$$k_{carbohidratos} = 0,2333 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

La ecuación 2.16 (Vargas-Zambrano et al., 2020) se usará para conocer el valor de la conductividad por el contenido de cenizas

$$k_{cenizas} = 0,32962 + 1,4011 * 10^{-3}T - 2,9069 * 10^{-6}T^2 \quad (2.16)$$

$$k_{cenizas} = 0,32962 + 1,4011 * 10^{-3}(25) - 2,9069 * 10^{-6}(25)^2$$

$$k_{cenizas} = 0,3628 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

La ecuación 2.17 (Vargas-Zambrano et al., 2020) se utilizará para conocer el valor de la conductividad por el contenido de agua

$$k_{proteinas} = 0,17881 + 1,1958 * 10^{-3}T - 2,7178 * 10^{-6}T^2 \quad (2.17)$$

$$k_{proteinas} = 0,17881 + 1,1958 * 10^{-3}(25) - 2,7178 * 10^{-6}(25)^2$$

$$k_{proteinas} = 0,2070 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

Para la obtención de la Conductividad final del producto, se multiplica el Cp obtenido por cada composición del producto, por la fracción (X_a) de estos en el producto, aplicando así la ecuación 2.18 (Vargas-Zambrano et al., 2020)

$$k_{Pulpa\ de\ Cacao} = k_{agua} * X_{agua} + k_{proteína} * X_{proteína} + k_{ceniza} * X_{ceniza} + k_{carbohidratos} * X_{carbohidratos} \quad (2.18)$$

$$k_{Pulpa\ de\ Cacao} = (0,6109)(0,8885) + (0,2070)(0,00507) + (0,3628)(0,003575) + (0,2333)(0,1029)$$

$$k_{pulpa\ de\ cacao} = 0,5691 \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

3.5 Elección del agente deteriorador más termorresistente

Se puede apreciar en la tabla 2.3 que la PPO a temperaturas similares con otros factores degradadores, tiene un amplio margen de diferencia, motivo por el cual se transforma en el objetivo principal para su inactivación por medio del tratamiento térmico. Al garantizar la inactivación del agente más termorresistente, se garantiza también la eliminación del resto factores que pueden degradar el alimento como lo son los microorganismos. En la tabla 2.3 se muestra los deterioradores de interés presentes en el jugo de cacao y podemos ver que su principal motivo de deterioro no será de carácter microbiano sino más bien enzimático, con un valor D de 300 segundos y un valor Z de 7,8 °C, esta variable representa cuanta temperatura se debe incrementar para poder reducir en

aproximadamente un 90 % el tiempo de reducción decimal D (Rajauria & Tiwari, 2018).

Diseño de proceso de térmico para la pasteurización de jugo de pulpa de cacao tomando en cuenta el MO más termorresistente

3.5.1 Cálculo de Valor de Pasteurización para inactivar la actividad de la Polifenoloxidasa en un Corto Periodo de Tiempo

Debido a que los valores de termorresistencia de la PPO, $D_{70} = 300$ segundos y el valor $Z = 7,8$ °C, es necesario determinar los parámetros del proceso térmico de la unidad móvil para inhibir la actividad enzimática en el jugo de pulpa de cacao, al ser esta enzima el agente degradador de mayor termorresistencia, se puede asegurar que al inactivarla, cualquier otro microorganismo presente también será erradicado, en el caso específico de pasteurización, se necesitan valores de 5D para considerar el producto como correctamente pasteurizado (Silva et al., 2014).

Para el proceso del diseño térmico, tomando en cuenta un envasado aséptico al finalizar la pasteurización y el pH del producto, realizar un calentamiento sobre los 90 °C, para que el producto terminado no requiera de una cadena de frío que pueda encarecer el costo del transporte.

3.5.2 Calentamiento

El jugo de mucílago de cacao va a pasar por 2 Etapas de Calentamiento, la primera etapa por la que atravesará es la etapa de Regeneración que es donde ingresa a temperatura ambiente y el fluido de trabajo (agua) que salió del proceso de calentamiento final, precalentara el jugo previo al calentamiento final. Para conocer la temperatura de ese fluido de trabajo se necesitará conocer la Temperatura del Fluido de Trabajo de Salida que viene después del Calentamiento, pero a su vez, se debe determinar la temperatura de entrada del Jugo de Mucílago después de la Regeneración. Para esto, determinamos la temperatura de Regeneración con la Ecuación 2.34:

$$\% R = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} * 100 \% \quad (2.34)$$

Donde:

% R : Regeneración

T_1 : Temperatura Previa a Regeneración

T_2 : Temperatura de Posterior a Regeneración

T_3 : Temperatura de Pasteurización

Por lo tanto:

$$T_2 = \% R(T_3 - T_1) + T_1 \quad (2.35)$$

En algunas ocasiones, el porcentaje de Regeneración alcanza el 95 %, pero en este caso se prefiere ser conservador y elevar la temperatura en un porcentaje de retención de 85 %. Por lo que se obtendría:

$$T_2 = \% 85(92 - 25) + 25$$

$$T_2 = 81,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con un porcentaje de regeneración del 85 %, se eleva la temperatura hasta 81,95 °C, haciendo esta la temperatura de entrada del jugo de pulpa a la sección de calentamiento. En la tabla 3.1 finalmente se obtiene los datos iniciales para calcular el proceso de calentamiento del jugo de pulpa.

Tabla 3.1 Tabla de datos para realizar el calentamiento [Elaboración propia]

Datos	Jugo	Agua
$c_p \left(\frac{kJ}{kg \text{ }^\circ\text{C}} \right)$	3,88	4,18
$\mu(Pa \cdot s)$	$9,15 \times 10^{-3}$	$1,002 \times 10^{-3}$
$k \left(\frac{W}{m \text{ }^\circ\text{C}} \right)$	0,5691	0,598
Pr	Se calcula más adelante	Se calcula más adelante
$Rd \left(\frac{m^2 \text{ }^\circ\text{C}}{W} \right)$	0,002	0,002
$Qm \left(\frac{kg}{s} \right)$	0,1476	0,1476
$T_{ingresa} (C)$	81,95	94
$T_{salida} (C)$	92	Se calcula más adelante

Para conocer el calor necesario que debe recibir el producto se aplica la ecuación 2.32 de diseño de procesos térmicos, con lo que se obtiene lo siguiente:

$$Q_{diseño} = U_D A_{tc\ diseño} \Delta T_v \quad (2.32)$$

$$Q_{jugo} = (mc_p \Delta T)_{jugo}$$

$$Q_{jugo} = \left(0,1476 \frac{kg}{s}\right) \left(3,88 \frac{kJ}{kg\ C}\right) (92\ ^\circ C - 81,95\ ^\circ C)$$

$$Q_{jugo} = 5,768 \frac{KJ}{s}$$

$$Q_{jugo} = 5,768\ KW$$

Se realiza una igualdad de proceso debido a que el calor que necesita el jugo es el mismo valor del calor que necesita entregar el fluido de calentamiento, por lo que podemos aplicar la siguiente ecuación para obtener este resultado

$$Q_{requerido\ del\ jugo} = Q_{entrega\ el\ agua}$$

$$5,768\ KW = Q_{entrega\ el\ agua}$$

$$5,768\ KW = (mc_p \Delta T)_{agua}$$

$$5,768\ KW = \left(0,5 \frac{kg}{s}\right) \left(4,18 \frac{kJ}{kg\ C}\right) (\Delta T)$$

$$\Delta T_{agua} = \frac{5,768\ KW}{\left(0,5 \frac{kg}{s}\right) \left(4,18 \frac{kJ}{kg\ C}\right)}$$

$$\Delta T_{agua} = 2,76\ C$$

$$t_{f\ agua} = T_{o\ agua} - \Delta T_{agua}$$

$$t_{f\ agua} = 94\ ^\circ C - 2,76\ ^\circ C$$

$$t_{f\ agua} = 91,24\ ^\circ C$$

Una vez obtenido el valor de la temperatura real final con la que sale el agua a utilizar, es necesario determinar las relaciones de temperaturas entre el jugo de pulpa de cacao con el agua para poder calcular el valor de la diferencia media logarítmica de temperatura (MLDT). La tabla 3.2 indica el flujo contracorriente que tendrán el fluido de servicio y el de proceso.

Tabla 3.2 Relaciones de flujo para cálculo de MLDT zona de calentamiento [Elaboración propia]

<i>Jugo</i>	$T_{ingresa}$	→	T_{salida}
<i>Agua</i>	T_{salida}	←	$T_{ingresa}$

La tabla 3.3 nos indica las diferencias de temperatura en los extremos del proceso que se utilizarán para el cálculo de MLDT.

Tabla 3.3 Datos de temperaturas para el cálculo de MLDT zona de calentamiento [Elaboración propia]

<i>Jugo</i>	$T_{ingresa}$	→	T_{salida}
	81,95 °C		92 °C
<i>Agua</i>	T_{salida}	←	$T_{ingresa}$
	91,24 °C		94 °C
<i>Total</i>	$\Delta T = 9,29\text{ °C}$		$\Delta T = 2\text{ °C}$

Se define como ΔT_2 a la mayor razón de diferencias de temperaturas y como ΔT_1 a la menor de ellas, la denominación de estas variables es de suma importancia para poder conocer el valor de MLDT, con la ayuda de la ecuación 2.20

$$\Delta T_2 > \Delta T_1$$

$$\Delta T_2 = 9,29\text{ °C}$$

$$\Delta T_1 = 2\text{ °C}$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (2.20)$$

$$MLDT = \frac{9,29\text{ °C} - 2\text{ °C}}{\ln\left(\frac{9,29\text{ °C}}{2\text{ °C}}\right)}$$

$$MLDT = 4,75\text{ °C}$$

En arreglos de tuberías la diferencia media logarítmica de temperatura se puede asumir que es el mismo valor que la diferencia real de temperatura, ecuación 2.20

$$MLDT = \Delta T_v \quad (2.20)$$

$$\Delta T_v = 4,75\text{ °C}$$

$$Q = U_D A_{tc} \Delta T_v \quad (2.32)$$

Se necesita conocer el valor de U_D para encontrar el valor de U_c , para esto se necesita conocer la dimensión real de las tuberías utilizadas en el intercambiador de calor; al utilizar tuberías de 2 pulgadas IPS cedula 40 para el tubo interior, por el cual va a fluir el jugo de pulpa de cacao y tuberías de 3 pulgadas IPS cedula 40 para el tubo exterior por donde pasara el agua. La tabla 3.4 nos indica las medidas reales de diámetros externos e internos según el tamaño nominal de una tubería.

Tabla 3.4 Dimensiones de tuberías [CEDIPSA, s.f.]

Tamaño nominal <i>inch</i>	Diámetro externo (<i>m</i>)	Diámetro interno (<i>m</i>)	Área de flujo m^2
2	0.0604	0.0525	0.00021
3	0.0889	0.0779	0.00059

Para calcular el valor de la entalpia (h) del jugo de cacao, es necesario tener definido el flujo másico dentro del intercambiador, el área por donde fluiría el jugo; la densidad y el diámetro equivalente del tubo interno del intercambiador y por donde pasará el jugo. Para esto se emplearán las ecuaciones de Reynolds, 2.23, la cual relaciona todas las variables ya mencionadas.

$$h_{jugo}$$

$$Re_{jugo} = \frac{Q m_{jugo} D_{eq_{jugo}}}{\mu_{jugo} A_{flujo_{jugo}}} \quad (2.23)$$

$$\dot{Q} = 0,1476 \frac{kg}{s}$$

$$A_{flujo} = 0,00021 m^2$$

$$\mu_{jugo} = 9,15 \times 10^{-3} Pa \cdot s$$

$$D_{eq} = D_{Interno de tubo interno}$$

$$D_{Interno tubo interno} = 0.0525 m$$

$$D_{eq} = 0.0525 m$$

$$Re_{jugo} = \frac{\left(0,1476 \frac{kg}{s}\right) (0,0525 m)}{(9,15 \times 10^{-3} Pa s) (0.0021 m^2)}$$

$$Re_{jugo} = 391,96$$

$$Nu_{jugo} = 0,023 Re_{jugo}^{0,8} Pr_{jugo}^{\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

$$Pr_{jugo} = \frac{c_{p_{jugo}} \cdot \mu_{jugo}}{k_{jugo}} \quad (2.24)$$

$$Pr_{jugo} = \frac{\left(3,88 \frac{kJ}{kg \cdot C}\right) (9,15 \times 10^{-3} Pa \cdot s)}{\left(0,5691 \frac{W}{m \cdot C}\right)}$$

$$Pr_{jugo} = 62,50$$

Como el valor del número de Reynolds presenta un valor de Flujo Laminar, el número de Nusselt del jugo se calcula con la ecuación 2.25:

$$Nu = 1,86 * (Re * Pr * \frac{De}{L})^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (2.25)$$

Donde:

De : Diametro equivalente.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

μ_w : Viscosidad del medio convectivo en la pared de la tubería.

L : Dimensión característica de la superficie, longitud del tubo (5,8 m).

Debido a que la relación $\frac{\mu}{\mu_w}$ es cercana a 1, y a ese factor se le considera el bajo exponente de 0,14, la expresión completa de $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$ se puede simplificar como 1, reduciendo la ecuación a la expresión 2.25

$$Nu = 1,86 * (Re * Pr * \frac{De}{L})^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$Nu_{jugo} = 1,86 \left(391,958 * 62,50 * \frac{0,0525}{5,8}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Con la ayuda de la ecuación 2.25 se obtuvo el valor experimental del número de Nusselt del jugo, valor que nos sirve para calcular la entalpia del producto a calentar:

$$Nu_{jugo} = 137,489$$

Con la ecuación 2.28 se obtiene el valor de la entalpia del jugo (h_{jugo})

$$h_{jugo} = \frac{Nu_{jugo} k_{jugo}}{D_{eq} jugo} \quad (2.28)$$

$$h_{jugo} = \frac{(137,489) \left(0,5691 \frac{W}{m C} \right)}{(0,0525 m)}$$

$$h_{jugo} = 1490,516 \frac{W}{m^2 C}$$

$$h_i = h_{jugo}$$

$$h_{io} = h_i \left(\frac{D_i}{D_o} \right)$$

$$h_{io} = \left(1490,516 \frac{W}{m^2 C} \right) \left(\frac{0,0525 m}{0,0604 m} \right)$$

$$h_{io} = 1294,494 \frac{W}{m^2 C}$$

$$h_{agua}$$

$$h_{agua} \rightarrow \text{anulo}$$

$$D_{eq} = \frac{(D_2^2 - D_1^2)}{D_1}$$

$$D_2 = D_{\text{interno tubo exterior}}$$

$$D_2 = 0,0779 m$$

$$D_1 = D_{\text{externo tubo interior}}$$

$$D_1 = 0,060 m$$

$$D_{eq} = \frac{(0,077 m)^2 - (0,060 m)^2}{0,060 m}$$

$$D_{eq} = 0,040 m$$

$$A_{\text{flujo agua}} = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}$$

$$A_{\text{flujo agua}} = \frac{\pi(0,077)^2 - (0,060)^2}{4}$$

$$A_{\text{flujo agua}} = 0,00189 m^2$$

$$Re_{agua} = \frac{Q_{m\ agua} D_{eq\ agua}}{\mu_{agua} A_{flujo\ agua}}$$

$$Re_{agua} = \frac{(0,5 \frac{kg}{s})(0,040\ m)}{(1,002 \times 10^{-3}\ Pa\ s)(0,0018\ m^2)} \quad (2.23)$$

$$Re_{agua} = 10509,97$$

$$Nu_{agua} = 0,023 Re_{agua}^{0,8} Pr_{agua}^{1/3} \quad (2.26)$$

$$Pr_{agua} = \frac{c_{p\ agua} \cdot \mu_{agua}}{k_{agua}} \quad (2.24)$$

$$Pr_{agua} = \frac{(4,18 \frac{kJ}{kg\ C})(1,002 \times 10^{-3}\ Pa\ s)}{(0,598 \frac{W}{m\ C})}$$

$$Pr_{agua} = 7,0039$$

Como se obtuvo un flujo turbulento, con un $Re_{agua} > 2100$ se utiliza la ecuación 2.26:

$$Nu_{agua} = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

$$Nu_{agua} = 0,023 (10509,97)^{0,8} (7,0039)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{agua} = 72,575$$

Para la obtención de la entalpia del agua se utiliza la ecuación 2.28:

$$h_{agua} = \frac{Nu_{agua} k_{agua}}{D_{eq\ agua}} \quad (2.28)$$

$$h_{agua} = \frac{(72,575)(0,67 \frac{W}{m\ C})}{0,040\ m}$$

$$h_{agua} = 1084,948 \frac{W}{m^2\ C}$$

$$h_{agua} = h_o$$

Teniendo los valores de las entalpias de los fluidos de las fronteras, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor limpio (U_c) con la ecuación 2.30

$$U_c = \frac{h_{i0} h_o}{h_{i0} + h_o} \quad (2.30)$$

$$U_c = \frac{\left(1294,49 \frac{W}{m^2 C}\right) \left(1084,948 \frac{W}{m^2 C}\right)}{1294,49 \frac{W}{m^2 C} + 1084,948 \frac{W}{m^2 C}}$$

$$U_c = 590,24 \frac{W}{m^2 C}$$

Para el Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor Global se utiliza la ecuación 2.31

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + R_{d_{jugo}} + R_{d_{agua}} \quad (2.31)$$

Donde los parámetros R_d corresponden a factores de incrustaciones y representa la resistencia térmica generada por la incrustación en el material. Debido a que no hay datos sobre el factor de incrustación del Jugo de Pulpa de Cacao en Intercambiadores, se asumirá un valor igual al del agua.

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{590,25 \frac{W}{m^2 C}} + 0,002 \frac{m C}{W} + 0,002 \frac{m C}{W}$$

$$\frac{1}{U_D} = 0,00569 \frac{m C}{W}$$

$$U_D = 175,617 \frac{mC}{W}$$

$$Q = U_D A_{tc} \Delta T_v \quad (2.32)$$

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{Q}{U_D \Delta T_v}$$

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{18,367 \text{ kW}}{\left(175,617 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (4,75 \text{ } ^\circ C)}$$

$$A_{tc} = 6,92 \text{ m}^2$$

$$A_{tc} = \pi D_o L$$

$$L = \frac{A_{tc}}{\pi D_o}$$

$$D_o = 0,060 \text{ m}$$

$$L = \frac{6,92 \text{ m}^2}{\pi 0,060452 \text{ m}}$$

$$L = 36,44 \text{ m}$$

$$\text{Numero de tuberías} = \frac{L_{\text{calculado}}}{\text{longitud}_{\text{tuberías}}}$$

Las tuberías de grado inoxidable tienen una longitud nominal de 5,8 metros, por lo que:

$$\text{Numero de tuberías} = \frac{36,44 \text{ m}}{5,8 \text{ m}}$$

$$\text{Numero de tuberías} = 6,28$$

$$\text{Numero de tuberías} \approx 7$$

$$\% \text{ Sobrediseño} = \frac{7 \times 100 \%}{6,28}$$

$$\% \text{ Sobrediseño} = 111,42 \%$$

Un porcentaje de sobre diseño de hasta el 15 % es admitido en proceso de calentamiento, ya que siempre existirán pérdidas que no se consideran en el diseño, como la transferencia de calor al medio ambiente, mayores factores de incrustación, etc.

3.5.3 Zona de Regeneración.

Como se planteó, el fluido ya pasteurizado que sale del tubo de retención se utiliza para precalentar el fluido frío que se encuentra a 25 °C, esto con el fin de reducir la capacidad requerida del equipo, tanto en suministrar calor, tubería, retiro de calor al fluido ya pasteurizado, que se transforma en un costo adicional en caso de no realizar la regeneración. En la tabla 3.5 se presenta el conjunto de Datos para el proceso de regeneración del sistema, aprovechando la energía del fluido que sale del tubo de retención. Para el cálculo de las propiedades de calor específico y conductividad del jugo de pulpa de cacao, se utilizaron las ecuaciones de Choi y Okos (1986) con temperatura de 90 °C para determinarlos, que corresponden a las ecuaciones de 2.9 a la 2.13 para el cálculo de la capacidad

calorífica (C_p) y de la 2.14 a la 2.18 para el cálculo de la conductividad (k).
Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.5 Tabla de datos para realizar la regeneración del proceso térmico [Elaboración propia]

Datos	Jugo sin Pasteurizar	Jugo Pasteurizado
$c_p \left(\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right)$	3,88	3,86
$\mu (Pa \cdot s)$	$9,15 \times 10^{-3}$	$9,15 \times 10^{-3}$
$k \left(\frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right)$	0,5691	0,6329
Pr	Se calcula más Adelante	Se calcula más Adelante
$Rd \left(\frac{m^2 C}{W} \right)$	0,002	0,002
$Qm \left(\frac{kg}{s} \right)$	0,1476	0,1476
$T_{ingresa} (^\circ C)$	25	90
$T_{salida} (^\circ C)$	81,95	Se calcula más adelante

Para conocer el calor necesario que debe recibir el producto se aplica la ecuación 2.32 de igual manera que se aplicó en el cálculo de pasteurización:

$$Q_{diseño} = U_D A_{tc \text{ diseño}} \Delta T_v \quad (2.32)$$

$$Q_{jugo \text{ sin pasteurizar}} = (mc_p \Delta T)_{jugo}$$

$$Q_{jugo \text{ sin pasteurizar}} = \left(0,1476 \frac{kg}{s} \right) \left(3,88 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right) (81,95 \text{ } ^\circ C - 25 \text{ } ^\circ C)$$

$$Q_{jugo \text{ sin pasteurizar}} = 32,69 \frac{KJ}{s}$$

$$Q_{jugo \text{ sin pasteurizar}} = 32,69 \text{ KW}$$

Se realiza una igualdad de proceso debido a que el calor que necesita el jugo es el mismo valor del calor que necesita entregar el fluido de calentamiento, por lo que podemos aplicar la ecuación 2.32 para obtener este resultado

$$Q_{requerido\ del\ jugo} = Q_{entrega\ jugo\ pasteurizado}$$

$$32,69\ KW = Q_{entrega\ jugo\ pasteurizado}$$

$$32,69\ KW = (mc_p\Delta T)_{agua}$$

$$32,69\ KW = \left(0,1476\ \frac{kg}{s}\right)\left(3,86\ \frac{kJ}{kg\ C}\right)(\Delta T)$$

$$\Delta T_{jugo\ pasteurizado} = \frac{32,69\ KW}{\left(0,1476\ \frac{kg}{s}\right)\left(3,86\ \frac{kJ}{kg\ C}\right)}$$

$$\Delta T_{pasteurizado} = 57,27\ C$$

$$t_{f\ agua} = T_{o\ agua} - \Delta T_{agua}$$

$$t_{f\ agua} = 90\ C - 57,27\ ^\circ C$$

$$t_{f\ agua} = 32,72\ ^\circ C$$

Una vez obtenido el valor de la temperatura real final con la que sale el jugo a pasteurizar, es necesario determinar las relaciones de temperaturas entre el jugo de pulpa de cacao pasteurizado con el jugo de pulpa por pasteurizar para poder calcular el valor de la diferencia media logarítmica de temperatura (MLDT). El tipo de flujo contracorriente del sistema es el mismo que se mostró en la tabla 3.2, mientras que la tabla 3.6 indica las diferencias de temperatura en los extremos del sistema.

Tabla 3.6 Datos de las temperaturas para cálculo de MLDT zona de regeneración [Elaboración propia]

<i>Jugo sin pasteurizar</i>	$T_{ingresa}$	→	T_{salida}
	25 °C		81,95 °C
<i>Jugo pasteurizado</i>	T_{salida}	←	$T_{ingresa}$
	32,72 °C		90 °C
<i>Total</i>	$\Delta T = 7,72^\circ C$		$\Delta T = 8,05^\circ C$

Usaremos la ecuación 2.20 para determinar el MLDT.

$$\Delta T_2 > \Delta T_1$$

$$\Delta T_2 = 8,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 7,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (2.20)$$

$$MLDT = \frac{8,05 \text{ } ^\circ\text{C} - 7,72 \text{ } ^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{8,05 \text{ } ^\circ\text{C}}{7,72 \text{ } ^\circ\text{C}}\right)}$$

$$MLDT = 7,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De igual manera con uso de la Ecuación 2.20 se estima el ΔT_v

$$MLDT = \Delta T_v \quad (2.20)$$

$$\Delta T_v = 7,89^\circ\text{C}$$

$$Q = U_D A_{tc} \Delta T_v \quad (2.32)$$

Usando el mismo procedimiento que en la parte de calentamiento,

$$h_{\text{jugo frio}}$$

$$Re_{\text{jugo frio}} = \frac{Q_{m \text{ jugo frio}} D_{eq \text{ jugo frio}}}{\mu_{\text{jugo frio}} A_{\text{flujo jugo}}} \quad (2.23)$$

$$\dot{Q} = 0,1476 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$A_{\text{flujo}} = 0,00021 \text{ m}^2$$

$$\mu_{\text{jugo}} = 9,15 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$D_{eq} = D_{\text{Interno de tubo interno}}$$

$$D_{\text{Interno tubo interno}} = 0.0525 \text{ m}$$

$$D_{eq} = 0.0525 \text{ m}$$

$$Re_{\text{jugo}} = \frac{\left(0,1476 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) (0,0525 \text{ m})}{(9,15 \times 10^{-3} \text{ Pa s})(0.0021 \text{ m}^2)}$$

$$Re_{\text{jugo}} = 391,96$$

$$Nu_{jugo} = 0,023 Re_{jugo}^{0,8} Pr_{jugo}^{\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

$$Pr_{jugo} = \frac{Cp_{jugo} \cdot \mu_{jugo}}{k_{jugo}} \quad (2.24)$$

$$Pr_{jugo} = \frac{\left(3,88 \frac{kJ}{kg \cdot C}\right) (9,15 \times 10^{-3} Pa \cdot s)}{\left(0,5691 \frac{W}{m \cdot C}\right)}$$

$$Pr_{jugo} = 62,50$$

Como el valor del número de Reynolds presenta un valor de Flujo Laminar, el Numero de Nusselt del jugo se calcula con la ecuación 2.25:

$$Nu = 1,86 * (Re * Pr * \frac{De}{L})^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$Nu_{jugo} = 1,86 (391,958 * 62,50 * \frac{0,0525}{5,8})^{\frac{1}{3}}$$

Nusselt del Jugo:

$$Nu_{jugo} = 137,489$$

Entalpia del Jugo

$$h_{jugo} = \frac{Nu_{jugo} k_{jugo}}{Deq_{jugo}} \quad (2.28)$$

$$h_{jugo} = \frac{(137,489) \left(0,5691 \frac{W}{m \cdot C}\right)}{(0,0525 m)}$$

$$h_{jugo} = 1490,516 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$h_i = h_{jugo}$$

$$h_{io} = h_i \left(\frac{D_i}{D_o}\right)$$

$$h_{io} = \left(1490,516 \frac{W}{m^2 \cdot C}\right) \left(\frac{0,0525 m}{0,0604 m}\right)$$

$$h_{io} = 1294,494 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$h_{\text{jugo pasteurizado}}$

$h_{\text{jugo pasteurizado}} \rightarrow \text{anulo}$

$$D_{eq} = \frac{(D_2^2 - D_1^2)}{D_1}$$

$$D_2 = D_{\text{interno tubo exterior}}$$

$$D_2 = 0,0779 \text{ m}$$

$$D_1 = D_{\text{externo tubo interior}}$$

$$D_1 = 0,060 \text{ m}$$

$$D_{eq} = \frac{(0,077 \text{ m})^2 - (0,060 \text{ m})^2}{0,060 \text{ m}}$$

$$D_{eq} = 0,040 \text{ m}$$

$$A_{\text{flujo jugo pasteurizado}} = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}$$

$$A_{\text{flujo jugo pasteurizado}} = \frac{\pi(0,077)^2 - (0,060)^2}{4}$$

$$A_{\text{flujo jugo pasteurizado}} = 0,00189 \text{ m}^2$$

$$Re_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{Q_{\text{m agua}} D_{eq \text{ agua}}}{\mu_{\text{agua}} A_{\text{flujo agua}}} \quad (2.23)$$

$$Re_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{\left(0,1476 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) (0,040 \text{ m})}{(9,15 \times 10^{-3} \text{ Pa s}) (0,0018 \text{ m}^2)}$$

$$Re_{\text{jugo pasteurizado}} = 339,84$$

$$Nu_{\text{jugo pasteurizado}} = 0,023 Re_{\text{agua}}^{0,8} Pr_{\text{agua}}^{1/3} \quad (2.26)$$

$$Pr_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{Cp_{\text{jugo pasteurizado}} \cdot \mu_{\text{jugo pasteurizado}}}{k_{\text{jugo pasteurizado}}} \quad (2.24)$$

$$Pr_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{\left(3,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg C}}\right) (9,15 \times 10^{-3} \text{ Pa s})}{\left(0,632 \frac{\text{W}}{\text{m C}}\right)}$$

$$Pr_{\text{jugo pasteurizado}} = 55,89$$

Como se obtuvo un flujo laminar, con un $Re_{\text{agua}} > 2100$ se utiliza la ecuación 2.25:

$$Nu = 1,86 * (Re * Pr * \frac{De}{L})^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$Nu_{\text{jugo pasteurizar}} = 1,86 (339,84 * 55,89 * \frac{0,0525}{5,8})^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{\text{jugo pasteurizado}} = 9,45$$

Para la obtención de la entalpia del agua:

$$h_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{Nu_{\text{jugo pasteurizado}} k_{\text{jugo pasteurizado}}}{De_{\text{jugo pasteurizado}}} \quad (2.28)$$

$$h_{\text{jugo pasteurizado}} = \frac{(9,45) (0,632 \frac{W}{m C})}{0,040 m}$$

$$h_{\text{jugo pasteurizado}} = 149,46 \frac{W}{m^2 C}$$

$$h_{\text{agua}} = h_o$$

Teniendo los valores de las entalpias de los fluidos de las fronteras, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor limpio (U_c).

$$U_c = \frac{h_{i0} h_o}{h_{i0} + h_o} \quad (2.30)$$

$$U_c = \frac{(1294,49 \frac{W}{m^2 C}) (149,46 \frac{W}{m^2 C})}{1294,49 \frac{W}{m^2 C} + 149,46 \frac{W}{m^2 C}}$$

$$U_c = 133,99 \frac{W}{m^2 C}$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor global

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + Rd_{\text{jugo}} + Rd_{\text{agua}} \quad (2.31)$$

Donde los parámetros R_d corresponden a factores de incrustaciones y representa la resistencia térmica generada por la incrustación en el material. Debido a que no hay datos sobre el factor de incrustación del jugo de pulpa de cacao en intercambiadores, se asumirá un valor igual al del agua.

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{133,99} \frac{W}{m^2 C} + 0,002 \frac{m C}{W} + 0,002 \frac{m C}{W}$$

$$\frac{1}{U_D} = 0,011 \frac{m C}{W}$$

$$U_D = 87,235 \frac{mC}{W}$$

$$Q = U_D A_{tc} \Delta T_v \quad (2.32)$$

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{Q}{U_D \Delta T_v}$$

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{32,69 \text{ kW}}{\left(87,235 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (7,89 \text{ } ^\circ C)}$$

$$A_{tc} = 47,51 \text{ m}^2$$

$$A_{tc} = \pi D_o L$$

$$L = \frac{A_{tc}}{\pi D_o}$$

$D_o = 0,060452 \text{ m}$ que corresponde al diámetro exterior de la tubería interna.

$$L = \frac{47,50 \text{ m}^2}{\pi 0,060452 \text{ m}}$$

$$L = 250,14 \text{ m}$$

$$\text{Numero de tuberias} = \frac{L_{\text{calculado}}}{\text{lonngitud}_{\text{tuberias}}}$$

Las tuberías de grado inoxidable tienen una longitud nominal de 5,8 metros, por lo que:

$$\text{Numero de tuberías} = \frac{250,14 \text{ m}}{5,8 \text{ m}}$$

$$\text{Numero de tuberías} = 43,12$$

$$\text{Numero de tuberías} \approx 44$$

$$\% \text{ Sobrediseño} = \frac{44 \times 100 \%}{43,12}$$

$$\% \text{ Sobrediseño} = 102,02 \%$$

3.5.4 Tubo de Retención.

Para obtener un valor de 5D de eliminación de la polifenoloxidasas, a 70 °C se necesitarían 1500 segundos, por lo que se requiere calcular el nuevo tiempo de pasteurización del proceso (F_T) a 90 °C con la ayuda de la ecuación 2.36. Debido a que se pierde un poco de temperatura al salir el fluido del calentamiento (92 °C), se lo considera con una temperatura de 90°C.

$$F_{T2} = 10^{\left(\frac{T_1 - T_2}{Z}\right)} * F_{T1} \quad (2.36)$$

Donde:

F_{T2} : Valor de tiempo de pasteurización buscado

F_{T1} : Valor de tiempo de pasteurización conocido

T_2 : Temperatura a la que se desea efectuar el tratamiento

T_1 : Temperatura de referencia para el tratamiento Térmico ($5 * D_{Polifenoloxidasas \text{ a } 70^\circ\text{C}}$)

Z : Valor Z de la enzima o microorganismo más termorresistente.

En la tabla 3.7 se encuentran los parámetros de tiempo de reducción decimal y temperatura requerida para reducir a un 10 % el tiempo de reducción decimal.

Tabla 3.7 Parámetros del agente más termorresistente [Elaboración propia]

Parámetro	Valor
$D_{Polifenoloxidasas \text{ a } 70^\circ\text{C}}$	300 s
$Z_{Polifenoloxidasas}$	7,8 °C
T_2	90 °C
T_1	70 °C

$$F_{T2} = 10^{\left(\frac{70 - 90}{7,8}\right)} * (5 * 300)$$

$$F_{T2} = 4,09 \text{ s}$$

En base al flujo másico se puede obtener el flujo volumétrico del fluido para después obtener su velocidad lineal.

$$Q = \frac{\dot{Q}}{\rho} \quad (2.37)$$

Donde:

Q : Flujo Volumétrico del Fluido ($\frac{m^3}{s}$)

\dot{Q} : Flujo Másico del Fluido ($\frac{kg}{s}$)

ρ : Densidad del Fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

Donde Obtenemos que

$$Q = \frac{0,1476}{1062,99}$$

$$Q = 0,0001389 \frac{m^3}{s}$$

El área de flujo se mantiene en $0,0021 \text{ m}^2$

Por lo que,

$$V = \frac{Q}{A_f} \quad (2.38)$$

$$V = \frac{0,0001389}{0,0021}$$

$$V = 0,0641 \frac{m}{s}$$

La velocidad de $0,0641 \text{ m/s}$ corresponde a la velocidad promedio dentro del tubo de retención, pero para el cálculo de distancia se utiliza el valor máximo de velocidad, donde esta es:

$$V_{max} = 2V_{prom} \quad (2.39)$$

Para la obtención de la distancia, se aplica la ecuación:

$$d = V * t \quad (2.40)$$

Donde:

d : Distancia Recorrida

V : Velocidad del Fluido

t : Tiempo Requerido para Pasteurizar el fluido, por lo que es igual a F_{T2}

$$d = (0,1283)(4,09)$$

$$d = 0,525 \text{ m}$$

Para aumentar el efecto de la pasteurización del jugo de pulpa de cacao y asegurar aún más la inocuidad del producto se decide incrementar de 0,525 metros a una longitud de 1 metro de tubo de retención.

$$d = 1,00 \text{ m}$$

3.5.5 Zona de Enfriamiento

La tabla 3.8 presenta los datos requeridos para la zona de enfriamiento.

Tabla 3.8 Tabla de datos para parte de enfriamiento [Elaboración propia]

Datos	Jugo	Agua
$c_p \left(\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right)$	3,88	4,18
$\mu(Pa \cdot s)$	$9,15 \times 10^{-3}$	$1,002 \times 10^{-3}$
$k \left(\frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right)$	0,5691	0,598
Pr	62,5	7,003
$Rd \left(\frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W} \right)$	0,002	0,002
$Qm \left(\frac{kg}{s} \right)$	0,1476	0,50
$T_{ingresa} (C)$	90	23
$T_{salida} (C)$	25	<i>Se calcula mas adelante</i>
$U_D \left(\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right)$	175,617	

De la misma manera que se aplicaron los cálculos pertinentes para obtener el resultado de la parte de calentamiento, se realizar los cálculos para obtener los parámetros de enfriamiento.

$$Q = U_D A_{tc} \Delta T_v$$

$$Q_{jugo} = (mc_p \Delta T)_{jugo}$$

$$Q_{\text{jugo}} = \left(0,1476 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(3,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) (32,72 ^\circ\text{C} - 25 ^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{jugo}} = -4,43 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{jugo}} = -4,43 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{requerido del jugo}} = Q_{\text{entrega el agua}}$$

$$-4,43 \text{ kW} = (QmCp\Delta T)_{\text{agua}}$$

$$-4,43 \text{ kW} = \left(0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) (\Delta T)$$

$$\Delta T_{\text{agua}} = -\frac{4,43 \text{ kW}}{\left(0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right)}$$

$$\Delta T_{\text{agua}} = 2,12 ^\circ\text{C}$$

$$t_{f \text{ agua}} = T_o + \Delta T$$

$$t_{f \text{ agua}} = 23 ^\circ\text{C} + (2,12 ^\circ\text{C})$$

$$t_{f \text{ agua}} = 25,12 ^\circ\text{C}$$

Una vez obtenido el valor de la temperatura real final con la que sale el agua a utilizar, es necesario determinar las relaciones de temperaturas entre el jugo de pulpa de cacao con el agua para poder calcular el valor de la diferencia media logarítmica de temperatura (MLDT). La tabla 3.9 indica los valores de las diferencias de temperaturas a los extremos del proceso.

Tabla 3.9 Valores de temperaturas para el cálculo de MLDT zona de pre enfriamiento [Elaboración propia]

<i>Jugo</i>	<i>T</i> _{ingresa}	→	<i>T</i> _{salida}
	32,72		25
<i>Agua</i>	<i>T</i> _{salida}	←	<i>T</i> _{ingresa}
	25,12		23
<i>Total</i>	$\Delta T = 7,60 ^\circ\text{C}$		$\Delta T = 2 ^\circ\text{C}$

$$\Delta T_2 > \Delta T_1$$

$$\Delta T_2 = 7,605 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$MLDT = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$MLDT = \frac{(7,60 \text{ } ^\circ\text{C} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{7,60 \text{ } ^\circ\text{C}}{2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right)}$$

$$MLDT = 4,19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como se conoce el valor de U_D del proceso de calentamiento, procedemos a reemplazar y despejar la ecuación del Área de Transferencia de Calor.

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{Q}{U_D \Delta T_v}$$

$$A_{tc \text{ diseño}} = \frac{4,43 \text{ kW}}{\left(175,617 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (4,19 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

$$A_{tc} = 6,02 \text{ m}^2$$

$$A_{tc} = \pi D_o L$$

$$L = \frac{A_{tc}}{\pi D_o}$$

$$D_o = 0,060 \text{ m}$$

$$L = \frac{6,02 \text{ m}^2}{\pi 0,060452 \text{ m}}$$

$$L = 31,69 \text{ m}$$

$$\text{Numero de tuberías} = \frac{L_{\text{calculado}}}{\text{longitud}_{\text{tuberías}}}$$

Las tuberías de grado inoxidable tienen una longitud nominal de 5,8 metros, por lo que:

$$\text{Numero de tuberías} = \frac{31,69 \text{ m}}{5,8 \text{ m}}$$

$$\text{Numero de tuberías} = 5,46$$

Numero de tuberías ≈ 6

$$\% \text{ Sobrediseño} = \frac{6 \times 100 \%}{5,46}$$

$$\% \text{ Sobrediseño} = 103,41 \%$$

La zona de enfriamiento logra el descenso de temperatura deseado en el producto a 25 °C con un porcentaje de sobre diseño de 103,41 %, es importante sobre diseñar el intercambiador ya que el fluido de servicio puede tener intercambio de temperatura con el medio ambiente, esto puede incrementar su temperatura afectando al rendimiento del proceso de enfriado. Cabe resaltar la temperatura de ingreso de agua requerida, que es de solo 23 °C, en ciertas zonas del país no se requerirá un banco de frío para alcanzar esa temperatura, si no que la misma agua que proviene de la tubería de agua potable se encuentra en muchas ocasiones a esa temperatura o inferior, significando un ahorro importante ya que no se necesitaría de un equipo para enfriar el fluido de servicio.

3.6 Resumen de Resultados

3.6.1 Caracterización fisicoquímica

Tabla 3.10 Resumen de resultados de caracterización fisicoquímica [Elaboración propia]

Análisis físico químico	Método	Resultado	Unidad
pH	Medidor de pH	3,6	-
Densidad	-	1,03	g/ml
% Humedad	NTE INEN 49	90,08	Porcentaje
Cenizas	NTE INEN 401:2013	0,52	Porcentaje

Tabla 3.11 Composición final del jugo de pulpa de cacao [Elaboración propia]

Composición	Porcentajes Pulpa de Cacao	Porcentaje de Pulpa de Cacao en el Jugo	Porcentajes Agua	Porcentaje de Agua en el Jugo	Composición Final Jugo de Pulpa de Cacao
Agua	82,84%	65%	100%	35%	88,85%
Proteína	0,78%		0		0,507%
Grasa	0%		0		0,00%
Carbohidrato	15,83%		0		10,29%
Ceniza	0,55%		0		0,3575%

De acuerdo con las tablas 3.10 y 3.11 el jugo de pulpa es un medio acuoso con nutrientes, lo que ocasiona que la proliferación de microorganismos que resisten pH ácidos suceda de manera muy rápida, pudiendo ocasionar serios problemas en la salud humana de no realizar un tratamiento para eliminar dichos microorganismos.

3.6.2 Resultados del diseño térmico

Para poder realizar el diseño térmico del proceso de pasteurización es necesario conocer los valores de las propiedades de transferencia de calor del jugo de cacao; las cuales se resumen en la tabla 3.12; una vez definidos y calculados se puede dar paso a determinar los parámetros de tiempo, temperatura, longitud de tuberías y número de las mismas.

Tabla 3.12 Propiedades de transferencia de calor [Elaboración propia]

Propiedad de transferencia de calor del jugo de cacao	Resultado	Unidad
Densidad total	1062,99	Kg/m ³
Calor específico	3,8878	J/g °C
Conductividad	0,2070	W/m °C

En la figura 3.3, se presenta un esquema del diseño térmico realizado, donde se indica las temperaturas de ingreso del fluido de servicio y de proceso. Como zona de control se implementa un termómetro a la salida del tubo de retención para determinar que la temperatura de pasteurización fue la adecuada, caso contrario el jugo de pulpa de cacao no ingresa a la zona de regeneración si no que retorna al calentamiento hasta alcanzar la temperatura deseada para su pasteurización

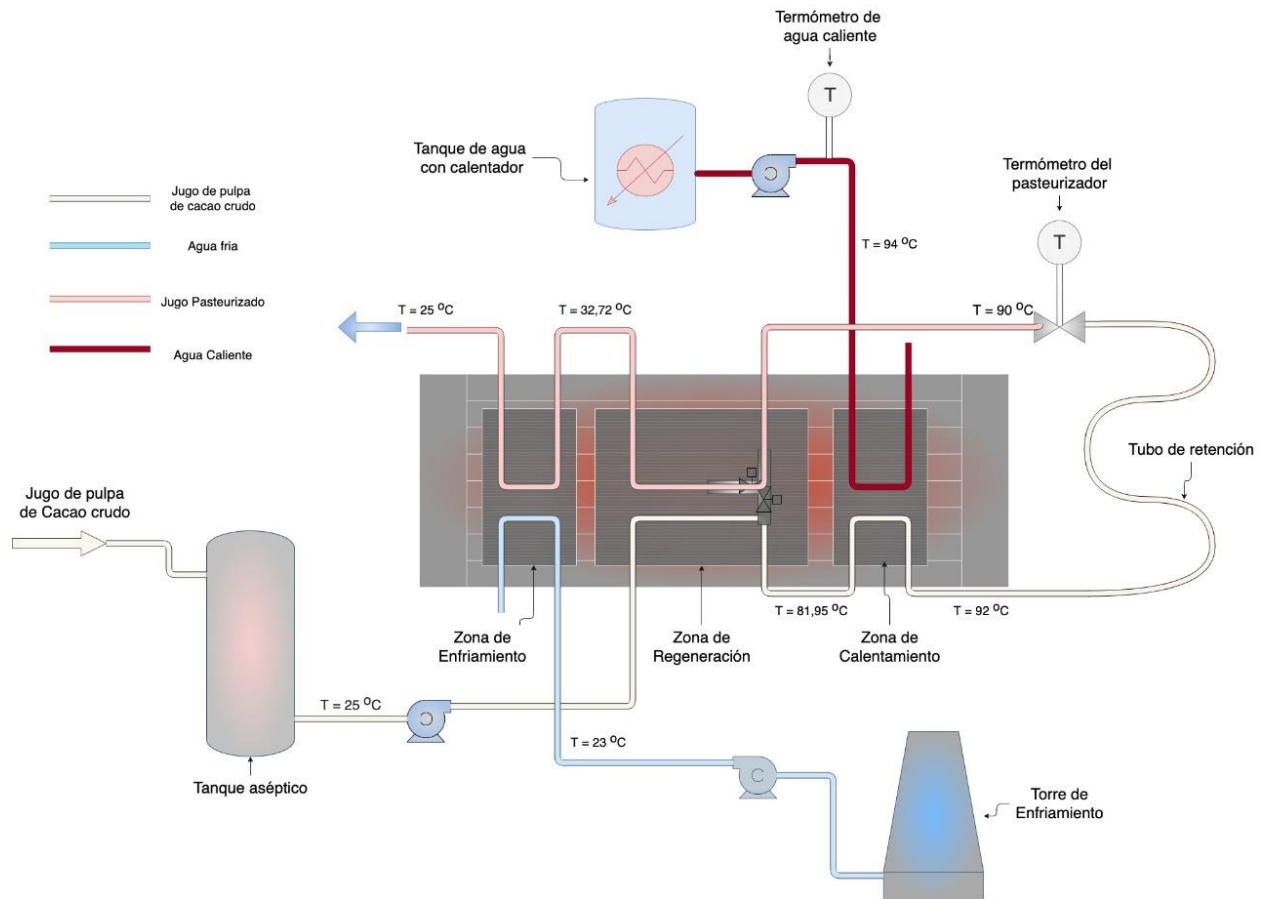


Figura 3.3 Esquema del proceso de pasteurización de pulpa de cacao [Elaboración propia]

Tabla 3.13 Resumen resultados del diseño de proceso térmico [Elaboración propia]

Propiedad	Resultado Calentamiento	Resultado Regeneración de Calor	Resultado Enfriamiento	Unidad
Calor requerido del jugo	5,77	32,69	-4,43	KJ/s
Temperatura de Ingreso del agua	94	-	23	°C
MLDT	4,75	7,72	7,60	°C
Uc	590,25	133,99	590,245	W/m ² °C
Ud	175,62	87,23	175,62	m °C/W
Área de transferencia de calor del diseño	6,92	47,50	4,4	m ²
Numero de tuberías	7	44	6	Tuberías cedula 40
% sobre diseño	11,42	2,02	9,81	%

La tabla 3.13 es un resumen de los resultados obtenidos para realizar el diseño del proceso térmico, en total se necesitaría 57 tubos de acero inoxidable grado 304 más el 1 metro de longitud que conlleva el tubo de retención. Se puede apreciar que la mayor cantidad de tubos está destinado a la zona de regeneración con la finalidad de aprovechar la energía que posee el jugo de pulpa al salir del proceso de calentamiento y aumente de manera significativa la temperatura del jugo de pulpa sin pasteurizar, al mismo tiempo, el jugo de pulpa de cacao pasteurizado logra una reducción importante de su temperatura, por lo que el gasto energético que se requeriría para alcanzar una temperatura ambiente, también se ve reducido. Se aprecia que los porcentajes de sobre diseño están por debajo del 15 % lo cual indica un diseño adecuado del intercambiador de calor.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En base a las características fisicoquímicas del jugo de pulpa de cacao se selecciona un pasteurizador de tubo en tubo, que es un equipo utilizado para fluidos de baja y media viscosidad que afectan de manera proporcional al tipo de flujo dentro de la tubería y por ende inciden en el coeficiente de transferencia de calor.
- Una vez realizada la investigación previa para conocer los posibles agentes deterioradores, se determinó que la enzima PPO es el más termorresistente dado que posee el tiempo de reducción decimal D y Z más elevados, de esta manera al garantizar la eliminación de este agente degradador, se garantiza también la eliminación de cualquier microorganismo patógeno que pueda afectar la seguridad alimentaria del producto.
- Se realizan zonas de regeneración para aprovechar la energía que posee el fluido de servicio a la salida del calentamiento y pre-enfriamiento respectivamente, esto permite hacer al proceso térmico más eficiente y sustentable ya que se requerirá de menor cantidad de fluido de servicio y energía en el proceso térmico.
- Se determinó una longitud necesaria de 0,525 metros en el tubo de retención para que el jugo de pulpa de cacao permanezca a una temperatura de 90 °C por 4,09 segundos que es el tiempo requerido para la eliminación de microorganismos patógenos y enzimas degradadoras, por motivos de solicitud del cliente que desea priorizar la seguridad alimentaria del producto, esta longitud se incrementó a 1 metro.
- El proceso térmico es el único procedimiento de la unidad móvil para elaborar jugo de pulpa de cacao que puede erradicar de manera significativa los agentes patógenos provenientes de la materia prima y manipulación de la misma, un diseño no adecuado o incorrecto comprometería la inocuidad del producto, pudiendo provocar brotes de una enfermedad transmitida por alimentos.

- Se determinaron los procesos necesarios para la elaboración del jugo de pulpa de cacao en conjunto con los equipos para elaborar un producto que cumpla con las normas de calidad para poder obtener un producto con parámetros de exportación.

4.2 Recomendaciones

- Para el diseño de la unidad de elaboración de jugo de pulpa de cacao se recomienda realizar un censo de las cantidades de cacao en grano producidas por los distintos miembros de la comunidad productora de cacao que harán uso del equipo, para obtener una proyección más realista de las capacidades operativas requeridas, y evitar tanto diseños con poca capacidad operativa o diseños con sobredimensionamientos que pueden encarecer el proyecto de manera significativa.
- Se recomienda realizar un análisis microbiológico al producto antes y después del tratamiento térmico diseñado en este trabajo para comprobar de manera experimental los microorganismos presentes en el jugo de pulpa de cacao antes de su pasteurización y de igual manera comprobar de manera experimental, que el jugo de pulpa de cacao será un alimento seguro de consumir posterior al tratamiento térmico sugerido en este estudio.
- Se recomienda reemplazar la unidad móvil de elaboración de jugo de pulpa de cacao por una unidad estacionaria, debido a la magnitud que tendrán los equipos que la conforman, mismos que hacen compleja la movilización de esta unidad, para esto se puede realizar un centro de acopio de los productores cacaoteros de la zona, donde se reciba la materia prima para la extracción del grano y la pulpa y se pueda aprovechar de mejor manera la capacidad operativa del equipo diseñado.
- Se recomienda realizar un diseño de planta para la correcta distribución de los equipos, que sigan un proceso fluido, donde los procesos que tengan mayor relación entre sí se encuentren lo más cercano posible, con la finalidad de agilizar el proceso, evitar posibles contaminaciones cruzadas entre materia prima y producto procesado, etc.

BIBLIOGRAFÍA

Agrocalidad, (2022). En 2021 Se Certificaron Más De 300 Mil Toneladas De Cacao En Grano Hacia 40 Destinos Mundiales. Accedido el 5 de mayo del 2022 desde: <https://www.agrocalidad.gob.ec/en-2021-se-certificaron-mas-de-300-mil-toneladas-de-cacao-en-grano-hacia-40-destinos-mundiales>

Arrázola, G., Alvis, A., & García., C. (2016). Efecto Del Tratamiento De Escaldado Sobre La Actividad Enzimática De La Polifenoloxidasa en dos variables de Batata (*Ipomoea Batatas lam*). Revista colombiana de Ciencias Hortícolas, 10(1), 80-88. Accedido el 5 de junio, 2022, desde <https://doi.org/10.17584/Rcch.2016v10i1.5125>

Arteaga Estrella, Y. (2013). Estudio Del Desperdicio Del Mucilago De Cacao En El Cantón Naranjal (Provincia Del Guayas). Dialnet, 4 (1), 49-59. Accedido el 3 de julio, 2022, desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6197548>

Arciniga & León Optimización de una bebida a base del Mucílago del Cacao (*Theobroma cacao*), como aprovechamiento de uno de sus subproductos. Dominios de la Ciencia. 6(3), 310-326. Accedido el 5 de junio, 2022, desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7539707>

Barrezueta-Unda, Salomón. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. CienciaUAT, 14(1), 155-166. Accedido el 15 de junio, 2022 desde <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>

Bover, S., Garriga., M. (2014). Condiciones que determinan el crecimiento y la supervivencia de *Listeria Monocytogenes* en alimentos listos para el consumo. Agencia de Salud Pública de Cataluña. Accedido el 3 de junio, 2022, desde https://acsa.gencat.cat/web/.content/_Publicacions/Informes-tecnics/Informes_ACSA/informe_listeria_irta_2014_castella.pdf

Chapra, S., & Canale, R. (2007). Métodos numéricos para ingenieros. McGRAW-HILL INTERAMERICANA.

Cengel, Y., Ghajar, A. (2011). Transferencia de Calor y Masa. McGraw Hill, (4ta Ed.)

De La Parte-Pérez, M., Bruzual, E. & Brito, A. (2005). *Cryptosporidium* spp. y Criptosporidiosis. Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología, 25(1), 06-14. Accedido el 20 de junio, 2022, de

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562005000100003&lng=es&tlng=es

Dimensiones en Tubería de Acero Inoxidable. Accedido el 1 de julio del 2022 desde:<http://www.cedipsa.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/ESPECIFICACIONES-PIPE-ACERO-INOXIDABLE-2.pdf>

Food and Drugs Administration. (2004). Guidance for Industry: Juice Hazard Analysis Critical Control Point Hazards and Controls Guidance (1era ed.).

Food and Drugs Administration. (2018). Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls for Human Food: Draft Guidance for Industry. Appendix 3: Bacterial Pathogen Growth and Inactivation. Accedido el 7 de septiembre del 2022 desde <https://www.fda.gov/media/99598/download>

Flores, C. & Peñafiel, M. (2019). Propiedades Bromatológicas, sensoriales y físicas del yogurt suplementado con mucilago de cacao. *Revista Científica de la Investigación y el Conocimiento*, 3 (3), 1342-1353. Accedido el 2 de agosto, 2022 desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7402114>

Forero, F. & Vélez, C. (2013). Optimización de la Concentración por Evaporación Osmótica del Jugo de Maracuyá. *DYNA*, 80(179), 90-98. Accedido el 14 de Septiembre, 2022 desde <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n179/v80n179a10.pdf>

García, J., Gil, J., & Botero, S. (2018). Control de crecimiento de *Listeria monocytogenes* en co-cultivo con *Lactobacillus plantarum*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 68-77.

González, J., Pereira, N., Soto, Z., Hernández, E., & Villarreal, J. (2014). Aislamiento microbiológico de *Salmonella* spp. y herramientas moleculares para su detección. *Revista Salud Uninorte*, 30(1), 73-94. Recuperado el 20 de Junio del 2022 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522014000100009&lng=en&tlng=es.

Instituto Nacional de salud de Colombia. (2011). Perfil de riesgo *Salmonella* spp. Accedido el 6 de agosto del 2022 desde: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/perfil-salmonella-spp.pdf>

López, A. (2015). Producción y Comercialización de Cacao Fino de Aroma en el Ecuador - Año 2012-2014. Superintendencia del Control de Mercado. Ecuador.

Lound, L., Aleu, H. Broggi, L., (2017). Resistencia térmica de *Salmonella*. Efecto del pH y la actividad del agua. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. Vol. 7, No. 7, 1-17. Accedido el 1 de agosto, 2022 desde

https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/33792/CONICET_Digital_Nro.9a753453-d55c-45d2-8f9d-b26be961910d_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Massey, B. (2006). *Mechanics of Fluids*. Taylor & Francis, (8th Ed.).

Motamayor J., Lachenaud P., da Silva e Mota., et al. (2008) Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L). PLOS ONE 3(10): e3311. Accedido el 6 de agosto, 2022 desde <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0003311>

Morales Intriago, F., Carrillo Zenteno, M., & Ferreira Neto, J. (2018). Cadena de comercialización del cacao nacional en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Ciencias Agrarias*, 63-69.

NTE INEN (2008) Jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de frutas y vegetales. Requisitos.

NTE INEN (2015). Determinación de la Humedad.

NTE INEN (2013). Conservas Vegetales. Determinación de Cenizas.

Olegario, M., Iannacone, J. & Alvarado-Zambrano, A. (2021). Efectos De La Concentración Y La Temperatura Sobre Las Propiedades Termofísicas Del Jugo De Manzana. *PAIDEIA XXI*. 11(1). 113-125.

Organización Mundial de la Salud. (2018). E. Coli. Accedido el 20 de junio, 2022 desde <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>

Orozco, C. & Bedoya, F. (2007). Cálculo Del Flujo Másico Y Caudal De Aire Para Un Ventilador Utilizado En Silos Para Secado Para Del Café. *Scientia et Technica Año XIII*. 3 (35). 207-212.

Pedroza, E., Millán, E. & Arroyo, V., (2016). Medición de Flujos Volumétricos en Presas, Canales y Pozos. IMTA.

Pérez-Chabela, M., Totosaus, A. & Hernández-Alcantara, A. (2016). Determinación Del Tiempo De Reducción Decimal "D" De Bacterias Ácido-Lácticas Probióticas. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 1, No. 2 129-133.

Peng, J., Tang, J., Barret, D., & Sablani, S. (2015). Thermal Pasteurization of Vegetables: Critical Factors for Process Design and Effects on Quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 17-31.

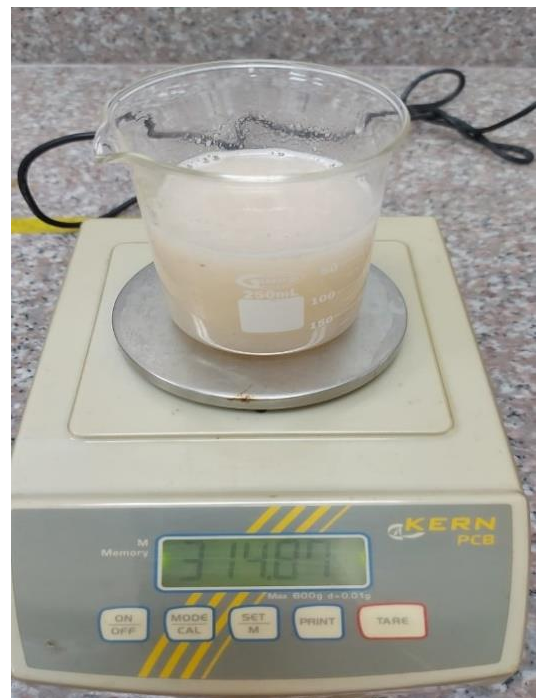
Rajauria, G., & Tiwari, B. (2018). Thermal Pasteurization and Microbial Inactivation Of Fruit Juices. Elsevier Inc. (1st Ed), *Fruit Juices Extraction, Composition, Quality and Analysis.*, 309-339, Academic Press.

- Rajauria, G., & Tiwari, B. (2018). The Inactivation of Pathogens in Fruit Juice: Escherichia Coli O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria monocytogenes. Elsevier Inc. (1st Ed), Fruit Juices Extraction, Composition, Quality and Analysis., 341-361, Academic Press.
- Richardson, P. (2004). Improving the Thermal Processing of Foods. Woodhead Publishing Limited. (1era ed.).
- Romero, C., Zambrano, A. (2012). Análisis de azúcares en pulpa de cacao por colorimetría y electroforesis capilar. Revista Científica UDO Agrícola 12 (4): 906-913.
- Ruiz, Y., Sánchez, J., Hernández, E., (2010). Viscosidad de zumos comerciales de melocotón, manzana y pera a temperaturas cercanas a la congelación. Dialnet. 67 (546). 114-118. Accedido el 12 de Septiembre, 2022 desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3800051>
- Salehi, F. (2020). Physicochemical Characteristics and Rheological Behaviour of Some Fruit Juices and their Concentrates. Journal of Food Measurement and Characterization. 14. 2472–2488.
- Silva, F., Gibbs, P. & Nuñez, H. (2014). Pasteurization. Encyclopedia of Food Microbiology. 3 (1). 577-575.
- Tema. (1988). Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, (7th Ed.), Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York.
- Tetrapack. (1996) Manual de Industrias Lácteas, Editorial Madrid Vicente, Madrid, España.
- Vargas-Zambrano, P., Arteaga-Solórzano, R. & Riera-González, G. (2020). Estimación de propiedades termofísicas de un producto cárnico. Tecnología Química, 40(1), 134-149.
- Vergara, C., Quillez, J. (2004). Criptosporidiosis: Una Zoonosis Parasitaria. Revista MVZ Córdoba. 9:(1), 363-372
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física Unlversitaria*. PEARSON EDUCACIÓN.

APÉNDICES

APÉNDICE A

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL JUGO DE PULPA DE CACAO



APÉNDICE B

DIMENSIONES DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE [CEDIPSA, sf]

DIMENSIONES TUBERIA EN ACERO INOXIDABLE PIPE									
DIAMETRO NOMINAL		DIAMETRO EXTERIOR		CEDULA					
PIPE SIZE		DIAMETERS							
Pulg.	mm.	Pulg.	mm						
Inch.	mm.	Inch.	mm		5	10	20	30	40
1/8	3	0.405	10.3	Epesor Pulg.	0.035	0.049			0.068
				Epesor mm.	0.889	1.2446			1.7272
1/4	6	0.54	13.7	Epesor Pulg.	0.049	0.065			0.088
				Epesor mm.	1.2446	1.651			2.2382
3/8	10	0.675	17.1	Epesor Pulg.	0.049	0.065			0.091
				Epesor mm.	1.2446	1.651			2.3114
1/2	13	0.84	21.3	Epesor Pulg.	0.065	0.083			0.109
				Epesor mm.	1.651	2.1082			2.7686
3/4	19	1.05	26.7	Epesor Pulg.	0.065	0.083			0.113
				Epesor mm.	1.651	2.1082			2.8702
1	25	1.315	33.4	Epesor Pulg.	0.065	0.109			0.133
				Epesor mm.	1.651	2.7686			3.3782
1 1/4	32	1.66	42.2	Epesor Pulg.	0.065	0.109			0.145
				Epesor mm.	1.651	2.7686			3.683
1 1/2	38	1.9	48.3	Epesor Pulg.	0.065	0.109			0.145
				Epesor mm.	1.651	2.7686			3.683
2	51	2.375	60.3	Epesor Pulg.	0.065	0.109			0.154
				Epesor mm.	1.651	2.7686			3.9116
2 1/2	64	2.875	73	Epesor Pulg.	0.083	0.12			0.203
				Epesor mm.	2.108	3.048			5.156
3	76	3.5	88.9	Epesor Pulg.	0.083	0.12			0.216
				Epesor mm.	2.108	3.048			5.486
3 1/2	89	4	101.6	Epesor Pulg.	0.083	0.12			0.226
				Epesor mm.	2.108	3.048			5.748
4	102	4.5	114.3	Epesor Pulg.	0.083	0.12			0.237
				Epesor mm.	2.108	3.048			6.028
4 1/2	114	5	127	Epesor Pulg.					
				Epesor mm.					
5	127	5.563	141	Epesor Pulg.	0.109	0.134	0.203		0.258
				Epesor mm.	2.768	3.404	5.156		6.553
6	152	6.625	168.3	Epesor Pulg.	0.109	0.134	0.203		0.28
				Epesor mm.	2.768	3.404	5.156		7.112
7	178	7.625	194	Epesor Pulg.					
				Epesor mm.					
8	203	8.625	219.1	Epesor Pulg.	0.109	0.148	0.25	0.277	0.322
				Epesor mm.	2.768	3.758	6.350	7.036	8.179

APÉNDICE C

RESÚMEN DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO TÉRMICO

Parámetro	Ecuación
Ecuación de transferencia de calor	$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$
Diferencia media logarítmica de temperatura	$LMDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$
Reynolds	$Re_{jugo} = \frac{\rho V L_{eq}}{\mu}$
Número Prandtl	$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$
Número de Nusselt	$Nu = 1,86 * \left(Re * Pr * \frac{De}{L}\right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$
Coefficiente de convección	$h = \frac{Nu k}{L_{eq}}$
Coefficiente total de transferencia de calor	$U_c = \frac{h_i h_o}{h_i + h_o}$