



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas

“CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA CAVITACIÓN POR MEDIO DE PLACAS DE ORIFICIO (CPO) Y PUESTA EN MARCHA”

Curricular

Que para obtener el grado de Licenciatura en
Ingeniería en Alimentos

Presenta:

Julieta Murillo Romero

Asesor del proyecto:

Dr. en C. Horacio Inchaurregui Méndez

Coasesor del proyecto:

Dra. en C. Karol Karla García Aguirre



Zacatecas, Zac., octubre 2022.

Folio
UPIIZ/ESA/459/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
DESIGNACIÓN DE ASESORES

Zacatecas, Zac., a 18 de octubre de 2022

C. JULIETA MURILLO ROMERO
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
BOLETA: 201867067298
GENERACIÓN: 2017-2022
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **Dr. en C. Horacio Inchaurregui Méndez**, y la **Dra. en C. Karol Karla García Aguirre**, sean sus **Asesores**, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación **CURRICULAR**, con el título y contenido siguiente:

"Construcción de un sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO) y puesta en marcha".

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.




L.C. María Monserrat Saldaña Noriega
Jefa del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"




DR. Fernando Flores Mejía
Director de la UPIIZ



Folio
UPIIZ/ESA/461/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

C. JULIETA MURILLO ROMERO
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
BOLETA: 201867067298
GENERACIÓN: 2017-2022
PRESENTE

Zacatecas, Zac., a 19 de octubre de 2022

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Construcción de un sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO) y puesta en marcha".

Se determinó que el citado Trabajo de Titulación, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.


DR. EN C. HORACIO INCHAURREGUI MÉNDEZ


DRA. EN C. KAROL KARLA GARCÍA AGUIRRE



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir la verdad la que suscribe **Julieta Murillo Romero**, estudiante del programa de **Ingeniería en Alimentos**, con número de boleta **2018670672**, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Construcción de un sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO) y puesta en marcha**", en adelante "El Trabajo de Titulación", y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante "El IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo **indefinido** contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a "El IPN" en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 24 de octubre del 2022.

Atentamente



Julieta Murillo Romero

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a mi asesor el Dr. en C. Horacio Inchaurregui Méndez, quien todos los días me motivo para poder llevar a cabo el proyecto, me brindó todo el conocimiento y herramientas necesarias para llegar a su conclusión de igual manera a la Dra. en C. Karol Karla García Aguirre quien con su conocimiento, apoyo y entusiasmo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

Asimismo quiero agradecer al Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez y al M. en I. Rafael Flores Pinedo, por compartir sus conocimientos como revisores ayudando a hacer aportaciones para mejorar el proyecto.

Agradezco al Ing. Juan Armando Chávez Rosales por darme su apoyo incondicional para el uso del laboratorio al igual que de su conocimiento para poder utilizar los equipos y obtener los resultados, también agradezco al Ing. César Cabral Bañuelos quien me fue guiando durante todo el proceso y me brindo consejos para llevar a cabo el proyecto; y de igual manera agradezco al M. en C. Óscar Javier Ramos Herrera quien siempre buscó la forma de brindarme su ayuda para poder mejorar las técnicas en el laboratorio.

También quiero agradecer a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación y a los docentes que me fueron desarrollando cada día con sus conocimientos.

Quiero agradecer a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero agradecer a mis padres, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos, quienes me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Resumen

A través del tiempo en la industria alimentaria se han buscado métodos alternativos para el procesamiento de ciertos productos mediante la pasteurización donde se utilizan reactores de calentamiento para poder generar la disrupción celular. Dentro de las nuevas tecnologías se busca la implementación de energías no térmicas mediante la cavitación hidrodinámica, donde el fluido es sometido a altas velocidades y una obstrucción generando que haya una caída de presión lo que ocasiona una implosión de burbujas. Una ventaja de este proceso es que con la tubería se logra el fenómeno haciendo que sea más rápido el proceso de disrupción celular.

El presente proyecto plantea la construcción de un sistema de cavitación con placa de orificio con una distribución de un orificio para poder generar el fenómeno de cavitación, logrando validar el proceso considerando las variables de caída de presión, número de cavitación y pruebas microbiológicas en agua. Además evaluar características fisicoquímicas y nutricionales para jugo de manzana para un análisis posterior.

En el análisis se determinó que con el acomodo de un orificio alcanza una presión de 1.5 bares con una bomba de 1 HP, una cabeza neta de la bomba de 3.97 m, una potencia de 0.22 HP y un caudal a la salida del sistema de 47.48 cm³/s. Para las pruebas microbiológicas no se observó crecimiento, ya que el agua contaba con lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Se determinó que la manzana seleccionada cumplió con los requisitos de la NMX-F-045-1982. ALIMENTOS. FRUTAS Y DERIVADOS. JUGO DE MANZANA. Para poder ser procesada, además de ser un fluido newtoniano. Los valores de los parámetros evaluados: capacidad antioxidante por el método de ABTS, vitamina C y azúcares totales, son menores a las esperadas.

Palabras clave: Cavitación hidrodinámica, disrupción celular, pasteurización, placa de orificio.

Abstract

Through time in the food industry, alternative methods have been sought for the processing of certain products through pasteurization where heating reactors are used to generate cell disruption. Within the new technologies, the implementation of non-thermal energies is sought through hydrodynamic cavitation, where the fluid is subjected to high speeds and an obstruction generating a pressure drop which causes an implosion of bubbles. An advantage of this process is that with the pipeline the phenomenon is achieved by making the cell disruption process faster.

The present project proposes the construction of a cavitation system with an orifice plate with a distribution of an orifice to be able to generate the cavitation phenomenon, managing to validate the process considering the variables of pressure drop, cavitation number and microbiological tests in drinking water. Also evaluate physicochemical, nutritional characteristics for apple juice for later analysis.

In the analysis it was determined that with the accommodation of an orifice it reaches a pressure of 1.5 bars with a 1 HP pump, a net pump head of 3.97 m, a power of 0.22 HP and a flow at the outlet of the system of 47.48 cm³ / s. For the microbiological tests, no growth was observed, since the drinking water had the provisions of NOM-127-SSA1-1994 "Environmental health, water for human use and consumption-permissible quality limits and treatments to which water must be subjected for its purification.

It was determined that the selected apple met the requirements of NMX-F-045-1982. FOOD. FRUITS AND DERIVATIVES. APPLE JUICE. To be able to be processed, in addition to being a Newtonian fluid. The values of the evaluated parameters: antioxidant capacity by the ABTS method, vitamin C and total sugars, are lower than expected.

Keywords: Hydrodynamic cavitation, cell disruption, pasteurization, orifice plate.

Índice general

Agradecimientos.....	I
Resumen	II
Abstract.....	II
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas.....	VI
Nomenclatura.....	VII
Capítulo I. Introducción.....	1
Capítulo II. Revisión de la literatura	2
2.1. Pasteurización	2
2.2. Nuevas técnicas de conservación utilizando altas presiones hidrostáticas	2
2.2.1. Cavitación hidrodinámica	2
2.2.2. Dispositivo de plato perforado	3
2.2.3. Otros equipos para llevar a cabo el fenómeno de cavitación.	4
2.3. Jugo de manzana.....	5
Capítulo III. Problema de investigación.....	6
Capítulo IV. Justificación.....	7
Capítulo V. Hipótesis	8
Capítulo VI. Objetivos.....	8
6.1. Objetivo general:.....	8
6.2. Objetivos específicos:	8
Capítulo VII. Técnicas y metodologías de investigación.....	8
Etapa 1: Construcción de sistema de cavitación de placas y orificio.	8
7.1. Metodología para la construcción del sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO).	8
7.1.1. Diseño y construcción de un sistema de cavitación de placa de orificio.....	8
7.1.2. Diseño de la placa de orificio.....	11
7.1.3. Preparación de soluciones	11
7.1.4. Determinación de las condiciones de operación del sistema de cavitación con placas de orificios.....	11
7.2. Metodología para pruebas microbiológicas.	12
7.2.3. Cuantificación de Coliformes Totales	12
7.2.2. Preparación de la muestra.....	12
7.2.3. Cuantificación de mohos y levaduras.....	13

Etapa 2: Pruebas para la caracterización de la muestra seleccionada para validar el proceso de pasteurización.	14
7.3. Metodología de caracterización de manzana antes de la elaboración del jugo (Malus Doméstica Golden Delicious).....	14
7.3.1. Medición de color.....	14
7.3.2. Determinación de acidez titulable	14
7.3.3. Determinación de pH.....	14
7.3.4. Medición de textura	14
7.4. Metodología para la elaboración del jugo de manzana.....	15
7.5. Metodología para pruebas fisicoquímicas para el jugo.....	15
7.5.1. Determinación de pH.....	15
7.5.2. Determinación de grados Brix.....	15
7.5.3. Determinación de densidad	15
7.5.4. Determinación de viscosidad.....	15
7.5.5. Determinación de antioxidantes por ABTS.....	16
7.5.6. Determinación de Vitamina C	17
7.5.7. Determinación de azúcares totales	18
Capítulo VIII. Resultados y discusión.....	20
8.1. Construcción del sistema de cavitación por medio de placas de orificio (CPO).....	20
8.1.1. Características microbiológicas del agua	25
8.2. Caracterización de la manzana antes de la elaboración del jugo	26
8.2.1. Características fisicoquímicas de jugo de manzana (Malus doméstica Golden Delicious).....	26
8.2.2. Nutrientes del jugo de manzana	27
Capítulo XI. Conclusiones.....	28
9.1. Recomendaciones y prospectivas	29
Bibliografía.....	29
Anexos	31

Índice de Figuras

Figura 1. Principio de la cavitación generalizado en un tubo Venturi.	3
Figura 2. Partes del tubo Venturi (Marín C. , 2021).....	4
Figura 3. Esquema del reactor biológico rotativo de contacto (RBC) (Marín J. , 2017).	5
Figura 4. Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica para llevar a cabo la pasteurización.	10
Figura 5. Representación de la placa de orificio para el sistema de cavitación hidrodinámica de 1 orificio.	11
Figura 6. Diagrama de pruebas para el CPO.	12
Figura 7. Cortado de tubería.	20
Figura 8. Unión de piezas con punto.	21
Figura 9. Primer prototipo para llevar a cabo la cavitación con una bomba de potencia de ½ HP.	21
Figura 10. Segundo prototipo construido para llevar a cabo la cavitación con una bomba de potencia de 1 HP.	22
Figura 11. Vista frontal de la placa de orificio.	23
Figura 12. Vista lateral de la placa de un orificio.....	23
Figura 13. Viscosidad respecto a la temperatura.	27
Figura 14. Curva patrón para azúcares totales.....	32
Figura 15. Curva patrón para ABTS.....	33
Figura 16. Curva patrón para Vitamina C.	33

Índice de Tablas

Tabla 1. Materiales y especificaciones para la construcción del CPO.	9
Tabla 2. Preparación de estándares para la curva de ABTS.	16
Tabla 3. Preparación de estándares para la curva tipo de Vitamina C.	18
Tabla 4. Preparación de estándares para la curva patrón de azúcares totales.....	19
Tabla 5. Comparación de las presiones alcanzadas por la bomba de 1/2 y 1 HP.....	22
Tabla 6. Resultados obtenidos de la ecuación de Bernoulli para el sistema CPO.....	25
Tabla 7. Resultados de pruebas microbiológicas con agua potable.	25
Tabla 8. Resultados de la caracterización de la manzana antes de la elaboración del jugo.	26
Tabla 9. Resultados de las características fisicoquímicas de jugo de manzana.	26
Tabla 10. Resultados de los nutrientes del jugo de manzana.	27
Tabla 11. Factor del viscosímetro de Brookfield.	31

Nomenclatura

Abreviaturas

ABTS	Ácido 2,2'-Azino-Bis (3-Etilbenzotiazolin)-6-Sulfónico
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AVB	Agar Verde Brillante
CIESA	Conexiones Inoxidables y Equipos, S.A. de C.V.
CPO	Cavitación por medio de Placas y Orificio
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
HTST	High Temperature – Short Time
NOM	Norma Oficial Mexicana
PTEF	Politetrafluoroetileno
TIG	Soldadura de Gas Inerte de Tungsteno
Trolox	Ácido 6-Hidroxi-2,5,7,8-Tetrametilcromo-2-Ácido Carboxílico
UHT	Ultra High Temperature
VAT	Pasteurización lenta

Símbolos y variables

%	Porcentaje
°Brix	Grados Brix
°C	Grados Celsius
μ	Viscosidad
abs	Absorbancia
Atm	Atmósfera
cm	Centímetro
Cv	Coefficiente de cavitación
HP	Caballo de fuerza
in	Pulgadas
K	Grados Kelvin

Kg	Kilogramo
KPa	Kilo Pascal
L	Litros
m	Metro
M	Molar
m/s	Metro por segundo
Mg/mL	Miligramo por mililitro
min	Minutos
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mM	Milimolar
MPa	Mega Pascal
N	Normal
nm	Nanómetro
P	Presión
Pa	Pascal
pH	Potencial de Hidrógeno
Psi	Libra por pulgada cuadrada
rpm	Revoluciones por minuto
UFC	Unidades Formadoras de Colonia
UT	Unidad de Trolox
V	Volumen
Δ	Operador nabra
μ L	Microlitro
μ M	Micromolar
ρ	Densidad

Capítulo I. Introducción

En el marco de la agroindustria nacional e internacional, la disminución de los costos y el aseguramiento de la eficiencia en cada una de las operaciones de transformación y agregación de valor, así como el control, la disminución de los residuos, el uso de tecnologías más amigables con el medio ambiente, forman parte de las tendencias prioritarias para el sector científico, productivo e industrial (Gogate & Kabadi, A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology, 2009). Por ello se han buscado nuevas alternativas tecnológicas para poder procesar alimentos utilizando energías no térmicas. Dentro de las investigaciones que se promueven a lo largo de las últimas dos décadas, sobresale la promisoriosa aplicación de la cavitación hidrodinámica en diferentes procesos químicos, físicos y biológicos: mejora de reacciones oxidativas, hidrólisis de aceite, síntesis nano-emulsiones, extracción de componentes activos, cristalización, disrupción celular, desinfección microbiana, y procesamiento de alimentos.

Los mayores avances en este campo se han conseguido con el desarrollo de sistemas físicos, que afectan la viabilidad de los microorganismos, sin un incremento sustancial de la temperatura del alimento. Estos métodos “no térmicos” no afectan, o lo hacen mínimamente a las características nutritivas y sensoriales de los alimentos (Gogate & Kabadi, A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology, 2009). Esta técnica no sólo reduce los costos totales de procesamiento; además, permite mantener una alta eficiencia energética en comparación con otras tecnologías convencionales, y presenta una mayor facilidad en cuanto a su escalamiento y funcionamiento a nivel comercial (Moholkar & Pandit, 2001).

La cavitación se define como el fenómeno de generación, crecimiento y posterior colapso de microburbujas de vapor (o cavidades) en el seno de un fluido líquido. La implosión de las burbujas ocurre en periodos de mili o microsegundos, liberando una gran cantidad de energía en un mínimo lapso de tiempo. Esta descarga energética, a su vez, conlleva la aparición de temperaturas altas y presiones locales elevadas en el sistema; cuyos efectos térmicos y mecánicos favorecen la transformación de diferentes matrices de interés (Sainte & Morison, 2010).

Por lo anterior, se propone la construcción de un sistema de cavitación en el cual se llevará a cabo el proceso de pasteurización que consiste en el calentamiento de líquidos hasta una temperatura, tal que permita la eliminación de los microorganismos patógenos y de esta forma extender el tiempo vida útil (Marín J. , 2017). Comprobando que el sistema funcione y cumpla las características con agua potable y después evaluando la degradación de nutrientes con la muestra seleccionada.

Capítulo II. Revisión de la literatura

2.1. Pasteurización

Los métodos térmicos tradicionales más utilizados para la conservación de algunos alimentos ha sido la pasteurización. La pasteurización es una operación de estabilidad de alimentos que persigue la reducción de la población de microorganismos presentes en estos de forma que se prolongue el tiempo de vida útil del alimento, es un tratamiento térmico suave, en contraposición con la esterilización (Par, 2017).

Existen tres tipos de pasteurización: la llamada VAT o pasteurización lenta es la más antigua; la sustancia (generalmente leche) se deposita en recipientes estancos donde es calentada a unos 63 °C durante 30 minutos y posteriormente se la deja enfriar lentamente. La pasteurización HTST (High Temperatura-Short Time) alrededor de 138 °C se usa especialmente para leche, zumos de frutas y cerveza; la exposición a temperaturas altas es breve y después se enfría. Por último, el UHT, también conocido como ultra pasteurización, es un proceso de flujo continuo donde el líquido se somete a 150 °C durante 2 segundos y se enfría después a temperatura ambiente. Este rápido calentamiento produce una degradación mínima del alimento (Par, 2017).

2.2. Nuevas técnicas de conservación utilizando altas presiones hidrostáticas

Se han desarrollado las nuevas técnicas de conservación, en las que se utilizan procesos no térmicos, con el fin de minimizar la pérdida de calidad de los alimentos derivada de los procesos tradicionales. De la cual, destacan las altas presiones hidrostáticas que se basan en la transmisión de presión por un fluido al alimento de manera uniforme e instantánea, lo que provoca un cambio en la permeabilidad de la membrana celular (Gutiérrez, Arias, & Cardona, 2019).

2.2.1. Cavitación hidrodinámica

En la cavitación hidrodinámica, el proceso ocurre generalmente a condiciones ambientales y sin un requerimiento de energía externa en forma de calor. La cavitación hidrodinámica describe el proceso de la generación e implosión de burbujas que se producen en un líquido que fluye como resultado de una disminución y posterior aumento de la presión. La cavitación sólo se producirá si la presión disminuye hasta cierto punto por debajo de la presión de vapor saturado del líquido. En la *Figura 1* se observan las tres etapas principales de la cavitación: formación de burbujas, expansión de burbujas y su colapso e implosión (Carillo, Galindo, & García, 2012).

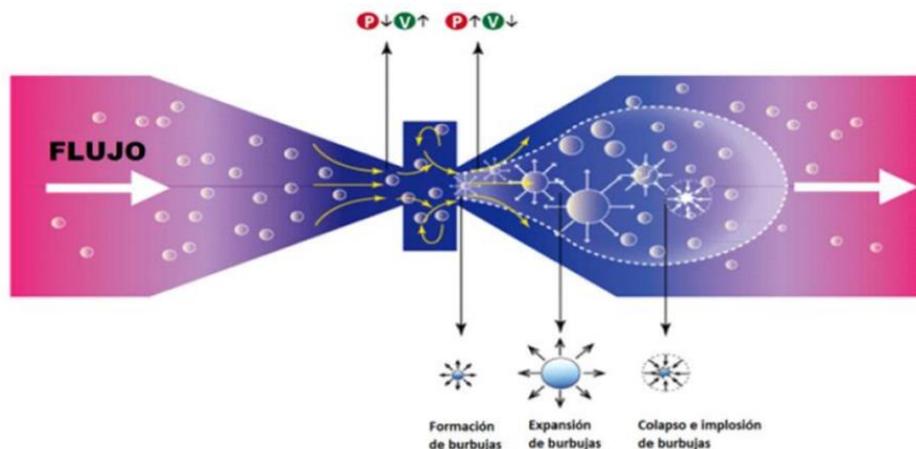


Figura 1. Principio de la cavitación generalizada en un tubo Venturi.

Debido a la oscilación de presiones, favorecida por la modificación del área de flujo y el consecuente aumento de la velocidad en la corriente, se produce la cavitación incipiente. En la fase de expansión de las burbujas, también llamada rarefacción, se manipula y controla el tiempo de residencia del fluido a lo largo de la garganta; que influye a su vez sobre el tamaño de las cavidades, la cantidad de eventos de cavitación ocurridos, y la existencia y magnitud de algunas interacciones entre las burbujas. Durante la compresión o implosión de las cavidades, debido a la recuperación súbita de presión, se difunde calor y se presentan altos picos de temperatura en el sistema (Arrojo & Y., 2008).

2.2.2. Dispositivo de plato perforado

En los equipos para cavitación basados en plato – orificios, el flujo que circula a través de la línea principal atraviesa una constricción que puede estar formada por un solo orificio, o por un conjunto de ellos, alojados en un plato perforado. En este tipo de dispositivos es importante optimizar el diámetro y la cantidad de las aberturas, siguiendo los parámetros geométricos de la operación. La configuración ofrece flexibilidad en términos del diseño y control del proceso, pues permite utilizar diferentes tamaños y geometrías (circular, triangular, rectangular, etc.), tanto para el plato como para los orificios que contiene (Gogate & Kabadi, A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology, 2009). En los sistemas de plato perforado, la intensidad del colapso de la cavidad depende fuertemente del área de la garganta (superficie de la abertura), y de la forma, el tamaño y la cantidad de orificios presentes en el plato (Dindar, 2016).

En el estudio hecho por Balasundaram y Harrison (Balasundaram & Harrison, 2011), se encontró que es preferible el uso de orificios circulares para mantener una velocidad de flujo alta durante la disrupción celular de microorganismos. Dicha geometría permite introducir una mayor cantidad de perforaciones en un área de flujo definida (plato), a diferencia de las formas rectangulares. Asimismo, la alta eficiencia de la placa con orificios circulares se debe a la fuerza de corte generada por un mayor número de chorros que pasan a través de ella.

Según Gogate (Gogate, Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing, 2010), orificios con diámetros grandes son recomendados para aplicaciones de cavitación intensa, mientras que un gran número de perforaciones con diámetros pequeños deben ser seleccionadas para las aplicaciones de baja intensidad.

2.2.3. Otros equipos para llevar a cabo el fenómeno de cavitación.

En los últimos años, se ha desarrollado diferente maquinaria y equipo que emplea el principio de cavitación hidrodinámica para el tratamiento físico o químico de materias primas y subproductos agroindustriales. Entre otras, se pueden mencionar las configuraciones de plato y orificio, tipo Venturi, homogeneizadores de alta presión, reactores rotatorios (de onda de choque), de cizalla inducida, y válvulas de estrangulamiento (Gogate & Kabadi, A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology, 2009).

Un Venturi como se observa en la *Figura 2* es un arreglo que incluye una sección de convergencia, una garganta o constricción y una zona de divergencia; etapas en las cuales varía la dinámica del flujo. Sin embargo, no ocurren contracciones y expansiones repentinas como en el caso de un reactor de platos perforados. El Venturi puede tener diferentes geometrías: rectangular, circular o elíptica. Los tamaños y formas marcan los principales criterios para lograr diferentes intensidades de cavitación en este tipo de equipos, pues determinan el número de eventos cavitantes, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo de residencia de la burbuja en la región de baja presión (Carpintero, Sunil, Suja, & Mandar, 2012).

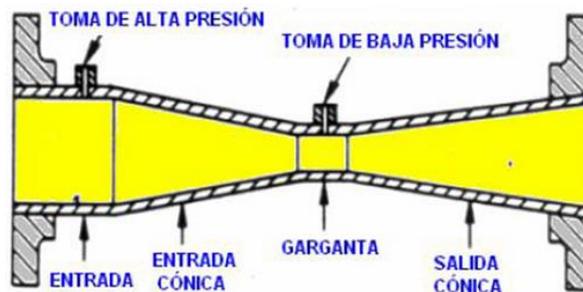


Figura 2. Partes del tubo Venturi (Marín C. , 2021).

La cavitación hidrodinámica también puede generarse en equipos rotatorios como se observa en la *Figura 3*, entre los cuales los más usados son los de onda de choque y los de doble rotor. El primero, está compuesto por dos cilindros concéntricos: uno estacionario y externo y otro interno y en movimiento. El líquido fluye a través de la sección anular y pasa a través de algunas hendiduras ubicadas sobre la superficie del cilindro central. Debido al golpe que sufre el fluido al ingresar por las grietas, sumado al efecto de la alta velocidad de rotación, se generan altas condiciones de temperatura, lo que resulta a su vez en una cavitación intensa (Carpintero, Sunil,

Suja, & Mandar, 2012). Este dispositivo es utilizado en la inactivación de células vegetativas de levaduras, bacterias y esporas resistentes al calor.

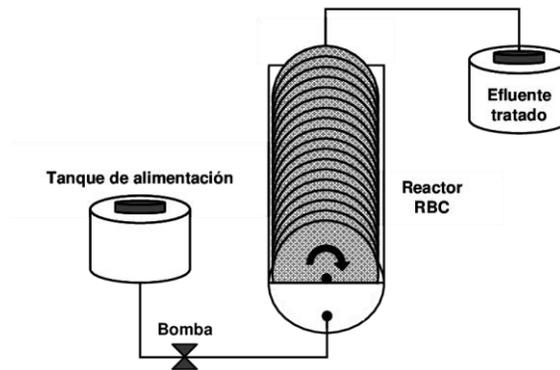


Figura 3. Esquema del reactor biológico rotativo de contacto (RBC) (Marín J. , 2017).

El generador de cavitación con doble rotor se basa en dos rotores enfrentados, donde cada uno gira en dirección opuesta. Cada impulsor posee una geometría especial, que causa un efecto repetitivo en la caída de presión. La frecuencia de rotación recomendada es de aproximadamente 2800 rpm, permitiendo lograr velocidades locales de hasta 26 m/s. El tipo de cavitación que ocurre al interior del equipo se denomina cavitación de corte, donde las cavidades se forman debido al movimiento opuesto de las dos capas de cizallamiento.

Este tipo de mecanismo se utiliza para el tratamiento fisicoquímico del agua, especialmente en la remoción de agentes contaminantes indeseables (Petkovsek, y otros, 2013). El consumo de energía en los equipos rotatorios suele ser mayor, comparado con los dispositivos de plato-orificios y Venturi. Además, presentan una menor flexibilidad en cuanto a la definición y el control de los parámetros de diseño (Gogate, Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing, 2010).

2.3. Jugo de manzana

La manzana es un fruto de estructura firme, carnoso, derivado del receptáculo de la flor. Difiere en cuanto a color, tamaño y sabor, según la variedad. El color de la piel va desde el verde claro hasta el rojo muy oscuro, casi negruzco. En cuanto a tamaño, puede ser apenas un poco mayor a una cereza y casi tan grande como una toronja o un melón mediano (SAGARPA, 2016).

La manzana representa uno de los conceptos de mayor gasto en las familias mexicanas. México es el decimotercer productor de manzana en el mundo. Pese a los importantes incrementos en su productividad nacional promedio en el periodo 2003-2016, equivalentes a 44.65%, la producción de 716,931 toneladas en 2016 cubrió únicamente 77.26% del consumo nacional, por lo que este producto se importa en fresco, principalmente de Estados Unidos (97.82% del total de las importaciones). Se consume cruda en su mayor parte, cocinada en numerosos postres así como

transformada industrialmente como jugos, sidra, néctares, yogurth, deshidratada, refrescos, vinagre, licores (SAGARPA, 2016).

En México los jugos y néctares representan 26% del volumen de la categoría de jugos, néctares y bebidas de frutas sin gas, y 40% del valor total de la categoría, que asciende a un volumen de más de 2 mil millones de litros y un valor superior a los 30 mil millones de pesos, a decir del reporte Índice de Jugos 100% de Tetra Pak 2016 (PROFECO, 2018).

Capítulo III. Problema de investigación

El consumidor actual, cada vez más concienciado de la estrecha relación entre la alimentación y la salud, busca alimentos mínimamente procesados, apetecibles, de fácil consumo y con propiedades funcionales. Además, la aplicación de tecnologías de conservación alternativas a la pasteurización tradicional, entre las que destacan son las altas presiones hidrostáticas, constituye una revolución en la industria alimentaria, al obtenerse productos seguros que conservan las características funcionales, nutricionales y sensoriales de los alimentos frescos (Andrés, 2016).

Una de las alternativas para obtener un alimento inocuo es la pasteurización por cavitación hidrodinámica, ya que, se ha encontrado que la pasteurización por este método es eficiente para lograr los cambios químicos/físicos deseados en las aplicaciones de procesamiento, en la industria de alimentos se ha utilizado para pasteurización de fluidos y homogenización de leche (Milly, Toledo, Kerr, & Armstead, 2007).

En la alta presión dinámica el incremento de presión se origina en un tiempo muy corto (milésimas de segundo) como consecuencia de una explosión que genera una onda de choque (> 100 MPa), denominada onda de choque hidrodinámica. Esta tecnología consigue la inactivación de microorganismos y el ablandamiento de ciertos tejidos, como carne, por ruptura de la estructura celular.

El efecto de las altas presiones hidrostáticas puede resumirse en los siguientes puntos: disminución de la síntesis de ADN, aumento de la permeabilidad de las membranas celulares, desnaturalización de biopolímeros y proteínas, incluida inactivación de enzimas, por cambios en la estructura intramolecular (>300 MPa). Estos hechos, pueden afectar, en mayor o menor grado, la viabilidad de los microorganismos y otros agentes alterantes, así como modificar los componentes de los alimentos y cambiar las características organolépticas de los mismos (Knorr,

Ade-Omowaye, & Heinz, Nutritional improvement of plant foods by non-thermal processing., 2002).

Capítulo IV. Justificación

En la actualidad, la ingeniería de los alimentos se encuentra encaminada hacia la proposición de tecnologías de procesamiento alternativas que incrementen la estabilidad y la vida útil de los productos, potencien sus características de calidad (sensorial, microbiológica y nutricional), utilicen una mínima cantidad de preservativos químicos (cultura orgánica) y mantengan bajos costos operativos. Para subsanar el efecto adverso de las técnicas térmicas tradicionales, que involucran pérdida de nutrientes y atributos organolépticos, se han sugerido diferentes opciones que no suponen la aplicación directa de calor sobre las materias primas. Entre ellas, se puede incluir la cavitación hidrodinámica (Martyneko, Astatkie, & Satanina, 2015).

Estos fenómenos, ya sea de forma individual o conjunta, pueden dar lugar a un mejoramiento de la eficiencia, el rendimiento y el desempeño de diferentes procesos agroindustriales, clasificados comúnmente como de índole físico o químico, según las transformaciones que ocurren sobre la matriz objetivo. En la cavitación hidrodinámica, concebida como una alternativa viable para la desinfección, las ondas de presión, sumadas a las altas temperaturas generadas en los puntos calientes, ocasionan la muerte directa de los microorganismos. Una ventaja práctica adicional de la cavitación en líquidos es que el calentamiento se produce directamente dentro del líquido sin intercambio con superficies o tuberías calientes, lo que reduce drásticamente las pérdidas de calor debido a la fricción interna, la pérdida de presión aguas abajo de las boquillas, curvas, etc. (Bauruv, Meneguzzo, & Buruv, 2012).

En este trabajo se propone realizar la construcción de un sistema CPO para llevar a cabo el proceso alternativo a la pasteurización por medio de cavitación hidrodinámica para proyectos de investigación en el área de alimentos, ya que, la cavitación hidrodinámica constituye un proceso altamente eficiente y avanzado, que demuestra un alto potencial para el mejoramiento o la sustitución de operaciones de agregación de valor tradicionales y poco eficaces. El conjunto de efectos físicos y mecánicos generados como producto del pulso de presión, sumados a la facilidad para su escalamiento a nivel industrial, hacen que la cavitación hidrodinámica se presente como un foco de estudio para diversas ramas del cluster de ciencia, tecnología e innovación (Gutiérrez, Arias, & Cardona, 2019).

Capítulo V. Hipótesis

Con el prototipo construido se conseguirán las condiciones de operación adecuadas para un proceso alternativo a la pasteurización; considerando la presión de operación.

Capítulo VI. Objetivos

6.1. Objetivo general:

Construir y validar un sistema cerrado para llevar a cabo el proceso de cavitación por medio de placas de orificio (CPO) como alternativa tecnológica para la pasteurización.

6.2. Objetivos específicos:

1. Construir un sistema para el proceso de cavitación por medio de placas de orificio (CPO) empleando un sistema cerrado y utilizando material de acero inoxidable grado alimenticio.
2. Validar la eficiencia del sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO) a partir de resultados de caída de presión, potencia de la bomba y pruebas microbiológicas.

Capítulo VII. Técnicas y metodologías de investigación

Etapas 1: Construcción de sistema de cavitación de placas y orificio.

7.1. Metodología para la construcción del sistema para cavitación por medio de placas de orificio (CPO).

7.1.1. Diseño y construcción de un sistema de cavitación de placa de orificio

Con la revisión actual de la literatura, así como el trabajo teórico desempeñado en el grupo de investigación para el diseño de la placa de orificio, se optó por construir un reactor CPO capaz de llevar a cabo un proceso alternativo de pasteurización. La construcción se realizó contratando los servicios de una herrería de acuerdo con el diseño propuesto en la Figura 4.

En la Tabla 1 se muestran los materiales y especificaciones necesarias para la construcción del sistema alternativo al proceso de pasteurización. Es necesario mencionar que las dimensiones tanto de las tuberías como de los accesorios considerados fueron de 1.5 in y de acero inoxidable grado alimenticio. La bomba utilizada durante las pruebas tiene una potencia de 1 HP.

Tabla 1. Materiales y especificaciones para la construcción del CPO.

Material	Cantidad	Modelo	Descripción
Recipiente	1	Acero inoxidable 304	El recipiente de acero inoxidable de 20 L para el almacenamiento de la muestra.
Tubería	2	C1-304	El diámetro de la tubería fue de 1 ½ in y longitud de 6.1 m.
Bomba	1	EVANS	Bomba VN00136OE1PA56J 1.0HP
Válvula de mariposa	1	C1-03694-21 G1-304	Válvula de mariposa C/F, 38.1 mm
Manómetro	2	MANO-30G	0 a 30 psi
Bridas	2	C1-04807-20 G1-304 S-5	Brida para barandal 38.1 mm PS-013-38
Abrazadera	2	19SH30100 38.1 mm 304	Abrazadera reforzada de 38.1 mm
Empaque	2		Empaque de neopreno 38.1 mm
Ferrula soldable	2	20SH09180 38.1 mm 304	Ferrula soldable p/abraz. 38.1 mm cortas
Placa de orificio	3	Polímero PTFE	Placas de orificio de polímero PTFE 179 gramos
Codo	5	Comenza (CT-200 38.1)	Codo de acero inoxidable de 90 grados de 38.1 mm
Unión		Comenza (CT-207 38.1)	Unión de acero inoxidable de 38.1 mm
Unión en T	2	Comenza (CT-202 38.1)	T de acero inoxidable de 38.1 mm
Soldadura	2 kg		Arc Weld 880 2.4 mm 3/32
Disco	1		Disco 2716 Lam Gr 40 4 ½"x7/8"

En la Figura 1 se observa una representación general del sistema dónde se llevará a cabo el proceso de cavitación hidrodinámica, proceso alternativo de pasteurización. El sistema consta de un recipiente de 20 L, una bomba centrífuga, válvulas para controlar el flujo, manómetros, un par de bridas para colocar la placa de orificio. Los accesorios y tubería son de acero inoxidable grado alimenticio 304 (ver Tabla 1).

En resumen, el sistema CPO a realizar tendrá una longitud total de 502 cm, una altura de 40 cm y el volumen de la tubería a ocupar es de 5 L; la conexión se realizó siguiendo el diagrama presentado en la Figura 4 (Crudo, Bosco, Cavaglià, & Mantegna, 2014). Finalmente, la estructura del reactor a construir deberá soportar las presiones que se generen en el sistema, por lo que la estructura se efectuó bajo las mejores condiciones de ensamble para asegurar que el equipo funcione de la mejor manera sin tener fugas en sus uniones.

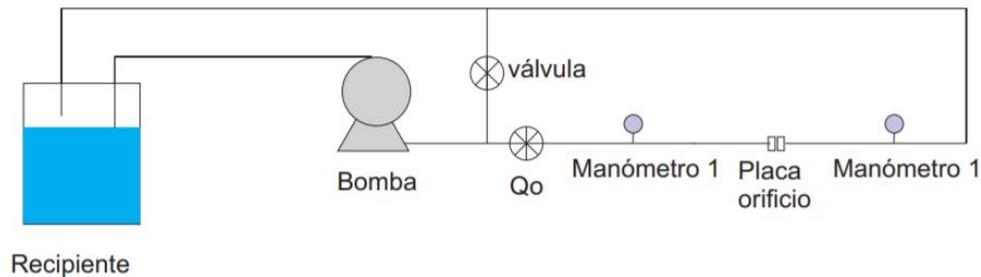


Figura 4. Esquema del sistema de cavitación hidrodinámica para llevar a cabo la pasteurización.

Para la unión de las piezas se utilizó la soldadura de arco con un electrodo infusible y protección de gas inerte se denomina comúnmente TIG (Tungsten Inert Gas). La soldadura TIG es un proceso autógeno en el que el calor se produce por un arco que choca entre la pieza de trabajo y un electrodo infusible (un electrodo que no se consume). El electrodo está hecho de tungsteno o aleaciones de tungsteno. Estos materiales tienen temperaturas de fusión muy altas, con excelentes propiedades de emisión termoiónica que facilitan el funcionamiento del arco eléctrico.

La soldadura TIG es adecuada para todo tipo de aceros al carbono, aceros de baja aleación, aleaciones inoxidables, aleaciones de níquel, aluminio y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, titanio, magnesio y otras aleaciones no ferrosas (Walter, 2020).

Para poder hacer este tipo de soldadura se tuvieron las siguientes condiciones:

- Como la soldadura es mucho más fluida, los operadores deben aumentar la velocidad de soldadura según sea necesario cuando trabajen en diferentes posiciones desde el plano.
- La limpieza antes de la soldadura es mucho más importante, dada la mayor sensibilidad de estos aceros a la formación de grietas (calientes) en la zona fundida.
- Los filtros especiales para la salida de la antorcha y la tapa en el reverso del metal reducen la coloración del cordón de soldadura (oxidación de la superficie).
- Esperar unos momentos para quitar la antorcha una vez que se completa la soldadura evita la oxidación del cráter.
- La limpieza y el mecanizado de acero inoxidable siempre requieren accesorios limpios no contaminados por aceros de baja aleación.

7.1.2. Diseño de la placa de orificio

En cuanto a la placa de orificio en la Figura 5 se muestra el diseño creado por (Alcalá, 2021), dónde se describen sus dimensiones. El diseño de la placa fue creado para 1 orificio, el tamaño de orificio considerado en este trabajo fue de 1 mm.

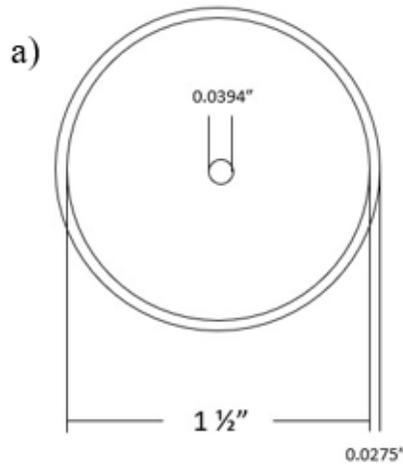


Figura 5. Representación de la placa de orificio para el sistema de cavitación hidrodinámica de 1 orificio.

La placa de orificio es la parte central del proceso de cavitación por lo que está se colocó entre dos bridas con sus respectivos empaques para asegurar o evitar alguna fuga en el sistema. Las bridas son aseguradas por tornillos. Cabe destacar que el material de las placas es de polímero politetrafluoroetileno (PTFE) y fueron impresas en una impresora 3D se buscó asegurar buena resistencia a las caídas de presión.

7.1.3. Preparación de soluciones

Para comprobar que no haya fugas en el sistema construido se utilizó agua potable para verificar que el prototipo cumpla con los requerimientos de flujo y presión.

7.1.4. Determinación de las condiciones de operación del sistema de cavitación con placas de orificios

En la Figura 6 se muestran el diseño experimental para las pruebas que se llevaron a cabo.

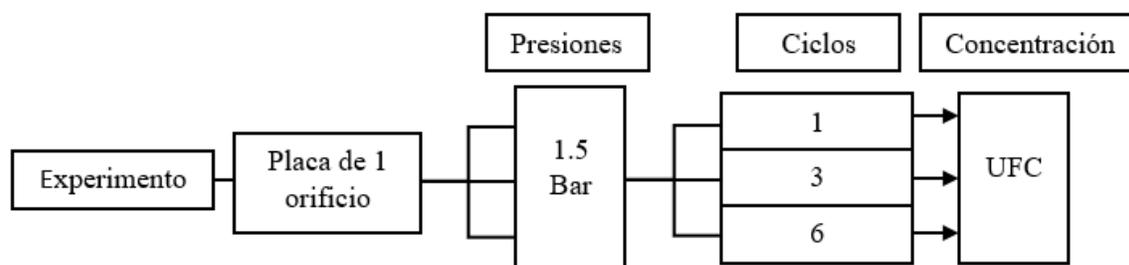


Figura 6. Diagrama de pruebas para el CPO.

7.2. Metodología para pruebas microbiológicas.

7.2.3. Cuantificación de Coliformes Totales

En la realiza conteo de coliformes totales en placa se utilizó la NOM-113-SSA1-1994, BIENES Y SERVICIOS. MÉTODO PARA LA CUENTA DE MICROORGANISMOS COLIFORMES TOTALES EN PLACA.

Preparación de medio:

1. Se colocó en un matraz Erlenmeyer con tapa de 500 mL la cantidad de 14.5 g del medio Agar Verde Brillante (AVB) y aproximadamente un volumen de 250 mL de agua destilada, se mantuvo en agitación y se calentó hasta ebullición con la precaución de que no proyectara.
2. Se preparó solución salina 0.85% donde se disolvieron 1.7 g de NaCl en 200 mL de agua destilada y se colocaron 9 mL de la solución en cada tubo de ensaye de 16x150 mm para tener las diluciones 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} por triplicado.
3. Se esterilizó en la autoclave el medio preparado y la solución salina a 121 °C por 15 minutos.
4. Se esterilizaron las pipetas de 1 mL colocando tapón de algodón y en un contenedor de pipetas en el horno a 180 °C durante 1 h.

7.2.2. Preparación de la muestra

Se realizó bajo la NOM-110-SSA1-1994, BIENES Y SERVICIOS. PREPARACIÓN Y DILUCIÓN DE MUESTRAS DE ALIMENTOS PARA SU ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.

1. Se agitó la muestra manualmente con 25 movimientos de arriba a abajo en un arco de 30 cm efectuados en un tiempo de 7 segundos
2. Se tomó 1 mL de la muestra y se colocó en tubo de solución salina 0.85% etiquetado 10^{-1} el cual se encontraba a una temperatura similar, evitando el contacto entre la pipeta y el diluyente.
3. Se realizaron los mismos movimientos mencionados anteriormente, se tomó 1 ml de la dilución 10^{-1} , se agregó en el tubo de la dilución 10^{-2} se agitó nuevamente, se tomó 1 ml de la dilución, se colocó en el tubo 10^{-3} y se repitió los movimientos de agitación, se realizó por triplicado.

Colocación de muestra:

1. Se colocaron en cajas Petri desechables estériles 0.1 mL de la dilución 10^{-3} y se vertió 15-20 mL del medio AVB a una temperatura alrededor de 45 °C.
2. Se mezcló cuidadosamente siguiendo los movimientos: 6 movimientos derecha- izquierda y a continuación 6 movimientos circulares hacia las manecillas del reloj, posteriormente contrario 6 movimientos contrarios al reloj y finalmente 6 movimientos arriba abajo.
3. Se repitió procedimiento con las diluciones restantes, se dejó solidificar el medio y se incubó a 35 °C durante 24 h.
4. Al terminar el período de incubación se realizó la cuantificación de bacterias.

7.2.3. Cuantificación de mohos y levaduras

Se realizó bajo la NORMA Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos.

1. Se preparó solución salina 0.85% donde se disolvieron 1.7 g de NaCl en 200 mL de agua destilada y se colocaron 9 mL de la solución en cada tubo de ensaye de 16x150 mm para tener diluciones de 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} por triplicado.
2. Se esterilizó en la autoclave el medio preparado y la solución salina a 121 °C por 15 minutos.
3. Se esterilizaron las pipetas de 1 mL a 180 °C durante 1 h.
4. Se agitó la muestra manualmente con 25 movimientos de arriba a abajo en un arco de 30 cm efectuados en un tiempo de 7 segundos
5. Se tomó 1 mL de la muestra y se colocó en tubo de solución salina 0.85% etiquetado 10^{-1} el cual se encontraba a una temperatura similar, evitando el contacto entre la pipeta y el diluyente.
6. Se realizaron los mismos movimientos mencionados anteriormente, se tomó 1 ml de la dilución 10^{-1} , se agregó en el tubo de la dilución 10^{-2} se agitó nuevamente, se tomó 1 ml de la dilución, se colocó en el tubo 10^{-3} y se repitió los movimientos de agitación, se realizó por triplicado.

La preparación de la muestra se realizó conforme lo establecido en el apartado 7.2.2.

Colocación de la muestra:

1. Se colocaron en cajas Petri desechables estériles 0.1 mL de la dilución 10^{-3} y se vertió 15-20 mL del medio PDA a una temperatura alrededor de 45 °C.
2. se mezcló cuidadosamente siguiendo los movimientos: 6 movimientos derecha- izquierda y a continuación 6 movimientos circulares hacia las manecillas del reloj, posteriormente contrario 6 movimientos contrarios al reloj y finalmente 6 movimientos arriba abajo.
3. Se repitió procedimiento con las demás diluciones, se dejó solidificar el medio y se incubó a 35 °C durante 24 h.
4. Al terminar el período de incubación se realizó la cuantificación de bacterias.

Etapa 2: Pruebas para la caracterización de la muestra seleccionada para validar el proceso de pasteurización.

Para estudios posteriores se evaluará la degradación de nutrientes del jugo de manzana para observar si el sistema cumple con las condiciones adecuadas para poder realizar la pasteurización sin la degradación de nutrientes.

7.3. Metodología de caracterización de manzana antes de la elaboración del jugo (*Malus Doméstica Golden Delicious*).

Para estas técnicas se seleccionaron 3 manzanas del lote que se compró para ser evaluadas por los siguientes métodos:

7.3.1. Medición de color

Se realizó la medición de color de la piel de la manzana antes de procesarla por el equipo. El medidor de colorimetría CR-410, se realizó por triplicado.

7.3.2. Determinación de acidez titulable

Se realizó la determinación de acidez titulable por medio de la NMX-FF-011-1982. PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS, PARA USO HUMANO. FRUTA FRESCA. DETERMINACIÓN DE ACIDEZ TITULABLE. MÉTODO DE TITULACIÓN. Se pesaron 5 g de manzana se agregaron 20 mL de agua destilada y se licuó, posteriormente se colocó en un matraz Erlenmeyer de 100 mL, se realizó por triplicado y por último se tituló con NaOH [0.1 M] utilizando como indicador fenolftaleína al 1% en etanol al 80%.

$$Acidez = \left(\frac{N * VD * Meq}{M} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde N es la normalidad del reactivo, VD es el volumen del reactivo descargado, Meq son los miliequivalentes del ácido dominante (ácido málico) y M es el tamaño de la muestra en gramos.

7.3.3. Determinación de pH

Se licuaron 10 g de manzana en 50 mL de agua y se midió el pH con potenciómetro para Laboratorio Oakton 700.

7.3.4. Medición de textura

Se midió dureza de la manzana en el equipo ANALIZADOR DE TEXTURA MOD. CT3- 1500GR 115 V, se realizó por triplicado.

7.4. Metodología para la elaboración del jugo de manzana.

Se elaboró el jugo de manzana bajo la metodología de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Primero se eligió fruta de calidad y madura, posteriormente se realizó un lavado de la fruta en una solución de hipoclorito al 10% y se dejó en reposo 10 min, en seguida del lavado se descorazonó la fruta y se cortó en 4 para proseguir a realizar el escaldado a una temperatura de 85 °C por 5 minutos. Al tener la fruta escaldada se prosiguió a realizar el puré donde se colocó la fruta con piel en una licuadora Óster y se licuó, ya obtenido el puré se exprimió para obtener el jugo por el método de prensa (Alcalá, 2021), dónde se utilizó un embudidor MTV7. El jugo se filtró a través de un papel filtro, se embolsó y finalmente se congeló.

7.5. Metodología para pruebas fisicoquímicas para el jugo.

7.5.1. Determinación de pH

Se midieron el pH con un potenciómetro para Laboratorio Oakton 700.

7.5.2. Determinación de grados Brix

Se tomaron una alícuota del jugo y se midió sus grados Brix con el Refractómetro ABBE-REF 1.

7.5.3. Determinación de densidad

Se colocaron un densímetro en una probeta de 250 mL con la muestra problema y se midió directamente.

7.5.4. Determinación de viscosidad

Se tomaron 350 mL de jugo de manzana y se colocó en un vaso de precipitado, posteriormente se le midió viscosidad en el viscosímetro Brookfield usando la aguja No. 2 en las velocidades de 50 y 100 rpm. La viscosidad se midió con las siguientes temperaturas 14, 25, 50, 60 y 70 °C. Posteriormente a tener los valores del viscosímetro se multiplicó por el factor de conversión para obtener el valor de viscosidad de la muestra. Para obtener el valor de viscosidad se utilizó la siguiente Ecuación 2.

$$\mu = dr * f \quad (2)$$

donde μ es viscosidad (mPa*s); dr se refiere a la lectura en el equipo; f es el factor que se elige de una tabla (ver Anexo 1) del equipo de acuerdo con la aguja utilizada y al rpm que fue utilizado el equipo.

7.5.5. Determinación de antioxidantes por ABTS

Preparación de la muestra:

1. Se realizó una dilución 1:1 de jugo de manzana con etanol al 96% y se homogeneizó en vortex.

Preparación de reactivos:

1. Se preparó la solución de Persulfato de Potasio a una concentración [2.45mM] donde se añadió 0.0662 g del reactivo y se disolvió en 100 mL de agua destilada y se mantuvo en refrigeración.
2. Se preparó la solución de Trolox (solución madre) con una concentración de [3.99 mM] en etanol al 96% un volumen de 100 mL y se añadió 0.1 g del reactivo.
3. Se preparó la solución de ABTS en un frasco ámbar envuelto en aluminio añadiendo 57.63 mL de la dilución 1:1 de Persulfato de Potasio con etanol al 96% y una pastilla del reactivo Ácido 2,2'-azinobis (3- etilbenzotiazolín)-6-sulfónico (ABTS) de un peso de 0.1095 g teniendo una concentración de [3.45X10⁻⁴ M].

Curva tipo:

Para realizar la curva tipo se utilizó como solución madre el Trolox como se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Preparación de estándares para la curva de ABTS.

Solución de reacción	Trolox (µM)	Trolox (mL)	Etanol (mL)
1	3	3.75	1.25
2	2	2.5	2.5
3	1	1.25	3.75
4	0.5	0.625	4.375
5	0.25	0.3125	4.6875
6	0	0.15625	4.8425

1. Para cada solución de reacción se utilizaron 40 µL de las soluciones patrón y posteriormente se agregó ABTS previamente ajustado con etanol 96% a 0.8 de absorbancia completando un volumen de 4 mL. La curva patrón se leyó en el espectro-UV a una absorbancia de 730 nm.
2. Al agregar el ABTS se esperó 5 minutos y posteriormente se leyó en el espectro.
3. Para la lectura de muestras problema se colocaron 40 µL de jugo de manzana previamente tratado, se agregaron 3960 µL de ABTS completando un volumen de 4 mL, se dejó en reposo 5 minutos y se leyó la absorbancia.

4. Para obtener la concentración de Trolox en el jugo de manzana se interpola en la curva tipo obtenida; para realizar la determinación de antioxidantes se tienen las siguientes recomendaciones:
 - 1) Se tiene que obtener la curva tipo de ABTS cada vez que se realice la prueba.
 - 2) Se tiene que identificar en la bibliografía cuanto se tiene que diluir la muestra para que entre en el rango de la curva.

7.5.6. Determinación de Vitamina C

Para evaluar la Vitamina C se utilizó la NMX-F-229-1972. MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE VITAMINA "C" EN LECHE con algunas modificaciones.

Preparación de la muestra:

1. Se realizó una dilución 1:1 de jugo de manzana con agua destilada y se homogeneizó en vortex.

Preparación de reactivos:

1. Se preparó ácido metafosfórico al 10% diluyeron 10 g de ácido metafosfórico en 100 mL de agua y se aforaron.
2. Se utilizó como blanco ácido metafosfórico-acético, donde se agregaron 0.3 g HPO_3 , 0.8 mL de ácido acético glacial y se aforó a 50 mL con agua destilada.
3. Para la solución de sal sódica del 2.6 diclorofenol indofenol se pesó exactamente 50 mg del reactivo, se agregó en un vaso de precipitado envuelto con aluminio, se le agregó agua y se calentó a ebullición sin dejar de agitar. Se enfrió, se filtró por papel y se recibió en un matraz aforado de 100 mL. Esta solución se conservó en un recipiente ámbar.
4. Para la preparación de la solución estándar de ácido ascórbico se pesaron 25 mg de ácido ascórbico grado reactivo y se agregaron a un matraz aforado de 25 mL, se aforó con la solución de ácido metafosfórico al 10%.

Curva tipo:

Para realizar la curva tipo se utilizó la solución estándar de ácido ascórbico. En la Tabla 3 se presentan los estándares para la curva tipo de Vitamina C.

Tabla 3. Preparación de estándares para la curva tipo de Vitamina C.

Solución de reacción	Ácido ascórbico (mg/mL)	HPO ₃ (mL)	Ácido ascórbico (mL)
1	0	4	0
2	0.2	3.2	0.8
3	0.4	2.4	1.6
4	0.6	1.6	2.4
5	0.8	0.8	3.2
6	1	0	4

1. Para cada solución de reacción se utilizaron 40 µL de las soluciones patrón y posteriormente se le agregó la solución de sal sódica de 2.6 diclorofenol indofenol completando un volumen de 4 mL. Al agregar la solución de sal sódica del 2.6 diclorofenol indofenol se esperó 5 minutos y posteriormente se leyó en el espectro. La curva patrón se leyó en el espectro-UV a una absorbancia de 530 nm.
2. Para la lectura de muestras problema se colocaron 40 µL de jugo de manzana previamente ya tratado y se agregó 3960 µL de la solución de sal sódica del 2.6 diclorofenol indofenol completando un volumen de 4 mL, se dejó en reposo 5 minutos y se leyó la absorbancia.
3. Para obtener la concentración de ácido ascórbico en el jugo de manzana se interpolo en la curva tipo obtenida; para realizar la determinación de Vitamina C se tienen las siguientes recomendaciones:
 - 1) Se tiene que obtener la curva tipo de ácido ascórbico cada vez que se prepare reactivo
 - 2) Se tiene que identificar con bibliografía cuanto se tiene que diluir la muestra para que entre en el rango de la curva.

7.5.7. Determinación de azúcares totales

Se determinaron los azúcares totales por el método Fenol- Sulfúrico.

Preparación de la muestra:

1. Se realizó una dilución 1:200 con agua destilada para el jugo sin pasteurizar. Agregando 1 mL de jugo de manzana y 200 mL de agua destilada. Para el jugo pasteurizado se realizó una dilución de 1:400 de igual manera se diluyó con agua destilada.

Preparación de reactivos:

1. Para la preparación de solución estándar de glucosa se disolvieron 100 mg de glucosa anhidra y se aforaron con 100 mL de agua destilada, teniendo una concentración de 100 mg/mL.
2. Para la preparación de solución Fenol 80g/100g: Se pesaron 6.4 g de fenol y se disolvieron en 1.6 mL de agua destilada.

Curva patrón:

Se utilizó la solución de glucosa como estándar, se enumeraron los tubos del 1 al 8 colocando los reactivos en el orden que describe en la Tabla 4.

Tabla 4. Preparación de estándares para la curva patrón de azúcares totales.

No. Tubos	Patrón de glucosa 100mg/mL (mL)	Agua destilada (mL)	Fenol 80g/100g (mL)	H ₂ SO ₄ 97g/100g (mL)
Blanco	0	1	0.1	3
1	0.1	0.9	0.1	3
2	0.2	0.8	0.1	3
3	0.3	0.7	0.1	3
4	0.5	0.5	0.1	3
5	0.6	0.4	0.1	3
6	0.8	0.2	0.1	3
7	0.9	0.1	0.1	3
8	1	0	0.1	3

1. Los tubos se leyeron en el espectrofotómetro-UV a una absorbancia de $\lambda=540\text{nm}$ en celdas de 4 mL.
2. Se colocó el volumen que indica el *Cuadro 3* de glucosa, agua y la solución de fenol, se agitó en vortex y se dejó en reposo 15 min después de agregar estas soluciones, al terminar el tiempo se agregó la solución de ácido sulfúrico nuevamente y se agitó en vortex para homogenizar e inmediatamente se dejó en reposo 15 min antes de leer en el espectro, todos los reactivos se agregaron en la campana de extracción.

3. Para leer la concentración de azúcares totales del jugo se colocó 1 mL de la dilución de la muestra y posteriormente se agregó la misma cantidad de fenol y ácido sulfúrico que las soluciones estándar.

Capítulo VIII. Resultados y discusión

8.1. Construcción del sistema de cavitación por medio de placas de orificio (CPO)

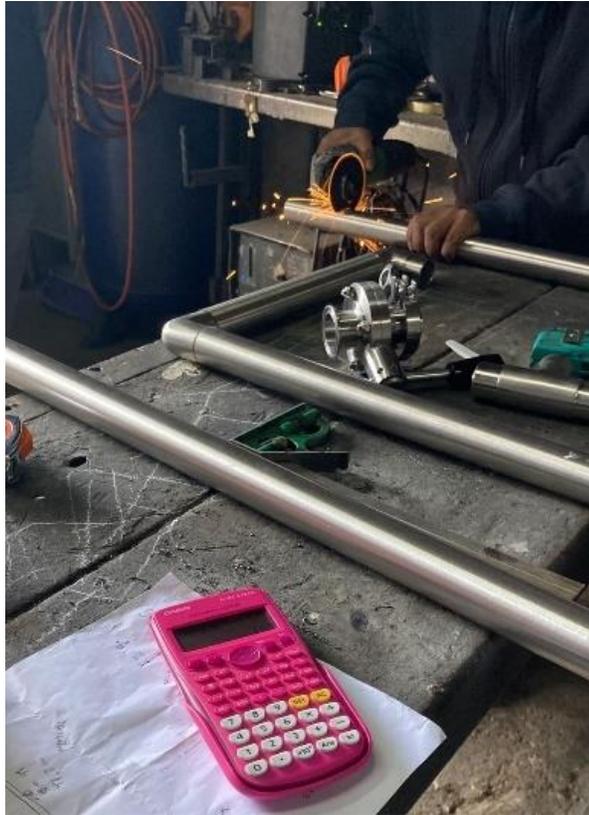


Figura 7. Cortado de tubería.

Para la construcción del sistema se basó en el diseño de la Figura 4, dónde primeramente se cortaron las piezas con un cortador de tubo eléctrico con las medidas descritas. En la Figura 7 se muestra el momento dónde se cortaron los tubos para después unirlos.



Figura 8. Unión de piezas con punto.

Después de cortar la tubería se fueron uniendo las piezas con los codos, uniones T, la válvula mariposa, bridas, etc. En la Figura 8 se muestran los puntos para poder dejar las piezas fijas y facilitar el proceso de soldar.



Figura 9. Primer prototipo para llevar a cabo la cavitación con una bomba de potencia de $\frac{1}{2}$ HP.

En la Figura 9 se representa el primer prototipo realizado, que después se tuvo que cambiar debido a que no se cumplían las condiciones de operación para llevar a cabo el fenómeno de cavitación.



Figura 10. Segundo prototipo construido para llevar a cabo la cavitación con una bomba de potencia de 1 HP.

En la Figura 10 se muestra el prototipo que cumplió con las condiciones para poder llevar a cabo el proceso de cavitación.

Tabla 5. Comparación de las presiones alcanzadas por la bomba de 1/2 y 1 HP.

Bomba	Presión de entrada	Presión de salida
1/2 HP	0 bares	0 bares
1 HP	1.5 – 2 bares	0 bares

En la Tabla 5 se muestran las presiones alcanzadas por las distintas bombas; la bomba de 1 HP tuvo mayor presión de entrada, por lo que si cumplió con las condiciones necesarias para poder llevar a cabo el fenómeno de cavitación y se optó por utilizarla para estudios posteriores.



Figura 11. Vista frontal de la placa de orificio.



Figura 12. Vista lateral de la placa de un orificio.

En la Figura 11 y 12 se muestra la placa de un orificio que se mandó imprimir en 3D con una vista frontal y lateral. Contaba con empaques para que pudiera tener un sellado hermético dentro del sistema.

Se realizó un balance de energía mecánica empleando la Ecuación de Bernoulli para determinar la potencia de la bomba de 1 HP.

Para calcular la potencia de la bomba primero se tiene la siguiente ecuación:

$$P_B(\text{hp}) = \frac{Q\rho gh_B}{746 e} \quad (3)$$

Donde:

P_B : Potencia de la bomba (hp)

Q : Caudal (m^3/s)

ρ : Densidad (kg/m^3)

g : Gravedad (m/s^2)

h_B : Cabeza neta de la bomba (m)

e : Eficiencia (%)

Para obtener la cabeza neta de la bomba se emplea la ecuación de Bernoulli

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} + h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{P_3}{\rho} + h_f \quad (4)$$

Como el sistema es estacionario se cancelan términos obteniendo lo siguiente:

$$h_B = h_3 + \frac{V_3^2}{2g} + h_f \quad (5)$$

Donde:

h_B : Cabeza neta de la bomba (m)

h_3 : Alturas del sistema (m)

v_3 : Velocidad de la bomba (m/s)

g : Gravedad (m/s^2)

h_f : Pérdidas de fricción (m)

Tabla 6. Resultados obtenidos de la ecuación de Bernoulli para el sistema CPO.

Variabes	Valor experimental
h₂	1.365 m
Q	2.75 x 10 ⁻³ m ³ /s
V₃	1.835 m/s
Re	79,594.52
ε	0.045 mm
D	43.68 mm
F	0.022
Coficiente K para codo de 90°	0.9
Coficiente K para Te paso directo	0.6
Coficiente K para placa de orificio	2.5
h_r	2.44 m
h_B	3.97 m
P_B	0.22 HP

En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos en los cálculos realizados obteniendo una cabeza neta de la bomba de 3.97 m y una potencia de 0.22 HP, los valores son bajos porque el sistema tiene dimensiones muy cortas y cuando pasa por la placa de orificio hay un decremento de la presión a la salida del sistema.

8.1.1. Características microbiológicas del agua

Tabla 7. Resultados de pruebas microbiológicas con agua potable.

Incubación (horas)	Coliformes totales	Mohos y levaduras
24	0 UFC/mL	0 UFC/mL
48	0 UFC/mL	0 UFC/mL

En la Tabla 7 no se observó crecimiento de coliformes totales, mohos y levaduras, esto debido a que el agua potable cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994 "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION"., que establece un límite permisible de 2 UFC/mL.

8.2. Caracterización de la manzana antes de la elaboración del jugo

Tabla 8. Resultados de la caracterización de la manzana antes de la elaboración del jugo.

Prueba	Valor experimental	Valor teórico
Acidez titulable	0.211 g ácido málico/100 mL	0.30 – 0.60 g ácido málico/100 mL
pH	4.23	3.5 – 4.0
Colorimetría	ΔE de cáscara = 29.12 ΔE de pulpa = 41.39	-
Texturometría	2,959 g	-

Como se observa en la Tabla 8 las manzanas que se utilizaron antes de la elaboración del jugo obtuvieron en acidez titulable un valor 0.2144 (g ácido málico/ 100mL), para el pH se obtuvo un valor de 4.23 los cuales están por debajo del parámetro que indica la NMX-F-045-1982.

De colorimetría la diferencia global de color promedio para la cáscara (epicarpio o piel) de la manzana fue de $\Delta E = 29.12$ y del interior de la manzana (mesocarpio o pulpa) de $\Delta E = 41.39$. En cuanto a la texturometría se obtuvo un valor de 2,595 g de fuerza para poder morder la manzana. Estos valores pueden ayudar en la determinación de la madurez del fruto antes de ser procesados.

8.2.1. Características fisicoquímicas de jugo de manzana (*Malus doméstica* Golden Delicious)

Tabla 9. Resultados de las características fisicoquímicas de jugo de manzana.

Prueba	Valor experimental	Valor de referencia
pH	4.54	3.5 – 4.0
Sólidos solubles °Brix	11.8	11.0 – 14.0
Densidad	1.05 g/mL	1.04 - 1.06 g/mL

Lo que se observa en la Tabla 9 en el pH se obtuvo un valor de 4.54, el cual está fuera de lo establecido en la norma, ya que el fruto no contó con la madurez suficiente para ser aceptado por la norma; en los sólidos solubles se obtuvo un valor de 11.8 y una densidad de 1.05 g/mL, los cuales si cumplen con lo establecido en la NMX-F-045-1982 ALIMENTOS. FRUTAS Y DERIVADOS. JUGO DE MANZANA. Estos datos pueden ayudar en un estudio para el balance de materia.

En la *Figura 13* se observa la viscosidad que se obtuvo con las temperaturas de 14, 25, 50 y 60 °C con la aguja No. 2 a 100 rpm.

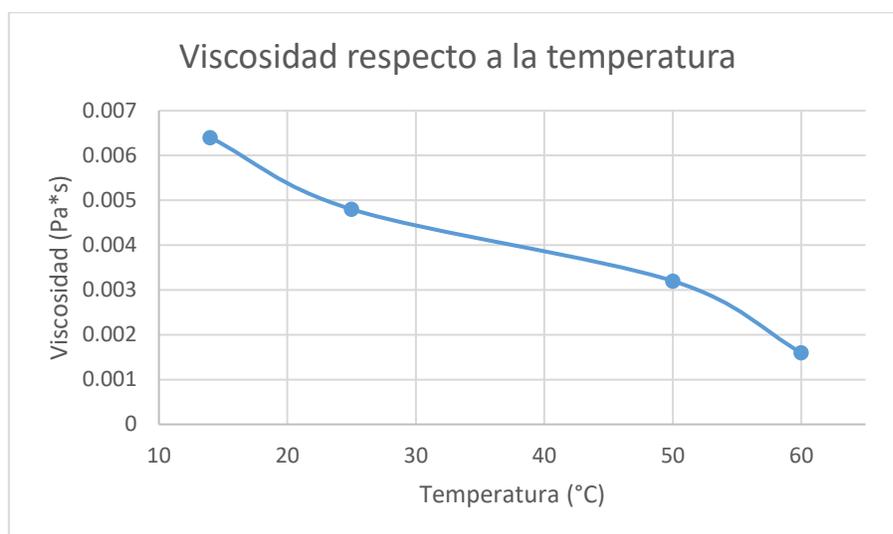


Figura 13. Viscosidad respecto a la temperatura.

Como se observa en la Figura 11 el comportamiento del fluido nos indica que es Newtoniano, ya que conforme aumenta la temperatura disminuye la viscosidad y se proporcionan los cambios que tiene el fluido cuando se somete al proceso de pasteurización.

8.2.2. Nutrientes del jugo de manzana

Tabla 10. Resultados de los nutrientes del jugo de manzana.

Prueba	Valor experimental	Valor de referencia
Antioxidantes ABTS	9.84 UT	47.7 UT
Vitamina C	0.55 mg/mL	0.84 mg/mL*
Azúcares totales	618 mg/ mL	247.39 mg/ mL*

*Los valores de referencias fueron tomados de un estudio previo de elaboración de jugo de manzana por (Alcalá, 2021).

Como se observa en la Tabla 10 se obtuvo un valor de 9.84 UT, que es un valor bajo con respecto a lo reportado por (Palomo, Yuri, Moore-Carrasco, Quilodrán, & Neira, 2010), ya que hay varios parámetros que influyen en el contenido de antioxidantes como la radiación solar, el cultivar, nutrición mineral de la planta, zona climática donde se desarrolla, almacenaje refrigerado y tipo de tejido (piel o pulpa).

Para la Vitamina C se obtuvo un valor de 0.55 mg/mL, lo cual está dentro de los límites de la norma NMX-F-045-1982, ya que señala que el máximo valor de ácido ascórbico que puede adicionarse a los jugos de manzana es de 15 mg/100g. Aproximadamente hay 10 mg de ácido ascórbico en cada

100 g de manzana, aunque eso depende de la calidad y la clase de esta fruta. (Ayala, Hernández, Gutiérrez, & Chávez, 2014)

Para el contenido de azúcares totales se obtuvo un valor de 6.18 g/mL el cual salió alto en comparación con el valor de referencia, esto puede deberse a que se utilizaron manzanas de diferente especie.

Capítulo XI. Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos se puede concluir que los objetivos planteados fueron alcanzados:

La construcción del prototipo para el sistema de cavitación con diferentes componentes permitió el monitoreo y control de las variables de interacción. Encontrando como variable más importante la presión de trabajo para el control del sistema.

Se validó la construcción de un sistema de cavitación de placa y orificio cerrado con acero inoxidable grado alimenticio 304 con las condiciones mínimas para poder llevar a cabo un proceso alternativo a la pasteurización.

Se obtuvo una cabeza neta de la bomba de 3.97 m, una potencia de 0.22 HP y un caudal a la salida del sistema de 47.48 cm³/s.

No se observó crecimiento de microorganismos debido a que el agua potable cumple con lo establecido en NOM-127-SSA1-1994 1994 "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

Se determinó que la manzana seleccionada cumplió con los requisitos de la NMX-F-045-1982. ALIMENTOS. FRUTAS Y DERIVADOS. JUGO DE MANZANA. Para poder ser procesada, además de ser un fluido newtoniano.

Los valores de los parámetros evaluados: capacidad antioxidante por el método de ABTS, vitamina C y azúcares totales, son menores a las esperadas.

9.1. Recomendaciones y prospectivas

Se recomienda utilizar una bomba con una capacidad mayor a 1 HP, para que se genere el fenómeno de cavitación.

Es importante verificar que el sistema no presente laceraciones que generen fugas para prevenir una caída de presión.

Como verificación de la disrupción celular por el fenómeno de cavitación se evaluará la interacción en el medio del microorganismo (*Saccharomyces cerevisiae*).

En futuras pruebas se implementará una bomba centrífuga y manómetros grado alimenticio para un mejor control y eficiencia del sistema de cavitación (CIESA, 2021).

Se evaluará la degradación de las propiedades organolépticas sometiendo el jugo de manzana generado durante este proyecto al sistema de cavitación CPO.

Si se pretende usar placas de diferentes orificios se recomienda aumentar la potencia de la bomba para poder tener el fenómeno de cavitación.

Bibliografía

- Alcalá, P. (2021). *Evaluación de parámetros fisicoquímicos y nutricionales del jugo de manzana en vida de anaquel de 3 meses y planteamiento de métodos de pasteurización por cavitación usando CFD*. Zacatecas: Instituto Politécnico Nacional.
- Andrés, V. (1 de Septiembre de 2016). *Efecto del tratamiento de altas presiones hidrostáticas y del almacenamiento sobre la seguridad y la calidad nutricional, sensorial y funcional de smoothies como alternativa a las bebidas mixtas comerciales*. Obtenido de Universidad Complutense: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/38579/>
- Arrojo, S., & Y., B. (2008). A theoretical study of hydrodynamic cavitation," *Ultrasonics Sonochemistry*, *15*, 203-211. doi:10.1016/j.ultsonch.2007.03.007
- Ayala, G., Hernández, L., Gutiérrez, N., & Chávez, D. (2014). Comparación del perfil vitamínico en jugos ultrapasteurizados de manzana y su impacto térmico de degradación. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, *3*, 1 - 22. Obtenido de <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/26/53>
- Balasundaram, B., & Harrison, S. (2011). Optimising orifice geometry for selective release of periplasmic products during cell disruption by hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, *2011*, 207-209. doi:10.1016/j.bej.2011.03.002
- Bauruv, Y., Meneguzzo, F., & Buruv, A. (2012). Plasma vacuum bubbles and a new forcé of natur, the experiments. *int.J Pure Appl*, *11*, 34-44.

- Carillo, O., Galindo, G., & García, I. (12 de Octubre de 2012). *Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua a nivel terciario*. Obtenido de UNAM: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1894/Tesis.pdf?sequence=1>
- Carpintero, J., Sunil, R., Suja, G., & Mandar, B. (2012). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 433-470, 2016. DOI: 10.1515/revce-2016-0032.
- CIESA. (2021). Catálogo de bombas. *CIPSA*, 4 - 16.
- Crudo, D., Bosco, V., Cavaglià, G., & Mantegna, S. (2014). Process intensification in the food industry: Hydrodynamic and acoustic cavitation in fresh milk treatment. *Agro Food Industry Hi Tech*, 55 - 59.
- Dindar, E. (2016). An overview of the application of hydrodynamic cavitation for the intensification of wastewater treatment applications: A review. *Innovative Energy & Research*, 5, 137-143. doi:10.4172/2576-1463.1000137
- Gogate, P. (2010). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food Bioprocess Technology*, 4, 996-1011. doi:10.1007/s11947-010-0418-1
- Gogate, P., & Kabadi, A. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44, 60-72. doi:10.1016/j.bej.2008.10.006
- Gutiérrez, F., Arias, S., & Cardona, D. (1 de Agosto de 2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 283-301. Obtenido de Redalyc.
- Knorr, D., Ade-Omowaye, & Heinz, V. (2002). Nutritional improvement of plant foods. *Proceedings of the Nutrition Society*, 61, 311-318.
- Knorr, D., Ade-Omowaye, & Heinz, V. (2002). Nutritional improvement of plant foods by non-thermal processing. *Proceedings of the Nutrition Society*, 61, 311-318.
- Marín, C. (8 de noviembre de 2021). *Tubo Venturi*. Obtenido de Instrumentación de Procesos Industriales: <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-flujo-2>
- Marín, J. (8 de noviembre de 2017). *Esquema del reactor biológico rotativo de contacto (RBC)*. . Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-del-reactor-biologico-rotativo-de-contacto-RBC_fig1_308609920
- Martyneko, A., Astatkie, T., & Satanina, V. (2015). Novel hydrothermodynamic food processing technology. *Journal of Food Engineering*, 152. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.11.016
- Milly, P., Toledo, R., Kerr, W., & Armstead, D. (2007). Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *Journal of Food Science*, 414-422.

- Moholkar, V., & Pandit, A. (2001). Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chemical Engineering Science*, 21, 6295-6302. doi:10.1016/j.ultsonch.2014.03
- Palomo, G., Yuri, S., Moore-Carrasco, R., Quilodrán, P., & Neira, E. (2010). El consumo de manzanas contribuye a prevenir el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y cáncer: antecedentes epidemiológicos y mecanismos de acción. *Revista chilena de nutrición*, 37(3), 377 - 385. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182010000300013
- Par, M. (10 de octubre de 2017). *Aplicación de los métodos de conservación de alimentos*. Obtenido de Library: <https://1library.co/document/y652g64z-aplicacion-de-los-metodos-de-conservacion-de-alimentos.html>
- Petkovsek, M., Zupanc, M., Dular, M., Kosjek, T., Heath, E., & Kompare, B. (2013). Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. *Separation and Purification Technology*, 118, 415 - 423. doi:10.1016/j.seppur.2013.07.029
- PROFECO. (14 de noviembre de 2018). *Jugos y néctares*. Obtenido de Consumidor: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/394666/Estudio_de_Calidad_Jugos_y_N_ctares.pdf
- SAGARPA. (14 de noviembre de 2016). *Manzana mexicana*. Obtenido de Subsecretaría de agricultura: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256430/B_sico-Manzana.pdf
- Sainte, R., & Morison, K. (2010). Enzymatic hydrolysis of canola oil with hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 1101-1106. doi:10.1016/j.cep.2010.08.012
- Walter. (20 de octubre de 2020). *Soldadura TIG*. Obtenido de Walter Surface Technologies: walter.com/es_MX/surfox/soldadura-tig

Anexos

Tabla 11. Factor del viscosímetro de Brookfield.

SPEED	SPINDLE NUMBER						
	H01	H02	03	04	05	06	07
0.5	1.6K	6.4K	16K	32K	64K	160K	640K
1	800	3.2K	8K	16K	32K	80K	320K
2	400	1.6K	4K	8K	16K	40K	160K
2.5	320	1.28K	3.2K	6.4K	12.8K	32K	128K

4	200	800	2K	4K	8K	20K	80K
5	160	640	1.6K	3.2K	6.4K	16K	64K
10	80	320	800	1.63K	3.2K	8K	32K
20	40	160	400	800	1.6K	4K	16K
50	16	64	160	320	640	1.6K	6.4K
100	8	32	80	160	320	800	3.2K

K=1000

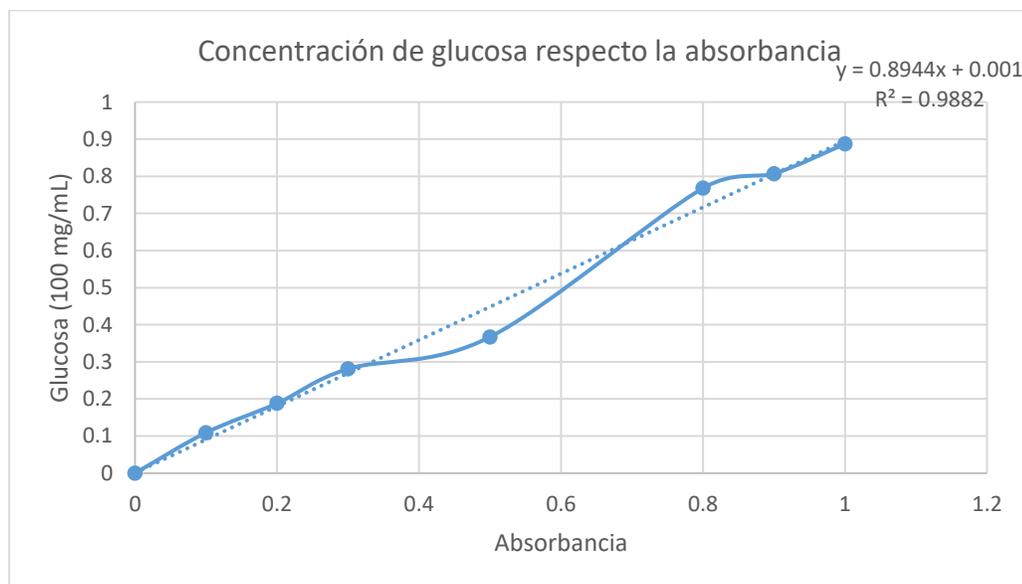


Figura 14. Curva patrón para azúcares totales.

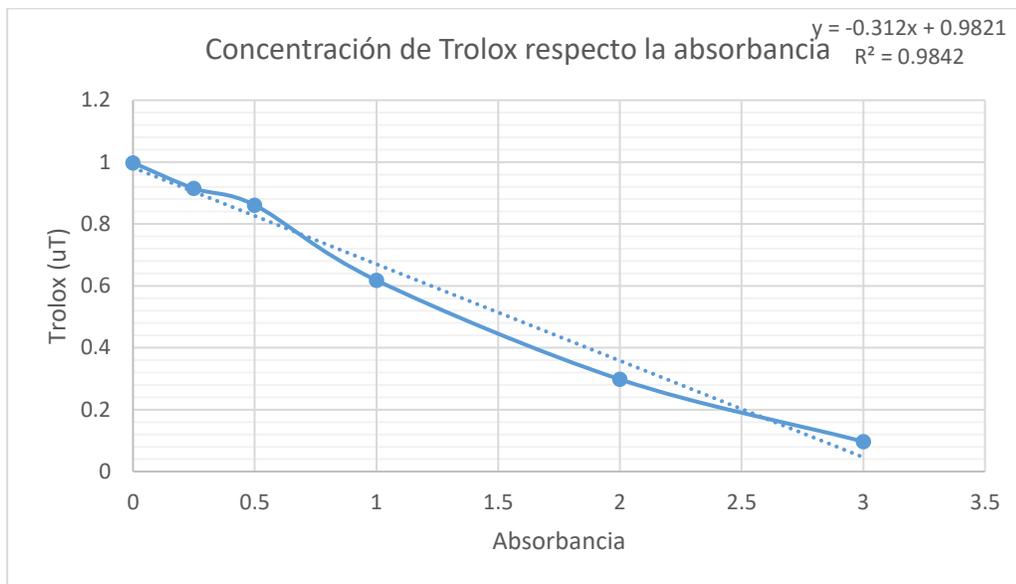


Figura 15. Curva patrón para ABTS.

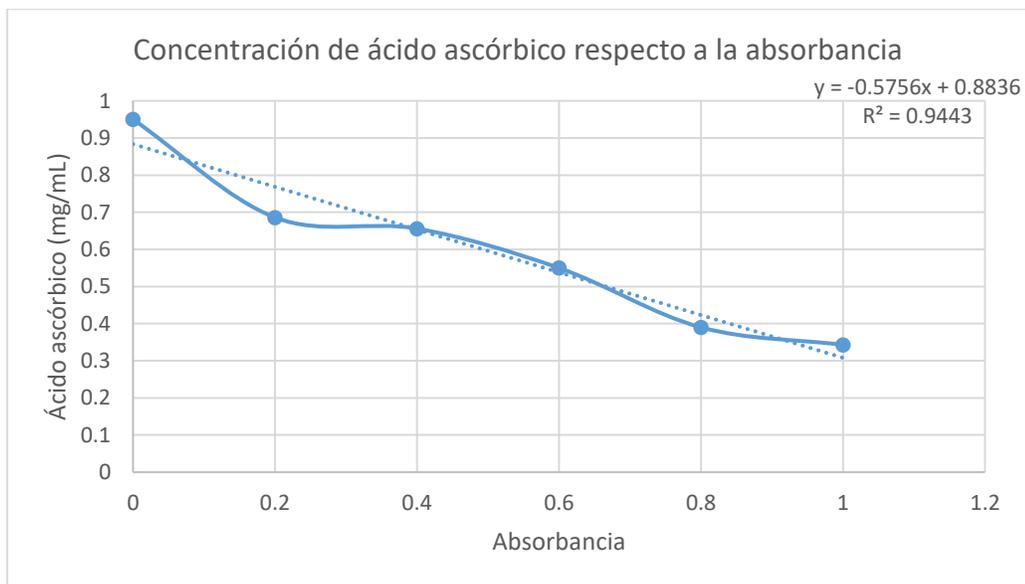


Figura 16. Curva patrón para Vitamina C.