

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO QUE
DESCRIBE LAS BASES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA
LAVADORA DE ROPA CON PERSPECTIVA EN UN BAJO
CONSUMO DE AGUA Y EL USO DE ENZIMAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

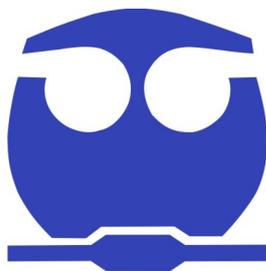
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

DIANA MONSERRAT ALVARADO SANTOS

DIRECTOR:

OSCAR HERNÁNDEZ MELENDEZ



Ciudad Universitaria, CDMX, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: Eduardo Barzana García

VOCAL: Profesor: Rodolfo Ruíz Trejo

SECRETARIO: Profesor: Oscar Hernández Melendez

PRIMER SUPLENTE: Profesora: Sandra Tobón Cornejo

SEGUNDO SUPLENTE: Profesora: Carmina Montiel Pacheco

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Química,
Ciudad Universitaria, CDMX.

ASESOR DEL TEMA: Dr. Oscar Hernández Melendez

SUSTENTANTE: Diana Monserrat Alvarado Santos

Agradecimientos

A mi mamá: Sonia Santos, a mi papá: Benigno Alvarado, a mis hermanos: Julio y Leonardo, a Blanquis y a Chiquis, por esta vida juntos.

A Adriana, Andrea, Aure, Gabriela, Itzel, Jaritzi, Lala, Mariana, Martha, Male, Sandra y Victoria, las mujeres que forman parte de mi vida, por tanto amor.

A Ale, Carlos, Deneff, Frida, Israel, Miguel, Pablo y Sandra, amigas y amigos, quienes amortiguaron este trayecto.

Al jurado revisor, integrado por los profesores: Óscar Hernández, Eduardo Barzana y Rodolfo Trejo, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y por sus comentarios, los cuales permitieron enriquecer e integrar el trabajo definitivo.

“¿Qué sería de la vida si no tuviéramos el valor de intentar algo nuevo.”

– Vincent Van Gogh.

Índice general

0.1. Objetivos generales	x
0.2. Objetivos específicos	x
1. El fenómeno de la detergencia	1
1.1. Tipos de suciedad	1
1.1.1. Grasa	1
1.1.2. Sólidos hidrosolubles	1
1.1.3. Partículas sólidas	1
1.2. Surfactantes o tensoactivos	2
1.2.1. Características estructurales generales y comportamiento de los tensoac- tivos	2
1.2.2. Clasificación de los tensoactivos	3
1.2.3. Mecanismo de la detergencia	4
1.2.4. Remoción de la suciedad	5
1.2.5. Solubilización	7
1.2.6. Emulsificación espontánea	8
1.2.7. Redeposición de la suciedad	8
1.2.8. Composición de un detergente comercial	8
1.3. Aspectos mecánicos	9
2. Mecanismo deteritivo basado en las enzimas	11
2.1. Enzimas no extremófilas	11
2.2. Enzimas extremófilas	15
2.3. Enzimas detergentes	16
2.3.1. “Procedimiento para la mejora del rendimiento de limpieza de un agente detergente o de limpieza”	18
2.3.2. “Composiciones detergentes y uso de combinaciones de enzimas en las mismas”	20
2.3.3. “ α -Amilasa mutante, detergente y agente de lavado de vajilla”	21
2.3.4. “Composición detergente”	22
3. Lavadoras con perspectiva de ahorro de agua	23
3.0.1. Lavadora Mabe Aqua Saver	24
3.0.2. Lavadora para instrumental de vidrio de laboratorio	24
3.0.3. Lavadora alemana	25
3.0.4. Estudio de la Procuraduría Federal del Consumidor	27
4. Fundamentos del ultrasonido	29
4.1. Tipos de ondas ultrasónicas	30
4.1.1. Precios de lavadores ultrasónicos	31

5. Modelo matemático	32
5.1. Difusión y advección	32
5.2. Movimiento ondulatorio	34
5.2.1. Velocidad de propagación de una onda mecánica	35
Materiales y métodos	37
Resultados y discusión	43
5.3. Lavado convencional	43
5.3.1. Vino tinto	43
5.3.2. Azúcares	46
5.3.3. Proteínas	48
5.3.4. Grasas	51
5.4. Lavado con enzimas	52
5.4.1. Hidrólisis de pectina (sin tela)	53
5.4.2. Hidrólisis de pectina (con tela)	54
5.4.3. Hidrólisis del almidón (sin tela)	55
5.4.4. Hidrólisis de almidón (con tela)	56
5.5. Modelado matemático para glucosa	57
5.5.1. Difusión	57
5.5.2. Difusión con advección (con ultrasonido)	59
5.6. Modelado matemático de una onda mecánica	61
Conclusiones	65
Perspectivas	66
Referencias	67

Índice de figuras

1.1. Estructura básica de un tensoactivo	3
1.2. Clasificación de tensoactivos	4
1.3. Tipos de agentes tensoactivos	4
1.4. Ángulo de contacto en la unión agua jabonosa-suciedad líquida y sustrato.	6
1.5. Eliminación completa de las gotas de aceite del sustrato mediante corrientes hidráulicas (flechas) cuando θ permanece constante en $>90^\circ$ (2).	7
1.6. Ruptura y remoción incompleta de gotas de aceite grandes por corrientes hidráulicas (flechas) cuando θ permanece constante a $<90^\circ$. Una pequeña gota permanece adherida al sustrato (2).	7
1.7. Representación de una micela.	8
2.1. Estructura de la subtilasa	19
3.1. Lavadora para instrumental de laboratorio de Cole-Parmer.	25
3.2. Prototipo de la patente alemana	27
3.3. Tira con diferentes manchas usado en el estudio de la PROFECO	27
4.1. Espectro del sonido.	29
4.2. Ejemplo de lavador ultrasónico.	30
4.3. Equipo lavador ultrasónico.	31
5.1. Sistema de coordenadas.	34
5.2. Definición de ξ	35
5.3. Cuerda vibrante. (40)	36
5.4. Método y condiciones utilizados en la cromatografía de gases para cuantificar oleato de metilo (biodiesel) en cromatógrafo Gow-Mac	39
5.5. Método de azúcares reductores utilizado para medir las absorbancias en el lavado de azúcares, pectina y almidón	40
5.6. Método de Bradford utilizado para medir las absorbancias en el lavado proteínas	41
5.7. Método para el lavado en la tina de ultrasonido	42
5.8. Curva patrón del vino tinto	43
5.9. Extracción de vino carga 10L/4kg	44
5.10. Extracción de vino carga 15L/4kg	44
5.11. Extracción de vino carga 30L/4kg	45
5.12. Extracción de azúcares carga 10L/4kg	47
5.13. Extracción de azúcares carga 15L/4kg	47
5.14. Extracción de azúcares carga 30L/4kg	48
5.15. Curvas patrón de BSA	49
5.16. Extracción de proteínas carga 10L/4kg.	50
5.17. Extracción de proteínas carga 15L/4kg.	50

5.18. Extracción de proteínas carga 30L/4Kg.	51
5.19. Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 5 minutos de lavado	51
5.20. Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 10 minutos de lavado	52
5.21. Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 15 minutos de lavado	52
5.22. Lavado de pectina en ultrasonido	54
5.23. Resultado del método de azúcares reductores para el lavado de pectina	55
5.24. Lavado de almidón en ultrasonido	57
5.25. Rapidez de TM en $x= 0.01$ m	58
5.26. Rapidez de TM en $x=0.02$ m	58
5.27. Rapidez de TM en $x=0.04$ m	59
5.28. Rapidez de TM en $x=0.05$ m	59
5.29. Difusión con ultrasonido para glucosa en diferentes posiciones	60
5.30. Comparación del modelo teórico vs modelo experimental de la extracción de azúcares	61
5.31. Velocidad de propagación de una onda mecánica	62

Índice de tablas

2.1. Aplicación de enzimas termoestables. (9)	12
2.2. Fuentes microbianas comerciales de preparaciones enzimáticas. (14)	14
2.3. Principales enzimas utilizadas en los detergentes. (17)	16
2.4. Composición de un detergente enzimático. (16)	18
3.1. Características estudiadas por la PROFECO	28
4.1. Precios de limpiadores ultrasónicos en el mercado	31
5.1. Concentraciones de lavado de vino a diferentes tiempos y cargas.	46
5.2. Concentraciones de lavado de azúcares a diferentes tiempos y cargas.	48
5.3. Concentraciones de lavado de proteínas a diferentes tiempos y cargas.	49
5.4. Hidrólisis de pectina en sistema de incubación con mezclador orbital	53
5.5. Hidrólisis de pectina en sistema de ultrasonido	53
5.6. Lavados de pectina en ultrasonido	54
5.7. Hidrólisis de almidón en sistema de incubación con mezclador orbital	55
5.8. Hidrólisis de almidón en sistema de ultrasonido	56
5.9. Lavados de telas impregnadas con almidón, en sistema de ultrasonido	56
5.10. Construcción de malla por diferencias finitas	58
5.11. Construcción de malla por diferencias finitas	60
5.12. Condiciones para la resolución de la EDP.	62
5.13. Construcción de malla por diferencias finitas	62
5.14. Construcción de malla por diferencias finitas (2da parte)	63
5.15. Construcción de malla por diferencias finitas (3ra parte)	63
5.16. Construcción de malla por diferencias finitas (4ta parte)	63
5.17. Construcción de malla por diferencias finitas (5ta parte)	63
5.18. Construcción de malla por diferencias finitas (6ta parte)	64
5.19. Construcción de malla por diferencias finitas (7ma parte)	64
5.20. Construcción de malla por diferencias finitas (8va parte)	64

Resumen

Se realizaron ensayos de lavado de telas impregnadas con diferentes tipos de "suciedad", incluyendo vino, grasas, azúcares y proteínas en un lavador activado por ultrasonido.

Estos experimentos se realizaron en diferentes condiciones de carga de tela/agua, buscando reducir el consumo de agua al mínimo. Se encontró que la óptima era de 15L/4Kg.

Se trabajó con detergente comercial que removiera la "suciedad" de la tela impregnada. En una segunda parte se trabajó con las enzimas amilasa y pectinasa.

El mejor ensayo resultó del lavado con pectinasa a temperaturas de 40°C y 60°C, carga de 15L/4Kg y 30 minutos de lavado.

Se planteó un modelo conformado por la ecuación de difusión-advección, para tratar de explicar el proceso de lavado de telas impregnadas con sustratos modelo en una tina de ultrasonido.

Introducción

El lavado de ropa es una de las actividades que utiliza grandes cantidades de agua, ya sea en lavadora, o en forma manual a nivel doméstico, o en lavanderías comerciales. Según el informe del 2016 del International Statistics for Water Service (ISWS) el consumo per cápita de la población mundial es de 28-631 litros/día, mientras que la recomendación de la ONU es de 110 litros/día.

Cuando la demanda de agua es más importante que la cantidad disponible durante un periodo determinado, o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad se habla del concepto de estrés hídrico, fenómeno que se ve cada vez más presente hoy en día.

Por otra parte, la limitación que presentan las lavadoras convencionales y el motivo por el cual ocupan un exceso de agua es debido a la segunda carga adicional de agua requerida para el proceso de enjuague y centrifugación final de la ropa.

Desde hace ya algunos años, en la industria del jabón se han incorporado algunas enzimas, estrategia que ha resultado eficiente durante algún tiempo.

Así mismo, si se quitara el uso del detergente comercial, se apreciaría que el proceso de transferencia de masa remueve parte de la suciedad en el sistema de lavado actual.

Otras opciones apuntan a potenciar la reacción de efervescencia entre el ácido cítrico y el bicarbonato de sodio para remover manchas persistentes. El ácido cítrico y el ácido láctico pueden dirigirse a la fabricación de detergentes en lugar de fosfatos, debido a que la presencia de estos últimos en los efluentes da lugar a la eutrofización por un aumento de nutrientes que favorece el desarrollo de algas como parte de la flora acuática (p.ej. sargazo).

Se presenta entonces la hipótesis siguiente: si se considera un procedimiento de lavado basado en una mezcla de enzimas hidrolíticas (p. ej. celulasas, lipasas y/o proteasas) solubilizadas en un medio acuoso y sin detergente, un mezclado intenso permitiría su transporte hacia la interfase tela/suciedad/agua. De ser correcto, el proceso comenzaría a estar limitado por la reacción de hidrólisis de la suciedad, provocando una disminución de su masa molecular, facilitando con ello su remoción de la tela.

Esta propuesta de nuevo sistema de lavado ayudaría a reducir el consumo de agua a un mínimo requerido. Aún más, de emplear enzimas que puedan trabajar a alta temperatura, la rapidez de las reacciones de hidrólisis aumentarían significativamente según se desprende de la Ley de Arrhenius.

Esta propuesta permitiría asegurar un limpiado similar al que se obtendría con jabón detergente y el uso de grandes cantidades de agua.

Objetivos

0.1. Objetivos generales

1. Establecer la relación de agua/tela que reduzca al mínimo posible el consumo de agua para el lavado con ultrasonido.
2. Desarrollar un modelo matemático que aproxime el fenómeno de difusión-advección responsable del proceso de lavado.

0.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar sustancias modelo de la vida diaria responsables de manchas típicas en la ropa para su posterior lavado.
2. Evaluar el sistema de lavado por ultrasonido con detergente convencional y otro basado en enzimas actuando sobre los sustratos modelo.
3. Describir y modelar los fenómenos causados por el ultrasonido y su efecto en la detergencia.

Capítulo 1

El fenómeno de la detergencia

En términos generales un detergente es un producto que posee un poder limpiador de una superficie. Los detergentes, tanto en polvo como líquidos, de uso doméstico o industrial, son formulaciones complejas en las cuales un surfactante (o una mezcla de surfactantes) juega un papel determinante en la combinación de efectos que se desean: mojabilidad, descenso de la tensión interfacial, adsorción en las interfases líquido-líquido y sólido-líquido, solubilización y emulsificación. La detergencia se refiere al proceso de limpieza de una superficie sólida o de una estructura fibrosa mediante un baño líquido, en el cual la acción limpiadora del solvente está considerablemente aumentada por procesos físico-químicos atribuible al surfactante y demás componentes del detergente. Se denomina generalmente *suciedad* al material indeseable que llega a acumularse en la superficie de un sólido o en la trama fibrosa de un textil (1).

1.1. Tipos de suciedad

1.1.1. Grasa

Las secreciones sebáceas representan la mayor suciedad presente en la ropa y debe removerse completamente porque de una parte ayudan al atrapamiento de partículas sólidas y por otra parte producen un tono amarillento al oxidarse al aire. Estas secreciones contienen hidrocarburos, triglicéridos, ácidos grasos, ésteres grasos y cantidades menores de otras sustancias como el colesterol (1).

1.1.2. Sólidos hidrosolubles

La secreción de sudor es el proceso termoregulador del cuerpo humano y varía considerablemente según el tipo de actividad física. Las glándulas secretan un tipo de sudor particular a nivel de los poros sebáceos pilosos cuyo papel principal es el de emulsionar las secreciones sebáceas y facilitar su acción lubricante. Globalmente el sudor contiene típicamente 1 % de sólidos disueltos o suspendidos en solución coloidal. La mitad de estos sólidos son sales inorgánicas, principalmente cloruro de sodio (50 %), iones calcio, magnesio, hierro, potasio, yodo y azufre. El material orgánico contiene urea (50 %), proteínas, carbohidratos, amoníaco y aminoácidos (1).

1.1.3. Partículas sólidas

Las partículas sólidas presentes en la ropa sucia pueden ser de origen orgánica o inorgánica. Las partículas orgánicas pueden adherirse sobre un sustrato orgánico (fibra) por quimisorción, mientras que las partículas inorgánicas coloidales presentan a menudo una geometría muy

compleja que favorece un atrapamiento físico, particularmente sobre en sustrato grasoso. A menudo intervienen también fuerzas electrostáticas de atracción (1).

1.2. Surfactantes o tensoactivos

Los surfactantes (de la contracción del inglés *surface-active agent*) o tensoactivos, son sustancias que cuando están presentes en baja concentración en un sistema, tiene la propiedad de adsorberse sobre las superficies o interfaces del sistema y de alterar en un grado marcado la superficie o energías libres interfaciales de esas superficies (o interfaces).

El término interfaz indica un límite entre dos fases inmiscibles cualesquiera; el término superficie denota una interfaz donde una fase es un gas, generalmente aire.

La energía libre interfacial es la cantidad mínima de trabajo requerida para crear esa interfaz. La energía libre interfacial por unidad de área es lo que medimos cuando determinamos la tensión interfacial entre dos fases. (1)

La tensión interfacial (o superficial) también es una medida de la diferencia en la naturaleza de las dos fases que se encuentran en la superficie. Cuanto mayor sea la disimilitud en sus naturalezas, mayor será la tensión superficial entre ellas. (1)

Cuando medimos la tensión superficial de un líquido, estamos midiendo la energía libre interfacial por unidad de área del límite entre el líquido y el aire por encima de él. Cuando expandimos una interfaz el trabajo mínimo requerido para crear la cantidad adicional de esa interfaz es el producto de la tensión interfacial γ_l y el aumento en el área de la interfaz:

$$W_{min} = \gamma_l(\Delta_{areainterfacial}) \quad (1.1)$$

Por lo tanto, un tensoactivo es una sustancia que a bajas concentraciones se adsorbe en algunas o en todas las interfaces del sistema y cambia significativamente la cantidad de trabajo necesario para expandir esas interfaces. Los tensoactivos generalmente actúan para reducir la energía libre interfacial en lugar de aumentarla, aunque hay ocasiones en las que se utilizan para aumentarla (2).

1.2.1. Características estructurales generales y comportamiento de los tensoactivos

Las moléculas en una superficie tienen energías potenciales más altas que las del interior. Esto se debe a que interactúan más fuertemente con las moléculas en el interior de la sustancia que con las moléculas de gas ampliamente espaciadas por encima de ella. Por tanto, es necesario trabajar para llevar una molécula del interior a la superficie.

Los tensoactivos tienen una estructura molecular característica que consiste en un grupo estructural que tiene muy poca atracción por el solvente, conocido como grupo liofóbico o hidrofóbico, junto con un grupo que tiene una fuerte atracción por el solvente, llamado grupo liofílico o hidrofílico. (2)

Cuando una molécula con estructura anfipática se disuelve en un solvente, el grupo liofóbico puede distorsionar la estructura del solvente, aumentando la energía libre del sistema. Cuando eso ocurre, el sistema responde de alguna manera para minimizar el contacto entre el grupo liofóbico y el solvente. (2) En el caso de un tensoactivo disuelto en medio acuoso, el grupo liofóbico distorsiona la estructura del agua (rompiendo los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y estructurando el agua en las proximidades del grupo hidrofóbico). Como resultado de esta distorsión, algunas de las moléculas de tensoactivo son expulsadas a las interfaces del sistema, con sus grupos hidrofobos orientados para minimizar el contacto con las moléculas de

agua. La superficie del agua se cubre con una sola capa de moléculas de tensoactivo con sus grupos hidrófobos orientados predominantemente hacia el aire. (2)

Dado que las moléculas de aire son esencialmente de naturaleza no polar, al igual que los grupos hidrófobos, esta disminución en la disimilitud de las dos fases que contactan entre sí en la superficie da como resultado una disminución en la tensión superficial del agua. Por otro lado, la presencia del grupo liofílico (hidrófilo) evita que el tensoactivo sea expulsado completamente del disolvente como una fase separada, ya que eso requeriría la deshidratación del grupo hidrófilo. (2)

La estructura anfipática del tensoactivo no sólo provoca la concentración del tensoactivo en la superficie y la reducción de la tensión superficial del agua, sino también la orientación de la molécula en la superficie con su grupo hidrófilo en la fase acuosa y su grupo hidrofóbico orientado fuera de ella (2).

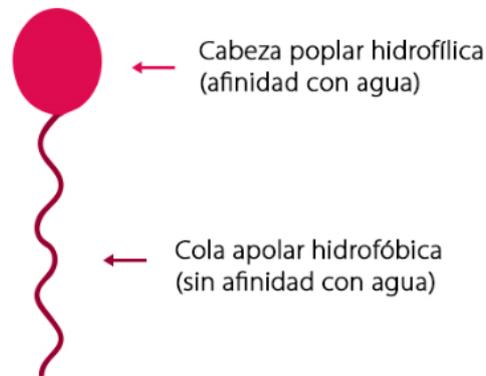


Figura 1.1: Estructura básica de un tensoactivo

Las estructuras químicas de las agrupaciones adecuadas como las porciones liofóbicas y liofílicas de la molécula de tensoactivo varían con la naturaleza del disolvente y las condiciones de uso.

En un disolvente polar como el agua, los grupos iónicos o muy polares pueden actuar como grupos liofílicos, mientras que en un disolvente apolar como el heptano pueden actuar como grupos liofóbicos.

A medida que varían la temperatura y las condiciones de uso (por ejemplo, la presencia de electrolitos o aditivos orgánicos), pueden resultar necesarias modificaciones en la estructura de los grupos liofóbicos y liofílicos para mantener la actividad superficial a un nivel adecuado. Por tanto, para la actividad superficial en un sistema particular, la molécula de tensoactivo debe tener una estructura química que sea anfipática en ese disolvente en las condiciones de uso.

El grupo hidrófobo es habitualmente un residuo de hidrocarburo de cadena larga y, con menos frecuencia, un hidrocarburo halogenado u oxigenado o una cadena de siloxano; el grupo hidrófilo es un grupo iónico o muy polar (2).

1.2.2. Clasificación de los tensoactivos

Dependiendo de la naturaleza del grupo hidrófilo, los tensoactivos se clasifican en:

1. Aniónico: la porción tensoactiva de la molécula tiene carga negativa. En solución se ionizan, el grupo hidrófobo queda cargado negativamente. Están constituidos por una cadena alquílica lineal o ramificada que va de 10 a 14 átomos de carbono, y en su extremo polar de la molécula se encuentra un anión.

2. Catiónico: la parte tensoactiva tiene carga positiva. En solución forman iones, resultando cargado positivamente el grupo hidrófobo de la molécula
3. Anfótero: pueden estar presentes cargas tanto positivas como negativas en la parte tensoactiva. Actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son catiónicos y en medio ácido son aniónicos.
4. No iónico: la parte tensoactiva no tiene carga iónica aparente. Sin ionizarse, se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrófilos) tales como enlace tipo éter ó grupos hidroxilos en su molécula.

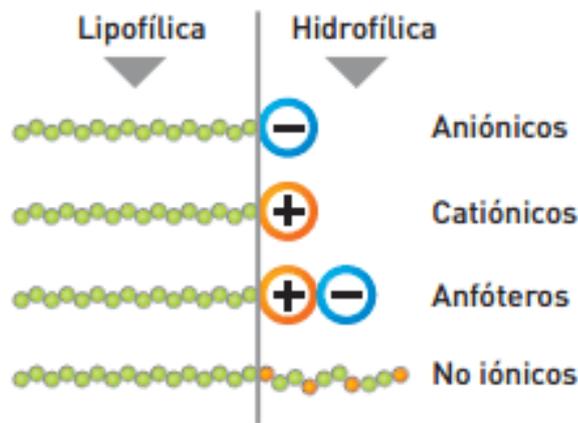


Figura 1.2: Clasificación de tensoactivos

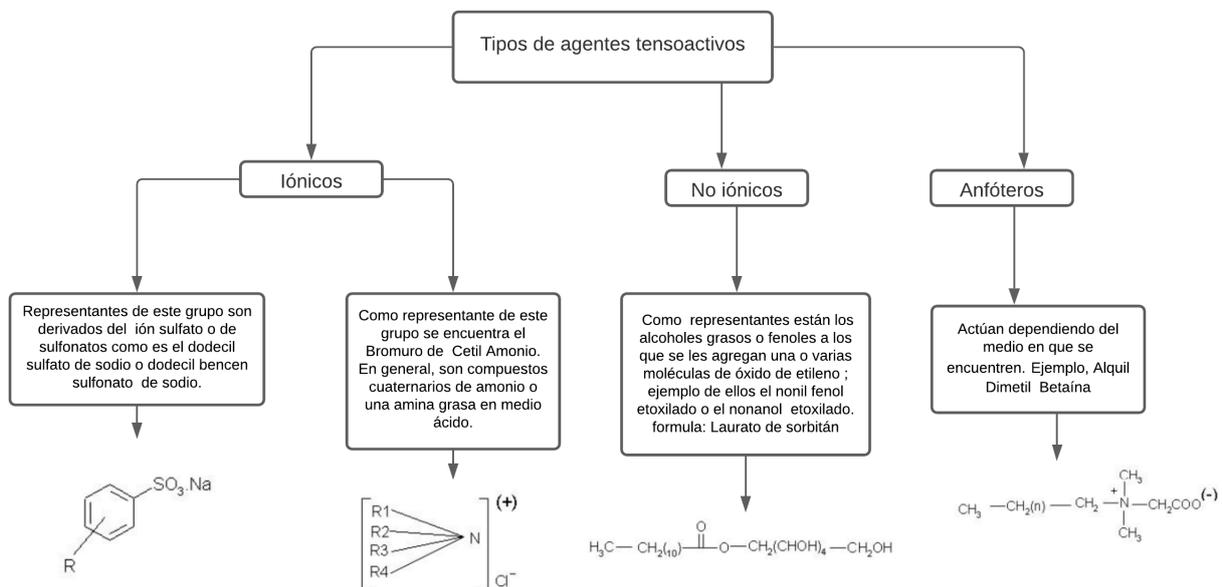


Figura 1.3: Tipos de agentes tensoactivos

1.2.3. Mecanismo de la detergencia

La detergencia, como término general, significa poder limpiador, pero ningún surfactante por sí solo puede limpiar una superficie. El término detergencia, cuando se aplica a un agente

tensoactivo, significa la propiedad especial que tiene de mejorar el poder limpiador de un líquido. Para cumplir su papel, un tensoactivo con efecto detergente, debe ser capaz de varias acciones:

- Que sus soluciones puedan mojar la superficie del sólido.
- Desplazar el contaminante.
- Permitir el desprendimiento del contaminante (suciedad) bajo la forma de suspensión sin re-depositación sobre la superficie sólida.
- Deberá ser estable en el medio, ya sea ácido o básico y no dar productos insolubles en el agua (3).

Tres elementos están presentes en cada proceso de limpieza:

- El sustrato (la superficie que se va a limpiar).
- La suciedad (el material que se eliminará del sustrato en el proceso de limpieza).
- La solución limpiadora (el líquido que se aplica al sustrato para eliminar la suciedad, también llamado baño o agua jabonosa).

La dificultad para desarrollar un mecanismo unificado para el proceso de limpieza radica en la casi infinita variedad de los dos primeros elementos.

No existe un único mecanismo de detergencia, sino varios mecanismos diferentes, dependiendo de la naturaleza del sustrato.

En general, la limpieza consiste esencialmente en dos procesos:

- Remoción de la suciedad del sustrato.
- Suspensión de la suciedad en el agua de lavado y prevención de su redeposición.

Este segundo proceso es tan importante como el primero, ya que evita redeposición de la suciedad sobre otra parte del sustrato (2).

1.2.4. Remoción de la suciedad

La suciedad se adhiere a los sustratos mediante varios tipos de fuerzas y, como resultado, se eliminan de ellos mediante diferentes mecanismos.

Las sustancias que son quimisorbidas a través de la formación de enlaces covalentes generalmente pueden eliminarse solo por medios químicos que destruyen esos enlaces (por ejemplo, mediante el uso de agentes oxidantes o enzimas); la suciedad que puede eliminarse mediante el uso de tensoactivos generalmente se adhieren por adsorción física (fuerzas de Van der Waals, interacciones dipolares) o por fuerzas electrostáticas.

La remoción de la suciedad por los tensoactivos generalmente implica su adsorción sobre las superficies del sustrato del agua de lavado. Esta adsorción cambia las tensiones interfaciales y/o los potenciales eléctricos en las interfaces suciedad-agua y sustrato-agua de tal manera que se mejora la eliminación de la suciedad por el agua. (2) La suciedad líquida, que puede contener grasas cutáneas (sebo), ácidos grasos, aceites minerales y vegetales, alcoholes grasos y los componentes líquidos que se encuentran en los materiales cosméticos, generalmente se remueve mediante el mecanismo de retroceso.

La suciedad sólida consiste en sólidos orgánicos, como ceras minerales o vegetales, que pueden eliminarse mediante la aplicación de calor, o de material particulado, como carbón, óxido de hierro o partículas de arcilla, que no pueden ser eliminadas fácilmente. Los primeros

se eliminan generalmente, después de la licuefacción, mediante el mecanismo de retroceso; el último, por la producción de potenciales eléctricos repulsivos en la superficie del suelo y del sustrato.

Se está acumulando evidencia de que la máxima detergencia puede estar asociada con la presencia de una fase insoluble rica en tensoactivo (2).

Eliminación de la suciedad líquida

La eliminación de la suciedad líquida (aceitosa) mediante agua se logra principalmente mediante un mecanismo de retroceso o enrollado en el que el ángulo de contacto que forma la tierra líquida con el sustrato aumenta mediante la adsorción de tensoactivo del agua jabonosa. El trabajo reversible para remover el suelo oleoso líquido o del sustrato, el trabajo de adhesión W_a viene dado por las expresiones:

$$W_{O/S(A)} = \gamma_{SA} + \gamma_{OA} - \gamma_{SO} = \gamma_{OA}(\cos\theta + 1) \quad (1.2)$$

donde θ es el ángulo de contacto, γ_{SA} es la tensión superficial de la interfase suciedad/aire, γ_{OA} es la tensión superficial de la interfase suciedad/aire, γ_{SO} es la tensión superficial de la interfase sustrato/suciedad, medido en la fase líquida de la suciedad, en la unión suciedad-sustrato-aire. La figura 1.4 ilustra la situación en la que el aire se reemplaza por agua jabonosa. El trabajo de adhesión de la suciedad líquida al sustrato viene dado ahora por la expresión:

$$W_{O/S(B)} = \gamma_{SB} + \gamma_{OB} - \gamma_{SO} = \gamma_{OB}(\cos\theta + 1) \quad (1.3)$$

donde γ_{SB} es la tensión superficial de la interfase sustrato/agua jabonosa, γ_{OB} es la tensión superficial de la interfase suciedad/agua jabonosa, γ_{SO} es la tensión superficial de la interfase sustrato/suciedad, y el ángulo de contacto por la expresión:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SB} - \gamma_{SO}}{\gamma_{OB}} \quad (1.4)$$

Cuando los surfactantes de la estructura adecuada están presentes en el agua jabonosa (baño), se adsorberán en las interfaces sustrato-baño (SB) y en la suciedad líquida-baño (OB) (con el grupo hidrófilo orientado hacia el baño acuoso) de manera tal como para reducir γ_{SB} y γ_{OB} , con la consecuente reducción en el trabajo de remoción de suciedad del sustrato. La reducción de γ_{SB} también provocará una disminución/aumento de $\cos\theta$, lo que resultará en el retroceso observado de la suciedad líquida. (2)

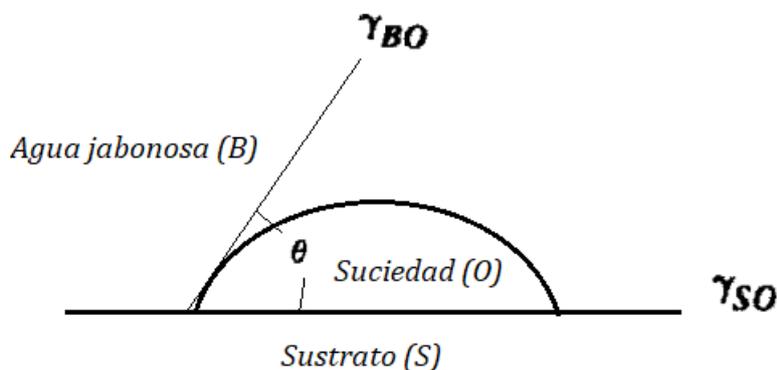


Figura 1.4: Ángulo de contacto en la unión agua jabonosa-suciedad líquida y sustrato.

Muchos investigadores que estudian la eliminación de suciedad aceitosa tanto en superficies textiles como duras, han descubierto que la reducción de γ_{OB} y/o el aumento de θ , medido en la fase de suciedad aceitosa, se correlaciona bien con el aumento de la detergencia.

En algunos casos, este bajo valor de γ_{OB} puede estar asociado con la separación de una fase insoluble rica en tensoactivos. En muchos casos, γ_{SB} se reduce al punto en el que $\gamma_{SB}-\gamma_{SO}$ es negativo, con un aumento resultante en θ a un valor superior a 90° . (2)

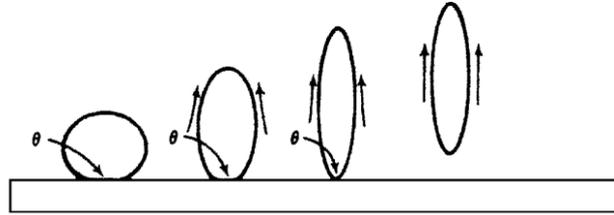


Figura 1.5: Eliminación completa de las gotas de aceite del sustrato mediante corrientes hidráulicas (flechas) cuando θ permanece constante en $>90^\circ$ (2).

Si el ángulo de contacto es de 180° , el baño desplazará espontáneamente por completo la suciedad líquida del sustrato; si el ángulo de contacto es menor de 180° pero mayor de 90° , la mancha no se desplazará espontáneamente sino que puede ser removido por corrientes hidráulicas en el baño (Figura 1.5).

Cuando el ángulo de contacto es menor a 90° , al menos parte de la suciedad aceitosa permanecerá adherida al sustrato, aún cuando este esté sometido a las corrientes hidráulicas del agua jabonosa (Figura 1.6), y trabajo mecánico o algún otro mecanismo. (2)

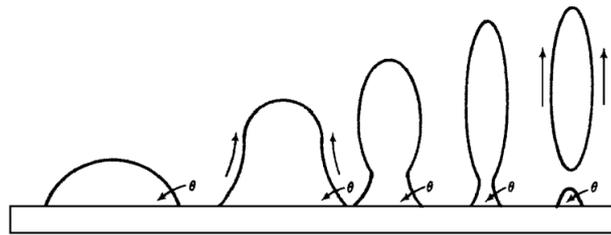


Figura 1.6: Ruptura y remoción incompleta de gotas de aceite grandes por corrientes hidráulicas (flechas) cuando θ permanece constante a $<90^\circ$. Una pequeña gota permanece adherida al sustrato (2).

En la limpieza por aspersión de alta velocidad, un factor crítico es la reducción dinámica de la tensión superficial de la solución de surfactante, más que su valor de tensión superficial de equilibrio, ya que bajo estas condiciones de limpieza no se alcanzan los valores de equilibrio. Los tensoactivos que reducen la tensión superficial a los valores más bajos en tiempos cortos exhiben la mejor remoción de suelo. (2)

1.2.5. Solubilización

En solución acuosa las moléculas de surfactantes forman agregados llamados micelas. Las micelas pueden solubilizar moléculas orgánicas de varias formas. Las sustancias de tipo hidrocarburos, y en general las sustancias netamente apolares, están solubilizadas en el interior o corazón de las micelas, el cual está constituido por las partes lipofílicas de las moléculas de surfactante.

Si tal solubilización fuera el mecanismo principal de la detergencia, se debería observar un aumento del poder detergente con el número de micelas, y por otra parte no ocurriría detergencia

alguna a concentración de surfactante inferior a la concentración micelar crítica (CMC). Sin embargo no es así. En efecto se observa que el poder detergente aumenta con la concentración del surfactante hasta que este alcance la CMC; encima de la CMC el poder detergente es en general independiente de la concentración del surfactante. Tal observación indica que la acción detergente se debe a las moléculas no micelizadas del surfactante, es decir a la actividad interfacial (adsorción y cambio de mojabilidad del sustrato, disminución de la tensión) y no a la presencia de micela. Por lo tanto el mecanismo de solubilización es probablemente poco importante en general (1).

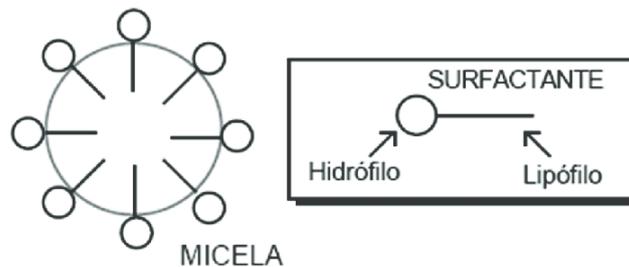


Figura 1.7: Representación de una micela.

1.2.6. Emulsificación espontánea

En ciertos casos se ha observado que se pueden formar gotas de fase acuosa en el interior de las gotas de fase orgánica. Esto implica una transferencia de masa por difusión a través de la fase orgánica, lo que puede resultar en un fenómeno de emulsificación espontánea.

Eso puede producirse también cuando el agente surfactante se forma in-situ en la interfase por reacción de una fase acuosa alcalina con ácidos grasos libres de la fase orgánica. Tal mecanismo tampoco parece tener una importancia. (1)

1.2.7. Redeposición de la suciedad

Una vez removida la suciedad en forma de gotas o de partículas, es importante que la suspensión de la suciedad en la fase acuosa sea estable, es decir que no vuelva a adherirse sobre el mismo (redepósito) u otro (deposición) sustrato presente en el sistema.

La redeposición es el fenómeno inverso de la remoción y está regido por los mecanismos inversos. Durante el lavado con una solución detergente, las condiciones son en general tales que la remoción excede considerablemente la redeposición (cambio de mojabilidad, aumento de fuerzas repulsivas suciedad-sustrato); además la agitación del líquido evita la acción de la gravedad también sobre la suciedad, la cual podría sedimentarse; sin embargo la agitación favorece el contacto suciedad dispersada-sustrato.

La deposición o redeposición de la suciedad ocurre en general cuando se produce una inestabilidad o un cambio repentino en el líquido dispersante. Tales situaciones pueden producirse cuando la solución detergente se satura de sucio, cuando precipitan nuevos sucios como jabones de calcio, o bien cuando se diluye considerablemente la solución como por ejemplo en la operación de enjuague. En tales circunstancias el líquido puede perder su capacidad dispersante y como consecuencia la suciedad puede depositarse o redepositarse. (1)

1.2.8. Composición de un detergente comercial

Las sustancias tensoactivas aniónicas, sulfatos de alcoholes grasos, reemplazaron, a fines de la segunda guerra mundial a los jabones utilizados para lavado de textiles. Los tensoactivos

forman parte de un 40 % del total de la composición de la formulación, el resto contiene muchas otras sustancias que favorecen su eficacia.

Los agentes deterstivos aniónicos adicionándoles sosa (NaOH) y tripolifosfatos, mejoran la calidad de estos detergentes aunque retardan la biodegradabilidad de los mismos.

La adición de silicatos mejora el efecto de lavado y tienen propiedades anticorrosivas. La adición de carboximetilcelulosa mejora el poder de eliminación de la suciedad. Los blanqueadores ópticos aumentan el grado de blancura ya que transforman la luz ultravioleta de longitud de onda corta invisible, en luz de longitud de onda larga (fluorescencia).

La adición de enzimas como proteasas es conveniente ya que rompe las cadenas proteicas de las manchas de sangre, en este caso, el agua debe de calentarse a 40°C para que actúen las enzimas y después reacciona el tensoactivo.

A medida que un tensoactivo aumenta su cadena hidrocarbonada, su poder quita-grasa es mayor, aunque su solubilidad se hace menor.

Los tensoactivos no-iónicos son muy buenos disolventes de la grasa. Los detergentes sin espuma (para lavadoras) contienen de 10 a 20 % de agente no-iónico el cual es un antiespumante.

Para un buen lavado, hay factores a considerar como:

- La composición de la suciedad.
- El tipo de textil o de superficie a lavar.
- El valor del pH.
- La temperatura.
- La duración del ciclo de lavado.
- La importancia de los efectos mecánicos.

El poder deterstivo en un tensoactivo, está condicionado por su formulación: a partir de 12 a 14 átomos de carbono para una cadena alifática resulta ser un buen detergente y se vuelve más eficaz a temperatura elevada. (3)

Actualmente, las enzimas han jugado un papel importante y eficaz en el desarrollo y mejora de los detergentes industriales y domésticos. Esto se abordará en el siguiente capítulo.

1.3. Aspectos mecánicos

La agitación mecánica del líquido dispersante tiene varios papeles. Una de ellas es mantener el líquido homogéneo a la escala del sistema, es decir asegura la misma concentración de detergente y de suciedad en todas partes y evita fenómenos de sedimentación. Por otra parte tiene un papel indispensable a nivel de la capa límite ya que produce el cizallamiento necesario para remover, disolver o solubilizar la suciedad retenida, y emulsionarla o desflocularla según el caso.

En la mayoría de los casos se usa una agitación que produce turbulencia, lo cual favorece la transferencia de masa y la suspensión de la suciedad.

Para aplicaciones especiales en los cuales es necesario una agitación considerable dentro de poros u otras ubicaciones que no se pueden normalmente alcanzar por la simple turbulencia externa, se usan generadores de energía ultrasónica. La energía ultrasónica corresponde a vibraciones mecánicas de alta frecuencia (20.000-200.000 Hz) producidas por excitación piezoeléctrica o electrostrictiva de cristales como titanato de bario o zirconato de plomo o por excitación magnetostrictiva de un cristal de níquel o de ferrita. (1)

Las ondas ultrasónicas de presión alcanzan en la amplitud de su fase negativa una presión debajo de la tensión de vapor del agua. En estas condiciones se producen burbujas de vapor, es decir el fenómeno conocido como cavitación. Al aumentar de nuevo la presión, la burbuja de vapor implota violentamente. (1)

En ausencia de gas disuelto esta implosión genera ondas de choque de muy alta presión, capaces de producir cizallamientos intensos a la escala microscópica. La energía ultrasónica es particularmente útil para remover suciedad que ha formado depósitos compactos o escamas. Sin embargo su aplicación es todavía reducida a otros casos particulares, de una parte debido al costo elevado de los equipos de gran tamaño y de otra parte por la contaminación acústica que produce. (1)

Capítulo 2

Mecanismo detergente basado en las enzimas

A lo largo del tiempo, las enzimas han sido un factor importante en el desarrollo y mejora de los productos detergentes, pues han contribuido a aspectos como reducir los tiempos de lavado, el consumo de energía y agua, suministrar efluentes de agua de lavado más amigables con el medio ambiente y proporcionar cuidado de las telas, además las enzimas por sí solas ya son atractivas para el medio ambiente porque se derivan de fuentes renovables.

Las enzimas son moléculas proteicas cuya función es catalizar una reacción química, es decir, acelera la velocidad de una reacción disminuyendo la energía de activación. La catálisis enzimática es una alternativa a los tratamientos físicos, fisicoquímicos o químicos convencionales. La ventaja es la especificidad, pues gracias a ella se limita la producción de subproductos, que pueden ser inhibidores del proceso, al tiempo que aumenta el rendimiento de la reacción. Emplearlas tiene otras ventajas:

- Muchas de ellas, y las más accesibles, funcionan en condiciones moderadas de temperatura y de pH por lo que no requieren de condiciones de procesamiento drásticas.
- Actúan en muy bajas concentraciones, entre 10^{-8} y 10^{-6} M.
- Su velocidad puede ser controlada al ajustar el pH, la temperatura y la concentración de la enzima.
- Son fácilmente inactivadas una vez alcanzado el grado de transformación deseado.

Como en todo, puede haber excepciones donde se requieran operar a las enzimas en ambientes extremos.

Por otro lado, una limitante para el uso de enzimas es que algunas de ellas son muy caras por su baja disponibilidad.

Sin embargo, en este sentido hay muchas innovaciones tecnológicas que están logrando hacer más económicos estos catalizadores, como es el caso de la ingeniería genética que permite transformar microorganismos y plantas para aumentar la síntesis de enzimas o bien, la reutilización de éstas cuando se encuentran inmovilizadas en un soporte, lo que constituye un biocatalizador (14).

2.1. Enzimas no extremófilas

Un problema con el uso de enzimas para la biotransformación industrial es su estabilidad a las condiciones empleadas. Durante los procesos industriales, las enzimas a menudo se exponen a un entorno diferente a sus condiciones naturales (ej.: dentro de la célula), como sustratos

diferentes y altas concentraciones de él, condiciones no acuosas y extremos de pH. Las enzimas también pueden llevar a cabo reacciones secundarias cuando se utilizan a un pH diferente al que se encuentra dentro de la célula. Algunas de sus principales aplicaciones, diferentes a los detergentes, y origen se describen en la tabla para el caso de enzimas termoestables.

Tabla 2.1: Aplicación de enzimas termoestables. (9)

Enzima	T (°C)	Aplicación	Origen
Enzimas que actúan sobre carbohidratos			
α -amilasa	60-90	Hidrólisis del almidón	<i>Bacillus licheniformis</i>
Pululanasa	50-60	Hidrólisis del almidón	<i>Klebsiella aerogenes</i>
Xilosa-isomerasa	50-55	Sacarificación de almidón	<i>Actinoplanes missouriensis</i>
Celulasas	55-65	Hidrólisis de celulosa producción de etanol, blanqueamiento de papel	<i>Clostridium thermocellum</i>
Proteasas			
Proteasa neutral	40-80	Procesado de alimentos	<i>Bacillus stearothermophilus</i>
Proteasa alcalina	40-80	Detergentes	<i>Bacillus licheniformis</i>
Biología molecular			
Taq polimerasa	45-95	Amplificación de DNA, PCR	<i>Thermus spp.</i>
Vent-DNA polimerasa	50-98	Amplificación de DNA, PCR	<i>Thermococcus litoralis</i>
Pfu-DNA polimerasa	50-98	Amplificación de DNA, PCR	<i>Pyrococcus furiosus</i>
Tth-polimerasa	45-95	Transcripción reversa del RNA	<i>Thermus thermophilus HB8</i>
RNA polimerasa	65-75	Síntesis de RNA	<i>Thermus spp.</i>
Enzimas de restricción	65-75	Digestión específica de DNA	<i>Thermus spp.</i> <i>Bacillus subtilis</i>
Hidrolasas, oxidoreductasas y/o ligasas para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales	50-60	Eliminación de componentes orgánicos	<i>Metanobacterium, metanosarcina</i>

Amilasas: para digerir carbohidratos.

La α -amilasa (EC 3.2.1.1) es una endohidrolasa que actúa de manera aleatoria sobre los enlaces internos α -(1-4) de la amilosa y de la amilopectina, provoca la rápida reducción de la viscosidad de las soluciones de almidón. Las α -amilasas bacterianas provienen principalmente del género *Bacillus* (*B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. licheniformis*), o también provenientes de varias especies del hongo *Aspergillus*, como *A. oryzae*, *A. niger*, *A. awamori* y *A. usarii*. Son metaloenzimas dependientes del ión calcio que les ayuda a mantener su actividad y las estabiliza contra desnaturalización térmica y degradación por proteasas.

La β -amilasa (EC 3.2.1.2) hidroliza los enlaces β -(1-4) a partir de los extremos no reductores de la amilosa y de la amilopectina. Se produce por un gran número de microorganismos. Entre los más importantes se encuentran *B. cereus*, *B. megaterium*, *B. polymyxa*, *B. stearothermophilus*, *Streptomyces sp* y *Aspergillus fumigatus*. (14)

Las amilasas facilitan la eliminación de manchas que contienen almidón, por ejemplo, pasta, patata, salsa, chocolate y comida para bebés. También evitan que el almidón hinchado se adhiera a la superficie de la ropa y los platos que, de otro modo, podrían actuar como un pegamento para la suciedad de partículas.

Los complejos o productos de reacción entre proteínas, almidón y/o grasas se encuentran generalmente en los alimentos preparados. En tales casos, los efectos de la sinergia de las enzimas

hacen posible eliminar la suciedad de manera aún más eficiente que con los sistemas de una sola enzima.

Las α -amilasas de importancia industrial se obtienen a partir de especies de *Bacillus* y especies de *Aspergillus*.

Las prendas de ropa blanca se vuelven cada vez más grises después de repetidos ciclos de lavado, un efecto que se ha demostrado al agregar aproximadamente 0.5 g de almidón/kg de tela de algodón.

En los detergentes para ropa, las amilasas pueden mantener o incluso contribuir a un mayor blanqueamiento de las telas sucias e inhibir el envejecimiento de las telas blancas como resultado de una combinación de almidón y suciedad en partículas. (15)

Proteasas: para digerir proteínas

Las proteasas son las enzimas más utilizadas para este fin. En los detergentes para ropa, las manchas de proteínas como la hierba, la sangre, los huevos y el sudor humano se eliminan mediante proteólisis. Las proteasas aseguran la eliminación de películas proteicas de alimentos, que son un problema particular con la cristalería y la cubertería. Las proteasas se clasifican según su fuente de origen (animal, vegetal, microbiano), su acción catalítica (endopeptidasa o exopeptidasa) y la naturaleza del sitio catalítico (sitio activo).

Se caracterizan por nombres comunes y nombres comerciales, rangos de pH típicos y especificidad preferencial. Basado en una comparación de sitios activos, residuos catalíticos y estructuras tridimensionales.

Se reconocen cuatro familias principales de proteasas:

- Serina.
- Tiol.
- Aspático.
- Metaloproteasas.

La familia de las serina proteasas contiene dos subgrupos:

- Similar a quimotripsina.
- Similar a subtilisina.

Este último es el grupo más importante para las aplicaciones de detergentes.

Las proteasas catalizan la escisión hidrolítica de la cadena peptídica. Los parámetros más importantes para la reacción de hidrólisis son el sustrato S disponible en la superficie (porcentaje de proteína para la reacción), E/S (relación enzima-sustrato en unidades de actividad por kg de proteína), pH, tiempo de reacción y temperatura. Inhibidores de la proteasa.

En los detergentes en polvo donde las proteasas se granulan y encapsulan, todas las enzimas son estables en ausencia de agua. En los detergentes líquidos, el ambiente acuoso es adverso a la estabilidad de la enzima y los inhibidores son necesarios para prevenir la autodigestión de las proteasas mismas o para prevenir la degradación de otras enzimas.

Se han utilizado polioles como glicerina, propilenglicol y polietilenglicol en combinación con ácido bórico para inhibir la actividad proteasa y reducir la autodigestión. El borato actúa como un inhibidor de proteasa reversible al interactuar con grupos en el sitio activo de las enzimas. Una vez en el agua de lavado, estos inhibidores se diluyen y aumenta la actividad enzimática. También se sabe que los productos de hidrolizado de proteínas y los aminoácidos pueden estabilizar las proteasas al unirse al sitio activo de la enzima. (15)

Tabla 2.2: Fuentes microbianas comerciales de preparaciones enzimáticas. (14)

Fuente	Actividad enzimática
Hongos	
<i>Aspergillus oryzae</i>	α -amilasa, glucoamilasa, lactasa, proteasa, lipasa
<i>Aspergillus niger</i>	α -amilasa, β -glucanasa, glucoamilasa, celulasas, hemicelulasas, lactasa, pectinasas, proteasas, lipasa, catalasa, glucosa oxidasa, naranginasa, pululanasa, dextranasa, inulinasa, xilanasas
<i>Rhizopus oryzae</i>	α -amilasa, glucoamilasa, pectinasa
<i>Mucor pusillus</i>	Proteasa, sustituto de la renina
<i>Mucor miehei</i>	Proteasa, sustituto de la renina
<i>Trichoderma reesei</i>	Proteasa, sustituto de la renina, celulasa, hemicelulosa
Levaduras	
<i>Kluyveromyces lactis</i>	Lactasa, renina recombinante
<i>Saccharomyces sp.</i>	Invertasa
Bacterias	
<i>Escherichia coli</i>	Enzimas recombinantes
<i>Bacillus subtilis</i>	α -amilasa, β -glucanasa, proteasas neutra y alcalina
<i>Bacillus licheniformis</i>	α -amilasa, proteasa
<i>Bacillus polymyxa</i>	α -amilasa
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	α -amilasa, proteasa
<i>Bacillus caereus</i>	α -amilasa, proteasa
<i>Micrococcus lysodieticus</i>	Catalasa
<i>Bacillus coagulans</i>	Glucosa isomerasa
<i>Streptococcus griseofuseus</i>	Glucosa isomerasa
<i>Streptomyces olivochromogenes</i>	Glucosa isomerasa
<i>Streptomyces rubiginosus</i>	Glucosa isomerasa
<i>Klebsiella aerogenes</i>	Pululanasa

Celulasas: para descomponer celulosa y polisacáridos

Las celulasas rompen los enlaces β -1,4-glucosídicos en la celulosa y actúan directamente sobre las fibras naturales de algodón o mezclas de algodón/lino y sobre la porción de celulosa en las fibras sintéticas.

Esta clase de enzimas se divide en:

- Endocelulasas (endoglucanasa: EG).
- Exocelulasas (celobiohidrolasa: CBH).

La molécula de la celulasa se compone de hasta tres tipos de dominios funcionalmente diferentes:

- El núcleo, que es un dominio catalítico esférico grande.
- Un enlazador, que es un espaciador alargado y flexible.
- Un pequeño dominio de unión a celulosa esférico (CBD).

Dosis extremadamente altas de “celulasas aclaradoras del color” pueden dañar la tela en algunos productos de algodón después de lavados repetidos. El daño puede aparecer como una

pérdida de resistencia de la tela y un ablandamiento excesivo de las partes mecánicamente expuestas de las prendas, como los dobladillos y los bordes. (15)

Lipasas: para digerir lípidos

Debido a su fuerte hidrofobicidad, las grasas y los aceites (triglicéridos) son difíciles de eliminar de la ropa a bajas temperaturas. Las lipasas hidrolizan los triglicéridos a mono y diglicéridos más hidrófilos, ácidos grasos libres y glicerol. Estos productos de hidrólisis son todos solubles en condiciones alcalinas.

La primera lipasa comercial para la aplicación en detergentes fue la "Lipolasa". La lipolasa se aisló por primera vez del hongo *Humicola lanuginosa* desde donde se transfirió la codificación genética de la lipasa a un organismo huésped, *Aspergillus* spp.

En el lavado, los efectos de las lipasas se observan solo después de varios ciclos de lavado. Se llevó a cabo ingeniería genética para desarrollar efectos de primer lavado en el uso de la ropa: se cambió uno de los 269 aminoácidos en la molécula de lipolasa (en la posición del aminoácido número 96, el ácido aspártico se sustituyó por leucina) para hacer que el sitio activo fuera más hidrófobo, por lo que se mejoró la afinidad por una zona de contacto con lípidos en la superficie textil. Para el lavado en frío, este efecto se mejoró considerablemente. (15)

Enzimas redox

Las enzimas redox, principalmente peroxidasas y oxidasas (incluidas las lacasas), se están investigando como componentes potenciales de nuevos sistemas de blanqueo que, además de utilizar productos químicos menos agresivos que los sistemas de blanqueo actuales, podrían incluso proporcionar efectos blanqueadores a bajas temperaturas de lavado (hasta 5-10°C). Esto proporcionaría ahorros de energía y también garantizaría un menor desgaste general de lavado de prendas.

El sistema DTI (del inglés *Dye Transfer Inhibition: inhibición de la transferencia de tintes*) consta de tres componentes:

- La enzima.
- Un mediador.
- El peróxido de hidrógeno.

La forma oxidada del mediador es el agente oxidante real. El tinte (la forma coloreada) liberado de la tela será oxidado por el mediador enzimáticamente oxidado y se volverá incoloro. Después de un cribado intensivo de mediadores, se encontró que el ácido propiónico fenotiazina-10 era útil en condiciones prácticas en un sistema de detergente. (15)

2.2. Enzimas extremófilas

La alta temperatura, condición extrema a la que están sometidos los denominados organismos termofílicos, demuestra claramente que la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes. La temperatura regula la actividad y evolución de los organismos. En la célula viva, determina la velocidad de los procesos biológicos, por ejemplo, de las reacciones catalizadas por enzimas y el estado de las estructuras de los biopolímeros activos, las proteínas, los ácidos nucleicos, el sistema de membranas, etc. (8).

La diversidad que la "naturaleza" proporciona para ambientes extremófilos de temperatura, pH, acidez, alcalinidad, presión y salinidad puede ser aprovechada para descubrir nuevas enzimas adecuadas para su uso en aplicaciones industriales.

El mecanismo de estabilización proteica en condiciones extremas varía dependiendo de la especie microbiana y del nivel de adaptación requerido para la supervivencia en el organismo huésped. Para los acidófilos y alcalófilos, son solo las proteínas exportadas de la célula las que tienen que ser estables bajo los pHs extremos del entorno de crecimiento, puesto que las proteínas dentro de la célula no tienen que soportar estas condiciones extremas como el pH intracelular se mantiene alrededor de pH 5.0-6.0. (7)

Muchas enzimas arqueales y bacterianas aisladas de los extremófilos tienen aplicaciones generales en biología molecular. Otras enzimas termófilas son de gran importancia para la descomposición de la biomasa y otros materiales, como los plásticos de desecho, con el fin de contribuir a una economía circular donde no se desperdicia nada. (7)

2.3. Enzimas detergentes

Las principales clases de enzimas detergentes (proteasas, lipasas, amilasas y celulasas) proporcionan beneficios específicos para su aplicación en la lavandería y el lavado automático de platos. Históricamente, las proteasas fueron las primeras en usarse ampliamente en detergentes para ropa. Además de elevar el nivel de limpieza, también han proporcionado beneficios ambientales al reducir el consumo de energía a través de tiempos de lavado más cortos, temperaturas de lavado más bajas y menor consumo de agua.

Tabla 2.3: Principales enzimas utilizadas en los detergentes. (17)

Enzima	Uso
Proteasa	Las enzimas más utilizadas en la industria detergente eliminan las manchas proteicas como la hierba, la sangre, el huevo y el sudor humano, que tienden a adherirse fuertemente a las fibras textiles.
Amilasa	Se utiliza para eliminar residuos de alimentos a base de almidón como patatas, espaguetis, natillas, salsas y chocolate.
Lipasas	Descomponen el material graso. Es capaz de eliminar las manchas de grasa como la mantequilla, aceite de ensalada, salsas y las manchas duras en cuellos y puños.
Celulasas	Modifica la estructura de la fibra de celulosa en algodón y mezclas de algodón. Cuando se agrega un detergente, da como resultado aclarar, suavizar y eliminar la suciedad del color.

Las enzimas detergentes deben ser rentables y seguras de usar. Los primeros intentos de usar proteasas fracasaron debido a que los productores y usuarios desarrollaron hipersensibilidad. Esto se combatió desarrollando granulados libres de polvo (de aproximadamente 0,5 mm de diámetro) en los que la enzima se incorpora a un núcleo interno, que contiene sales inorgánicas (p. Ej., NaCl) y azúcares como conservantes, unido con fibras de refuerzo de carboximetilcelulosa o similares.

Este núcleo se recubre con materiales cerosos inertes a base de parafina o polietilenglicol y diversos ligantes delicuescentes, que luego se dispersan en el lavado. Esta combinación de materiales previene la formación de suciedad y protege las enzimas contra daños causados por diferentes partes del detergente durante el almacenamiento. (16)

Las enzimas se utilizan en cantidades increíblemente diminutas en la mayoría de preparaciones de detergente, sólo 0.4 - 0.8% catalizador bruto en peso. En la tabla 2.4 se muestra el

ejemplo de la composición de un detergente enzimático.

Además, el catalizador debe soportar detergentes aniónicos y no iónicos, jabones, oxidantes, abrillantadores ópticos, y numerosos materiales un poco menos reactivos. (16)

Hoy las proteasas son unidas por lipasas y amilasas para mejorar la eficacia del detergente especialmente para el lavado doméstico a temperaturas más bajas y, en operaciones de limpieza industrial, a niveles de pH más bajos. Las celulasas contribuyen al cuidado general de la tela rejuveneciendo o manteniendo la nueva apariencia de las prendas lavadas.

Las enzimas son producidas por tecnologías de fermentación que utilizan recursos renovables y hoy en día los avances en la ingeniería genética y de proteínas han contribuido a la mejora de ella en aspecto como la estabilidad, economía, especificidad y potencial general de los productos enzimáticos industriales.

Desde el punto de vista de las enzimas, los detergentes en el mercado internacional contienen ingredientes principales que operan mediante mecanismos de detergencia casi idénticos. La suciedad y las manchas se eliminan mediante acción mecánica asistida por tensoactivos, reforzantes y enzimas.

Las proteasas, amilasas o lipasas alcalinas en detergentes de uso pesado hidrolizan y solubilizan la suciedad del sustrato adherida a telas o superficies duras. Las celulasas limpian por hidrólisis de enlaces glicosídicos que eliminan las partículas de suciedad adheridas a las microfibras de algodón. Los efectos clave de las celulasas son suavizar y mejorar el brillo del color de las superficies textiles desgastadas. Los tensoactivos reducen la tensión superficial en las interfaces y mejoran la fuerza repulsiva entre la suciedad original, la suciedad degradada enzimáticamente y la tela. Los reforzantes actúan para quelar, precipitar o intercambiar iones, sales de calcio y magnesio, proporcionar alcalinidad, prevenir la redeposición del suelo, proporcionar capacidad amortiguadora e inhibir la corrosión.

La producción de enzimas microbianas representa una parte importante de la biotecnología industrial actual. Los productos enzimáticos industriales más importantes se producen mediante fermentación continua o por lotes aeróbicos en fermentadores con volúmenes que oscilan entre 20 y 1000 m^3 . Los procesos de fermentación se llevan a cabo sobre nutrientes esterilizados a base de materias primas renovables como almidón de maíz, diversos azúcares y sémola de soja en presencia de diversas sales añadidas para aportar elementos básicos. (7)

La mayoría de las enzimas industriales se secretan a partir de microorganismos seleccionados en el medio de fermentación para descomponer el carbono y la fuente de nitrógeno.

Para los productos sólidos, como los detergentes en polvo, se fabrican formulaciones enzimáticas granuladas no espesantes. Para su uso en detergentes líquidos, las formulaciones líquidas o encapsuladas son fáciles de manipular y dosificar en una fábrica.

Tabla 2.4: Composición de un detergente enzimático. (16)

Constituyente	Composición (%)
Tripolifosfato de sodio (ablandador de agua, afloja la suciedad)	38
Dodecibencenosulfonato de sodio (tensoactivo)	25
Perborato de sodio tetrahidratado (agente oxidante)	25
Jabón (alcanocarboxilatos de sodio)	3
Sulfato de sodio (ablandador de agua)	2.5
Carboximetilcelulosa sodio (agente de suspensión de la suciedad)	1.6
Metasilicato de sodio (aglutinante, afloja la suciedad)	1
Proteasa de bacilo (3% activo)	0.8
Abrillantadores fluorescentes	0.3
Agentes antiespumantes	Traza
Perfume	Traza
Agua	al 100%

2.3.1. “Procedimiento para la mejora del rendimiento de limpieza de un agente detergente o de limpieza”

La siguiente sección describe la patente de Henkel ®AG & CO. KGAA por O’Connell, Timothy; Siegert, Petra; Evers, Stefan; Bongaerts, Johannes; Weber, Thomas; Maurer, Karl-Heinz y Bessler, Cornelius publicada en el 2020 (34):

El empleo de enzimas en agentes detergentes y de limpieza está establecido en el estado de la técnica. Sirven para ampliar el espectro de rendimiento del agente referido correspondientemente a sus actividades especiales. Pertenecen a ellas particularmente enzimas hidrolíticas como proteasas, amilasas, lipasas y celulasas. Las tres primeras citadas hidrolizan proteínas, almidones y grasas y contribuyen por lo tanto directamente a la eliminación de suciedad.

Las celulasas se utilizan particularmente a causa de su acción en los tejidos. Son otro grupo de enzimas de agentes detergentes y de limpieza las enzimas oxidativas, particularmente oxidasas, que sirven preferentemente, dado el caso en interacción con otros componentes, para blanquear la suciedad o producir agentes blanqueantes in situ.

Además 15 de estas enzimas, que se someten a una optimización continua, se proporcionan constantemente otras enzimas para empleo en agentes detergentes y de limpieza para poder abordar particularmente suciedades especiales óptimamente, como por ejemplo pectinasas, β -glucanasas, mananasas u otras hemicelulasas para la hidrólisis particularmente de polímeros vegetales especiales.

Las enzimas contenidas en agentes detergentes y de limpieza establecidas hace más tiempo, y en la práctica todas las modernas y eficaces, son proteasas, y entre ellas particularmente serinproteasas, en las que figuran también las subtilasas. Provocan la degradación de suciedades que contienen proteínas del producto para limpiar.

Entre ellas, son especialmente importantes a su vez las proteasas de tipo subtilisina (subtilasas, subtilopeptidasas, EC 3.4.21.62), que a causa de los aminoácidos de acción catalítica se

incluyen en las serinproteasas. Actúan como endopeptidasas inespecíficas, es decir, hidrolizan cualquier enlace amida de ácido que se encuentre en el interior de péptidos o proteínas. Su pH óptimo se encuentra generalmente en el intervalo claramente alcalino.

Las subtilasas se forman naturalmente a partir de microorganismos; entre ellas han de mencionarse particularmente las subtilisinas formadas y secretadas por especies de *Bacillus* como el grupo principal dentro de las subtilasas.

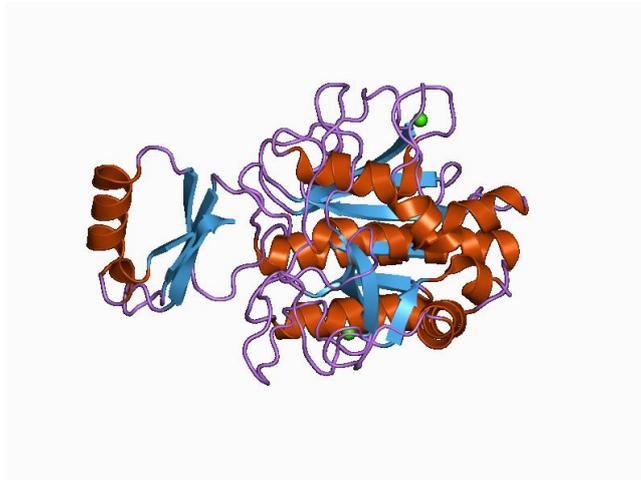


Figura 2.1: Estructura de la subtilasa

Son ejemplos de proteasas de tipo subtilisina utilizadas preferentemente para agentes detergentes y de limpieza las subtilisinas BPN' y Carlsberg, la proteasa PB92, las subtilisinas 147 y 309, la proteasa alcalina de *Bacillus lentus*, particularmente de *Bacillus lentus* DSM 5483, la subtilisina DY y las enzimas asignadas como subtilasas, no son subtilisinas en sentido estricto, termitasa, proteinasa K y las proteasas TW3 y TW7.

Es una desventaja de estas proteasas utilizadas preferentemente en agentes detergentes y de limpieza del estado de la técnica que no presentan suficiente actividad proteolítica, particularmente a bajas temperaturas, por ejemplo, entre 10 y 40 °C, particularmente entre 10 y 30 °C o incluso entre 10 y 25 °C, y por lo tanto particularmente en agentes detergentes y detergentes para lavavajillas no muestran un rendimiento de limpieza óptimo en este intervalo de temperatura.

En un procedimiento según la invención, los agentes utilizados contienen enzimas preferentemente en cantidades totales de 1 x 10-8 a 5 % en peso referido a la proteína activa. Se prefieren enzimas contenidas de 0,001 a 5 % en peso, más preferentemente de 0,01 a 5 % en peso, aún más preferentemente de 0,05 a 4 % en peso y con especial preferencia de 0,075 a 3,5 % en peso en estos agentes, en las que cada enzima contenida puede presentarse en las cantidades citadas.

La concentración de proteína puede determinarse con ayuda de procedimientos conocidos, por ejemplo, el procedimiento de BCA (ácido bicinconínico; ácido 2,2'-biquinolil-4,4'-dicarboxílico) o el procedimiento de Biuret.

La siguiente sección describe la patente de Henkel ® por Hellmuth Hendrik, Laufs Brian, O'Connell Timothy, Kropf Christian, y Sunder, Matthias, publicada en el 2016 (35):

La invención se refiere al uso de aislado de proteína de suero en detergentes o agentes de limpieza que contienen enzimas para aumentar la estabilidad de enzimas y un detergente o agente de limpieza que contiene enzimas, en particular un detergente líquido o agente de limpieza con estabilidad enzimática mejorada.

Las enzimas activas de lavado o limpieza se confeccionan tanto en forma sólida como líquida. El grupo de preparaciones de enzimas sólidas incluye, en particular, los gránulos enzimáticos que consisten en varios ingredientes, que a su vez se incorporan preferiblemente en detergentes

sólidos o agentes de limpieza. Por el contrario, los detergentes líquidos o gelatinosos o agentes de limpieza a menudo contienen preparaciones de enzimas líquidas, por lo que, a diferencia de los gránulos de enzimas, son mucho menos están protegidos.

Para aumentar la estabilidad de dichos detergentes líquidos o agentes de limpieza que contienen enzimas, se han propuesto varias medidas de protección diferentes. Por ejemplo, la solicitud de patente alemana DE2038103 (Henkel ®) enseña la estabilización de detergentes lavavajillas que contienen enzimas mediante sacáridos, mientras que la patente europea EP646170B1 (Procter & Gamble ®) divulga el propilenglicol para la estabilización enzimática en agentes de limpieza líquidos.

Se ha encontrado que el aislado de proteína de suero contribuye a la estabilización de las enzimas incluso en cantidades relativamente pequeñas.

En una realización preferida de la invención se proporciona un agente que aísla de proteína de suero en cantidades de hasta 5 % en peso, preferiblemente de 0.01 a 5 % en peso.

Una composición según la invención contiene al menos una enzima del grupo de enzimas conocidas comúnmente utilizadas en detergentes o agentes de limpieza. Contiene al menos una proteasa y al menos una amilasa.

Según la invención, las amilasas montables son, por ejemplo, las α -amilasas de *Bacillus liche-niformis*, de *Bacillus amyloliquefaciens* o de *Bacillus stearothermophilus*.

Los agentes según la invención pueden contener, en particular, coadyuvantes, tensoactivos, blanqueantes a base de compuestos orgánicos y/o inorgánicos, activadores del blanqueo, disolventes orgánicos miscibles en agua, enzimas, secuestrantes, electrolitos, reguladores del pH y otros auxiliares tales como blanqueadores ópticos, reguladores de espuma y tintes y fragancias y combinaciones de los mismos.

2.3.2. “Composiciones detergentes y uso de combinaciones de enzimas en las mismas”

La siguiente sección describe la patente de Novozymes ® por Mikael Mikkelsen, Niels Munk Ryom, Claus Ladefoged y Sandra Friis-Jensen publicada en el 2012 (36):

La presente invención se refiere a composiciones detergentes tipo gel o líquidas acuosas que comprenden combinaciones específicas de enzimas. Las composiciones detergentes pueden comprender además una combinación de ácido bórico o un compuesto de boro capaz de formar ácido bórico en la composición, un compuesto polihidroxi, preferiblemente propanodiol, y un nivel relativamente alto de ion calcio para estabilizar una combinación seleccionada de una enzima proteasa y otras enzimas. La invención también se refiere a un proceso para aumentar la estabilidad de las enzimas no proteasas en combinación de una enzima proteasa con otras enzimas en una composición detergente en gel o líquida.

La presente invención se refiere a una composición líquida o en gel que comprende subtilisina KL y/o sus variantes en combinación con al menos una lipasa, amilasa, celulasa o, mananasa, donde la proporción en peso entre el contenido de subtilisina KL o sus variantes al contenido de lipasa, amilasa, celulasa o mananasa es de 0,001 a 100, preferiblemente de 0,01 a 10, especialmente de 0,5 a 5, especialmente de 1 a 3, donde la variante de subtilisina KL es una del grupo definido en la reivindicación 1.

En una forma de realización particular el contenido de subtilisina KL o sus 50 variantes es de 0,001 a 5 % en peso y si están presentes el contenido de cada una de la siguiente lipasa, amilasa, celulasa, o mananasa, es del 0,001 al 5 % en peso.

La composición detergente de la invención puede por ejemplo ser formulada como una composición detergente para ropa a mano o a máquina que incluye una composición de aditivo para el lavado de la ropa adecuado para el pretratamiento de tejidos manchados y una composición de suavizante adicionada al enjuague, o ser formulada como una composición detergente para

el uso en operaciones de limpieza de superficies duras del hogar en general, o ser formulada para operaciones de lavado de la vajilla a mano o a máquina.

La composición detergente comprende uno o más tensoactivos, que pueden ser no iónicos incluyendo semipolares y/o aniónicos y/o zwitteriónicos y/o catiónicos. Los tensoactivos están típicamente presentes a un nivel del 40 0,1 % al 60 % en peso.

Es contemplado que en las composiciones detergentes cualquier enzima, en particular la enzima de la invención, se puede adicionar en una cantidad correspondiente a 0,01-100 mg de proteína enzimática por litro de solución de lavado, preferiblemente 0,05-5 mg de proteína enzimática por litro de solución de lavado, en particular 0,1-1 mg de proteína enzimática por litro de solución de lavado.

2.3.3. “ α -Amilasa mutante, detergente y agente de lavado de vajilla”

La siguiente sección describe la patente de Novozymes (®) por Allan Svendsen y Henrik Bisgard-Frantzen, publicada en el 2009 (37):

La α -amilasa mutante según la invención es una α -amilasa de *B. licheniformis*, una α -amilasa de *B. amyloliquefaciens* o una α -amilasa de *B. stearothermophilus*. Todas estas α -amilasas están bien caracterizadas y se describe su secuencia de aminoácidos completa.

Una forma de realización preferida de la α -amilasa mutante reivindicada según la invención se caracteriza por el hecho de que el residuo de aminoácidos de metionina se sustituye por una Leu. En esta forma de realización se obtiene un nivel de actividad y estabilidad muy satisfactorio en presencia de agentes oxidantes.

Además, la invención comprende un detergente, el cual se caracteriza por el hecho de que éste comprende una forma de realización preferida de la α -amilasa mutante según la invención. Así, según la invención, la forma de realización preferida de la α -amilasa mutante puede añadirse como un componente de una composición detergente. Como tal, puede incluirse en la composición detergente en forma de un aditivo detergente.

La composición detergente al igual que el aditivo detergente puede comprender adicionalmente otra u otras enzimas usadas de forma convencional en detergentes, tales como proteasas, lipasas, celulasas, oxidasas o peroxidasas.

La composición detergente de la invención puede estar en cualquier forma conveniente, p. ej. en polvo, gránulos o líquido. Un detergente líquido puede ser acuoso, conteniendo normalmente hasta un 90 % de agua y un 0-20 % de solvente orgánico.

La composición detergente comprende un tensoactivo que puede ser aniónico, no-iónico, catiónico, anfotérico o una mezcla de estos tipos. El detergente normalmente contendrá un 0-50 % de tensoactivo aniónico tal como sulfonato de alquilbenceno lineal (SAL), sulfonato de alfa-olefinas (SAO), sulfato de alquilo (SA), sulfato de etoxialcohol (SEA) o jabón. También puede contener un 0-40 % de tensoactivo no-iónico tal como etoxilato de nonilfenol o etoxilato de alcohol. Además, puede contener un tensoactivo de amida de ácido graso de polihidroxi.

El pH (medido en una solución de detergente acuosa) será normalmente neutral o alcalino, p. ej. de 7-11. El detergente puede contener un 1-40 % de un constructor de detergente tal como zeolita, fosfato, fosfonato, citrato, NTA, EDTA o DTPA, anhídrido succínico de alquenilo, o silicato, o puede no estar construido (es decir, esencialmente libre de un constructor detergente).

Se contempla actualmente que, en la composición detergente de la invención, la α -amilasa mutante puede añadirse en una cantidad correspondiente a 0.001-100 mg de enzima por litro de solución de lavado.

2.3.4. “Composición detergente”

La siguiente sección describe la patente por Yasunao Wada; Miyuki Kasai y Shitsuw Shikata, publicada en 1998 (38):

Los presentes inventores han descubierto que, en comparación con el caso de los detergentes convencionales, se puede obtener una detergencia particularmente excelente contra la suciedad fangosa mediante la incorporación de protopectinasa que tiene un pH óptimo para la reacción en la región alcalina, lo que lleva a completar la presente invención. En consecuencia, la presente invención proporciona un detergente que en composición comprende protopectinasa con un pH de reacción óptimo de 7,0 o superior cuando se usa protopectina o ácido poligalacturónico como sustrato.

En la presente invención, el término protopectinasa se refiere colectivamente a las enzimas que actúan sobre la protopectina (pectina natural insoluble), que es una sustancia péctica insolubilizada a través del enlace mutuo de moléculas de pectina a través de Ca^{2+} , Mg^{2+} o enlace intermolecular; enlace a una molécula de celulosa; etc.

No se impone ninguna limitación particular a la cantidad de protopectinasa incorporada en el detergente de la presente invención siempre que la actividad enzimática se exprese satisfactoriamente. Por ejemplo, la protopectinasa se incorpora a una solución de lavado en una cantidad de 0,001 a 500 mg/L, más preferiblemente de 0,05 a 50 mg/L reducida a la cantidad de la muestra de enzima, de modo que la capacidad de liberación mencionada anteriormente para la pectina de algodón puede ser de 0,2 mg/g-algodón o más.

Para obtener un alto efecto de lavado contra las manchas turbias, es importante emplear una enzima que muestre actividad de protopectinasa en una región alcalina en la que se lleva a cabo el lavado real. Específicamente, se prefiere que se incorpore protopectinasa que tenga un pH de reacción óptimo de 7,0 o superior o protopectinasa que tenga una capacidad de liberación de pectina de algodón de 0,2 mg/g-algodón o más a un pH de 8,0.

En otras palabras, es importante para la realización de la presente invención que la protopectinasa actúe para provocar la liberación de pectina de algodón en una solución alcalina que contiene el detergente.

Capítulo 3

Lavadoras con perspectiva de ahorro de agua

Las lavadoras pertenecen a la categoría de enseres mayores o aparatos de línea blanca. Se consideran un electrodoméstico, debido no sólo a que su principal fuente de energía para funcionar es la electricidad, sino también porque es una máquina utilizada en el hogar. En el mercado existe una amplia gama de ellas de diferentes tipos y mecanismos de lavado. Además, pueden tener sistema automatizado o no y una o dos tinas. Se comercializan prácticamente dos tipos, las de eje vertical y las de eje horizontal, las primeras se caracterizan porque la ropa se introduce en el contenedor por la parte superior, mientras en las segundas su carga se realiza por la parte frontal. A su vez, éstas se clasifican en manuales, semiautomáticas y automáticas. Las lavadoras de ropa doméstica se dividen en dos grupos: automáticas y semiautomáticas. (22)

Dentro del grupo de las automáticas existen dos sistemas de lavado:

- Tina giratoria horizontal (carga frontal).
- Tina giratoria vertical (carga superior).

En las semiautomáticas

- Doble cuba (lavado y centrifugado).
- Agitador central o paleta (helicoidal o vertical).

Las lavadoras automáticas están proyectadas para lavar de 4-6 kg de ropa seca. Las prendas se colocan en un tambor de acero perforado que gira dentro de un cilindro hueco, se cierra la puerta y se selecciona el ciclo adecuado de lavado. Además de un motor síncrono para accionar el programador, otro mueve el tambor de lavado que imprime cambios en el sentido del giro durante el lavado, girando hasta 1100 rpm. Después de las distintas operaciones, las aguas sucias se eliminan mediante una bomba de vaciado. En las lavadoras semiautomáticas la cuba debe estar siempre llena de agua hasta los niveles indicados, y la ropa debe hallarse en todo momento cubierta por el agua; las prendas son agitadas mediante un impulsor que mediante movimientos alternos (izquierda y derecha) produce corrientes que hace que la suciedad se desprenda de la ropa. (23)

Las lavadoras automáticas por la clase de funciones que realizan consumen más energía que las manuales y las semiautomáticas. Por ejemplo, las manuales con agitador, gastan entre 29 y 94 Kilo Watts hora/año (KWh/año), una cantidad menor que las semiautomáticas, pues requieren para trabajar entre 34 y 144 (KWh/año). (22)

A continuación se muestra el ejemplo de una lavadora de marca Mabe, que desarrolló una tecnología para consumir menor cantidad de agua.

3.0.1. Lavadora Mabe Aqua Saver

La empresa mexicana de electrodomésticos Mabe comenzó a trabajar en 2007 en el diseño de una lavadora ahorradora de agua en su centro de Centro de Tecnología y Proyectos ubicado en el estado de Querétaro.

Las lavadoras normalmente operan en tres etapas de funcionamiento, con algunas variaciones: un ciclo de remojado y lavado con jabón, otro más para el enjuagado y el centrifugado para exprimir la ropa.

Sin embargo, el proceso presentaba ineficiencias: la primera es que una lavadora suele llenarse de agua hasta el borde, lo mismo si tiene carga máxima de ropa que si contiene pocas prendas.

Peor aún, algunos programas de lavado requieren dos o más procesos de remojo con jabón o suavizante, lo que dispara el consumo de agua. Por ello, la empresa decidió fragmentar el proceso de lavado para convertirlo en una serie de pequeños procesos que consumen menos agua.

Así, en lugar de llenar la tina hasta el borde, el proceso desarrollado por la empresa sólo la humedece por aspersion. Para un centrifugado a baja velocidad, la prepara para el remojado con agua jabonosa. Este proceso está controlado por sensores que detectan el peso de la ropa y determinan la cantidad de agua que deberá usarse en la lavada, por lo que esta nunca se llena más allá de una tercera parte de su capacidad.

Otro proceso consumidor de agua es el remojado con jabón. En este caso, en lugar de llenar la tina, se humedece con líquido que circula gracias a una red de mangueras que la rocían por arriba y por los lados de la tina. En lugar de enjuagar la ropa con una carga completa de agua limpia, la lavadora combina aspersiones de agua limpia y períodos de centrifugado hasta dejar la ropa limpia y exprimida.

Estas mejoras en el diseño del sistema de lavado llevaron años de trabajo en áreas como el análisis de la hidráulica y la interacción de la ropa con la propela (lo que algunos llaman también agitador), ya que una prenda bien lavada es el resultado de la exitosa combinación de cuatro factores, según la empresa: la temperatura del agua, el detergente usado, la turbulencia del agua y el impacto de la propela contra la ropa.

El funcionario de Mabe señaló que tuvieron que diseñar una propela especial, que pudiera proporcionar potencia suficiente para lavar la ropa, sin consumir demasiada energía. El resultado es una familia de lavadoras cuyos precios van de los 8,500 hasta los 11,000 pesos, capaces de lavar una carga de ropa con apenas 80 litros de agua, ahorrando hasta un 73% de la energía eléctrica. (21)

3.0.2. Lavadora para instrumental de vidrio de laboratorio

Estas lavadoras para instrumental de vidrio de laboratorio poseen un generador de vapor incorporado para penetrar en los residuos secos y eliminarlos, y la bomba de agua purificada incorporada le permite usar una fuente de agua purificada no presurizada para hasta seis enjuagues con agua pura.

Los brazos de lavado están ubicados en la parte inferior de las rejillas, lo que permite contar con más espacio para instrumental de vidrio y elementos más grandes, como jaulas de animales.

Las rejillas intercambiables le permiten usar las rejillas de espigas superiores e inferiores para albergar una amplia variedad de instrumental de vidrio, incluidos matraces volumétricos.

Las rejillas de espigas dirigen el agua hacia el instrumental de vidrio para una limpieza eficaz; el secado por aire forzado a través de las espigas no está disponible cuando usa las rejillas de espigas en esta lavadora.

La pantalla LCD permite monitorear en forma fácil el ciclo de lavado, incluso la temperatura del agua. Los ciclos predeterminados de fábrica y los dos ciclos programables por el usuario le permiten personalizar sus configuraciones de lavado. El retardo de inicio del ciclo le permite

programar la unidad para que ejecute el ciclo más tarde (hasta 8 horas más tarde) y así reducir los ruidos indeseados y el consumo de electricidad durante las horas de mayor actividad. Las alarmas incorporadas advierten del vidrio caliente, el nivel bajo del agua, el nivel alto del agua y el desborde. La lavadora posee dos bombas, una para lavado y otra para drenaje, a fin de reducir la posibilidad de contaminación cruzada. El aumento de la temperatura del agua permite la sanitización y una mejor limpieza del instrumental de vidrio. (26)



Figura 3.1: Lavadora para instrumental de laboratorio de Cole-Parmer.

3.0.3. Lavadora alemana

Se revisó una patente alemana: “Uso de cuerpos de espuma para el acabado de prendas de ropa y un método y dispositivo de tratamiento de ropa adecuados para este fin” (41) de una lavadora con las siguientes características:

- Una cámara de tratamiento.
- Un sistema de almacenamiento con sustancias marcadoras y enzimas.
- Dispositivo con boquilla que dosifica las sustancias y enzimas.
- Un conductor de agua.
- Una bomba.
- Un detector óptico de las sustancias marcadoras que marcan la suciedad en la ropa.
- Un calentador del agua.

Con un mecanismo donde las enzimas se aplican a la suciedad para eliminarlas, posiblemente varias veces. Para mejorar la eficacia de las enzimas, la temperatura y la humedad dentro de la cámara de tratamiento se pueden ajustar de forma óptima. Una vez que se ha eliminado la suciedad, las prendas se pueden mover entre sí o se puede examinar una nueva área de ropa en busca de suciedad con sustancias marcadoras.

Además, el aparato doméstico tiene una tobera para colocar o pulverizar sustancias marcadoras en la cámara de tratamiento.

Las enzimas están habilitadas (o se crean las condiciones adecuadas para ellas) para eliminar la suciedad que detectan. En el caso de detectarse diferentes tipos de suciedad se pueden utilizar distintas enzimas, o pueden utilizarse conjuntamente.

Algunas otras consideraciones:

1. Pueden crearse las condiciones de acción local para la eficacia de estas enzimas, en particular a través de la influencia de la temperatura.
2. Es posible que un método óptico de detección se realice con luz ultravioleta. Además puede utilizarse la luz UV para desactivar enzimas.
3. Los objetos de la cámara de tratamiento se pueden mover. Esto es posible mediante la rotación de un tambor como cámara de tratamiento. Como resultado de este movimiento, las enzimas y cualquier otra sustancia que pueda haber sido aplicada pueden distribuirse mejor sobre la superficie.
4. Es posible que las enzimas u otros detergentes mencionados anteriormente también se apliquen con una tobera y que la dirección de la boquilla sea regulable en lo que se refiere a su dirección.
5. La bomba tiene preferencia por una calefacción integrada. Puede estar formada para producir aire o agua, pero sin sustitución de componentes.

En la siguiente figura, se muestra una lavadora [11] con una carcasa [12]. La lavadora [11] tiene un tambor [15] con prendas [W] de ropa en su interior. En el interior del tambor se disponen [15] impulsores [20] de manera conocida. Se utilizan para mezclar las prendas de ropa [W] a medida que gira el tambor [15]. Un sumidero [22], que se abre a una salida [23], se encuentra debajo del tambor [15]. El drenaje [23] va a una válvula [V1] de tres posiciones. En la posición cerrada, no puede salir agua del sumidero [22]. En una posición abierta a la derecha, el agua puede fluir ser bombeado al agua residual [33] por medio de una bomba [P1] y así fuera de la lavadora [11]. En una posición abierta a la izquierda, una línea de alimentación [Z] se conecta a la válvula [V1], que conduce a una bomba [P2]. Esta bomba [P2] está configurada ventajosamente como antes con un dispositivo de calentamiento integrado. Esto significa que el agua bombeada se puede calentar al mismo tiempo. Además, se plantea que pueda bombear tanto agua desde la línea de suministro [Z] como aire aspirado de alguna otra manera. (41)

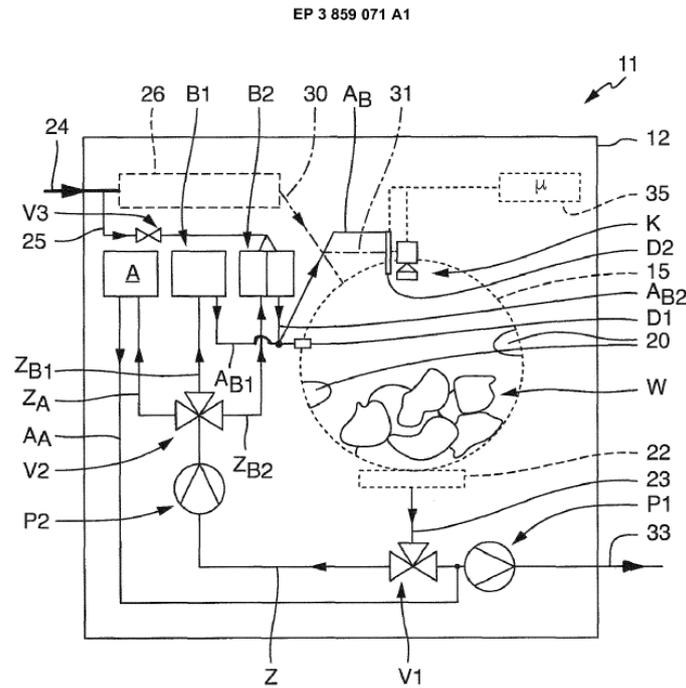


Figura 3.2: Prototipo de la patente alemana

3.0.4. Estudio de la Procuraduría Federal del Consumidor

Se examinaron 13 modelos de las 9 principales marcas de lavadoras automáticas, a su mayor capacidad (por marca) hasta 17 kg, y en sus diferentes sistemas de lavado (impulsor, tambor, agitador o infusor, de llenado frontal o superior), que se comercializan en el mercado nacional.

Se evaluó la capacidad de la lavadora para remover tanto las manchas comunes como las de difícil extracción en una carga de prendas de algodón (sábanas, toallas y fundas de almohadas) según la capacidad recomendada. A esta carga se le agregaron “tiras de manchas” para evaluar las características principales del lavado, formada por cuadros de tela de algodón (de 120 cm x 120 cm cada uno) unidos, pero manchados individualmente con distintos elementos, a saber: Para cuantificar el efecto del tallado (debido principalmente a la fuerza mecánica), los dos primeros cuadros de tela se mancharon con sebo y con una mezcla de carbón mineral y de aceite mineral, respectivamente.

Con el fin de verificar la remoción de pigmentos de proteínas, el tercer cuadro se manchó con sangre, y el cuarto con chocolate para observar la remoción de pigmentos orgánicos. Por último, para verificar el efecto blanqueador, la pieza final de la tira de prueba se manchó con vino tinto.

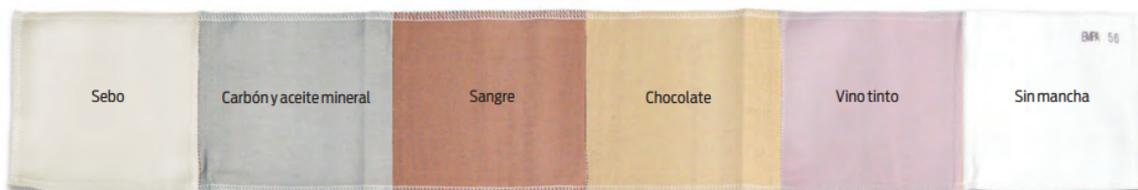


Figura 3.3: Tira con diferentes manchas usado en el estudio de la PROFECO

La carga de ropa total (incluyendo las tiras de manchas) se lavó en cada modelo programando un ciclo de lavado completo para ropa de algodón, bajo una operación y alimentación eléctrica

normales, con detergente (líquido) de marca comercial con una dosificación de 36 ml + 10.7 ml por cada kilogramo de carga de ropa, y agua tomada directamente de la red de suministro hidráulico del laboratorio (agua suave) a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para el agua fría, y para la caliente de $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Una vez finalizado el ciclo de lavado y 24 horas después del proceso de secado (de forma natural) se cuantificó, con un medidor de color, la remoción de las manchas en relación con el cuadro de tela “sin mancha” incluido en la tira, que sirvió como referencia.

Se cuantificó la cantidad de agua (en litros) que requieren las lavadoras para completar el ciclo completo de lavado (lavado, enjuague y centrifugado) y el tiempo (en minutos) que le toma a cada modelo. (24)

Anteriormente se describió la tecnología Aqua Saver de la lavadora Mabe, en la tabla 3.1 se muestra la comparación de 4 de las 13 lavadoras analizadas en el estudio, entre ellas la de Mabe.

Tabla 3.1: Características estudiadas por la PROFECO

Marca	Whirlpool	LG	Samsung	Mabe
Modelo y país de origen	7MFWW95HEY México	WM2650HWA Corea	WF431ABP/XAX Corea	Aqua saver México
Dimensiones alto x ancho x fondo (cm)	99x69x85	98x69x77	98x69x82	109x68x69
Capacidad de carga declarada(kg)				
Declarada	17	16	17	17
Recomendada	7.3	6.3	6.7	6
Eficiencia de lavado (% de remoción de manchas)				
Sebo	73	74	76	76
Carbón y aceite mineral	40	42	44	42
Sangre	58	48	83	60
Chocolate	58	65	72	59
Vino	72	76	74	72
Global	Bueno	Bueno	Muy bueno	Bueno

Capítulo 4

Fundamentos del ultrasonido

El término ultrasonido, se refiere a cualquiera por encima de las frecuencias del sonido audible a los de más de 20.000 Hz. Los sonidos en el rango de 20-100 kHz, son comúnmente utilizados en la comunicación y la navegación de los murciélagos, delfines, y algunas otras especies. Frecuencias mucho más altas, en el rango de 1-20 MHz, se utilizan en la ecografía médica. Tales sonidos son producidos por transductores ultrasónicos.

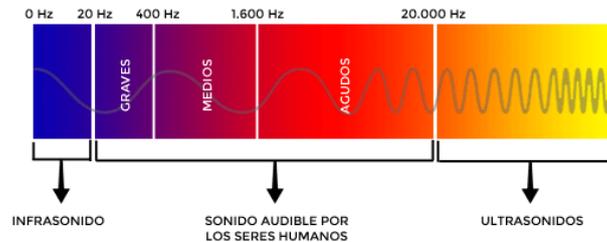


Figura 4.1: Espectro del sonido.

Por otro lado, la limpieza por ultrasonidos funciona mediante ondas longitudinales producidas en el líquido donde están sumergidas las piezas o los elementos a limpiar. El principio se basa en tratar de romper los enlaces de todas las partículas que no forman parte de la pieza, sino que están alojados en ellas. (30)

En un limpiador ultrasónico, el objeto a limpiar se coloca en un tanque o tina de acero inoxidable que contiene un líquido conductor de ultrasonidos (puede ser agua o algún disolvente orgánico). Además se añade un tensoactivo que rompe la tensión superficial del agua. (30)

Consta de transductores incorporados en el tanque de acero inoxidable, o sumergido en el fluido, mismo que produce ondas ultrasónicas en el fluido por cambio de tamaño en sintonía con una señal eléctrica oscilante a la frecuencia de ultrasonidos.

Estas ondas “rompen” el líquido, dejando tras de sí millones de microscópicos “huecos”, fenómeno conocido como cavitación. Estas burbujas se colapsan con gran energía; a temperaturas de 10000 K y presiones de 50000 libras por pulgada cuadrada; pero son tan pequeñas que no hacen más que limpiar la superficie y eliminar la suciedad y contaminantes. Cuanto mayor sea la frecuencia, menor es el espacio entre los nodos de la cavitación, lo que permite la limpieza de los más intrincados detalles.

Los transductores son generalmente de material piezoeléctrico (por ejemplo, zirconato titanato de plomo o titanato de bario), y, a veces, magnetostrictivos (hechos de un material como el níquel o la ferrita).

Una máquina ultrasónica o lavadora de ultrasonidos consta básicamente de:

- Una tina en la que se sumerge la pieza a limpiar.

- Un generador y un emisor de ultrasonidos.
- Agua, un producto limpiador para ultrasonidos o detergente para ultrasonidos.

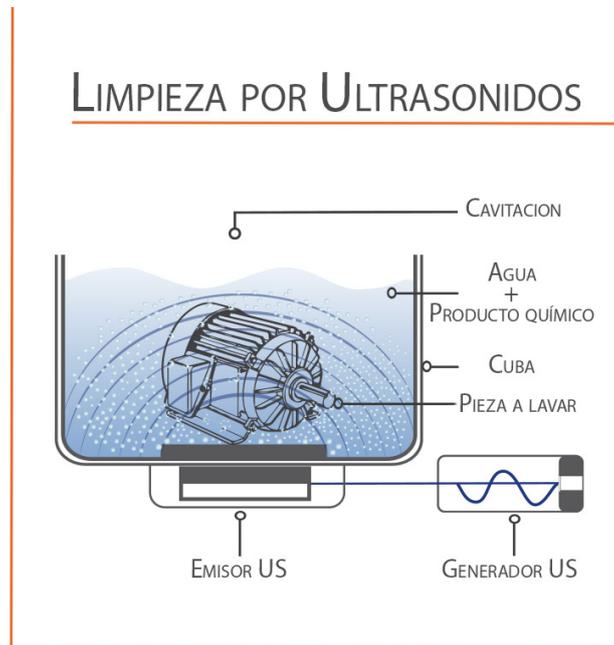


Figura 4.2: Ejemplo de lavador ultrasónico.

4.1. Tipos de ondas ultrasónicas

- Ondas longitudinales: las partículas vibran en la dirección de propagación del sonido. Este tipo de ondas pueden propagarse en sólidos, líquidos y gases.
- Ondas transversales: En las ondas transversales o de cizalla el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de propagación en un material suele ser diferente para las ondas transversales y las longitudinales.
- Ondas superficiales: Las ondas superficiales o de Rayleigh se producen en medios semi-infinitos. Se propagan en una región no superior a una longitud de onda por debajo de la superficie del material. Las partículas vibran siguiendo un movimiento elíptico.

Onda longitudinal:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

Onda transversal:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$$

Onda superficial:

$$V_s = \frac{0.87+1.12\mu}{1+\mu} \approx 0.92V_T$$

Donde:

E= Módulo de elasticidad

ρ = densidad

μ = coeficiente de poisson

G= Módulo de rigidez

4.1.1. Precios de lavadores ultrasónicos

A continuación se muestran los precios de algunos lavadores ultrasónicos como el que fue usado para la experimentación:



Figura 4.3: Equipo lavador ultrasónico.

Tabla 4.1: Precios de limpiadores ultrasónicos en el mercado

Descripción	Capacidad (L)	Precio (MXN)
VEVOR® Ultrasonic Cleaner	1.3	\$1259.99
CO-Z® Limpiador ultrasónico profesional con temporizador digital y calentador	2	\$2270.95
VEVOR®- Limpiador ultrasónico comercial	3	\$3125.76
PNKKODW® Limpiador ultrasónico profesional	3.2	\$2379.18
CREWORKS® Limpiador Ultrasónico Profesional con Calentador y Temporizador	6.5	\$3858.33
VEVOR® Ultrasonic Cleaner with Digital Timer&Heater Professional	15	\$5145.97

Capítulo 5

Modelo matemático

5.1. Difusión y advección

La ecuación de advección y difusión es una expresión muy importante debido a su amplio uso dentro de la modelación matemática en procesos de dispersión y difusión en el transporte de masa, calor, economía o un contaminante dentro de un medio poroso o atmosférico. (29) Es una ecuación diferencial en derivadas parciales del tipo parabólica, que describe el fenómeno físico donde las partículas o la energía (u otras cantidades físicas) se transforman dentro de un sistema físico debido a dos procesos: la difusión y la convección.

En su forma más simple (donde el coeficiente de difusión y la velocidad de convección son constantes y no hay fuentes) la ecuación toma la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c - \vec{v} \cdot \nabla c \quad (5.1)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$$

El primer termino de la ecuación describe la difusión y el segundo la advección, c es la variable de interés, D es el coeficiente de difusión y v es la velocidad.

Este trabajo se basa en las ecuaciones de aguas someras que son una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las hipótesis clave consisten en considerar la uniformidad en vertical del perfil de velocidades horizontal, y una distribución de presiones hidrostáticas por debajo de la ola. Sin embargo, es importante hacer notar que en estas, la velocidad de fase es independiente de la longitud de onda, con lo que esta teoría no puede describir las diferencias en la velocidad de propagación para diferentes componentes del oleaje.(31)

Del trabajo de M.L.Ruiz-Zavala, donde busca predecir el movimiento de la solución numérica de la ecuación para regiones no rectangulares, se rescata lo siguiente.

Se supone:

- Fluidos newtonianos
- Hipótesis de incompresibilidad del fluido
- No tenemos fuentes ni sumideros
- Existe fricción entre el agua y el fondo

En el caso de un lecho horizontal, como es el caso en la tina de ultrasonido, con unas fuerzas de Coriolis, de fricción y viscosidad despreciables, las ecuaciones de aguas someras son:

$$\frac{\partial(\rho\eta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\eta u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\eta v)}{\partial y} = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial(\rho\eta u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho\eta u^2 + \frac{1}{2}\rho g\eta^2 \right) + \frac{\partial(\rho\eta uv)}{\partial y} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(\rho\eta v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\eta uv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho\eta v^2 + \frac{1}{2}\rho g\eta^2 \right) = 0 \quad (5.4)$$

Donde η es la altura total de la columna de fluido (profundidad instantánea del fluido en función de x , y y t), y el vector 2D (u, v) es la velocidad de flujo horizontal del fluido, promediada a través de la columna vertical. Además g es la aceleración debida a la gravedad y ρ es la densidad del fluido.

La primera ecuación se deriva de la conservación de la masa, las dos segundas de la conservación del momento.

De la literatura se conoce la solución analítica de esta ecuación:

$$u(x, \infty) = 100 \frac{\exp(\frac{P^*x}{L}) - 1}{\exp(P) - 1} \quad (5.5)$$

donde P es el número de Peclet dado por $P = (\frac{a^*L}{D})$ y representa la proporción existente entre la advección y difusión.

Para resolver la ecuación 5.1 considerando la coordenada x se utilizan diferencias finitas para discretizar la ecuación donde i representa la ubicación del nodo y n representa el paso temporal:

$$\left(\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \right) + a \left(\frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2 * \Delta x} \right) = D \left(\frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) \quad (5.6)$$

Reorganizando:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \left(\frac{a\Delta t}{2\Delta x} \right) * (u_{i+1}^n - u_{i-1}^n) + \left(\frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \right) * (u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n) \quad (5.7)$$

Se define el número de Courant o de convección como:

$$c = \left(\frac{a\Delta t}{\Delta x} \right)$$

y el número de convección como:

$$d = \left(\frac{D\Delta t}{a\Delta x^2} \right)$$

Entonces se tiene la siguiente ecuación que es la aproximación por diferencias finitas con FTCS (espacio centrado en el tiempo hacia adelante):

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \left(\frac{c}{2} \right) * (u_{i+1}^n - u_{i-1}^n) + d * (u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n) \quad (5.8)$$

Esta ecuación es ampliamente utilizada en la ingeniería, una de las aplicaciones representativas es en la modelación de dispersión de contaminante y en la transferencia de calor en una dimensión.

Los modelos mayormente utilizados son los modelos gaussianos. Estos modelos son determinísticos y aproximan la dispersión de los contaminantes a una curva gaussiana, principio fundamental sobre el cual operan los modelos de calidad del aire tipo gaussiano (32). Esta dispersión obedece la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{2\pi * \sigma y * \sigma z * u} * \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma y}\right)^2\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma x}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma x}\right)^2\right) \right\} \quad (5.9)$$

Donde:

u : Velocidad del viento

Q : Flujo másico del contaminante i

H : Altura de la chimenea

Z : Altura de los receptores

σ_y y σ_z : coeficiente de dispersión en las direcciones y y z respectivamente.

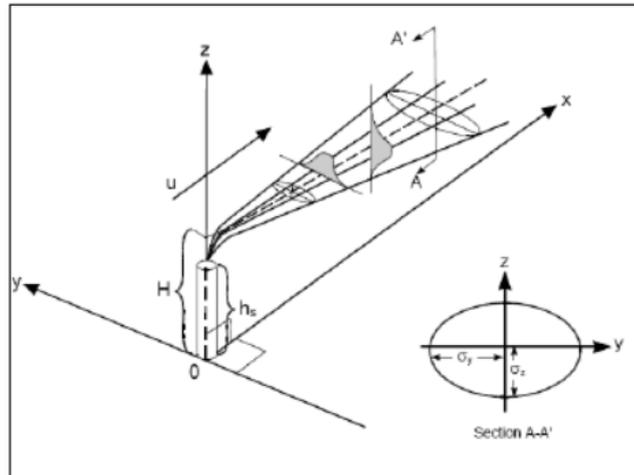


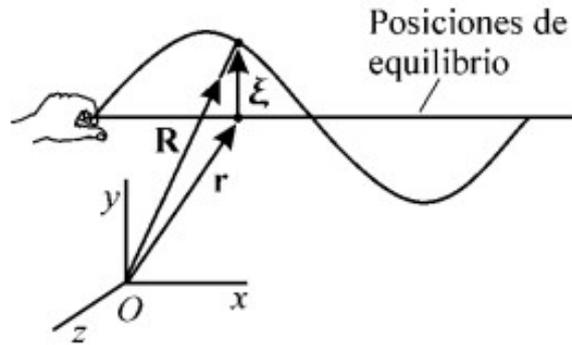
Figura 5.1: Sistema de coordenadas.

Estos modelos de calidad del aire operan bajo los siguientes supuestos (32):

- No hay reacción química
- El transporte de masa por difusión es despreciable comparado con el transporte de masa mecánico generado por acción del viento
- Existen condiciones de estado estable en la emisión de contaminantes y en las condiciones meteorológicas.
- No hay barreras físicas para la dispersión de contaminantes vientos abajo
- Son constantes en el tiempo, pero son función de la distancia.
- Son constantes en el tiempo, pero son función de la distancia.
- Los contaminantes se reflejan del piso. Esto se modela como una fuente espejo por debajo del piso.

5.2. Movimiento ondulatorio

En la figura 5.2 la línea horizontal representa una cuerda estática, con sus puntos en sus respectivas posiciones de equilibrio, caracterizadas por el vector posición r . Una fuente de ondas en el extremo izquierdo oscila verticalmente y produce una perturbación que avanza horizontalmente con cierta rapidez, haciendo que cada punto se mueva alrededor de su posición de equilibrio. (39)


 Figura 5.2: Definición de ξ

La línea curva representa la sección de la cuerda que ha sido perturbada, en cierto instante. En ondas estáticas, por el vector r no se indica la posición de un punto del medio, sino la posición de equilibrio del punto. Lo que un punto se separa de su posición de equilibrio lo denotamos con la letra ϵ que es un vector independiente de r y t . La posición R de un punto del medio es su posición de equilibrio más lo que se haya apartado de él (39):

$$R = r + \xi(r, t) \quad (5.10)$$

donde ξ es un campo vectorial y r especifica el punto del espacio donde se calcula el campo. La velocidad de un punto del medio, V_p es:

$$v_p(r, t) = \frac{\partial \xi(r, t)}{\partial t} \quad (5.11)$$

y no $v_p = dr/dt$.

La aceleración es:

$$a(r, t) = \frac{\partial V_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi(r, t)}{\partial t^2} \quad (5.12)$$

Se debe distinguir entre velocidad de la onda, v , y velocidad de un punto del medio, v_p . La onda en la cuerda de la figura se propaga hacia la derecha con v constante, mientras que un punto del medio se mueve de una forma más compleja, aproximadamente a 90 respecto a v , con movimiento armónico simple. (39)

Mientras que la onda avanza a lo largo de la cuerda, sin importar su longitud, cualquier punto de ella ejecuta pequeñas oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio, sin que haya transporte de masa. Una onda transporta energía, momento lineal y momento angular, pero no masa. (39)

Además de clasificar las ondas en elásticas y no elásticas, se pueden clasificar de acuerdo al ángulo que formen el campo y la velocidad de propagación de la onda. Cuando son perpendiculares, la onda es transversal; cuando son paralelos, es longitudinal. El ejemplo más notable de ondas transversales es la luz y ondas longitudinales es el sonido. Hay ondas que no son transversales ni longitudinales, como las ondas en la superficie del agua, ya que tienen ambos componentes. (39)

5.2.1. Velocidad de propagación de una onda mecánica

Considere una cuerda (figura 5.3) homogénea de sección transversal constante, de longitud L , y estirada (en un plano vertical) entre sus dos extremos que se supone que están fijos y ubicados a lo largo del eje x en $x = 0$ y en $x = L$. (40)

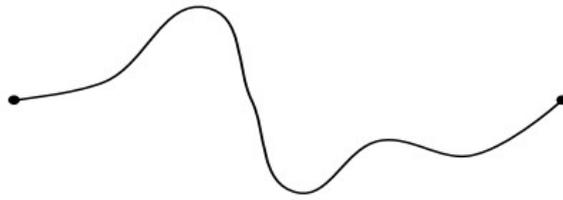


Figura 5.3: Cuerda vibrante. (40)

La cuerda está sujeta a una fuerza transversal $\tau f(x)dx$ por elemento de longitud dx (donde τ es la tensión de la cuerda). (40)

Así, buscamos una función $u(x, t)$ definida para $t \geq 0$ y $x \in [0, L]$, tal que $u(x, t)$ represente la deformación vertical de la cuerda en la abscisa x y en el instante t . (40)

Se puede demostrar que debe satisfacer la siguiente EDP:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = f(x, t), \quad (5.13)$$

$$0 < x < L, t > 0$$

Donde con $c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$, donde ρ es la densidad lineal de la cuerda, conocida como ecuación de onda unidimensional. Además, se conoce la forma inicial de la cuerda en $t = 0$, así como la distribución de las velocidades iniciales a lo largo de la cuerda; en otras palabras, hay dos funciones $u_{i,0}$ y $u_{i,1}$ tales que:

$$u(x, 0) = u_{i,0}(x), 0 \leq x \leq L,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = u_{i,1}(x), 0 \leq x \leq L.$$

Por ejemplo, si la cuerda simplemente se suelta de su posición inicial dada, tenemos $u_{i,1} = 0$. Por último, debido a que los extremos de la cuerda son fijos, debemos tener:

$$u(0, t) = u(L, t) = 0, t \geq 0.$$

En consecuencia, buscamos una función $u : \mathbb{R}_+ \times [0, L] \rightarrow \mathbb{R}$ que satisfaga las siguientes condiciones:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = f(x, t),$$

$$0 < x < L, t > 0$$

$$u(0, t) = u(L, t) = 0, t \geq 0. \text{ (condición de frontera),}$$

$$u(x, 0) = u_{i,0}(x), 0 \leq x \leq L \text{ (condición inicial)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = u_{i,1}(x), 0 \leq x \leq L$$

Para simplificar el problema, suponga que $f = 0$, lo que equivale a despreciar el efecto de la gravedad. En este caso, nuestra EDP se convierte en:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = 0$$

Materiales y métodos

Los materiales utilizados se dividen en dos partes, la primera que engloba al lavado convencional y la segunda que abarca el lavado con enzimas.

Lavado convencional:

Las condiciones que variaron fueron la cantidad de agua/carga de ropa, probando 30 L/4 kg la mas alta, 15 L/4 kg la intermedia y finalmente la más pequeña de 10 L/4 kg.

Se utilizaron telas de algodón de 30 cm x 30 cm con un peso promedio de 7 g, que equivale a la cuarta parte del método propuesto en el estudio de la PROFECO.

La tina de ultrasonido se llenó a su máxima capacidad (1.5L).

El sistema de lavado se compuso de una bolsa con sello hermético que contenía la tela sucia, 175 μ L de jabón y la cantidad correspondiente de agua destilada (para así evitar el crecimiento de microorganismos).

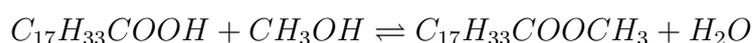
Se realizaron lavados por 20 min y se tomaron alicuotas cada 5 minutos, a diferentes temperaturas: ambiente, 40°C y 60°C.

Al finalizar los 20 minutos se realizó un enjuague por 5 minutos con la misma cantidad de agua (correspondiente al tiempo 25 en las tablas).

- Biodiesel, preparado en el laboratorio a partir de ácido oléico.

Para esta sección se realizó una reacción de transesterificación para la obtención un ácido graso que funcionaría aquí como la suciedad por grasa impregnada en las telas, misma que se seguiría a través de cromatografía de gases.

La reacción entre el ácido oléico y el metanol para producir oleato de metilo:



- Huevo, del que se disuelve la clara en 1L de agua
- Jabón líquido “foca”, el fabricante recomienda usar 2 tapas (100mL) para 4Kg de ropa o 30L de agua.
- Sacarosa, de la que se realiza una disolución de 10g/L
- Telas de algodón 30x30 cm
- Vino tinto “Concha y Toro”[®], del que se realiza barrido espectral para ver su interacción con el colorante del jabón, se encuentra que la lectura apta es a 520 nm

Lavado con enzimas: Se realizó la reacción de hidrólisis en un sistema de mezclado convencional por 2 horas, se mezclaron 10 mg de sustrato en 5mL de buffer de fosfato 100 mM, pH=7

- Pectinasa, “pectinex ultra spl”, BIOTECOSA, SA de CV.
- α -amilasa, “licuamil 1200 enmex”

- Pectina cítrica, droguería cosmopolita.
- Almidón de papa soluble, droguería cosmopolita.

Lavados con enzima pectinasa: Se realizaron lavados en un sistema compuesto de una bolsa con sello hermético que contenía la tela impregnada con pectina cítrica y buffer, posteriormente al accionar el ultrasonido se añadía la enzima pectinasa y comenzaba la reacción.

El agua para preparar las disoluciones se trataba de agua destilada, para prevenir la formación de microorganismos no deseados.

La tela se impregnó con una disolución previamente preparada de 5g de pectina en 100 mL de agua destilada. Posteriormente se secó en horno de convección a T= Ambiente por 1 hora. Luego se añadieron 26 mL de buffer de fosfatos pH=7 100mM, volumen que correspondería a la relación 15L/4kg de lavado y 50 μ L de enzima.

Lavados con α -amilasa: Se realizaron lavados en un sistema compuesto de una bolsa con sello hermético que contenía la tela impregnada con almidón soluble de papa y buffer, posteriormente al accionar el ultrasonido se añadía la enzima α -amilasa y comenzaba la reacción.

El agua para preparar las disoluciones se trataba de agua destilada, para prevenir la formación de microorganismos no deseados.

La tela se impregnó con una disolución previamente preparada de 104 g de almidón en 26 mL de agua destilada, se añadieron 26 mL de buffer de fosfatos pH=7 100 mM, volumen que correspondería a la relación 15L/4kg de lavado y 50 μ L de enzima (del trabajo de Jimenez (33) donde se usan cerca de 4 μ L de α -amilasa)

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Agitador vórtex: Heathrow Scientific Vortexer.
- Balanza Analítica: Ohaus Adventurer Pro.
- Baño de ultrasonido: Digital Ultrasonic Cleaner PS-10A.
- Espectrofotómetro UV-Vis: Cole-Parmer Unico Spectrophotometer.
- Espectrofotómetro UV-Vis: Perkin Elmer Spectrometer Lambda 2S.
- Parrilla de calentamiento y agitación magnética: Thermoscientific Cimarec.

Los reactivos utilizados fueron los siguientes:

- Ácido oléico, droguería cosmopolita ($C_{18}H_{34}O_2$)
- Albumina de suero bovino, BSA
- Buffer de fosfatos: fosfato monopotásico (KH_2PO_4), fosfato dipotásico (K_2HPO_4), WÖHLER
- Etanol 96^o (C_2H_5OH), droguería cosmopolita
- Glucosa, grado reactivo analítico, ($C_6H_{12}O_6$), droguería cosmopolita
- Hidróxido de sodio, grado reactivo, (NaOH), droguería cosmopolita
- Metanol (CH_3OH), Sigma-Aldrich
- Reactivo de Bradford, Sigma-Aldrich
- Reactivo DNS, Ácido 3,5-dinitrosalicílico: DNS ($C_7H_4N_2O_7$), Hidróxido de sodio (NaOH), tartrato de sodio ($C_4H_4Na_2O_6$), fenol (C_6H_6O), sulfito de sodio (Na_2SO_3)

- Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4), Sigma-Aldrich

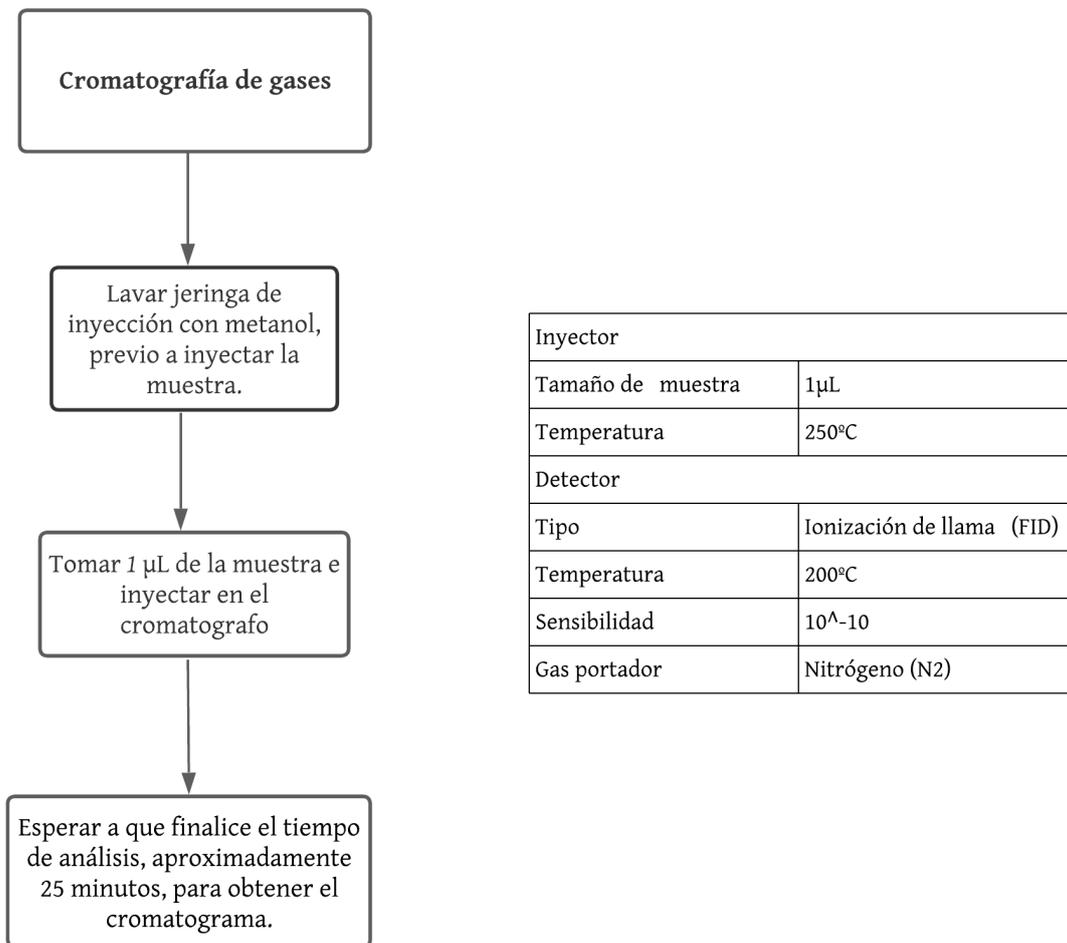


Figura 5.4: Método y condiciones utilizados en la cromatografía de gases para cuantificar oleato de metilo (biodiesel) en cromatógrafo Gow-Mac

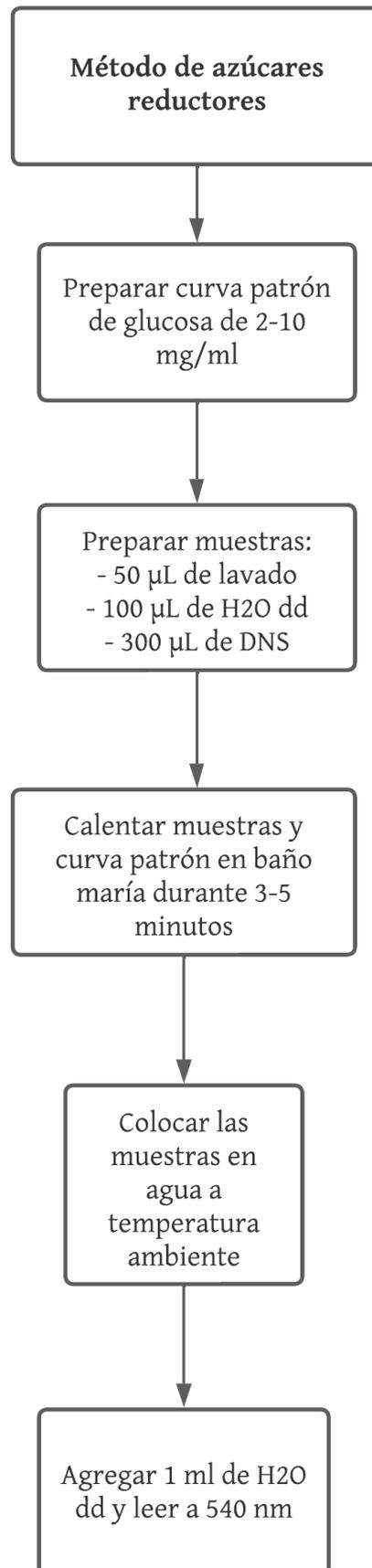


Figura 5.5: Método de azúcares reductores utilizado para medir las absorbancias en el lavado de azúcares, pectina y almidón

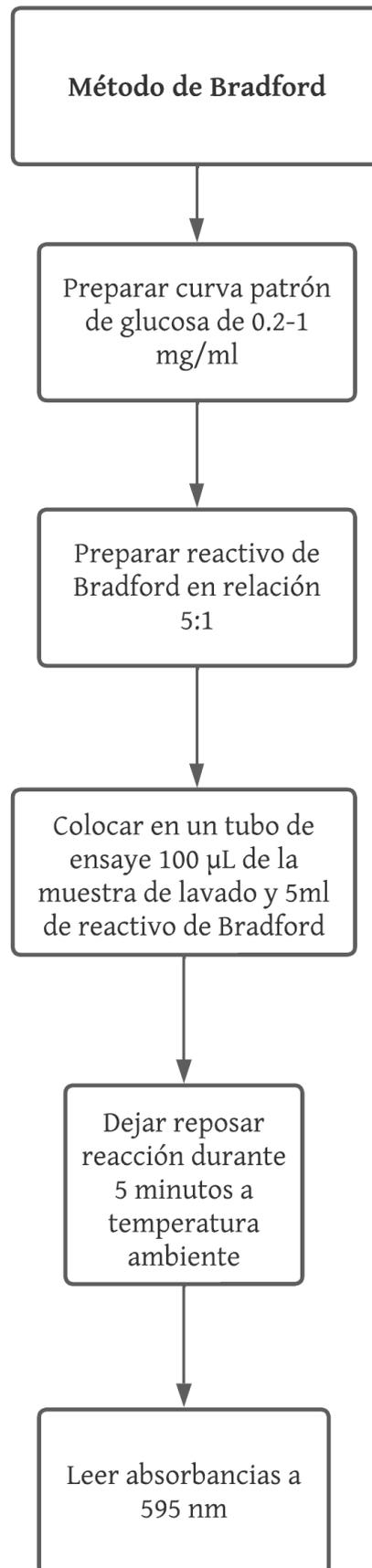


Figura 5.6: Método de Bradford utilizado para medir las absorbancias en el lavado proteínas

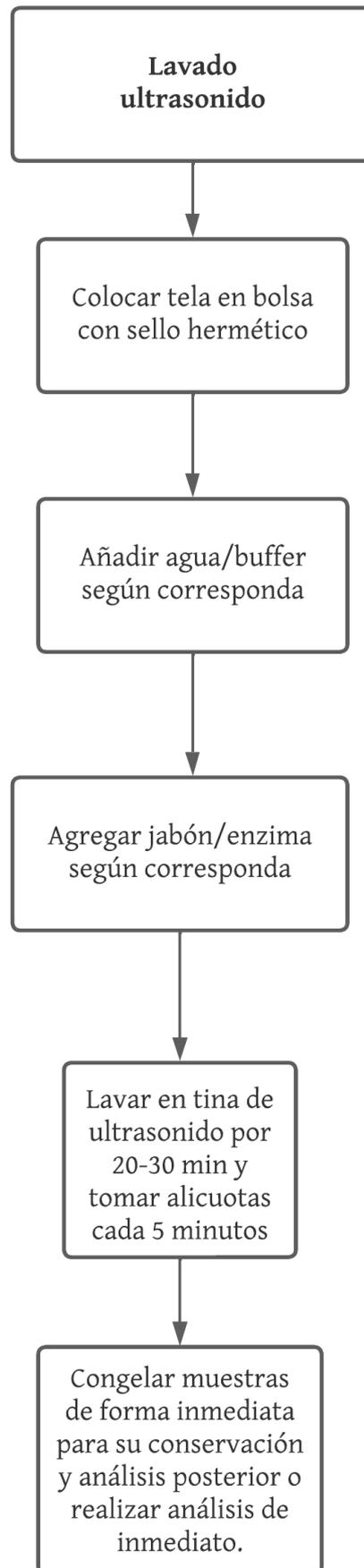


Figura 5.7: Método para el lavado en la tina de ultrasonido

Resultados y discusión

5.3. Lavado convencional

A continuación se muestran los resultados de lavado convencional realizado en aparato de ultrasonido.

Las condiciones que variaron fueron la cantidad de agua/carga de ropa, probando 30 L/4 kg la mas alta, 15 L/4 kg la intermedia y finalmente la más pequeña de 10 L/4 kg.

Se utilizaron telas de 30 cm x 30 cm con un peso promedio de 7 g.

La tina de ultrasonido se llenó a su máxima capacidad (1.5L).

El sistema de reacción se compuso de una bolsa con sello hermético que contenía la tela sucia, 175 μ L de jabón y la cantidad correspondiente de agua.

Se realizaron lavados por 20 min y se tomaron alicuotas cada 5 minutos, a diferentes temperaturas: ambiente, 40°C y 60°C.

Al finalizar los 20 minutos se realizó un enjuague por 5 minutos con la misma cantidad de agua (correspondiente al tiempo 25 en las tablas).

5.3.1. Vino tinto

Se realizó una curva patrón (gráfica 5.8) con una disolución de vino tinto.

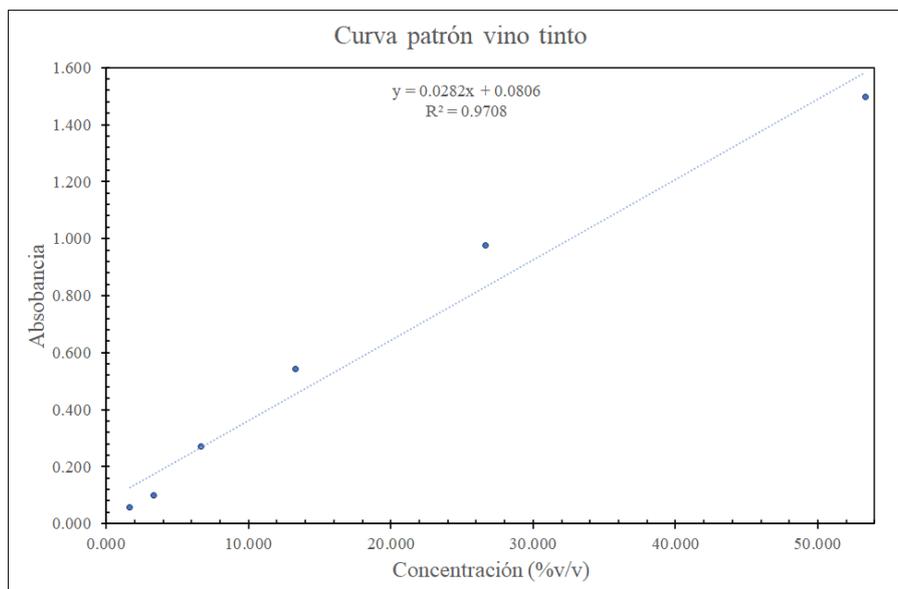


Figura 5.8: Curva patrón del vino tinto

Se observaron los siguientes resultados que se pueden visualizar en la tabla 5.1.

Al aumentar la temperatura la extracción es mayor, además la cantidad de agua necesaria para realizar esta extracción es la mínima, pues la relación 10L/4kg es la que obtiene mayor concentración v/v de colorante que se traduce a extracción de vino.

Sin embargo, si se habla de la velocidad con la que se extrae mayor cantidad de vino la temperatura ideal es la de 40°C a una carga de 10L/4kg, pues a los primeros 5 minutos se extraen los 57% v/v que no se logran a los primeros 5 minutos con otra carga o temperatura como se observa en la siguiente gráfica 5.9.

Es importante mencionar que a pesar de la poca cantidad de agua que se tiene en el sistema de lavado, la cual es suficiente para que la tela quede solamente empapada, la fuerza impulsora es notoria en los gráficos, pues hay un comportamiento de aumento en la concentración.

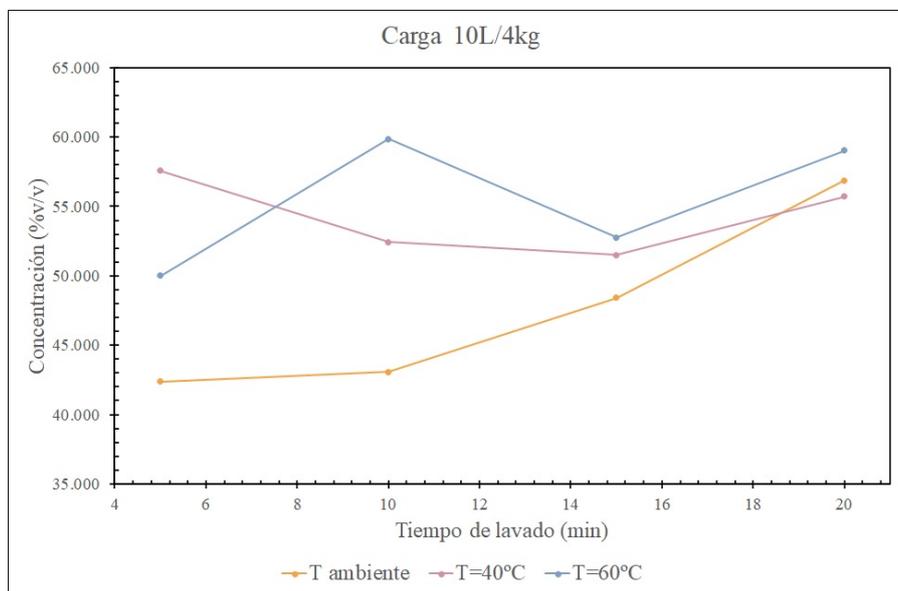


Figura 5.9: Extracción de vino carga 10L/4kg

La siguiente gráfica 5.10 corresponde a la relación 15L/4kg, donde la temperatura de 60°C predomina en la extracción sobre las otras dos. Se puede observar que la fuerza impulsora se mantiene alta incluso al tener una temperatura menor en el lavado.

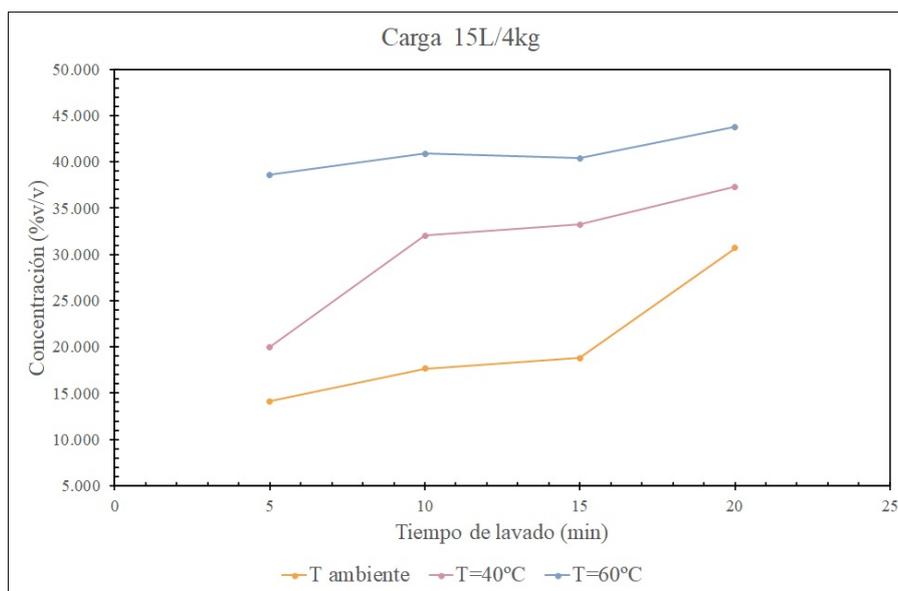


Figura 5.10: Extracción de vino carga 15L/4kg

En la gráfica siguiente 5.11 se puede observar que el sistema llega rápidamente a un estado de equilibrio, la fuerza impulsora se mantiene alta, debido a que la concentración de los pigmentos del vino tinto en la fase acuosa se mantienen bajos.

Lo que parece extraño es el alto grado de extracción logrado a temperatura ambiente, con respecto a las temperaturas más altas, que presentan resultados menores. Al tenerse más agua en el lavado, se limita de manera importante la fuerza impulsora, que es el gradiente de concentración de los pigmentos en la tela contra aquellos que ya están disueltos en el agua.

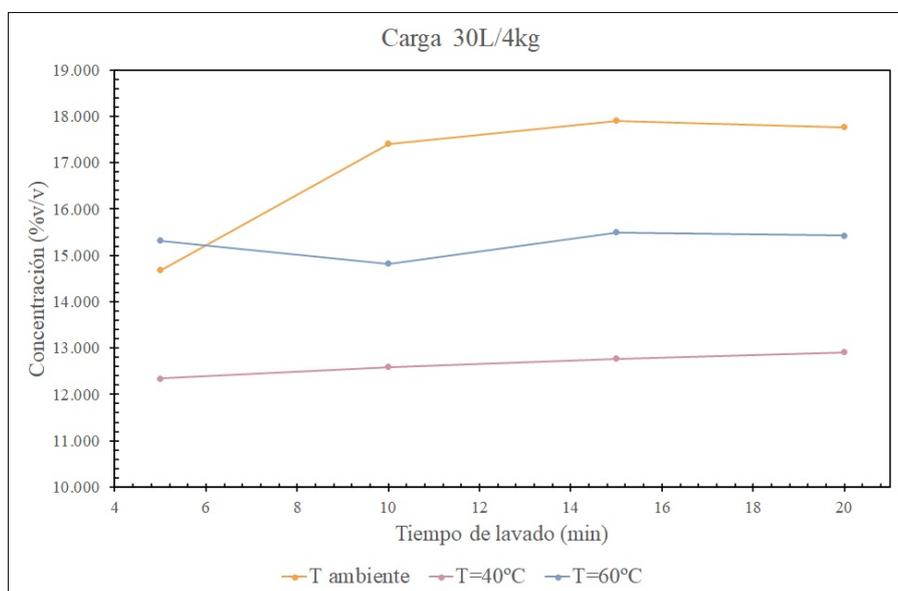


Figura 5.11: Extracción de vino carga 30L/4kg

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de las concentraciones de vino a diferentes cargas y temperaturas, el último dato corresponde al enjuague, se cambió el agua de lavado por agua limpia y se realizó el enjuague por 5 minutos más.

Tabla 5.1: Concentraciones de lavado de vino a diferentes tiempos y cargas.

Tiempo (min)	Absorbancias			Concentración (%v/v)		
	<i>Carga</i>	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg	30L/4kg	15L/4kg
T=ambiente						
5	0.414	0.398	1.195	14.681	14.113	42.376
10	0.491	0.498	1.215	17.411	17.660	43.085
15	0.505	0.53	1.365	17.908	18.794	48.404
20	0.501	0.866	1.604	17.766	30.709	56.879
Enjuague	0.146	0.187	0.425	5.177	6.631	15.071
T=40°C						
5	0.348	0.564	1.623	12.340	20.000	57.553
10	0.355	0.903	1.478	12.589	32.021	52.411
15	0.360	0.937	1.452	12.766	33.227	51.489
20	0.364	1.052	1.571	12.908	37.305	55.709
Enjuague	0.108	0.394	0.473	3.830	13.972	16.773
T=60°C						
5	0.432	1.088	1.41	15.319	38.582	50.000
10	0.418	1.153	1.688	14.823	40.887	59.858
15	0.437	1.139	1.488	15.496	40.390	52.766
20	0.435	1.234	1.665	15.426	43.759	59.043
Enjuague	0.105	0.323	0.422	3.723	11.454	14.965

5.3.2. Azúcares

Se realizó una curva patrón de glucosa. Se impregnaron las telas en una disolución de glucosa de 15 g/L.

Las telas se dejaron secar al aire libre y se procesaron en el mismo sistema de lavado que se utilizó en el vino.

Posteriormente se utilizó el método de cuantificación de azúcares reductores para poder cuantificar los azúcares obtenidos durante el lavado.

Los resultados fueron los siguientes: nuevamente al aumentar la temperatura la extracción de azúcares es significativamente mayor, en este caso a los 60°C, con una carga de 10L/4kg y a los 10 minutos de lavado se obtiene la mayor concentración que es de 8.809 mg/mL.

Un fenómeno importante que se observa en la gráfica 5.12 en la temperatura de 60°C es la depositación del sustrato, pareciera que hay un aumento en la concentración sin embargo después de unos minutos decrece.

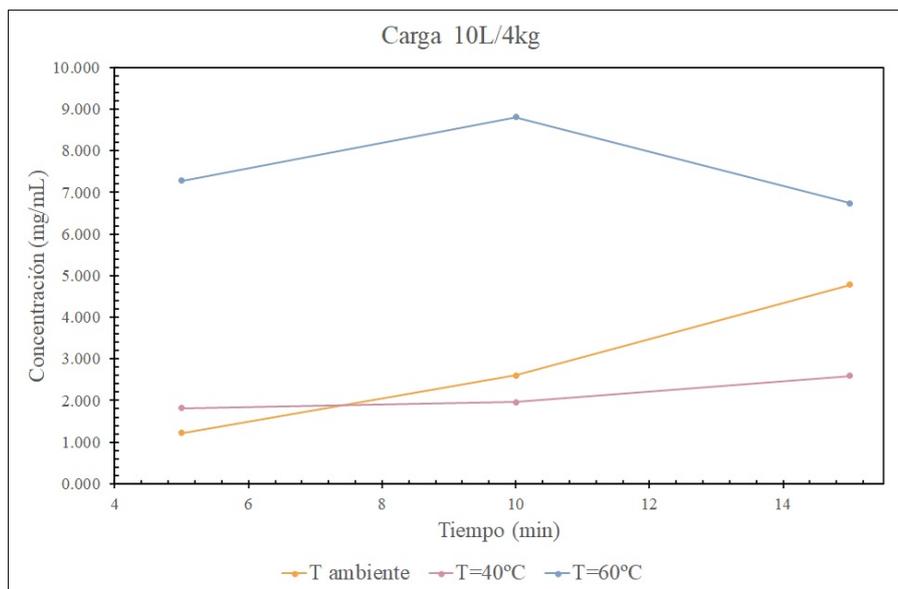


Figura 5.12: Extracción de azúcares carga 10L/4kg

La siguiente gráfica 5.13 muestra que la temperatura de 40°C domina en la extracción de azúcares.

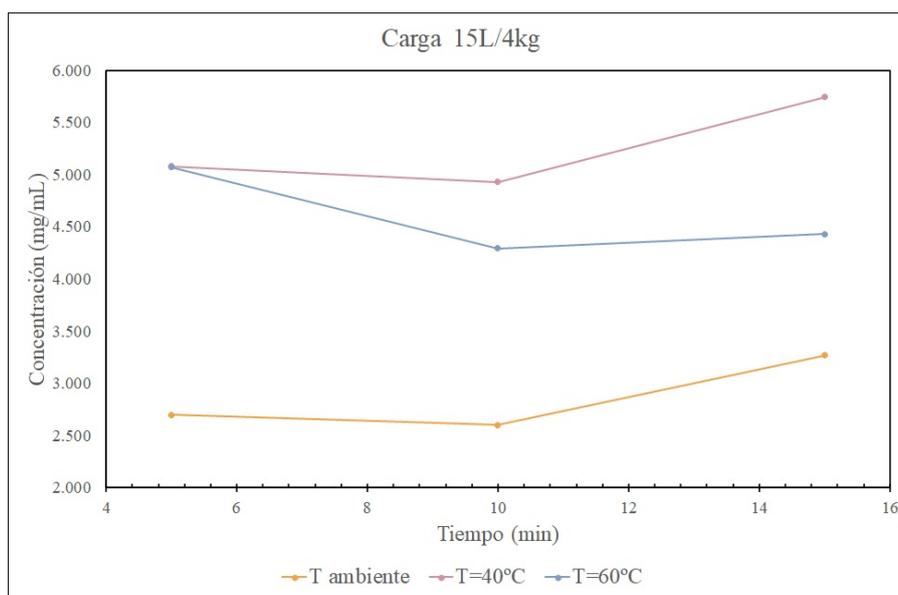


Figura 5.13: Extracción de azúcares carga 15L/4kg

En la siguiente gráfica 5.14 pareciera que no hay extracción de azúcares a temperatura ambiente, contrario a las otras dos temperaturas, se puede deducir que hay un fenómeno de readsorción.

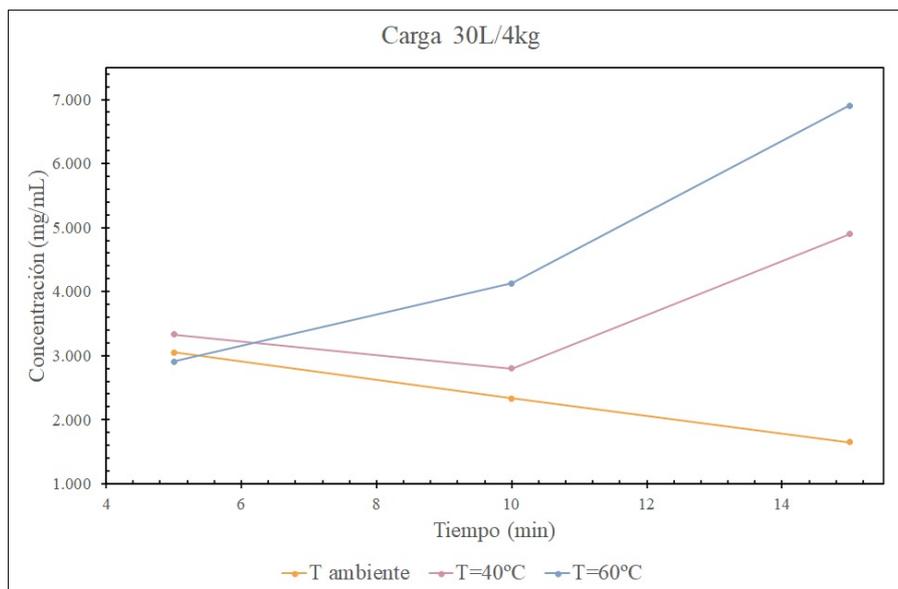


Figura 5.14: Extracción de azúcares carga 30L/4kg

En la tabla 5.2 se muestran los resultados de la extracción de azúcares a diferentes tiempos y cargas, también se muestran los azúcares totales (en mg).

Tabla 5.2: Concentraciones de lavado de azúcares a diferentes tiempos y cargas.

Tiempo (min)	Absorbancias			Concentración (mg/mL)			Azúcares totales (mg)			
	Carga	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg
T=ambiente										
5		0.769	0.679	0.235	3.052	2.694	1.221	160.208	70.056	20.753
10		0.588	0.655	0.501	2.333	2.599	2.603	122.500	67.579	44.244
15		0.415	0.823	0.92	1.647	3.266	4.779	86.458	84.913	81.247
20		0.584	0.931	1.125	2.317	3.694	5.844	121.667	96.056	99.351
Enjuague		0.055	0.716	0.346	0.218	2.841	1.797	11.458	73.873	30.556
T=40°C										
5		0.482	0.735	0.344	3.331	5.079	1.812	174.879	132.066	30.811
10		0.405	0.713	0.372	2.799	4.927	1.960	146.942	128.113	33.319
15		0.709	0.831	0.492	4.900	5.743	2.592	257.239	149.316	44.067
20		0.034	1.25	0.595	0.235	8.639	3.135	12.336	224.603	53.293
Enjuague		0	0.675	1.339	0.000	4.665	7.055	0.000	121.285	119.932
T=60°C										
5		0.421	0.734	1.381	2.909	5.073	7.276	152.747	131.887	123.693
10		0.597	0.621	1.672	4.126	4.292	8.809	216.603	111.583	149.758
15		0.999	0.641	1.279	6.904	4.430	6.739	362.457	115.176	114.557
20		0.162	0.626	1.535	1.120	4.326	8.087	58.777	112.481	137.487
Enjuague		0	0.055	0.365	0.000	0.380	1.923	0.000	9.883	32.692

5.3.3. Proteínas

Se realizaron dos curvas patrón de albúmina, la primera utilizada para un primer ensayo de 30L/4kg, al observar los resultados se realizan los demás ensayos con una segunda curva (gráfica 5.15).

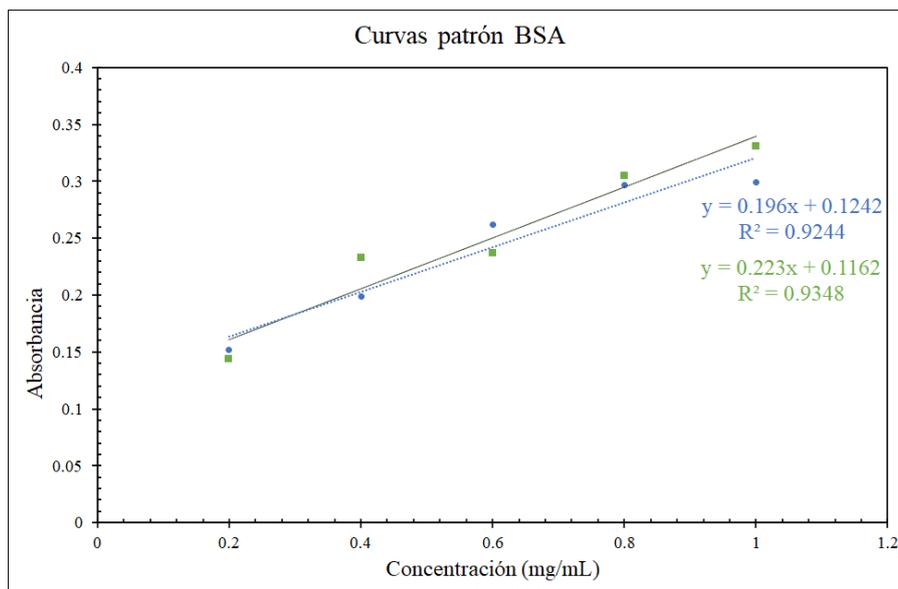


Figura 5.15: Curvas patrón de BSA

Se impregnaron las telas en una disolución de clara de huevo en agua con agua destilada. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.3: Concentraciones de lavado de proteínas a diferentes tiempos y cargas.

Tiempo (min)	Absorbancias			Concentración (mg/mL)			
	Carga	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg	30L/4kg	15L/4kg	10L/4kg
T=ambiente							
5		0.181	0.228	0.226	1.709	1.163	1.153
10		0.22	0.308	0.253	0.987	1.571	1.291
15		0.158	0.269	0.238	0.709	1.372	1.214
20		0.197	0.329	0.242	0.883	1.679	1.235
Enjuague		0.066	0.221	0.214	0.296	1.128	1.092
T=40°C							
5		0.173	0.282	0.319	0.883	1.439	1.628
10		0.207	0.338	0.303	1.056	1.724	1.546
15		0.13	0.375	0.334	0.663	1.913	1.704
20		0.215	0.361	0.312	1.097	1.842	1.592
Enjuague		0.084	0.186	0.082	0.429	0.949	0.418
T=60°C							
5		0.211	0.306	0.192	1.077	1.561	0.980
10		0.233	0.315	0.203	1.189	1.607	1.036
15		0.227	0.3	0.188	1.158	1.531	0.959
20		0.202	0.275	0.178	1.031	1.403	0.908
Enjuague		0.125	0.174	0.23	0.638	0.888	1.173

A diferencia de los primeros dos casos, aquí la temperatura con mejores resultados es la de 40°C, esto puede deberse a la estabilidad de la albúmina, pues al aumentar a la temperatura hasta los 60°C con una carga de 10L/4kg la la concentración de ovoalbúmina se ve significativamente reducida. Los resultados se muestran en la tabla 5.3.

La siguiente gráfica 5.16 corresponde a la relación 10L/4kg, se presenta un comportamiento diferente a lo observado con anterioridad, pues aunque hay extracción se llega rápidamente al equilibrio, al limitarse la cantidad de agua, hay una mayor superficie de contacto que por consiguiente transferirá el calor más rápido.

Por el efecto de la temperatura se favorece la extracción a 40°C, sin embargo, se ve afectada a 60°C pues al disminuir la cantidad del agua, la temperatura alta favorecería la desnaturalización o precipitación de las proteínas.

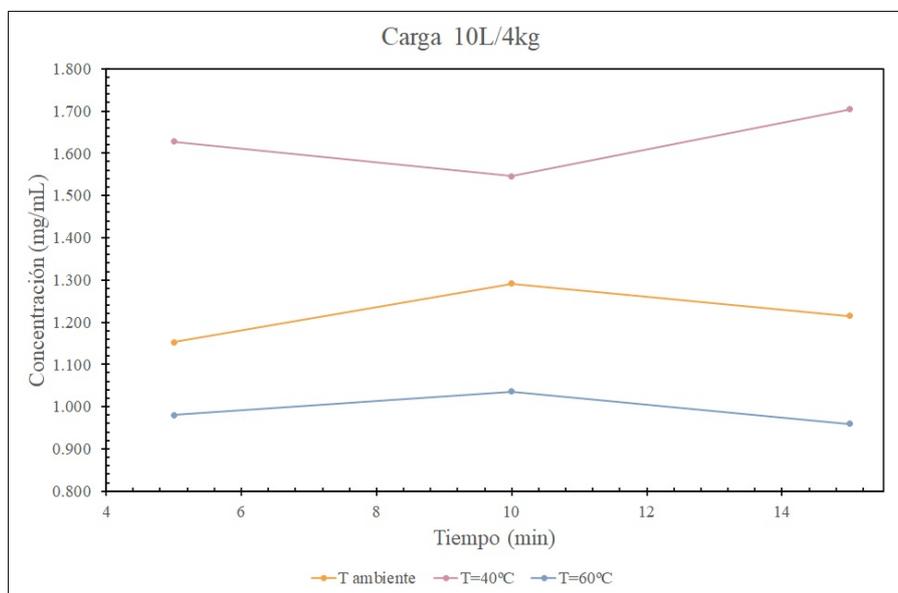


Figura 5.16: Extracción de proteínas carga 10L/4kg.

Para este caso, se observa en la gráfica 5.17 que la carga ideal es la de 15L/4kg, a los 40°C y 15 minutos de lavado se puede extraer hasta 1.913 mg/mL de proteína debido posiblemente al fenómeno de depositación (a temperatura ambiente) y de precipitación de la proteína (a 60°C).

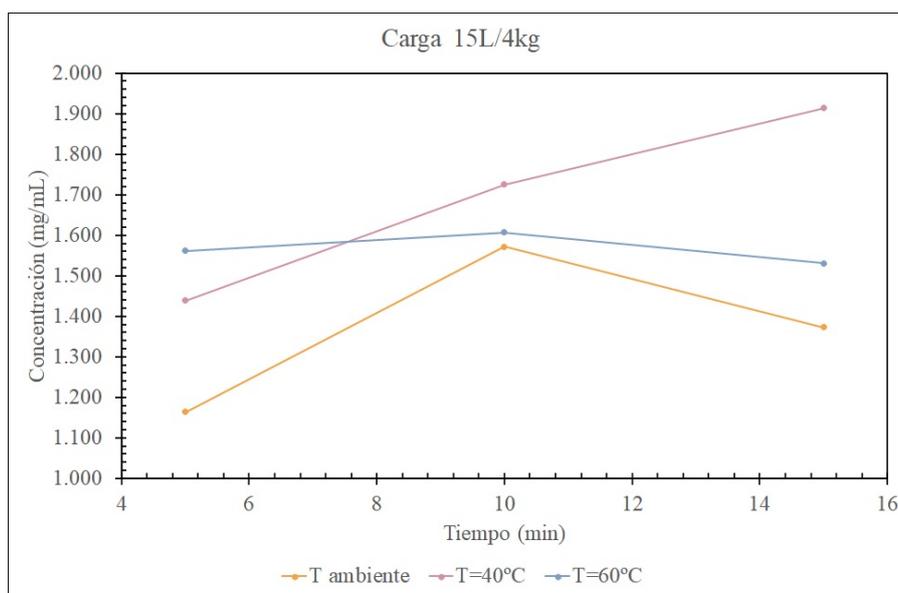


Figura 5.17: Extracción de proteínas carga 15L/4kg.

La siguiente gráfica 5.18 corresponde a la relación 30L/4kg.

Aquí tampoco se observa una mayor extracción de proteínas debido al alto volumen del disolvente.

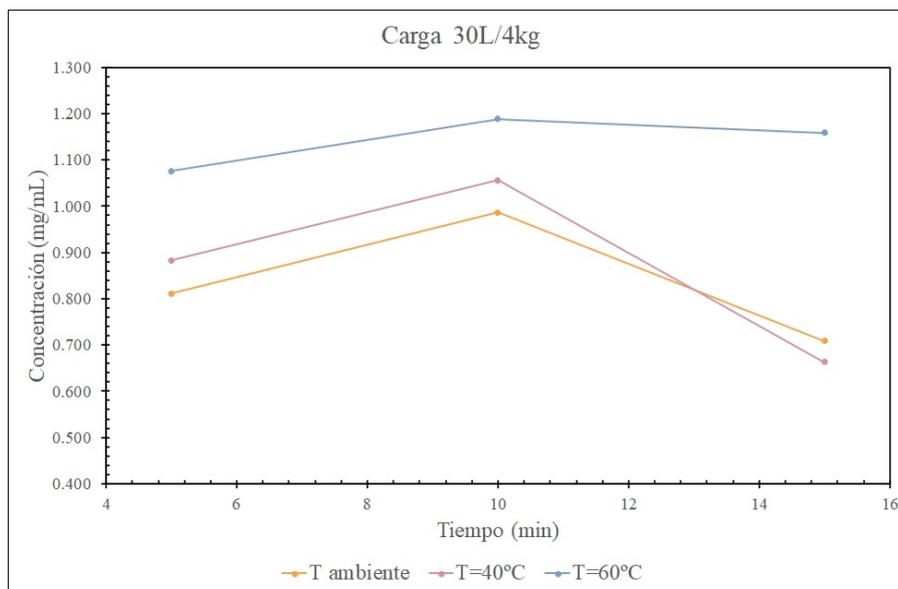


Figura 5.18: Extracción de proteínas carga 30L/4Kg.

5.3.4. Grasas

El método analítico utilizado no resultó tan sencillo para la obtención de resultados, se sabía por diversos autores que la señal en el cromatograma del ácido oléico/oleato de metilo se presentaría en los últimos minutos (15-25 minutos) y el pico más alto en los primeros minutos correspondería al disolvente, en este caso el etanol. En los cromatogramas se puede observar la señal del etanol pero una señal muy pequeña del FAME. Aunque hay extracción de la grasa, pues la tela visiblemente se encontraba más limpia, no se obtuvieron resultados cuantitativos concluyentes.

Es probable que la cantidad de detergente no haya sido la suficiente para emulsionar al FAME, incluso que hubo la formación de dos fases, quizá la carga de éster metílico sobre la tela fue muy alta.

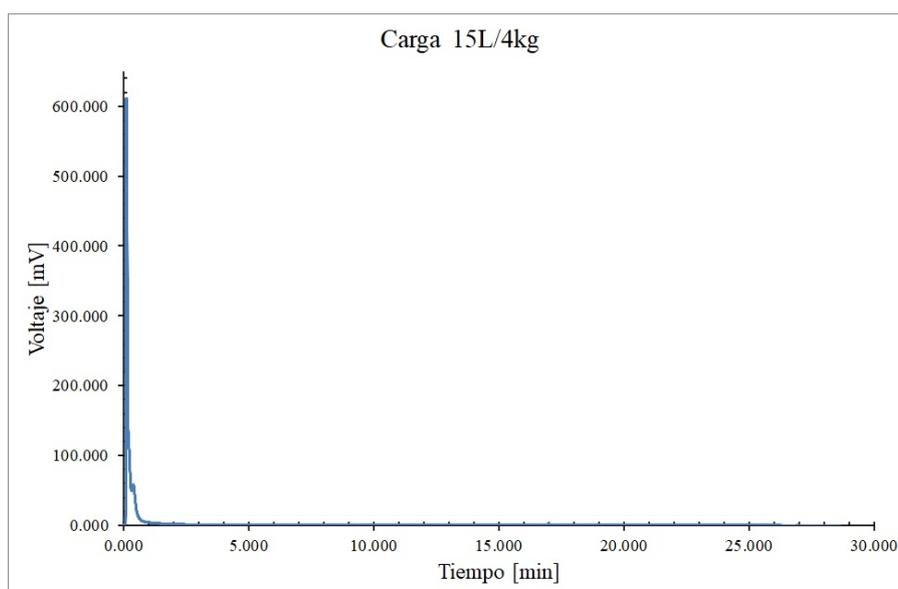


Figura 5.19: Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 5 minutos de lavado

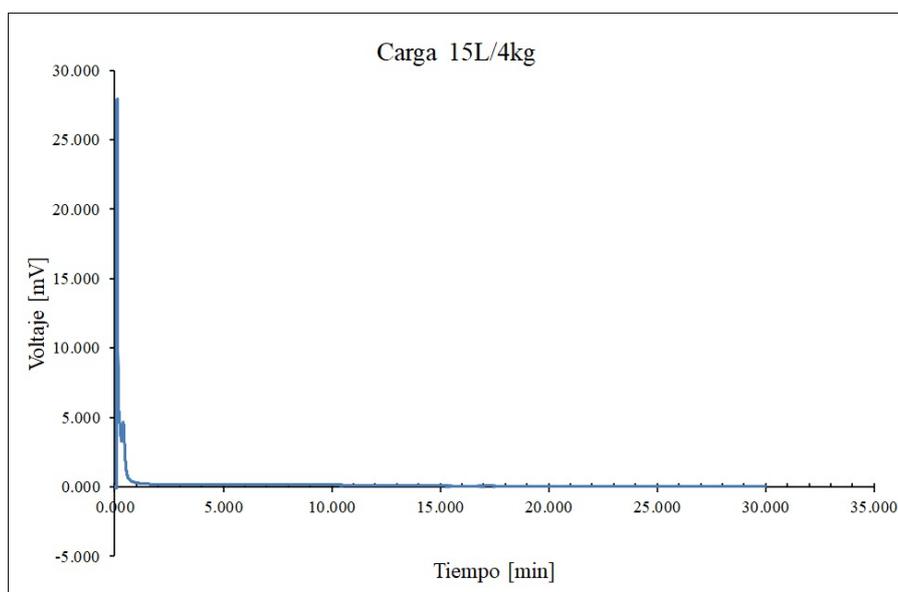


Figura 5.20: Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 10 minutos de lavado

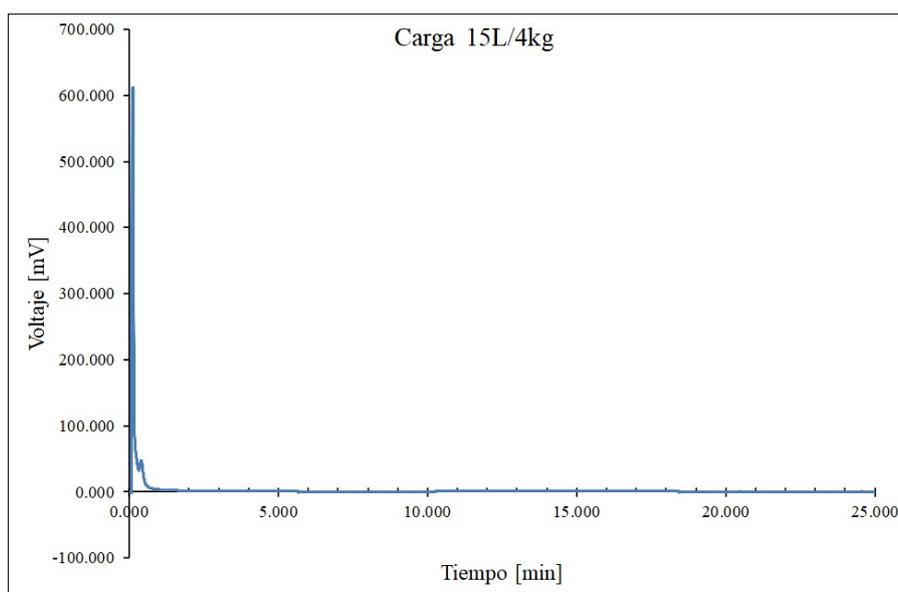


Figura 5.21: Cromatograma referente a la extracción de grasas carga 15L/4kg a los 15 minutos de lavado

5.4. Lavado con enzimas

En esta parte experimental se utilizaron dos enzimas, para el lavado de almidón de papa la α -amilasa y para el lavado de pectina la pectinasa.

Del trabajo de I. Jiménez, donde evalúa el efecto del ultrasonido en la sacarificación para la producción de bioetanol a partir de la harina de ramón, se puede rescatar la sección de sus pretratamientos, pues usa ultrasonido para este paso.

El pretratamiento es un paso esencial para obtener azúcares potencialmente fermentables en la etapa de hidrólisis, el objetivo es descomponer la estructura de la lignina e interrumpir la estructura cristalina de la celulosa y del almidón, para mejorar el acceso de las enzimas durante

la etapa de hidrólisis. En sustratos como almidón tiene como objetivo favorecer la hidrólisis enzimática. (32)

Los tratamientos con ultrasonido han demostrado ser de gran utilidad ya que permiten mejorar el proceso de licuefacción y sacarificación, dando como resultado un mayor rendimiento de hidrólisis. Todo esto, debido a los efectos físicos causados por las ondas de choque y fuerzas de corte provocadas por la transmisión acústica, el colapso de las microburbujas generadas y los efectos químicos provocados por la formación de radicales hidroxilos (-OH) e hidrógeno (-H). El tratamiento ultrasónico, conduce a la destrucción de la estructura de doble hélice de algunos almidones, lo que contribuye a la gelatinización y licuefacción del almidón (32).

I. Jiménez refiere que el ultrasonido puede producir cambios morfológicos puntuales sobre la superficie lisa de almidón, debido al choque por las ondas ultrasónicas, que pasan de tener forma ovalada o esférica a estructuras amorfas y con rupturas y grietas.

Estos pretratamientos se usan de igual forma para la hidrólisis de pectina, como ya se destacó previamente su uso en una patente alemana de lavado enzimático.

Así entonces, se esperaría que la hidrólisis enzimática del almidón y de la pectina fuera favorecida por el ultrasonido, sin embargo esto también depende de muchos otros factores tales como la potencia, frecuencia del ultrasonido, temperatura, tiempo de reacción y concentración de la enzima.

5.4.1. Hidrólisis de pectina (sin tela)

A temperatura ambiente se puede observar el aumento de la concentración con el tiempo; para los primeros 10 minutos de hidrólisis al aumentar la temperatura hasta los 40°C la capacidad de la pectinasa para hidrolizar a su sustrato aumenta por lo menos al doble.

La siguiente tabla 5.4 muestra los resultados de la hidrólisis de pectina en el sistema de incubación con mezclado orbital.

Tabla 5.4: Hidrólisis de pectina en sistema de incubación con mezclado orbital

T=Ambiente			T=40°C		
<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>
10	0.48	1.9431	10	0.306	4.7367
20	0.43	1.6955	20	0.3	4.6593
30	0.489	1.9876	30	0.34	5.1754
45	1.254	5.7748	45	0.362	5.4593
60	1.346	6.2302	60	0.444	6.5174
90	1.524	7.1114	90	0.544	7.8077
120	1.339	6.1955	120	0.591	8.4141

En el caso del sistema de mezclado por ultrasonido (sin tela, tabla 5.5) el tiempo de reacción se redujo a la mitad, se observa que en menor tiempo se alcanza la hidrólisis de la pectina cítrica.

Tabla 5.5: Hidrólisis de pectina en sistema de ultrasonido

T=Ambiente			T=40°C		
<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>
10	0.735	38.8580	10	1.101	60.5148
20	0.84	45.0710	20	1.333	74.2426
30	0.884	47.6746	30	1.326	73.8284
45	0.941	51.0473	45	1.567	88.0888
60	1.044	57.1420	60	2.003	113.8876

5.4.2. Hidrólisis de pectina (con tela)

La siguiente tabla 5.6 muestra los resultados del lavado de las telas impregnadas con pectina cítrica realizados con la enzima pectinasa en el sistema de la tina de ultrasonido.

Tabla 5.6: Lavados de pectina en ultrasonido

T=40°C			T=60°C		
Tiempo (min)	Abs	Concentración (mg/ml)	Tiempo (min)	Abs	Concentración (mg/ml)
5	0.09	0.6923	5	0.154	4.4793
10	0.115	2.1716	10	0.456	22.3491
15	0.122	2.5858	15	0.656	34.1834
20	0.127	2.8817	20	0.61	31.4615
25	0.134	3.2959	25	0.701	36.8462
30	0.256	10.5148	30	0.789	42.0533

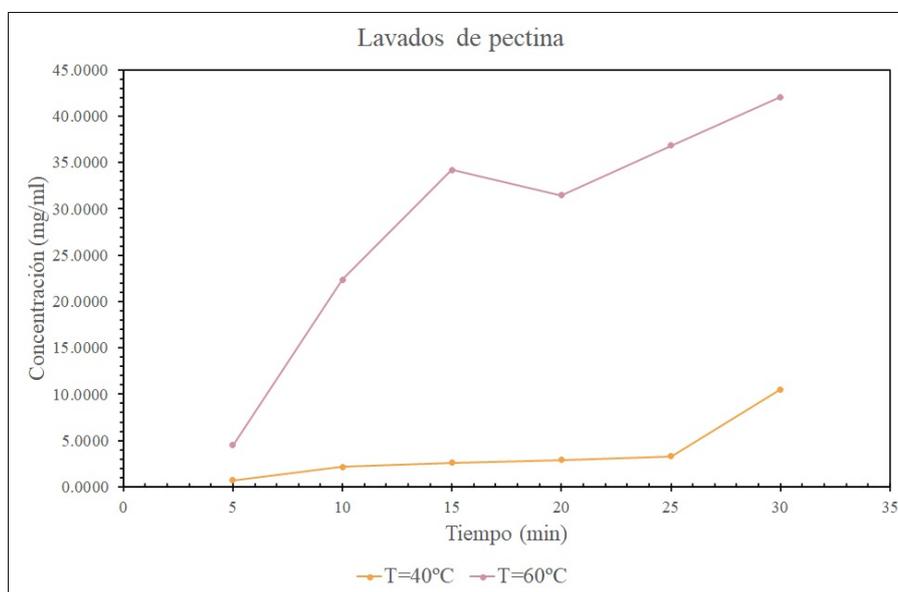


Figura 5.22: Lavado de pectina en ultrasonido

Los resultados para el lavado de pectina son concluyentes desde que se observó la coloración al finalizar la reacción del DNS, y se reafirmó al calcular las concentraciones con las absorbancias, en este sistema se logran las altas concentraciones esperadas, al parecer la pectinasa no tiene ninguna limitación para trabajar, no se observa precipitación, ni aglutinamiento de la pectina.

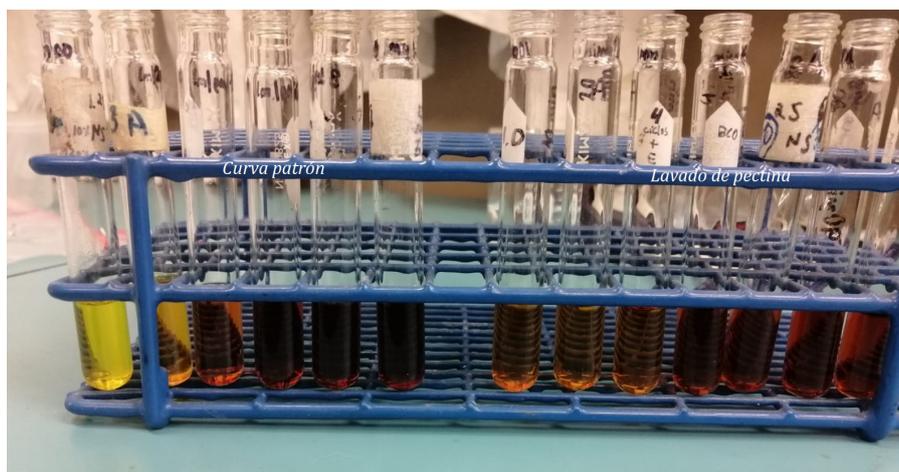


Figura 5.23: Resultado del método de azúcares reductores para el lavado de pectina

5.4.3. Hidrólisis del almidón (sin tela)

El sistema de lavado del almidón fue el mismo que el de la pectina, al igual que sus condiciones, sin embargo aquí ocurrió un problema de precipitación, lo que limitó la acción de la enzima.

En el sistema de mezclado convencional se observan concentraciones más altas en comparación del sistema de ultrasonido, pues al parecer las vibraciones de este último provocan la precipitación.

Como se puede observar en la tabla 5.7 la enzima se encontraba activa, en la parte de la incubación no se tenía tela, únicamente la enzima, su sustrato y el buffer, es por eso que se puede concluir que el problema presentado no es atribuible a la enzima.

Tabla 5.7: Hidrólisis de almidón en sistema de incubación con mezclado orbital

T=Ambiente			T=40°C		
Tiempo (min)	Abs	Concentración (mg/ml)	Tiempo (min)	Abs	Concentración (mg/ml)
10	0.172	0.2118	10	0.214	0.3634
20	0.228	0.4139	20	0.313	0.7207
30	0.243	0.4681	30	0.557	1.6012
45	0.351	0.8578	45	0.575	1.6662
60	0.498	1.3883	60	0.726	2.2111
90	0.666	1.9946	90	0.925	2.9293
120	0.92	2.9112	120	1.108	3.5897

En la tabla 5.8 se puede observar, de igual manera como con la enzima libre de tela, que la enzima está activa. Además, no se encuentran datos acerca de esta enzima trabajando a altas frecuencias, por lo que el problema es atribuible al ultrasonido, claramente la enzima no se siente tan cómoda en el ultrasonido, como sí ocurre en la agitación orbital.

Tabla 5.8: Hidrólisis de almidón en sistema de ultrasonido

T=Ambiente			T=40°C		
<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>
10	0.162	0.1757	10	0.334	0.7965
20	0.32	0.7459	20	0.327	0.7712
30	0.423	1.1176	30	0.337	0.8073
45	0.5	1.3955	45	0.46	1.2512
60	0.56	1.6121	60	0.764	2.3482

5.4.4. Hidrólisis de almidón (con tela)

Después de realizar la hidrólisis del almidón en dos sistemas, se procedió a realizar los lavados de tela impregnada con almidón de papa en el sistema de mezclado por ultrasonido, compuesto por la tela (7g promedio), 26mL buffer de fosfatos pH=7 100mM que correspondería a la relación 15L/4kg de lavado y los 50 μ L de enzima.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.9: Lavados de telas impregnadas con almidón, en sistema de ultrasonido

T=40°C			T=60°C		
<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Abs</i>	<i>Concentración (mg/ml)</i>
5	0.003	-0.3981	5	0.259	0.5258
10	0.178	0.2335	10	0.281	0.6052
15	0.21	0.3490	15	0.267	0.5547
20	0.334	0.7965	20	0.279	0.5980
25	0.308	0.7026	25	0.28	0.6016
30	0.389	0.9949	30	0.306	0.6954

A 40°C y los primeros 5 minutos la concentración del almidón ni siquiera es perceptible por el espectrofotómetro, con el paso del tiempo pareciera aumentar hasta los 20 minutos donde decrece, contrario a lo que se esperaría al aumentar la temperatura, a los 60°C las concentraciones parecieran mantenerse constantes.

En ambos ensayos se repite el mismo fenómeno de precipitación, aunque al principio se trabajaba con almidón de maíz al no ver señal alguna de la hidrólisis se opta por cambiar a almidón de papa, con el que se obtienen mejores resultados pero no los esperados en comparación con los resultados de la hidrólisis de la pectina en ultrasonido.

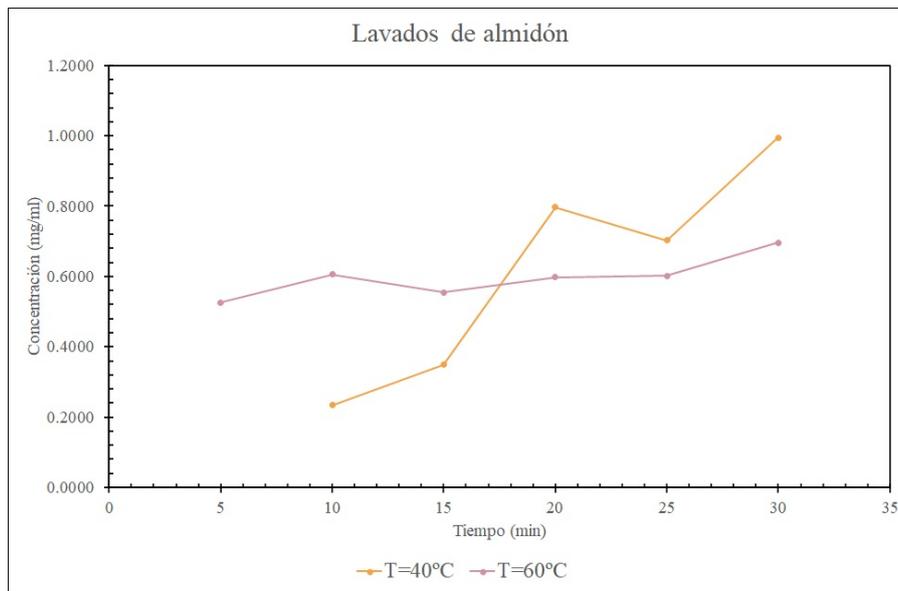


Figura 5.24: Lavado de almidón en ultrasonido

La principal justificación al fenómeno de precipitación del almidón son las ondas del ultrasonido, pareciera que estas son las que lo inducen, sin embargo se piensa en otra explicación donde la estabilidad de los puentes de hidrógeno establecidos entre el almidón y el agua no son lo suficientemente fuertes para mantener soluble al almidón en presencia del ultrasonido.

Finalmente, se concluye que la parte de almidón que se mantuvo soluble sí alcanza su hidrólisis hacia azúcares reductores.

5.5. Modelado matemático para glucosa

Se realizó el modelado de los dos sistemas propuestos experimentalmente utilizando el método numérico de diferencias finitas: el sistema de transferencia de masa controlado por la difusión (ecuación 5.14) y el sistema difusión + advección ultrasónica ecuación(5.15) utilizando el coeficiente de difusión para la glucosa.

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (5.14)$$

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (5.15)$$

Se considera una tina con profundidad de 0.3 m y un tiempo de hasta 26 min.

5.5.1. Difusión

Se considera un coeficiente de difusión para la glucosa en agua de $4.9E-10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, además se establece el criterio de estabilidad como: $\frac{D(\Delta t)}{(\Delta x)^2} < 0.5$

Se construye la malla y se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.10 donde se puede observar que la difusión se da principalmente en la cercanía de la interfase tela/agua, es decir, en la posición de 1 cm (ver gráfica 5.25). Posteriormente en 2 cm (gráfica 5.26), 4 cm (gráfica 5.27) y 5 cm (gráfica 5.28) el proceso difusivo continua lentamente con el paso del tiempo y va alcanzando una profundidad mayor.

Tabla 5.10: Construcción de malla por diferencias finitas

$t(s)\downarrow/x(m)\rightarrow$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
0	10	0	0	0	0	0	0
60	0	3E-03	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
120	0	3E-03	8E-07	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
180	0	3E-03	2E-06	2E-10	0E+00	0E+00	0E+00
240	0	3E-03	3E-06	7E-10	7E-14	0E+00	0E+00
300	0	3E-03	3E-06	1E-09	3E-13	2E-17	0E+00
360	0	3E-03	4E-06	2E-09	7E-13	1E-16	6E-21

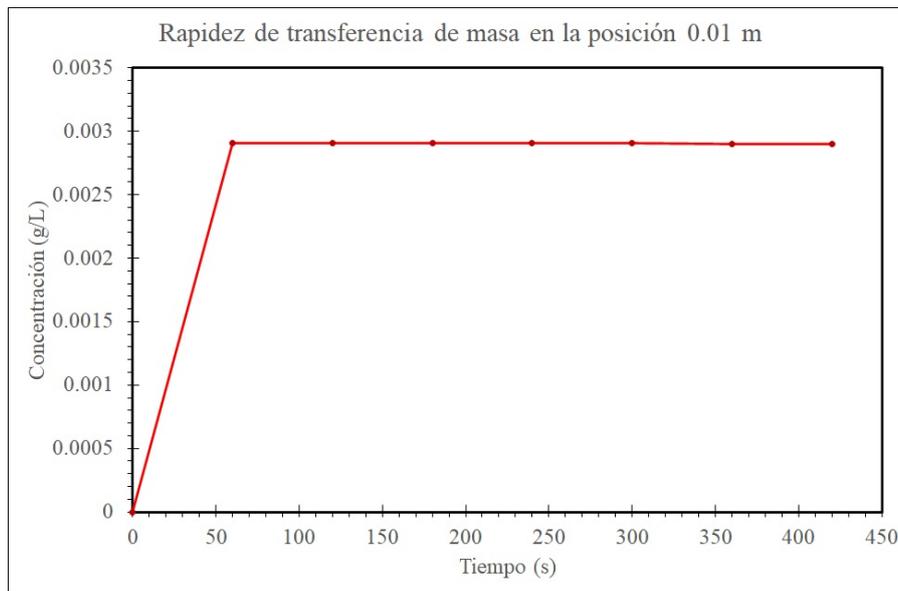


Figura 5.25: Rapidez de TM en $x= 0.01$ m

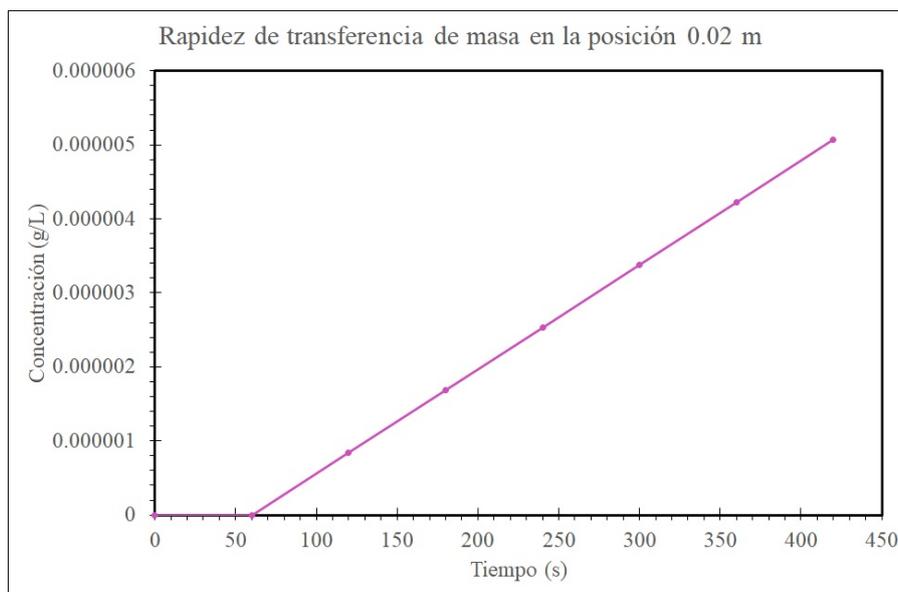


Figura 5.26: Rapidez de TM en $x=0.02$ m

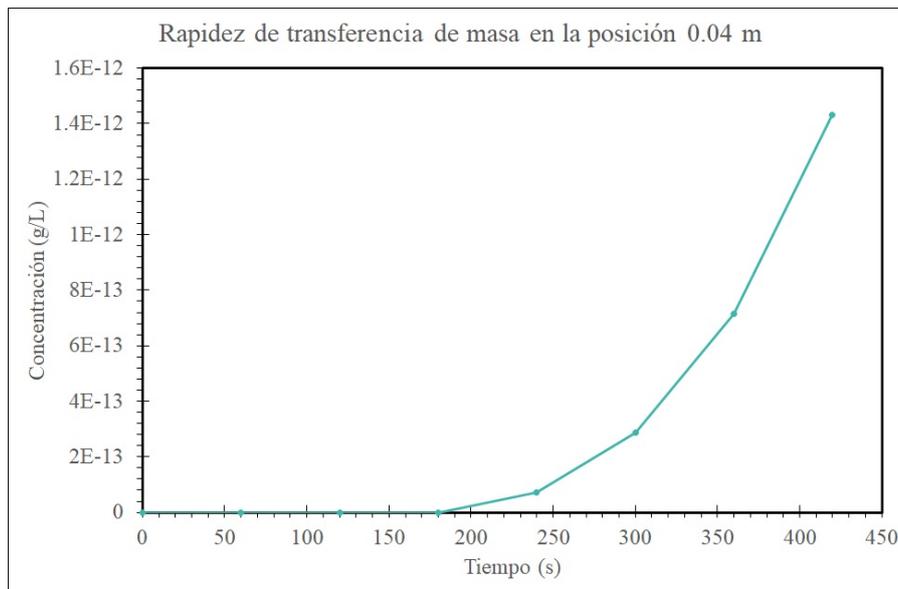


Figura 5.27: Rapidez de TM en $x=0.04$ m

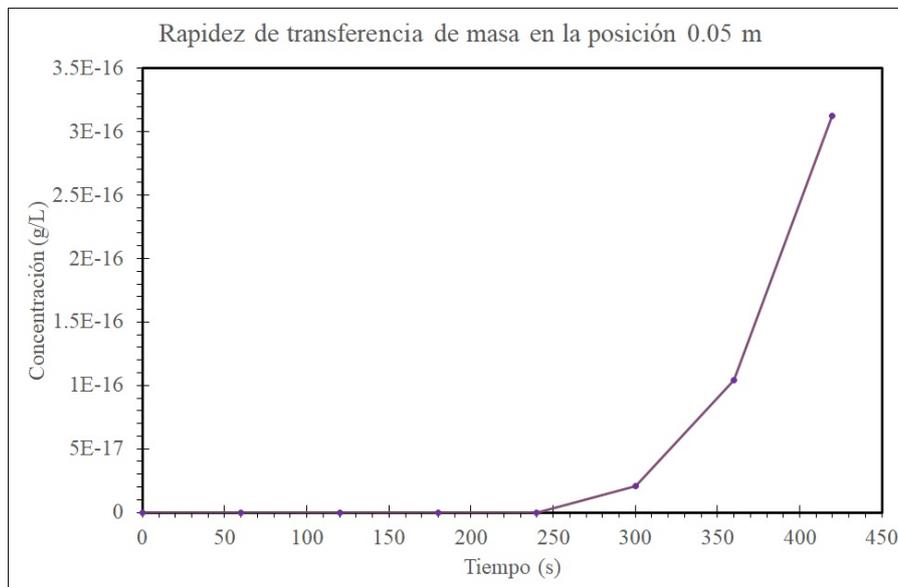


Figura 5.28: Rapidez de TM en $x=0.05$ m

5.5.2. Difusión con advección (con ultrasonido)

Se considera lo siguiente:

- Estabilidad=0.000291
- Velocidad lineal=0.1 mm/s
- Número de Courant=0.6

Aplicando el método de diferencias finitas se construye la malla y se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.11, donde se puede observar el incremento en la rapidez de transferencia de masa del soluto gracias al efecto de las ondas mecánicas (ver gráfica 5.29).

Tabla 5.11: Construcción de malla por diferencias finitas

t(s)↓/x(m)→	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
0	10	0	0	0	0	0	0
60	0	3.00291	0	0	0	0	0
120	0	3.001162	0.901747	0	0	0	0
180	0	2.729154	1.802444	0.270786	0	0	0
240	0	2.187357	2.539778	0.811887	0.081315	0	0
300	0	1.424889	2.951814	1.549716	0.32507	0.024418	0
360	0	0.539375	2.913514	2.337791	0.782928	0.122019	0.007333

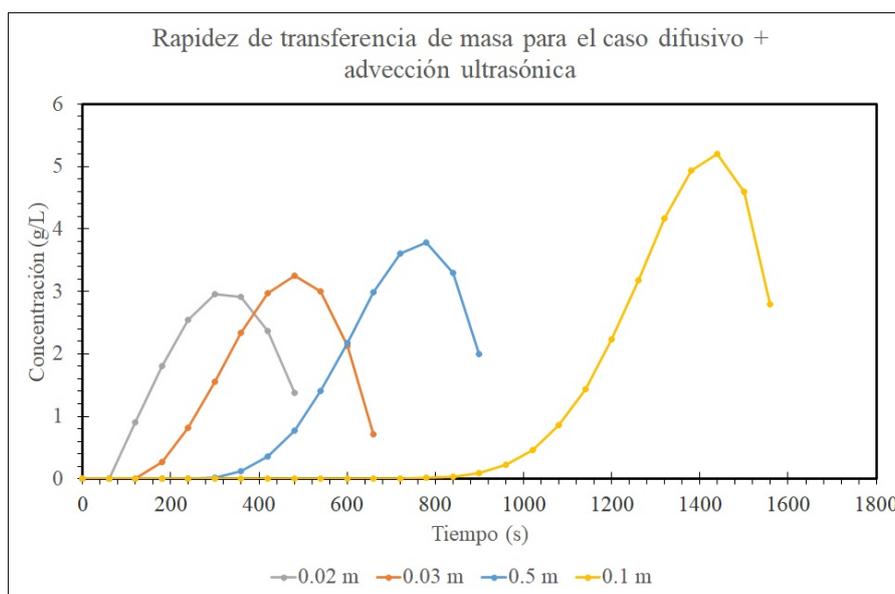


Figura 5.29: Difusión con ultrasonido para glucosa en diferentes posiciones

Finalmente, en la gráfica 5.30 es muy notorio el efecto que tiene el ultrasonido en el sistema, por lo que es concluyente que el modelo matemático y los resultados experimentales convergen (los datos experimentales son los expuestos en la tabla 5.2).

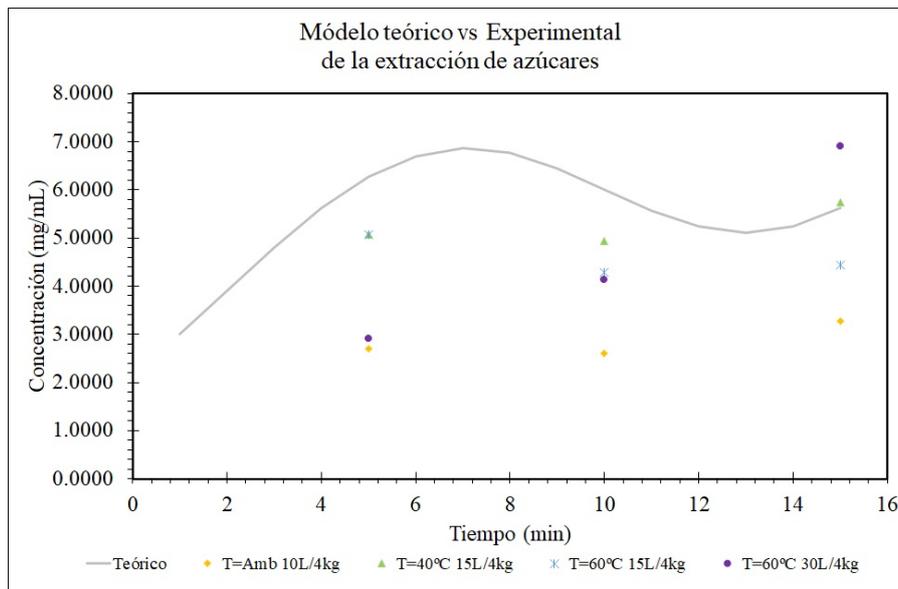


Figura 5.30: Comparación del modelo teórico vs modelo experimental de la extracción de azúcares

5.6. Modelado matemático de una onda mecánica

Reordenando la ecuación 5.13 se tiene:

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Aproximando la ecuación de la velocidad de propagación de una onda mecánica:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, 0 \leq x \leq 1$$

$$u(0, t) = u(1, t) = 0$$

$$u(x, 0) = \sin(2\pi x), 0 < x < 1$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = 2\pi \cos(2\pi x), 0 \leq x \leq 1$$

Utilizando el método de diferencias finitas:

$$u_i^1 = f(x_t) + g(x_t) * \Delta t + \frac{(\Delta t)^2 * c^2 * x_t}{2(\Delta x)^2} [f(x_{t-1}) - 2f(x_t) + f(x_{t+1})] \quad (5.16)$$

$$\lambda = \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x} \right)^2$$

$$u_i^{t+1} = 2(1 - \lambda)u_i^t + \lambda(u_{i+1}^t + u_{i-1}^t) - u_i^{t-1} \quad (5.17)$$

Convergencia: $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c}$

Conclusiones

Se pudo realizar la limpieza de manchas usuales con menor cantidad de agua con respecto a un lavado convencional y se redujo también en el lavado con enzimas así como el tiempo de lavado. Ambos se redujeron significativamente por lo que son, sin duda, resultados estimulantes. Además, aunque el fabricante recomienda usar 30L/4kg de ropa, la realidad es que se usan hasta 80L. Lo aquí reportado muestra que es posible reducir el agua hasta un 1/4 de lo realmente usado.

Se concluye que la relación óptima sería una intermedia, o sea, ni el agua que se utiliza en el lavado convencional, ni tan poca que no pueda cubrir la tela. Por esta razón se seleccionó la carga intermedia 15L/4kg, misma que se usa para el lavado con enzimas.

El modelo matemático explica el fenómeno de difusión-advección, que se que se aproxima al comportamiento del sistema de lavado estudiado. Este modelo se usa en diferentes campos para explicar la propagación de las ondas sísmicas en el mar, la dispersión de contaminantes y otros.

La resolución de esta ecuación por el método numérico de diferencias finitas permitió modelar para la glucosa el sistema donde se visualiza la acción de las ondas mecánicas.

Es evidente que el sistema de ultrasonido reduce el tiempo y el agua. Sin embargo aún se necesita un estudio acerca del costo que éste conlleva.

Para que el modelo matemático reproduzca mejor el proceso de transferencia de liberación de la glucosa, el término convectivo tiene gran peso, en comparación con la transferencia de masa controlada por solo el término difusivo.

La ecuación de velocidad responde de forma interesante a cambios en el parámetro ζ'' , lo cual claramente modifica el patrón o la forma de propagación de las ondas ultrasónicas (considerando el modelo de la cuerda sujeta por ambos extremos).

La ecuación desarrollada modela mucho mejor el comportamiento del lavado de glucosa que considera las temperaturas de 40°C y 60°C, en comparación con temperatura ambiente.

Perspectivas

El presente trabajo se realizó a nivel laboratorio, por lo que una proyección es poder escalarlo, una carga de ropa es aproximadamente de 12 kg, entonces se necesita un aparato de ultrasonido de mayores dimensiones.

Además, se necesita una formulación completa de un tipo de detergente que contenga la mezcla de enzimas ideal para la suciedad a remover, así como se describe en las patentes, aquí se usa únicamente la enzima por facilidad (solo se sigue su actividad sin tener que preocuparse por reacciones secundarias).

Aunque se resuelve el tema del gasto de agua, se introducen otras variables, p. ej. el gasto económico y energético, de los que se necesita un estudio profundo.

Hace falta crear el comportamiento de la ecuación de difusión + advección con un sustrato modelo de pectina, considerando también el término de reacción química (hidrólisis de la pectina para producir azúcares).

Se necesita implementar una formulación detergente, usando solo 4 ingredientes: ácido láctico, bicarbonato de sodio, ácido cítrico y limoneno, por medio de combinaciones en un diseño experimental.

Se requiere formular el lavado de una grasa modelo, como es el biodiesel, impregnando las telas con menos cantidad de oleato de metilo para obtener resultados analíticos concluyentes para este tipo de suciedad.

Referencias

- (1) Jean Louis Salager. (1988). Detergencia: fenómenos y mecanismos.. Mérida, Venezuela.: Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química.
- (2) Milton, J. Rosen. (2004). Surfactants and interfacial phenomena. EE.UU.: Wiley-Interscience.
- (3) Universidad de Viena, BIOREM: Bioremediation of Contaminated Sites. Tensoactivos.
- (4) Lehninger. Principios de Bioquímica. 3^a ed. Nelson D. y Cox, M. Editorial Omega (2002).
- (5) Bioquímica. D. Voet y J. Voet. Ed. Omega (1992).
- (6) Gatt, E., Rigal, L., y Vandenbossche, V. (2018). Biomass pretreatment with reactive extrusion using enzymes: A review. ELSEVIER: Industrial Crops and Products, 122, 329-339. 2021, marzo 7. Doi:10.1016/j.indcrop.2018.05.069
- (7) Littlechild, J. (2015, octubre 13). Enzymes from extreme environments and their industrial applications. Frontiers in bioengineering and biotechnology 3:161. Doi:10.3389/fbioe.2015.00161
- (8) Zuber H. (1981) Structure and Function of Thermophilic Enzymes. In: Eggerer H., Huber R. (eds) Structural and Functional Aspects of Enzyme Catalysis. Colloquium der Gesellschaft für Biologische Chemie 23.–25. April 1981 in Mosbach/Baden, vol 32. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi:10.1007/978-3-642-81738-0_11
- (9) Lasa, I. (1994). Thermophilic enzymes and their biotechnological potential. Microbiología, 77-89, PubMed.
- (10) Ray M., Daniel, Cowan, A., Morgan, W. (1981). The industrial potential of enzymes from extremely thermophilic bacteria.
- (11) Zyber, H. (1981). Structure and function of thermophilic enzymes. Structural and functional Aspects of enzyme catalysis. 114-127.
- (12) LMEngineering GmbH (2021) Bioextrusion by LEHMANN: increased biogas yield and decreased stirring energy thanks to bioextrusion. Sitio web: http://www.lmengineering.de/bioextrusion_2019a_uk.pdf
- (13) Peña, L. A. (2017). Evaluación de mezclas de propilenglicol, trietocitrato e ibuprofeno y condiciones de proceso por extrusión de doble husillo corotante para obtención de granulados. Estado de México.
- (14) Salvador Badui Dergal. (2006). Química de alimentos. Estado de México: Pearson Educación.

- (15) Olsen, H. S., y Falholt, P. (1998). The role of enzymes in modern detergency. *Journal of Surfactants and Detergents*, 1(4), 555–567. Sitio web: Doi : 10.1007/s11743-998-0058-7
- (16) Infinita Biotech. (2021). Enzymes Used In The Detergent Industry. 23/09/21, de Infinita Biotech Private Limited. Sitio web: <https://infinitabiotech.com/blog/enzymes-used-in-detergent-industry/>
- (17) Hasan, F., Ali, A., Javed, S. (2010) Enzymes used in detergents: lipases. *African Journal of Biotechnology* Vol. 9(31), pp. 4836-4844. Doi : 10.5897/AJBx09.026
- (18) Jesús Merino P., Ma. José Noeriga B.. (sf). Enzimas. 24/09/2021, de Universidad de Cantabria. Sitio web: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/879/course/section/967/Tema%25202B-Bloque%2520I-Enzimas>
- (19) Ma. del Pilar N. (2001). Optimización del proceso de extrusión de monohusillo. 24/09/2021, de El empaque más conversión. Sitio web: <https://www.elempaque.com/temas/Optimizacion-del-proceso-de-extrusion-de-monohusillo+5000404>
- (20) Fadeyibi, Adeshina y Osunde, Zinash y Gbabo, Agidi y Egwim, Evans. (2016). Design of single screw extruder for homogenizing bulk solids. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal*. 18. 222-231.
- (21) Leonardo Peralta. (20211). Una empresa mexicana rediseña sus lavadoras para ahorrar agua. *CNN Expansión*. Sitio web <https://expansion.mx/planetacnn/2011/06/20/una-empresa-mexicana-redisen-a-sus-lavadoras-para-ahorrar-agua>
- (22) Procuraduría Federal del Consumidor (2018). Grandes Elctrodomesticos: lavadoras. Sitio web: <https://www.gob.mx/profeco>
- (23) Pulido, José O. (1986). QUALLI Lavadora domestica compacta. Ciudad Universitaria, CDMX.
- (24) PROFECO. (2013). Lavadoras automáticas . *Revista del consumidor*, Estudio de calidad, 40-48.
- (25) Hanau, A., Hasse, T., Schaub, H. Use of foam body for the equipment of pieces of laundry and for this proper procedure and laundry treatment equipment. Patent number DE102019201678 (2020)
- (26) Maribel Beltrán, Antonio Marcilla. (2012). Tecnología de polímeros . España: Universidad de Alicante.
- (27) Cole-Parmer and antylia scientific company. Lavadoras. Lavadora de para instrumental de laboratorio. Sitio web: https://archive-resources.coleparmer.com/Catalog_pdfs/PDF_CP/JZ_0885.pdf
- (28) González-Bacerio, Jorge, y Rodríguez Hernández, Jairo, y Monte Martínez, Alberto del (2010). Las lipasas: enzimas con potencial para el desarrollo de biocatalizadores inmovilizados por adsorción interfacial. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XII(1),124-140.[fecha de Consulta 6 de Octubre de 2021]. ISSN: 0123-3475. Sitio web: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77617786013>
- (29) Revista digital — Matemática, Educación e Internet <http://tecdigital.tec.ac.cr/revistamatematica/> Vol 18, No 2. Marzo-Agosto, 2018

- (30) ¿Cómo funciona la limpieza por ultrasonido?, TierraTech ultrasonic cleaning systems <https://www.tierratech.com/ES/nd459/como-funciona-la-limpieza-ultrasonido>
- (31) Perdozo-Acuña, Adrián, Sobre el uso de las ecuaciones de Navier- Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011, pp. 51-67
- (32) Diseño del sistema inteligente de monitoreo de la calidad ambiental del distrito de cartagena. Convenio Interadministrativo 0133-2015 entre el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena – EPA y la Universidad de Cartagena.
- (33) I.A. Jiménez, Efecto del ultrasonido en la sacarificación para la producción de bio-etanol a partir de la harina de ramón. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Yucatán (2019).
- (34) O’Connell, T., Siegert, P., Evers, S., Bongaerts, J., Weber, T., Maurer, K., y Bessler, C., Procedure for improving cleaning performance of a detergent or cleaning agent, (2020), EE.UU. Patente US20110201536A1.
- (35) Hellmuth, H., Laufs, B., O’Connell, T., Kropf, C., Sunder, M., Use of whey protein isolate in detergents or cleaning agents containing enzymes to increase the stability of enzymes (2016), Alemania, Patente DE102014223969A1.
- (36) Mikkelsen, M., Niels, R., Ladefoged, C., Friiss-Jensen, S., Detergent compositions and use of enzyme combinations therein (2012), EE.UU., Patente US8329632B2.
- (37) Svendensen, A., Bisgard-Frantzen, H., α -Amylase mutant (2009), EE.UU., Patente US8263368B2
- (38) Wada, Y., Kasai, M., Shikata, S., Detergent composition (1998), Tokio, Patente WO1998045393A3.
- (39) Alzate, H. (2007), Física de las ondas, Universidad de Antioquia.
- (40) Gallier, J., Quaintance, J. (2022) Algebra, Topology, Differential Calculus, and Optimization Theory For Computer Science and Machine Learning, Universidad de Pensilvania.
- (41) Hanua, A., Hasse, T., Schaub, H. Use of foam bodies for finishing clothes and a method and device for treating clothes suitable for this purpose (2020), Alemania, Patente DE 10 2019 201 678 A1