



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN PROTEICA DE
RESIDUOS DE LANGOSTINO MEDIANTE EXTRACCIÓN
ASISTIDA CON MICROONDAS: ESTUDIO CINÉTICO Y
DIMENSIONADO BÁSICO DEL PROCESO**

Autor:

González Caballero, Inés

Tutor:

Alonso Sánchez, Gloria Esther

Departamento Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente

Valladolid, julio 2024.

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en optimizar la extracción de proteínas de residuos de langostino utilizando tecnología asistida por microondas.

Los objetivos experimentales incluyen evaluar la eficiencia de la extracción, estudiar la cinética y optimizar las variables de extracción de proteínas con peso molecular > 2kDa. El estudio identificó condiciones óptimas a 200°C y 6 minutos de extracción, obteniéndose un rendimiento de proteínas del $79,08 \pm 1,21\%$ sin degradación. Varios modelos cinéticos, incluido el modelo de difusión de Fick, describieron con éxito el proceso de extracción.

Se ha dimensionado la etapa de desproteínización para el procesado de 1950 kg cáscara/año, proponiendo un diagrama de flujo que permite recuperar la proteína seca y el sólido residual. Se han diseñado algunos de los equipos de proceso como el tanque de almacenamiento intermedio de la suspensión, el silo de almacenamiento de sólidos y una de las bombas del proceso.

PALABRAS CLAVE

Langostinos, mudas, microondas, proteínas, extracción.

ABSTRACT

This final degree work focuses on optimizing the extraction of proteins from shrimp wastes using microwave-assisted technology.

The experimental objectives include evaluating the extraction efficiency, studying the kinetics and optimizing the extraction variables for proteins with molecular weight > 2kDa. The study identified optimal conditions at 200°C and 6 minutes of extraction, obtaining a protein yield of $79,08 \pm 1.21\%$ without degradation. Several kinetic models, including the Fick diffusion model, successfully described the extraction process.

The deproteinization stage has been dimensioned for the processing of 1950 kg shells/year, proposing a process flow diagram that allows recovering the dry protein and the residual solid. Some of the process equipment such as the suspension tank, the solids storage silo and one of the process pumps have been designed.

KEYWORDS

Shrimps, molts, microwave, proteins, extraction.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Composición de las mudas de <i>Litopenaeus Vannamei</i> utilizadas como materia prima.....	22
Tabla 2. Condiciones de trabajo en los diferentes experimentos. Masa inicial de sólido = 0,333g. Volumen de agua = 20 mL. Agitación = 1000 rpm.....	24
Tabla 3. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos	25
Tabla 4. Composición de las mudas de <i>Litopenaeus Vannamei</i> utilizadas como materia prima.....	37
Tabla 5. Tabla de corrientes.	42
Tabla 6. Tabla de abreviaturas del diagrama de flujo.	46
Tabla 7. Tabla de descripción de equipos.	46
Tabla 8. Espesores mínimos según ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sec. VIII, Div. 1	51
Tabla 9. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos	65
Tabla 10. (cont.) Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos.	66
Tabla 11. Cálculos del modelo cinético de difusión de en estado no estacionario para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C	67
Tabla 12. Cálculos del Modelo de la Ley de las Potencias para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C.....	69
Tabla 13. Cálculos del Modelo de primer orden para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C.....	71
Tabla 14. Cálculos del Modelo de segundo orden para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C..	73
Tabla 15. Cálculos para la linealización de la Ecuación de Arrhenius	74
Tabla 16. Tiempos del proceso de extracción.	75
Tabla 17. Cálculos capacidad total por carga	75
Figura 1 Clases de compuestos presentes en la cáscara de langostino con aplicaciones industriales.(Rossi et al., 2024).....	8
Figura 2. Microondas Monowave 300 de Anton Paar	19
Figura 3. Bomba de vacío (Membranpumpe)	20
Figura 4. Balanza analítica Adventurer Pro AV264C.....	20
Figura 5 Estufa universal Memmert EXCELLENT	21
Figura 6. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos	26

Figura 7. Linealización según Modelo cinético de difusión en estado no estacionario para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.....	28
Figura 8. Linealización según Modelo cinético de las potencias para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.....	29
Figura 9. Linealización según Modelo cinético de primer orden para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.....	30
Figura 10. Linealización según Modelo cinético de segundo orden para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.....	31
Figura 11. Diagrama de flujo 01.	40
Figura 12. Diagrama de flujo 02	41
Figura 13. Agitador.	43
Figura 14. Bomba.....	43
Figura 15. Cinta transportadora.	43
Figura 16. Depósito.....	43
Figura 17. Ducha -Lavado.	44
Figura 18. Filtro.....	44
Figura 19. Filtro ultrafiltración.....	44
Figura 20. Horno de secado.....	44
Figura 21. Silo.	45
Figura 22. Silo refrigerado.	45
Figura 23. Trituradora.....	45
Figura 24. Válvula.	45

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	7
1.1. RESIDUOS DE LANGOSTINOS	7
1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN PROTEICA.....	8
1.2. EXTRACCIÓN DE PRODUCTOS NATURALES	9
1.2.1. MÉTODOS CONVENCIONALES DE EXTRACCIÓN.....	9
1.2.2. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN SOSTENIBLES Y DE INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS .	10
1.2.3. FUNDAMENTOS DE LA EXTRACCIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS.....	12
1.2.4. UTILIZACIÓN DE MICROONDAS PARA LA EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS	12
1.2.5. MODELOS CINÉTICOS DE EXTRACCIÓN	14
Capítulo 2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS	17
Capítulo 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS DE RESIDUOS DE LANGOSTINO CON MICROONDAS	19
3.1. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1.1. EQUIPOS.....	19
3.1.2. MATERIA PRIMA.....	21
3.1.3. ANÁLISIS DE PROTEÍNAS Y RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN	22
3.1.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE EXTRACCIÓN CON AGUA Y ASISTIDA CON MICROONDAS	25
3.2.1. RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE EXTRACCIÓN	25
3.2.2. AJUSTE DE LOS DATOS CINÉTICOS CON DIFERENTES MODELOS MATEMÁTICOS. .	27
3.2.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA.	32
3.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	34
CAPÍTULO 4. DIMENSIONADO BÁSICO DE UNA ETAPA DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS DE RESIDUOS DE LANGOSTINO	36
4.1. BASES DE DISEÑO DEL PROCESO	36
4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO, DIAGRAMA DE BLOQUES Y DIAGRAMA DE FLUJO	38
4.2.1. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	39
4.2.2. DIAGRAMA DE FLUJO	40
4.2.1. TABLA DE CORRIENTES	42
4.2.2. SÍMBOLOS.....	43
4.3. DIMENSIONADO DE UNA ETAPA DE EXTRACCIÓN	48

4.3.1. TANQUE INTERMEDIO PARA ALMACENAR EL EXTRACTO (D-103).....	48
4.3.2. TANQUE ATMOSFÉRICO (SILO) PARA ALMACENAR LA CÁSCARA (D-101)	52
4.3.3. BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE EXTRACTO A LA FILTRACIÓN (P-100)	57
CAPÍTULO 5. IMPACTO EN LA MEJORA SOCIAL DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS DE LA AGENDA 2030.....	60
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	61
CAPÍTULO 8. ANEXOS	64
8.1. ANEXO I RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	65
8.2. ANEXO II CÁLCULOS DE LOS MODELOS CINÉTICOS.....	67
8.3. ANEXO III CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO	75
8.4. ANEXO IV HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL RECIPIENTE D-103.....	76
8.5. ANEXO V HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL SILO D-101.....	77
8.6. ANEXO VI HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA P-100.....	78

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1.1. RESIDUOS DE LANGOSTINOS

Los residuos de langostinos, específicamente de la especie *Litopenaeus vannamei*, son un subproducto significativo de la industria pesquera y acuícola. También conocido como el langostino blanco, es una especie de crustáceo ampliamente cultivado en la acuicultura debido a su alta demanda comercial y su rápido crecimiento en condiciones controladas. Originario de las costas del Pacífico, este crustáceo presenta un cuerpo traslúcido de tonalidad gris verdosa. Su anatomía se divide en tres partes principales: el cefalotórax, el abdomen y el telson, siendo el cefalotórax la región donde se concentran la mayoría de los órganos vitales (Bioaquafloc website., s. f.).

A nivel mundial, la producción de langostinos ha aumentado considerablemente debido a la creciente demanda de este producto en el mercado. Según datos de la FAO 2020 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020), la producción global de camarones y langostinos alcanzó aproximadamente 5 millones de toneladas anuales, con *Litopenaeus vannamei* representando la mayor parte de esta cifra.

La producción intensiva de langostinos genera grandes cantidades de residuos, que incluyen cáscaras, cabezas y mudas. Estos residuos pueden representar hasta el 50% del peso total del langostino procesado. La gestión y valorización de estos residuos es un desafío importante para la industria, pero también una oportunidad para obtener productos de alto valor añadido, como proteínas, quitina y otros compuestos bioactivos.

La muda, o ecdisis, es un proceso vital en la vida de los crustáceos, incluidos los langostinos. Este ciclo de crecimiento implica el desprendimiento periódico del exoesqueleto, seguido de la síntesis de uno nuevo que se adapte al tamaño del organismo en crecimiento. Los ciclos de muda pueden variar según las condiciones ambientales y la edad del crustáceo, pero generalmente ocurren cada cuatro u ocho semanas. Este proceso se divide en cuatro etapas: postmuda o metecdisis, intermuda o anecdisis, premuda o proecdisis, y ecdisis o muda. (Rossi et al., 2024)

Los residuos de langostinos están compuestos principalmente por:

Proteínas: Constituyen aproximadamente el 20-40% del peso seco de los residuos.

Quitina y Quitosano: Polisacáridos estructurales que representan alrededor del 20-30%.

Minerales: Incluyen calcio, magnesio y otros oligoelementos.

Lípidos: Presentes en menor proporción, alrededor del 5-10%.

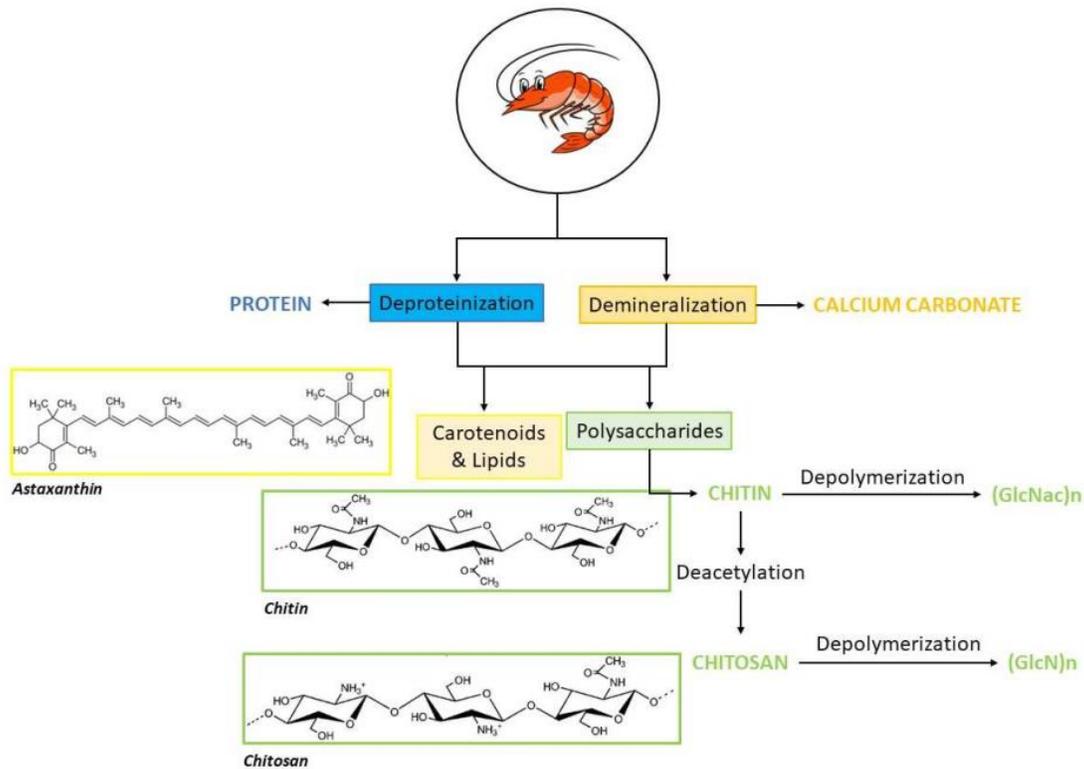


Figura 1 Clases de compuestos presentes en la cáscara de langostino con aplicaciones industriales. (Rossi et al., 2024)

La fracción proteica de estos residuos es particularmente valiosa debido a sus propiedades nutricionales y funcionales, y es objeto de numerosos estudios para su recuperación y uso en diversas aplicaciones industriales y alimentarias.

1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA FRACCIÓN PROTEICA

Las proteínas son macromoléculas formadas por cadenas de aminoácidos que desempeñan una amplia variedad de funciones biológicas. Están presentes en todas las formas de vida y son esenciales para la estructura, función y regulación de los tejidos y órganos del cuerpo. Las proteínas en los residuos de langostinos incluyen varias clases importantes que tienen diferentes propiedades y potenciales aplicaciones.

Tipos de Proteínas en los Residuos de Langostinos: (Rossi et al., 2024)

Proteínas Estructurales: Estas incluyen colágeno y actina, que son importantes para la integridad estructural del exoesqueleto y los tejidos musculares.

Enzimas: Como quitinasas y proteasas, que participan en la degradación de quitina y proteínas.

Glicoproteínas: Proteínas unidas a carbohidratos, que tienen roles en la formación del exoesqueleto y en la protección contra patógenos.

Hemocianina: Una proteína transportadora de oxígeno que se encuentra en la hemolinfa de los langostinos.

Usos de las Proteínas de los Residuos de Langostinos: Las proteínas recuperadas de los residuos de langostinos tienen múltiples aplicaciones debido a sus propiedades nutricionales y funcionales (Abuzar et al., 2023):

Industria Alimentaria: Pueden utilizarse como suplementos proteicos en productos alimenticios, mejorando su contenido nutricional y funcionalidad.

Industria Cosmética: Los péptidos derivados de estas proteínas pueden ser utilizados en productos para el cuidado de la piel debido a sus propiedades hidratantes y regenerativas.

Biomedicina: Las proteínas y péptidos bioactivos tienen potencial en aplicaciones terapéuticas, como la cicatrización de heridas y la fabricación de biomateriales.

Agricultura: Los hidrolizados proteicos pueden ser utilizados como biofertilizantes o en la alimentación animal, mejorando la digestibilidad y el valor nutricional del pienso.

En resumen, la recuperación y utilización de la fracción proteica de los residuos de langostinos no solo ofrece una solución a los problemas de gestión de residuos, sino que también abre nuevas vías para el desarrollo de productos innovadores y sostenibles.

1.2. EXTRACCIÓN DE PRODUCTOS NATURALES

La extracción de compuestos naturales de diversas fuentes, como plantas, animales y microorganismos, ha sido un área de gran interés en la investigación científica y la industria durante décadas. Estos compuestos, poseen una amplia gama de propiedades biológicas y aplicaciones potenciales en campos como la medicina, la nutrición, la cosmética y la agricultura. La obtención eficiente de estos compuestos es crucial para su estudio y aplicación en diversas áreas.

1.2.1. MÉTODOS CONVENCIONALES DE EXTRACCIÓN

Los métodos convencionales de extracción han sido utilizados para la obtención de compuestos naturales debido a su simplicidad y viabilidad técnica. Entre estos métodos se incluyen el método de cambio de pH, el método de extracción con solventes, el tratamiento térmico y las hidrólisis enzimáticas ácidas o básicas.

- **Método de cambio de pH:** Este método implica la modificación del pH del medio de extracción para favorecer la solubilización de los compuestos deseados. Por ejemplo, la modificación del pH puede facilitar la extracción de compuestos ácidos o básicos que son insolubles en su forma natural.
- **Extracción con solventes:** La extracción con solventes implica el uso de disolventes orgánicos para disolver y recuperar los compuestos de interés de la materia prima. Este método es ampliamente utilizado debido a su versatilidad y eficacia en la extracción de una amplia variedad de compuestos.
- **Tratamiento térmico:** El tratamiento térmico se utiliza para desnaturalizar las proteínas y romper las estructuras celulares, lo que facilita la extracción de compuestos intracelulares.
- **Hidrólisis enzimática:** Utiliza enzimas específicas para descomponer las proteínas en sus componentes más pequeños, como péptidos y aminoácidos. Este proceso es altamente selectivo y permite un control preciso sobre las condiciones de operación, como la temperatura y el pH, lo cual minimiza la producción de productos secundarios no deseados.
- **Hidrólisis ácida:** Implica el uso de ácidos fuertes como el ácido clorhídrico (HCl) para romper los enlaces peptídicos en las proteínas y liberar los aminoácidos. Este método es conocido por su rapidez y eficiencia en la ruptura completa de proteínas, siendo especialmente útil para la descomposición de materiales resistentes.
- **Hidrólisis básica:** Emplea bases fuertes como el hidróxido de sodio (NaOH) para descomponer las proteínas. Este método es eficaz para tratar proteínas que son resistentes a otros tipos de hidrólisis (Majid Pakizeh et al., 2021). Es el método químico más utilizado para la desproteización de cáscaras de crustáceos, pero provoca la deacetilación parcial y la hidrólisis de la quitina.

Es importante tener en cuenta que el perfil de aminoácidos de las proteínas extraídas y el contenido de compuestos de sabor varían según la técnica de extracción aplicada, y esta debe ser rentable y respetuosa con el medio ambiente.

1.2.2. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN SOSTENIBLES Y DE INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS

Los métodos convencionales de extracción a menudo implican el uso de grandes cantidades de solventes, o ácidos/bases y energía, lo que puede generar residuos y representar riesgos para el medio ambiente y la salud humana. En respuesta a estas preocupaciones, se han desarrollado métodos de extracción sostenibles y de intensificación de procesos que buscan reducir el consumo de solventes y energía, así como minimizar los riesgos asociados. Estos métodos aprovechan tecnologías innovadoras y procesos más eficientes para la extracción de compuestos naturales.

Entre los métodos de extracción sostenibles y de intensificación de procesos, se encuentran (Chemat et al., 2020):

Extracción asistida con Microondas: La aplicación de microondas para la extracción de compuestos naturales ha ganado popularidad debido a su capacidad para calentar de manera rápida y uniforme los materiales, lo que conduce a una extracción más eficiente en menos tiempo y con menor consumo de energía.

Extracción asistida con Ultrasonidos: El ultrasonido es otra técnica que se utiliza para mejorar la extracción de compuestos naturales. Las ondas ultrasónicas generan microcavidades y microcorrientes en el medio de extracción, lo que aumenta la transferencia de masa y mejora la eficiencia de la extracción.

Extracción mediante Pulsos de campo eléctrico: Este método utiliza pulsos de campo eléctrico para aumentar la permeabilidad de las membranas celulares, facilitando así la liberación de compuestos intracelulares durante la extracción.

Descompresión Instantánea Controlada (Instant Controlled Pressure Drop, ICPD): Este enfoque implica someter a los materiales a un cambio instantáneo de presión controlado, lo que provoca la ruptura de las estructuras celulares y facilita la liberación de los compuestos deseados.

Procesamiento con fluidos sub- y supercríticos: Los fluidos sub- y supercríticos se utilizan como solventes en la extracción, ya que ofrecen propiedades únicas que permiten una extracción eficiente a temperaturas y presiones específicas, con una mínima huella ambiental.

Extrusión: Este método implica el uso de altas presiones y temperaturas para forzar la extracción de compuestos de los materiales de partida. Es especialmente útil para la extracción de aceites y lípidos de diversas fuentes.

Mecanoquímica: La aplicación de fuerzas mecánicas para facilitar reacciones químicas es una técnica emergente en la extracción de compuestos naturales. La molienda de los materiales junto con aditivos puede aumentar la eficiencia de la extracción.

Alta presión: La extracción a alta presión utiliza condiciones de presión elevada para mejorar la eficiencia de la extracción y reducir los tiempos de procesamiento.

Calentamiento óhmico, UV e IR: Estos métodos de calentamiento alternativos pueden ser utilizados para la extracción de compuestos naturales, ofreciendo ventajas en términos de eficiencia y selectividad.

Estos métodos de extracción sostenibles y de intensificación de procesos ofrecen una alternativa prometedora a los métodos convencionales, ya que permiten una extracción más eficiente y respetuosa con el medio ambiente, al tiempo que reducen el consumo de

solventes y energía, así como los riesgos asociados. Además, su aplicación puede conducir a la obtención de productos de mayor pureza y calidad. (Chemat et al., 2020)

1.2.3. FUNDAMENTOS DE LA EXTRACCIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS

La técnica de microondas ha surgido como una alternativa eficiente y ecológica a los métodos de calentamiento convencionales en la extracción y síntesis de compuestos naturales. Las microondas son radiaciones electromagnéticas de baja energía que se sitúan en la parte inferior del espectro electromagnético.

Las microondas pueden producir calentamiento en el medio, este se produce principalmente por dos mecanismos: la rotación dipolar y la conducción iónica. La rotación dipolar implica la interacción de las moléculas polares con el campo eléctrico cambiante de las microondas, lo que genera un movimiento de reorientación y transferencia de energía por fricción molecular. Por otro lado, la conducción iónica ocurre cuando los iones o especies iónicas libres en la disolución intentan orientarse en respuesta al campo eléctrico, provocando un rápido calentamiento.

Una ventaja significativa de la técnica de microondas es su capacidad para producir un calentamiento interno en los materiales, lo que resulta en una transferencia de energía más eficiente y tiempos de reacción más cortos en comparación con los métodos convencionales. Además, este proceso de calentamiento es independiente de la conductividad térmica del recipiente, lo que evita pérdidas de calor y mejora la eficiencia del proceso. También se destaca que el calentamiento selectivo de las microondas afecta directamente a las moléculas, lo que asegura una mayor eficiencia y la síntesis de productos más puros.

En resumen, las microondas se han convertido en una técnica ampliamente empleada para la aceleración de la síntesis de compuestos debido a sus ventajas en términos de mayor velocidad de reacción, tiempos de reacción más cortos, mayores rendimientos, ahorro de energía y reducción de reacciones secundarias.

1.2.4. UTILIZACIÓN DE MICROONDAS PARA LA EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS

La técnica de extracción de proteínas mediante microondas ha surgido como un enfoque prometedor para obtener proteínas de diversos materiales biológicos de manera rápida y eficiente. Este método se basa en el principio de calentamiento selectivo generado por las

microondas, que permite desnaturalizar y solubilizar las proteínas presentes en las muestras biológicas.

El proceso de extracción de proteínas utilizando microondas implica la aplicación controlada de radiación microondas a la muestra biológica en presencia de un solvente adecuado. La radiación microondas genera calor dentro de la muestra al interactuar con las moléculas polares presentes, lo que facilita la desnaturalización de las proteínas y su posterior solubilización en el solvente. Este método ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales de extracción de proteínas, como tiempos de extracción reducidos, mayor rendimiento de extracción y menor consumo de solventes (Chemat et al., 2020).

Además, la aplicación de microondas permite un calentamiento rápido y uniforme de la muestra, lo que garantiza una extracción más eficiente de las proteínas en comparación con los métodos convencionales de calentamiento. La capacidad de controlar con precisión la temperatura y el tiempo de exposición a las microondas también permite optimizar las condiciones de extracción para maximizar el rendimiento y la calidad de las proteínas obtenidas.

En resumen, la utilización de microondas para la extracción de proteínas ofrece una alternativa eficiente y rápida a los métodos convencionales, permitiendo obtener proteínas de alta calidad en tiempos reducidos y con un menor consumo de solventes.

En el artículo (H. el Knidri y col.) se compararon la desproteización de cáscara de langostino mediante tratamiento alcalino con (NaOH al 10% en una ratio 1/10 (w/v) a 80°C y 2h) con la desproteización en las mismas condiciones operacionales (10% NaOH, relación 1/10) con calentamiento en un microondas doméstico durante un tiempo de solo 8 min. En estas condiciones la quitina obtenida con el microondas presentaba un mayor peso molecular y un índice de cristalinidad mayor que la obtenida con calentamiento convencional (índice de cristalinidad = 89,70% frente a 78,35%) a pesar de haber utilizado solo 8 minutos de tratamiento con el microondas frente a 2h del proceso convencional. La tecnología con microondas, por tanto, permite obtener quitina más cristalina, de mayor peso molecular y con una reducción del tiempo de extracción de 1/15, poniendo de manifiesto que la irradiación con microondas es una manera de valorizar los residuos de langostinos más eficiente, respetuosa con el medio ambiente y que ahorra más energía.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se utiliza la tecnología de calentamiento con microondas buscando incrementar la sostenibilidad del proceso, no solo por la reducción de tiempos que supone sino también porque se utiliza exclusivamente agua como disolvente. Este enfoque, evita el uso de solventes químicos tradicionales. Desde una perspectiva ambiental, elimina la necesidad de ácidos y bases fuertes, reduciendo significativamente la generación de residuos. Este enfoque está alineado con los principios de la química verde, que buscan minimizar el impacto ambiental de los procesos químicos. Económicamente, este método es más accesible y rentable, ya que se eliminan los costos

asociados con la compra y disposición de productos químicos. El proceso también se simplifica al evitar múltiples etapas de neutralización y lavado.

1.2.5. MODELOS CINÉTICOS DE EXTRACCIÓN

Los modelos cinéticos de extracción desempeñan un papel crucial en la comprensión y optimización de los procesos de extracción de compuestos bioactivos, como las proteínas, en la industria alimentaria. Estos modelos permiten predecir la cinética de transferencia de masa durante la extracción, lo que facilita la optimización de las condiciones de operación para mejorar los rendimientos y la calidad de los productos finales.

Existen modelos cinéticos ampliamente utilizados en la industria alimentaria, como el modelo de difusión intrapartícula, el modelo de difusión externa y el modelo de dos fases. Cada uno de estos modelos tiene sus propias aplicaciones y limitaciones, pero en conjunto proporcionan herramientas poderosas para caracterizar y optimizar los procesos de extracción.

Utilizando el **Modelo cinético de difusión en estado no estacionario** basado en la segunda ley de Fick (Dabbour et al., 2021) se consideran las siguientes suposiciones.

- Las partículas se consideran esferas con un diámetro promedio.
- La suspensión de extracción se mezcla adecuadamente debido a la microturbulencia y las burbujas de cavitación, minimizando la resistencia externa a la transferencia de masa.

Basándose en estas suposiciones, la transferencia de masa de proteína soluble se describe mediante el modelo de difusión de primer orden según la Ecuación 1:

$$\frac{dC}{dt} = D_s \cdot \left(r^2 \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: C (mg/mL) representa la concentración de la proteína soluble, r (m) representa el radio de la partícula esférica, D_s (m^2/s) denota el coeficiente de difusión efectiva de la proteína soluble, t (s) denota el tiempo de tratamiento.

Las condiciones iniciales y de contorno para resolver el modelo de difusión son:

$$t = 0, C = C_0; \quad r = R, \frac{dC}{dt} \cdot V = -D_s \cdot S \cdot \left(\frac{dC}{dr} \right)_{r=R}$$

Donde: V (mL) es el volumen de la suspensión de muestra, R (m) es el radio de la partícula, S (m²) es el área de contacto entre el solvente de extracción y las partículas.

La integración de las condiciones iniciales y de contorno conduce a la Ecuación 2:

$$\ln \frac{(C_{\infty}-C_0)}{(C_{\infty}-C)} = kt + \ln \frac{C_{\infty}}{(C_{\infty}-C_0)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: C_∞ (mg/mL) representa la concentración de equilibrio de la proteína soluble, C₀ (mg/mL) representa la concentración inicial de la proteína soluble, k (min⁻¹) es la constante de velocidad y t el tiempo de extracción (min).

La constante cinética (k) se puede determinar experimentalmente mediante la pendiente de la gráfica del logaritmo de (C_∞ - C₀) / (C_∞ - C) versus el tiempo de extracción.

Esta ecuación cinética de primer orden permite describir la extracción mediante difusión en estado no estacionario, considerando la geometría de las partículas, la mezcla de la suspensión y el coeficiente de difusión efectiva.

El valor del parámetro k se puede definir como (ecuación 3):

$$k = \frac{\pi^2 \cdot D_s}{R^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo D_s el coeficiente de difusión efectiva y R el radio de las partículas.

Existe también **el modelo de Ley de Potencias** (Xie et al., s. f.) el cual se ha utilizado ampliamente para describir procesos de extracción sólido-líquido. Este modelo se expresa con la ecuación 4:

$$C = b \cdot t^n \quad \text{Ecuación 4}$$

C (mg/mL) es la proteína extraída en función del tiempo de extracción (min), b es una constante relacionada con la tasa de extracción (mg/mL·min), y n es el exponente de difusión (adim). Al transformar esta ecuación a una forma logarítmica, se obtiene una ecuación lineal (ecuación 5):

$$\ln(C) = n \cdot \ln t + \ln b \quad \text{Ecuación 5}$$

El modelo de Primer Orden es ampliamente utilizado para describir la velocidad de muchas reacciones químicas y procesos de extracción. En este modelo, la velocidad de reacción es directamente proporcional a la concentración de un solo reactante. La ecuación diferencial que describe este modelo se puede expresar según la ecuación 6:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde C (mg/mL) es la concentración del reactante (o del soluto en el caso de la extracción), t es el tiempo (min), k (min⁻¹) es la constante de velocidad de primer orden.

Al integrar esta ecuación diferencial, se obtiene la ecuación integrada de primer orden (ecuación 7):

$$C = C_0 e^{-kt} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde C₀ es la concentración inicial de proteína disuelta (mg/mL).

La linealización de este modelo se logra aplicando el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación integrada (ecuación 8):

$$\ln C = \ln C_0 - kt \quad \text{Ecuación 8}$$

Modelo de Segundo Orden (Xie et al., s. f.) se ha usado para simular la extracción sólido-líquido de plantas. Asume que el proceso es función de la proteína soluble en suspensión, con el rendimiento de extracción en equilibrio constante bajo las mismas condiciones. La ecuación se expresa en la ecuación 9:

$$\frac{dC}{dt} = k(C_s - C)^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde C es el rendimiento de proteína extraída (mg/g) en el tiempo t (min), k es la constante de tasa de extracción de segundo orden (g/mg/min), y C_s es el rendimiento de extracción en equilibrio (mg/g). La forma lineal de esta ecuación es (ecuación 10):

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_s} + kt \quad \text{Ecuación 10}$$

Cada uno de estos modelos tiene sus propias suposiciones y limitaciones, por lo que la selección del modelo adecuado depende de las características específicas del sistema y de los datos experimentales disponibles. En el apartado 3.2.2 AJUSTE DE LOS DATOS CINÉTICOS A DIFERENTES MODELOS se evaluarán estos modelos cinéticos para determinar cuál se ajusta mejor al comportamiento regido por los datos experimentales.

Capítulo 2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Objetivo General: Este trabajo fin de grado tiene como objetivo principal evaluar y optimizar el proceso de extracción de proteínas a partir de residuos de langostino utilizando la tecnología de extracción asistida con microondas. Además, se pretende realizar el dimensionado básico de una etapa de extracción aplicando esta tecnología.

Objetivos Específicos:

1. Desarrollo Experimental:

Realizar experimentos a escala de laboratorio para investigar la viabilidad y eficiencia del proceso de extracción asistida con microondas.

Estudiar la cinética de extracción de proteínas con agua a diferentes temperaturas utilizando la tecnología de extracción asistida con microondas

Ajustar los resultados experimentales obtenidos con modelos cinéticos de extracción sólido-líquido existentes.

2. Optimización del Proceso de Extracción:

Evaluar el efecto de variables operativas clave, como la temperatura y el tiempo de operación, en la eficiencia de la extracción acuosa de proteínas asistida con microondas.

Identificar el punto óptimo de temperatura y tiempo de extracción que maximice la cantidad de proteína extraída minimizando su degradación.

3. Caracterización y Análisis:

Aplicar técnicas de caracterización y análisis de biomasa, incluyendo el análisis BCA (Bicinchoninic Acid Assay), para cuantificar las proteínas extraídas.

4. Dimensionado Básico:

Realizar cálculos básicos de balances de materia y energía para el diseño de una planta piloto que implemente la extracción de proteínas asistida con microondas.

Utilizar el código ASME BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code) Sección VIII, División 1, para el diseño mecánico de uno de los recipientes de la etapa de extracción.

Utilizar el código UNE-EN-1991-4, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 4: silos y depósitos para el diseño mecánico de uno de los tanques de la etapa de extracción.

5. Contribución al desarrollo de procesos y productos en el marco de la economía circular y **de acuerdo con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Agenda 2030:**

Proporcionar una base científica y técnica para la utilización de residuos de langostino como fuente de proteínas, contribuyendo a la sostenibilidad y aprovechamiento de subproductos de la industria pesquera y de acuicultura.

Demostrar la eficiencia y viabilidad de la extracción asistida con microondas como una técnica de intensificación de procesos, que puede ser aplicada en la industria para mejorar la recuperación de proteínas y reducir el impacto ambiental.

Demostrar la viabilidad de la sustitución de disolventes alcalinos (NaOH) por agua caliente presurizada en la etapa de desproteización de cáscaras de langostinos.

Capítulo 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS DE RESIDUOS DE LANGOSTINO CON MICROONDAS

3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1. EQUIPOS

Para la realización de los experimentos de extracción de proteínas de residuos de langostino asistida con microondas, se utilizaron los siguientes equipos:

Microondas Monowave 300 de Anton Paar (Figura 2): Es un reactor de microondas de alto rendimiento, especialmente diseñado para la síntesis y la extracción a pequeña y mediana escala. Este equipo se distingue por sus capacidades avanzadas y su precisión en el control de las condiciones experimentales. Puede alcanzar temperaturas de hasta 300°C y presiones de hasta 30 bar, con un volumen de trabajo de hasta 30 mL. Utiliza un sensor infrarrojo (IR) y un termómetro de rubí de fibra óptica para medir la temperatura simultáneamente, lo que asegura una precisión elevada. El Monowave 300 es un reactor monomodal cerrado, en el que la radiación incide directamente sobre un punto específico del recipiente, creando una onda permanente que permite un calentamiento controlado y eficiente. Gracias a los sensores de temperatura y presión, se puede monitorear y ajustar las condiciones internas en tiempo real, garantizando la seguridad y la eficiencia del proceso. Además, el equipo está diseñado para detener automáticamente la radiación si se superan los valores límite establecidos para temperatura o presión. La tecnología de microondas del Monowave 300 permite un calentamiento rápido y uniforme, reduciendo significativamente el tiempo de extracción en comparación con métodos tradicionales.

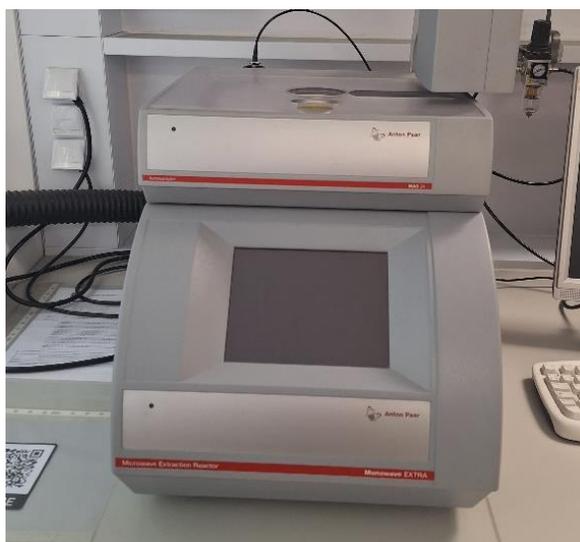


Figura 2. Microondas Monowave 300 de Anton Paar

Filtro a vacío: La filtración a vacío es esencial para la separación de mezclas sólido-líquido. Se utiliza un embudo Büchner con un filtro adecuado y un matraz Kitasato, conectado a una

bomba de vacío modelo Welch IImvac Membranpumpe chemiefest MPC 101 Z (figura 3). Esta configuración permite la rápida y eficiente separación de los componentes, recogiendo el líquido en el Kitasato y reteniendo el sólido en el filtro.

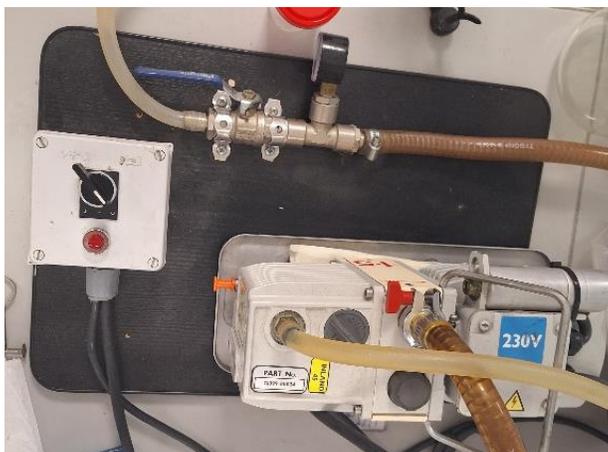


Figura 3. Bomba de vacío (Membranpumpe)

Balanza analítica: La balanza analítica Adventurer Pro AV264C (figura 4), con una precisión de 0,1 miligramos, es fundamental para obtener medidas exactas de los reactivos y muestras. Su diseño incluye una base con un plato de pesaje y un recubrimiento de cuatro paredes y techo, minimizando las interferencias ambientales.

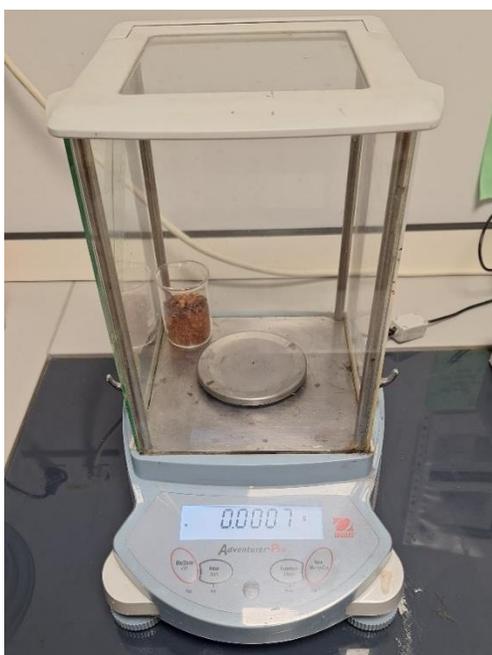


Figura 4. Balanza analítica Adventurer Pro AV264C

Estufa de laboratorio: La estufa universal Memmert EXCELLENT de 108L (figura 5) se utiliza para el secado uniforme de la fase sólida extraída. Este equipo es capaz de mantener altas temperaturas de manera constante, asegurando la eliminación completa de la humedad de las muestras sólidas.



Figura 5 Estufa universal Memmert EXCELLENT

Equipos de Laboratorio Adicionales:

Recipientes de Vidrio: Utilizados para la preparación y almacenamiento de soluciones. Incluyen vasos de precipitados de diversos tamaños.

Pipetas y Micropipetas: Para la medición precisa y transferencia de líquidos en pequeñas cantidades.

Agitadores Magnéticos: Para mezclar las soluciones de manera controlada.

3.1.2. MATERIA PRIMA

En este Trabajo Fin de Grado se trabaja con mudas de *Litopenaeus Vannamei* proporcionadas por la empresa Noray Seafood, específicamente de sus instalaciones en Medina del Campo (Valladolid). La caracterización de esta materia prima ha sido realizada por el estudiante predoctoral Mauricio Masaru en el laboratorio del grupo PressTech de la Universidad de Valladolid. La Tabla 1. recoge la composición de la materia prima utilizada

en la parte experimental de este TFG en base seca, siendo el contenido en humedad de este sólido cuando se ha caracterizado del $1,72 \pm 0,06 \%$.

Tabla 1. Composición de las mudas de *Litopenaeus Vannamei* utilizadas como materia prima.

Compuestos químicos	g/100 g en base seca
Minerales (cenizas)	$53,7 \pm 0,5$
Ácidos grasos	$3,1 \pm 0,3$
Quitina (fibra cruda)	$17,8 \pm 0,7$
Proteína	$10,6 \pm 0,4$
Aminoácidos libres	$1,37 \pm 0,12$

3.1.3. ANÁLISIS DE PROTEÍNAS Y RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN

La cuantificación de proteínas se realizó mediante el análisis del ácido bicinconínico (BCA), en el cual la absorbancia de la muestra es proporcional a la concentración de proteínas. Para este ensayo se utilizó el Pierce™ BCA Protein Assay Kit, que incluye reactivos como NaOH, H₂SO₄ y éter de petróleo.

Procedimiento del Método BCA:

Primero se prepara el Reactivo de Trabajo mezclando los reactivos A y B en una proporción de 50:1, respectivamente. Las muestras se preparan colocando 0,1 mL de agua destilada (para el blanco) en tubos de vidrio. Se agregan 2 mL de la mezcla de reactivos preparada previamente. Las muestras se agitan y se incuban a 37°C durante 30 minutos. Después del periodo de incubación, las muestras se enfrían a temperatura ambiente se colocan en el espectrofotómetro leyendo la absorbancia a una longitud de onda de 562 nm. La absorbancia medida es proporcional a la concentración de proteínas en la muestra, que se determina mediante curva de calibrado preparada diariamente con patrones del método. Este análisis permite obtener los miligramos de proteína extraída por cada gramo de muestra.

Cálculo del Rendimiento de Extracción de Proteínas:

El porcentaje de proteínas extraídas del residuo se calcula como el porcentaje de proteína extraída en comparación con la masa inicial de materia prima utilizada en la extracción, definido en la Ecuación 11.

$$\%Proteínas\ extraídas\ del\ residuo = \frac{Proteínas\ extraídas\ (g)}{Masa\ de\ materia\ prima\ (g)} \cdot 100 \quad Ecuación\ 11$$

Por otro lado, el rendimiento de la extracción se define como las proteínas extraídas entre las proteínas que inicialmente tenía la materia prima como se ve en la Ecuación 12.

$$\text{Rendimiento de extracción total (\%)} = \frac{\text{Proteínas extraídas (g)}}{\text{Proteínas de la materia prima (g)}} \cdot 100 \text{ Ecuación 12}$$

3.1.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este procedimiento experimental, se siguen una serie de pasos detallados para asegurar la extracción y cuantificación precisa de proteínas a partir de las mudas de *Litopenaeus Vannamei*.

El procedimiento comienza con el pesaje de 0,3333 gramos de polvo de mudas de langostino utilizando una balanza analítica de alta precisión. Este paso es crucial para asegurar que la cantidad de materia prima sea consistente en cada experimento. Una vez pesado el polvo, se añaden 20 mL de agua destilada tipo III usando una micropipeta. En todos los experimentos se ha utilizado una relación sólido/líquido de 1/60 (g/mL) optimizada en trabajos previos del grupo, asegurando una extracción eficiente de proteínas.

La mezcla de polvo y agua se coloca en un vial de vidrio de 30 mL diseñado para su uso en el microondas Monowave 300 de Antoni Paar. Este vial tiene una tapa y un septum que permiten introducir un termómetro de rubí, de tal manera que no toca el líquido, lo que permite una medición precisa de la temperatura de la suspensión sin interferencias. Además, el microondas cuenta con un termómetro IR que mide la temperatura de pared del vial. Se coloca un imán agitador en el interior del vial para asegurar una mezcla homogénea durante el proceso de calentamiento.

Una vez preparada la muestra en el vial, se introduce en el microondas Anton Paar Monowave 300. Las condiciones del microondas se configuran de la siguiente manera:

Calentamiento rápido: Se selecciona la opción "heat as fast as possible" para alcanzar la temperatura objetivo, que varía entre 150°C y 230°C según el experimento, utilizando una potencia de 850W y una velocidad de agitación de 1000 rpm.

Tiempo de mantenimiento: Una vez alcanzada la temperatura de set, se mantiene la mezcla a esta temperatura durante un tiempo específico que varía entre 0 y 18 minutos. Durante este periodo, se mantiene la misma potencia (850W) y velocidad de agitación (1000 rpm).

Enfriamiento: Después del tiempo de mantenimiento, la mezcla se enfría rápidamente hasta 70°C.

Las condiciones de operación de los diferentes experimentos realizados se recogen en la tabla 2:

Tabla 2. Condiciones de trabajo en los diferentes experimentos. Masa inicial de sólido = 0,333g. Volumen de agua = 20 mL. Agitación = 1000 rpm.

Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (t, min)
150	0
	6
	12
	18
170	0
	6
	12
	18
200	0
	6
	12
230	0
	6
	12

Después del tratamiento en el microondas, la mezcla se filtra utilizando un sistema de filtración a vacío. Este proceso permite separar el líquido de los sólidos de manera eficiente. El líquido filtrado, que contiene las proteínas extraídas, se recoge, se pesa en la balanza y se guarda inmediatamente en el frigorífico (4°C) para mantener las propiedades de la proteína intactas.

Para asegurarse de que todos los sólidos han sido removidos, se realiza un lavado adicional con agua destilada tipo III. Los sólidos restantes se arrastran con esta agua y se sigue filtrando. Los sólidos recuperados se secan en una estufa de laboratorio a temperatura controlada durante 24h a 105°C para eliminar la humedad.

Al día siguiente, los sólidos secos se recogen y se almacenan en recipientes de plástico cerrados a temperatura ambiente. Luego, se procede con el análisis de proteínas extraídas mediante el método BCA (Bicinchoninic Acid Assay).

3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CINÉTICA DE EXTRACCIÓN CON AGUA Y ASISTIDA CON MICROONDAS

3.2.1. RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE EXTRACCIÓN

En esta sección, se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos mediante la extracción con agua y asistida con microondas. Se detallan los experimentos realizados para estudiar la cinética de extracción. A los experimentos realizados se añaden otros previamente realizados por el estudiante predoctoral Mauricio Masaru en el laboratorio del grupo PressTech de la Universidad de Valladolid. Datos recogidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos

T (°C)	t(min)	% Proteínas extraído	Rendimiento Extracción (%)
100	0	2,16 ± 0,05	20,33 ± 0,13
	2	2,22 ± 0,00	20,90 ± 0,00
	4	2,32 ± 0,07	21,93 ± 0,18
	6	2,30 ± 0,00	21,70 ± 0,00
	8	2,37 ± 0,00	22,33 ± 0,00
	10	2,43 ± 0,00	22,96 ± 0,00
	12	2,49 ± 0,00	23,52 ± 0,00
135	0	2,28 ± 0,06	21,47 ± 0,11
	2	2,66 ± 0,00	20,90 ± 0,00
	4	2,80 ± 0,00	24,19 ± 0,54
	6	3,11 ± 0,00	29,37 ± 0,00
	8	3,42 ± 0,00	32,24 ± 0,00
	10	3,60 ± 0,00	33,96 ± 0,00
	12	3,81 ± 0,00	35,98 ± 0,00
150	0	3,10 ± 0,30	29,18 ± 0,65
	6	4,92 ± 0,06	46,45 ± 0,15
	12	5,80 ± 0,20	52,83 ± 0,59
	18	5,50 ± 0,10	54,72 ± 0,00
170	0	3,33 ± 0,07	31,37 ± 0,17
	6	6,50 ± 0,40	61,40 ± 0,92
	12	7,50 ± 0,40	70,64 ± 1,12
	18	6,80 ± 0,00	63,87 ± 0,00
200	0	7,80 ± 0,30	73,42 ± 0,82
	6	8,40 ± 0,50	79,08 ± 1,21
	12	8,50 ± 0,40	80,16 ± 1,11
230	0	8,90 ± 0,03	84,06 ± 0,79
	6	7,25 ± 0,12	68,38 ± 0,29
	12	6,86 ± 0,14	64,72 ± 0,34

Tabla completa en el Anexo I.

Como se puede observar en la tabla 3., a mayores temperaturas se obtiene un rendimiento de extracción mayor. Sin embargo, temperaturas demasiado altas como por ejemplo 230°C, se produce una disminución del rendimiento a medida que se aumenta el tiempo de mantenimiento en el microondas. De esto se puede suponer que a esa temperatura se produce la degradación de la proteína. El análisis de BCA determina proteínas con pesos moleculares por encima de 2000Da, por lo que no se están cuantificando péptidos más pequeños ni aminoácidos libres, u otros productos de degradación como el amonio. Esto mismo se observa a temperaturas de 150°C y 170°C cuando se trabaja con tiempos largos de 18 minutos, obteniéndose valores de proteína extraída menores que a 12 minutos. Alargar el tiempo, incluso a esas temperaturas más bajas también lleva a obtener más productos de degradación no cuantificados por el método BCA.

Se representan estos mismos datos en la figura 6:

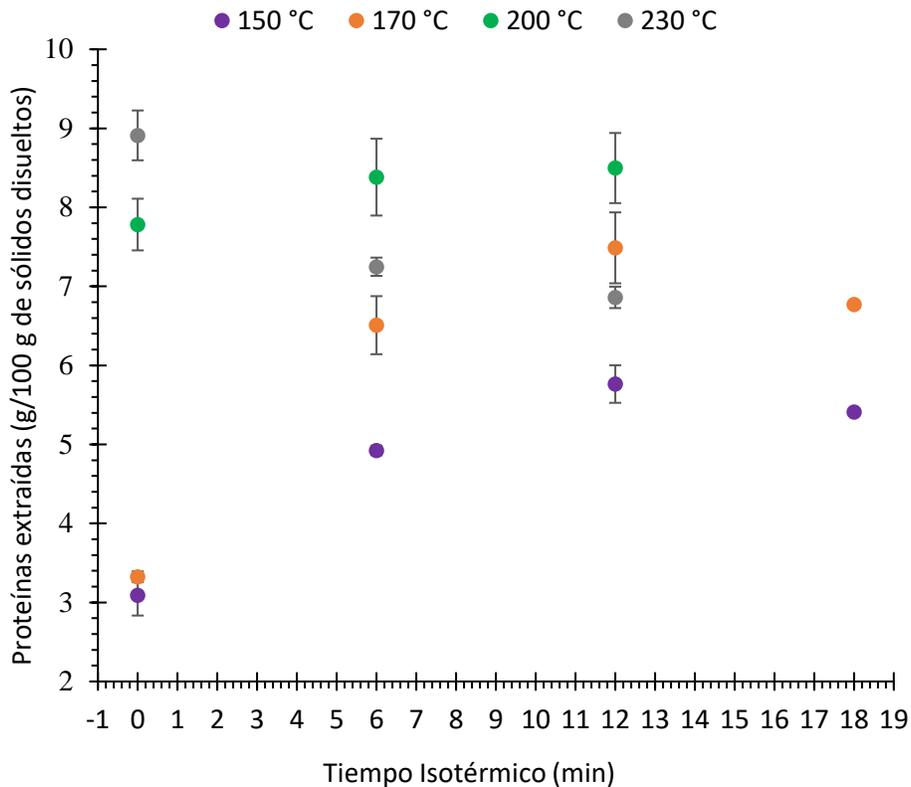


Figura 6. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos

Se puede deducir entonces que, para mayores rendimientos hay que escoger temperaturas altas sin que haya degradación de la proteína. Por lo que, la temperatura óptima es de 200 °C. Por otro lado, la diferencia de rendimientos entre 6 y 12 minutos es mínima por lo tanto se escoge como óptimo 6 minutos ya que favorece al ahorro de energía.

3.2.2. AJUSTE DE LOS DATOS CINÉTICOS CON DIFERENTES MODELOS MATEMÁTICOS.

En este apartado se procede a mostrar los resultados del ajuste a los modelos cinéticos descritos en el apartado 1.2.5 MODELOS CINÉTICOS DE EXTRACCIÓN.

No se han ajustado los datos obtenidos a 230 °C porque solo se ha cuantificado proteína por BCA, método que solo cuantifica proteínas por encima de 2kDa de peso molecular. Para 230 °C, como ya se ha comentado se produce degradación de la proteína dando lugar a productos como aminoácidos libres y amonio. Por ello, a medida que aumenta el tiempo, a esta temperatura, la BCA en el líquido va disminuyendo, porque van apareciendo esos productos de degradación. Es por esto, que en este TFG no se van a tener en cuenta los datos experimentales a 230°C en los ajustes cinéticos, ya que se necesitaría un modelo que incorporara las cinéticas de degradación y una cuantificación experimental de esos productos de degradación para su validación.

La dinámica que se ha seguido para el ajuste de los datos experimentales con los diferentes modelos cinéticos del apartado 1.2.5. es representar gráficamente la linealización de todos ellos de manera que si verdaderamente estas representaciones responden una recta se deduce que el modelo se ajusta a la cinética real de los experimentos.

Primeramente, para el Modelo cinético de difusión en estado no estacionario según (Dabbour et al., 2021) se obtuvo la linealización recogida en la Ecuación 2

La integración de las condiciones iniciales y de borde conduce a la Ecuación 2:

$$\ln \frac{(C_{\infty}-C_0)}{(C_{\infty}-C)} = kt + \ln \frac{(C_{\infty})}{(C_{\infty}-C_0)} \quad \text{Ecuación 2}$$

La constante cinética (k) es la pendiente de la recta cuando representamos el logaritmo de $(C_{\infty} - C_0) / (C_{\infty} - C)$ frente al tiempo de extracción. Representando esta linealización se obtiene la figura 7:

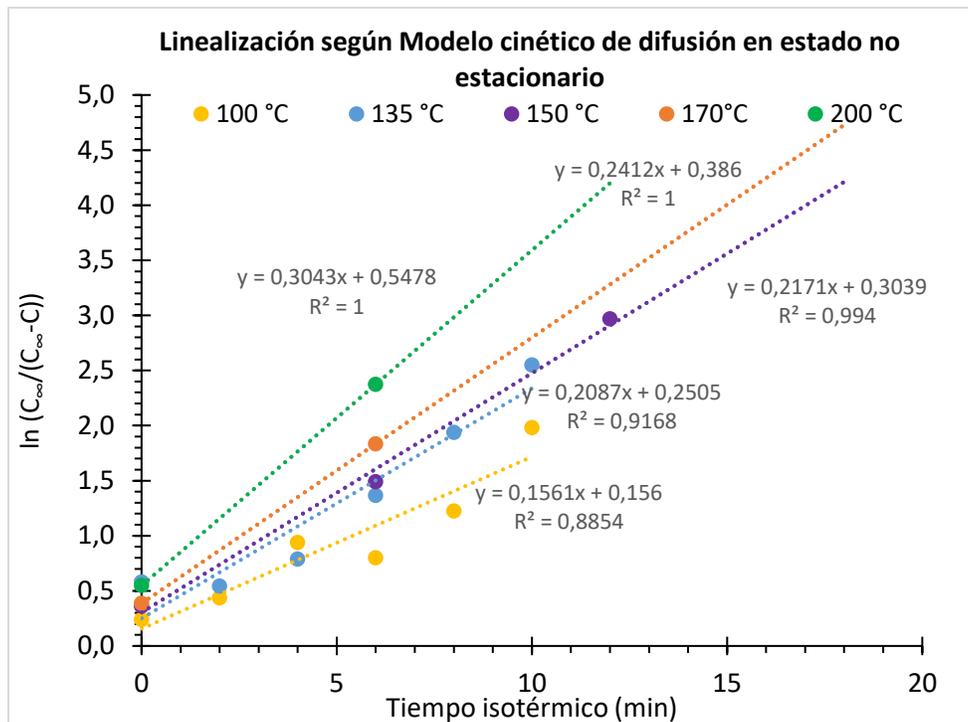


Figura 7. Linealización según Modelo cinético de difusión en estado no estacionario para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.

En el caso de 170 y 200 °C solo se obtienen dos puntos debido a que se tienen datos para 0, 6 y 12 minutos tomando el valor a 12 minutos como el valor de C_{∞} , por lo que, en el momento de hacer los cálculos a ese tiempo no se obtienen valores. Sin embargo, para el resto de las temperaturas se tienen más valores a otros tiempos. Analizando el resto de temperaturas 100, 135 y 150 °C se observa que el ajuste es bueno obteniendo R^2 cercanas a 1 en todos los casos.

Con el modelo de Ley de Potencias (Xie et al., s. f.) se obtiene la linealización de la ecuación 5.

$$\ln(C) = n \cdot \ln t + \ln b \quad \text{Ecuación 5}$$

De igual forma se representa gráficamente, en este caso como hay que realizar el logaritmo del tiempo se tomará el tiempo total. Este se define como el tiempo de mantenimiento sumado al tiempo que tarda en llegar a esta temperatura. Esto se debe a que para tiempo de mantenimiento igual a cero no se puede realizar el logaritmo y se perderían esos puntos de la recta. Se representa en la figura 8.

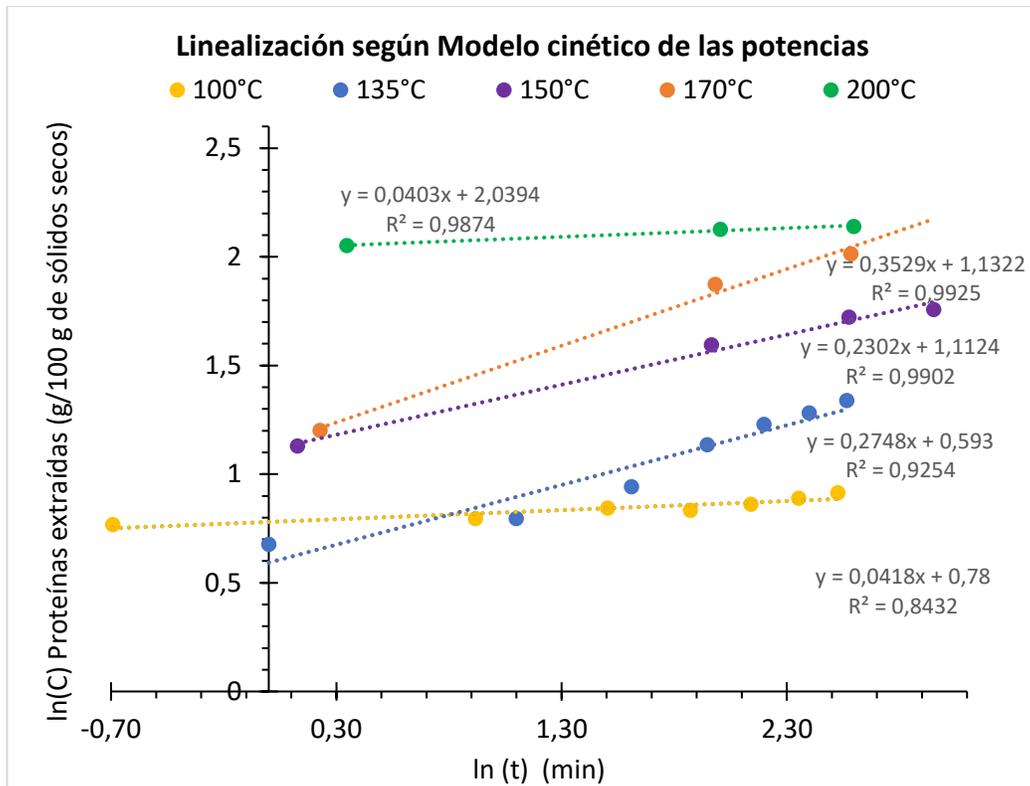


Figura 8. Linealización según Modelo cinético de las potencias para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.

Con el modelo de la ley de la potencia también se obtienen buenos valores de correlación para las temperaturas altas (150 °C, 170 °C y 200 °C) pero no son tan buenas para las temperaturas más bajas (100 °C y 135 °C).

Si se utiliza el Modelo de Primer Orden (ecuación 8), la representación del ajuste con este modelo se incluye en la figura 9.

$$\ln C = \ln C_0 - kt$$

Ecuación 8

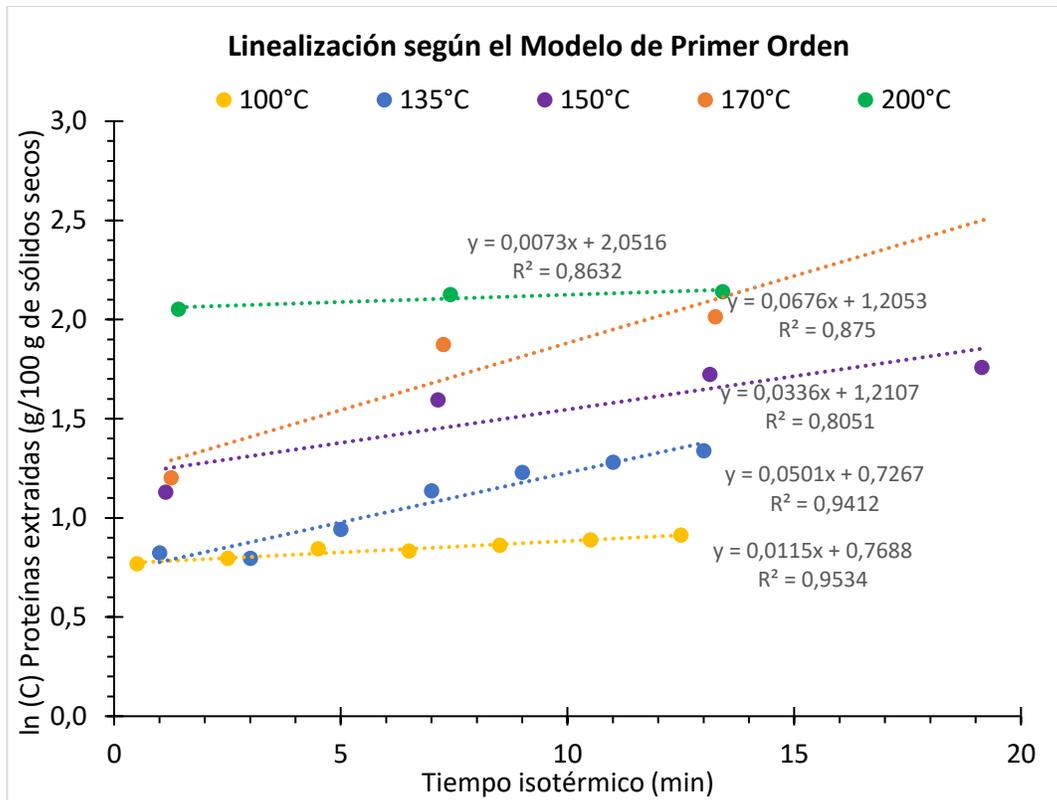


Figura 9. Linealización según Modelo cinético de primer orden para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.

Los valores más bajos de R^2 hacen suponer que el modelo de primer orden es menos adecuado que los dos anteriores.

Finalmente, según el Modelo de Segundo Orden (ecuación 10), los ajustes de las diferentes temperaturas con este modelo se recogen en la figura 10.

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_s} + kt \quad \text{Ecuación 10}$$

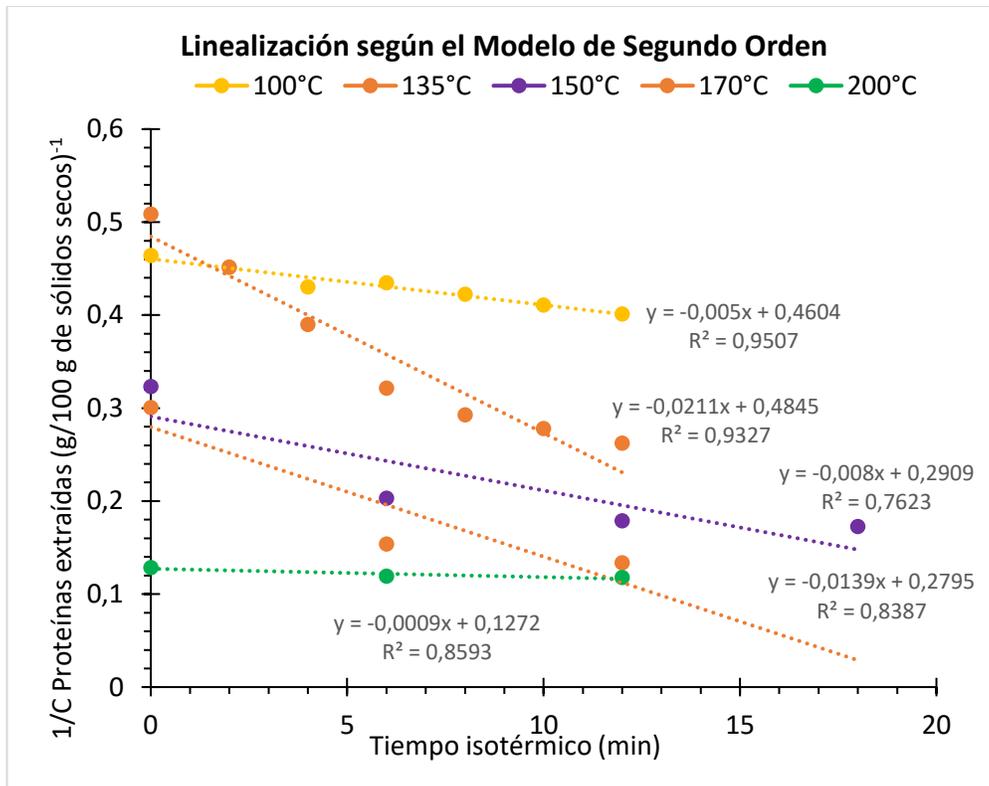


Figura 10. Linealización según Modelo cinético de segundo orden para temperaturas de 100, 135, 150, 170 y 200 °C.

Tras observar esta gráfica (figura 10) se puede deducir que no es un buen modelo para ajustar estos datos experimentales debido a los valores bajos de R².

En relación con todo lo comentado sobre los cuatro modelos cinéticos estudiados, el modelo que mejor ajusta los datos experimentales es el **Modelo cinético de difusión en estado no estacionario**.

Los valores de las constantes de velocidad (k) obtenidas con el modelo cinético de difusión en estado no estacionario seleccionado se recogen en la tabla 4, así como los valores del coeficiente de difusión calculados a partir de la constante de velocidad y el diámetro D50 es de 226 μm y D90 de 483 μm. D50 implica que el 50% de la muestra tiene ese diámetro, en cambio D90 significaría el 90% de muestra. Se elige el valor de 226 μm para así tomar un valor medio. Es decir, el radio es de 113 μm. Siguiendo la ecuación 3 se obtiene:

Tabla 4. Valores de la constante de velocidad (k) y constante de difusión obtenidos con el modelo cinético de difusión en estado no estacionario

T(°C)	k (min ⁻¹)	Ds (m ² ·min ⁻¹)
100	0,16	1,97E-08
135	0,21	2,63E-08
150	0,22	2,74E-08
170	0,24	3,04E-08
200	0,30	1,75E-07

Tablas con los cálculos de la cinética de extracción en el Anexo II.

3.2.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA.

El estudio del efecto de la temperatura es fundamental para comprender y optimizar los procesos de recuperación de proteínas. La temperatura afecta la estabilidad y desnaturalización de las proteínas, lo que puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso.

En este contexto, la ecuación de Arrhenius puede usarse para estudiar cómo la temperatura afecta a la tasa de extracción de proteínas. La ecuación de Arrhenius se utiliza normalmente para reacciones químicas. En la extracción de proteínas, el proceso no implica una transformación química de las moléculas de proteína, sino un cambio físico de su ubicación desde la matriz sólida a la fase líquida. Sin embargo, la ecuación de Arrhenius puede tener cierta utilidad en este contexto, pero con precauciones y consideraciones específicas. La constante de velocidad (k) en la ecuación de Arrhenius no representa la tasa de una reacción química, sino la tasa de transferencia de masa de las proteínas desde la fase sólida a la líquida. La "energía de activación" (E_a) no representa la energía necesaria para romper enlaces químicos, sino la energía requerida para superar las barreras de difusión y transporte de las proteínas.

La Ecuación de Arrhenius se define como (ecuación 13):

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad \text{Ecuación 13}$$

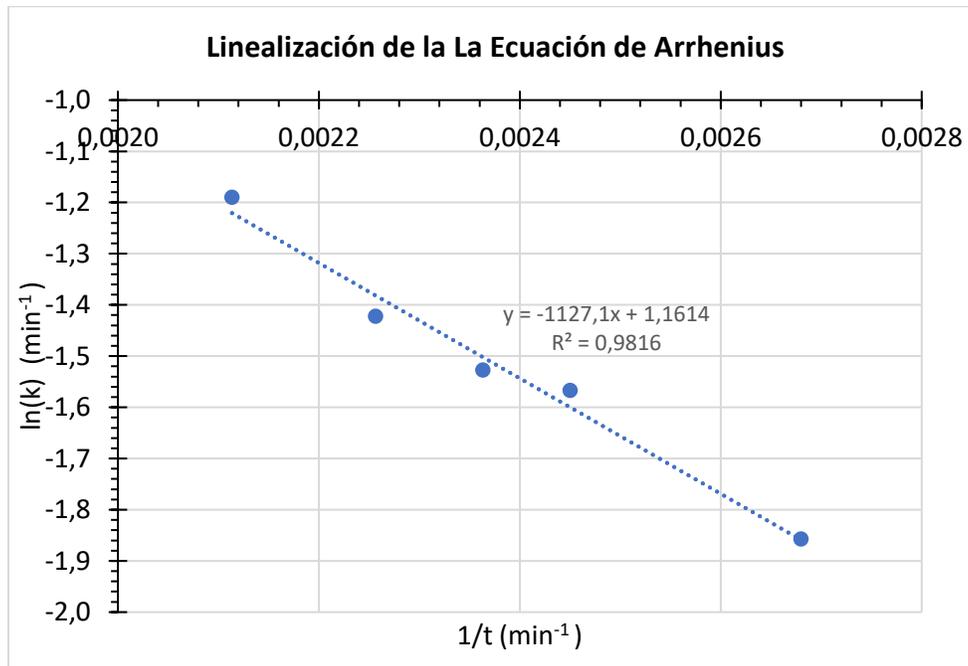
Donde A es el factor pre-exponencial, E_a es la energía de activación, R es la constante de los gases (8,314 J/mol·K) y T la temperatura en Kelvin.

Para determinar energía de activación y factor pre-exponencial, se necesita linealizar la ecuación anterior aplicando logaritmos a ambos lados (ecuación 14):

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 14}$$

De esta forma, conociendo la temperatura y la constante cinética calculada en el apartado anterior y graficando $\ln(k)$ frente a $1/T$ se puede conocer la pendiente y la ordenada de manera que se pueda despejar la energía de activación y el factor pre-exponencial.

Estos cálculos se realizarán únicamente para el modelo escogido en el apartado anterior.



Se obtuvo la siguiente ecuación de la recta linealizada de la Ec. De Arrhenius:

$$\ln(k) = -1127,1 \left(\frac{1}{T}\right) + 1,1614$$

con $R^2 = 0,981$ por lo que:

$$\frac{Ea}{R} = 1127,1 \rightarrow Ea = 9371,16 \frac{J}{mol}$$

$$\ln(A) = 1,1614 \rightarrow A = 3,1644 \text{ min}^{-1}$$

La constante de velocidad (que en la ecuación de Arrhenius representa la tasa de transferencia de masa de las proteínas desde la fase sólida a la líquida) aumenta con la temperatura.

La "energía de activación" (Ea) calculada de 9371,16 J/mol es la energía requerida para superar las barreras de difusión y transporte de las proteínas. Comparando este valor con otros de bibliografía se puede resaltar un estudio sobre la extracción de gósipol (polifenol)

de harina de la semilla de la planta de algodón desgrasada con etanol (Surendra Kumar Sharma & Sushil Kumar Kansal, 2020) que obtuvieron una energía de activación para este proceso de 6099 J/mol. Comparando los resultados se puede ver que son valores del mismo orden.

El análisis mediante la ecuación de Arrhenius permite entender cómo la temperatura afecta la disolución de proteínas, proporcionando valores de energía de activación y factor pre-exponencial que son cruciales para modelar y optimizar este proceso de tratamiento.

3.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este trabajo se ha estudiado la extracción de proteínas a partir de residuos de langostino (*Litopenaeus Vannamei*) utilizando agua como disolvente y asistida con microondas. Se han evaluado diferentes temperaturas (100, 135, 150, 170 y 200 °C) y tiempos de mantenimiento entre 0 y 18 minutos para determinar las condiciones óptimas de extracción.

Los resultados experimentales mostraron que la temperatura y el tiempo de mantenimiento tienen un efecto significativo en el rendimiento de extracción de proteínas. Se observó que, a mayor temperatura, se obtiene un mayor rendimiento de extracción, siendo de 80,16 % a **200 °C y 6 minutos**. Tiempos más largos o temperaturas más altas llevan a una disminución de la cantidad de proteína soluble en el líquido, probablemente por degradación de las proteínas ya extraídas. Aunque a 230 °C y 0 min se ha obtenido un rendimiento de extracción algo mayor, se requeriría un control más preciso del tiempo y de la temperatura porque a esa temperatura más alta la proteína degrada rápidamente.

Se ajustaron los datos experimentales a cuatro modelos cinéticos diferentes: modelo de difusión en estado no estacionario, ley de potencias, primer orden y segundo orden. El modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue **el modelo de difusión en estado no estacionario**, con un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,88 para todas las temperaturas estudiadas.

Se observó una relación directa entre la constante de velocidad (k) y la temperatura. **A mayor temperatura, la energía cinética de las moléculas aumenta**, lo que conduce a una mayor frecuencia de colisiones efectivas y, en consecuencia, a una mayor tasa de extracción de proteínas. Esta tendencia es consistente con la teoría cinética y con los resultados de otros estudios sobre la extracción de proteínas asistida con microondas.

El valor de energía de activación obtenido fue de 9371,16 J/mol. Un valor $A=3,16 \text{ min}^{-1}$ sugiere una frecuencia moderada de colisiones efectivas. Esto indica que, en promedio, hay aproximadamente 3,16 colisiones efectivas por minuto que tienen la orientación correcta para superar la barrera de energía.

En general, este estudio experimental ha demostrado la viabilidad técnica y el potencial de la extracción asistida con microondas de proteínas a partir de residuos de langostino utilizando agua como disolvente. La utilización de este método ofrece ventajas significativas en cuanto a eficiencia, seguridad y costo, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para la valorización de estos residuos. Estos resultados proporcionan información valiosa para el desarrollo de un proceso eficiente y escalable para la extracción de proteínas a partir de residuos de langostino, con potencial aplicación en la industria alimentaria y biotecnológica. Este proceso a escala piloto se estudiará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. DIMENSIONADO BÁSICO DE UNA ETAPA DE EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS DE RESIDUOS DE LANGOSTINO

4.1. BASES DE DISEÑO DEL PROCESO

Para diseñar una etapa de extracción de proteínas de residuos de langostino, es crucial definir y establecer las bases de diseño del proceso. Estas bases incluyen la capacidad de tratamiento, las horas de operación, y las especificaciones de la materia prima. A continuación, se detallan cada uno de estos aspectos:

Capacidad de tratamiento:

Se tratarán 1950 kg/año de materia prima diseñando para un valor de sobrediseño del 120% y un turndown de 70%.

Para fijar la capacidad de la planta se va a utilizar el microondas más grande de la gama de microondas Anton Paar. (Product name Multiwave 5000, s. f.). suponiendo que se instalarán 4 microondas de este modelo en paralelo. El ROTOR 41HVT56 tiene una capacidad 41 viales de 56 mL cada uno lo que implica el tratamiento de 2296 mL por cada equipo y carga. Admitiendo un llenado del 80%, el volumen útil, de los 4 microondas operando en paralelo, sería de 7,347 L. Según la relación sólido/líquido establecida de 1/60 (g/mL) esto supone 122 g de cáscara/carga (0,744 g sólido + 44,6 mL agua en cada vial).

Se aproxima la densidad de la cáscara tomando las densidades de los compuestos más significativos, el carbonato y la quitina, de manera que se obtiene una densidad de 2085 kg/m³. Entonces la densidad aparente, teniendo en cuenta una porosidad de 0,4, será de 1251 kg/m³.

Como el tiempo de mantenimiento es de 6 minutos contando además con el tiempo de calentamiento, enfriamiento, carga y descarga, se diseña para 3 cargas por hora, lo que supone una capacidad de tratamiento de 0,366 kg/h.

La planta se encontrará en funcionamiento 16 horas al día, las cuales se repartirán a lo largo de dos turnos con una duración de 8 horas cada uno. De los 365 días del año, únicamente 334 serán días laborales, obteniéndose un total de 5344 h/año de operación. Los 31 días restantes, la planta parará y se emplearán para las reparaciones o funciones de mantenimiento requeridas.

Contando con la capacidad de tratamiento por hora y las horas de trabajo por año suponen unos 1955 kg/año.

Cálculos de la capacidad del proceso en Anexo III.

Especificaciones de materia prima:

Para el dimensionado de esta etapa de proceso se va a considerar la composición media de la materia utilizada en la parte experimental de este TFG y recogida en la tabla 4.

Tabla 4. Composición de las mudas de *Litopenaeus Vannamei* utilizadas como materia prima.

Compuestos químicos	g/100 g en base seca
Minerales (cenizas)	53,7 ± 0,5
Ácidos grasos	3,1 ± 0,3
Quitina (fibra cruda)	17,8 ± 0,7
Proteína	10,6 ± 0,4
Aminoácidos libres	1,37 ± 0,12

Especificaciones de productos:

El producto final es una proteína de alta pureza obtenida a partir de cáscaras de langostino a través de un proceso de extracción y purificación. Este proceso incluye etapas de lavado, secado, molienda, tratamiento con microondas, filtración, ultrafiltración y secado final. La proteína obtenida es adecuada para aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y de suplementos nutricionales.

Localización

La planta se localizará en el polígono industrial de Medina del Campo (Valladolid) por cercanía a la empresa que proporciona el residuo de langostino.

Códigos de diseño:

Establecen los requisitos para garantizar diseños seguros y económicos. Además de aquellas pruebas o revisiones para tener en cuenta durante su fabricación. Los códigos de diseño empleados son los siguientes:

American Society of Mechanical Engineers (ASME): ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sec. VIII, Div. 1, para recipientes a presión

UNE-EN-1991-4, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 4: silos y depósitos para el silo de almacenamiento de cáscara seca.

Tiempo de vida de la instalación

El tiempo de vida de la instalación será el correspondiente al elemento del proceso más limitante, el cual se considera que es el microondas. Se considera entonces un tiempo de vida de 10 años.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO, DIAGRAMA DE BLOQUES Y DIAGRAMA DE FLUJO

El proceso de extracción de proteínas de residuos de langostino implica varias etapas cruciales para asegurar la máxima recuperación y pureza del producto final. Para diseñar un proceso eficiente, es esencial considerar cada etapa con detalle, desde la preparación de la materia prima hasta la obtención de las proteínas extraídas.

El diagrama de bloques (figura 10) muestra el proceso de extracción de proteínas a partir de cáscaras de langostino. Aquí se detalla cada etapa del proceso y la importancia de las condiciones y equipos utilizados.

El lavado y secado inicial aseguran la eliminación de impurezas y la preparación adecuada de las cáscaras para la molienda. Esto es esencial para evitar contaminaciones y facilitar el tratamiento posterior. El secado reduce el contenido de agua en las cáscaras para facilitar su molienda y estabilización durante el almacenamiento antes del procesado.

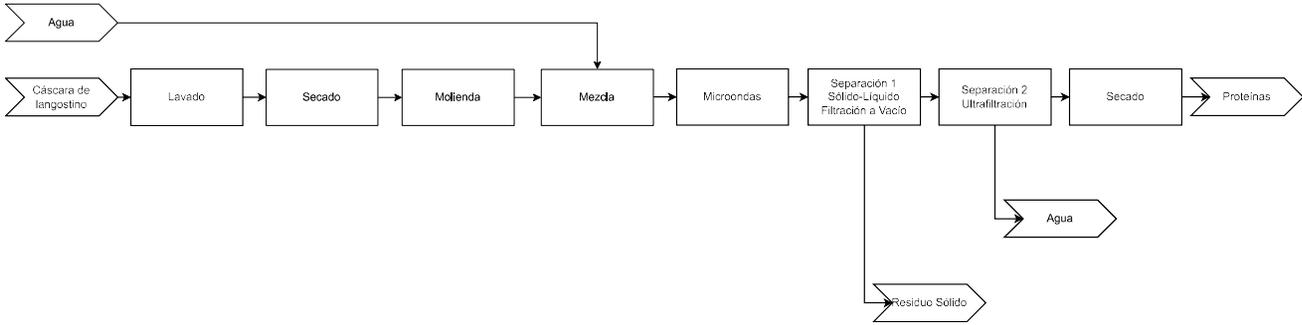
La molienda aumenta la superficie de contacto, lo que mejora la eficiencia del tratamiento con microondas y la extracción de proteínas. Un tamaño de partícula más pequeño permite una mejor penetración de los microondas y una liberación más eficiente de proteínas.

Tras la etapa de tratamiento por microondas se procede con la filtración a vacío, técnica efectiva para la separación inicial de sólidos y líquidos. La ultrafiltración, por otro lado, permite una separación precisa basada en el tamaño molecular, crucial para obtener proteínas de alta pureza. Las membranas de 5 kDa (*Merck Ultrafiltration Discs, 5 kDa NMW, UltracelTM Regenerated Cellulose*, s. f.) son adecuadas para retener proteínas grandes y dejar pasar moléculas pequeñas y agua.

Puesto que no se ha encontrado en la bibliografía un valor de rendimiento de separación de proteínas de crustáceos por ultrafiltración, se va a utilizar el artículo (C. Baldasso et al., 2011), el cual investiga el uso de ultrafiltración para concentrar y purificar las proteínas del suero de leche, y según el cual se pueden obtener rendimientos del 70% en peso, en base seca.

El secado final de las proteínas es crucial para su almacenamiento. La eliminación del agua previene la degradación microbiana y química, asegurando que las proteínas mantengan su actividad y estabilidad a largo plazo.

4.2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES



DIBUJANTE		
Inés González Caballero		
REV 0	REV 1	
Esther Alonso	Esther Alonso	
20/06/24	4/07/24	
TÍTULO		
DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN PROTEICA DE RESIDUOS DE LANGOSTINO MEDIANTE EXTRACCIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS		

4.2.2. DIAGRAMA DE FLUJO

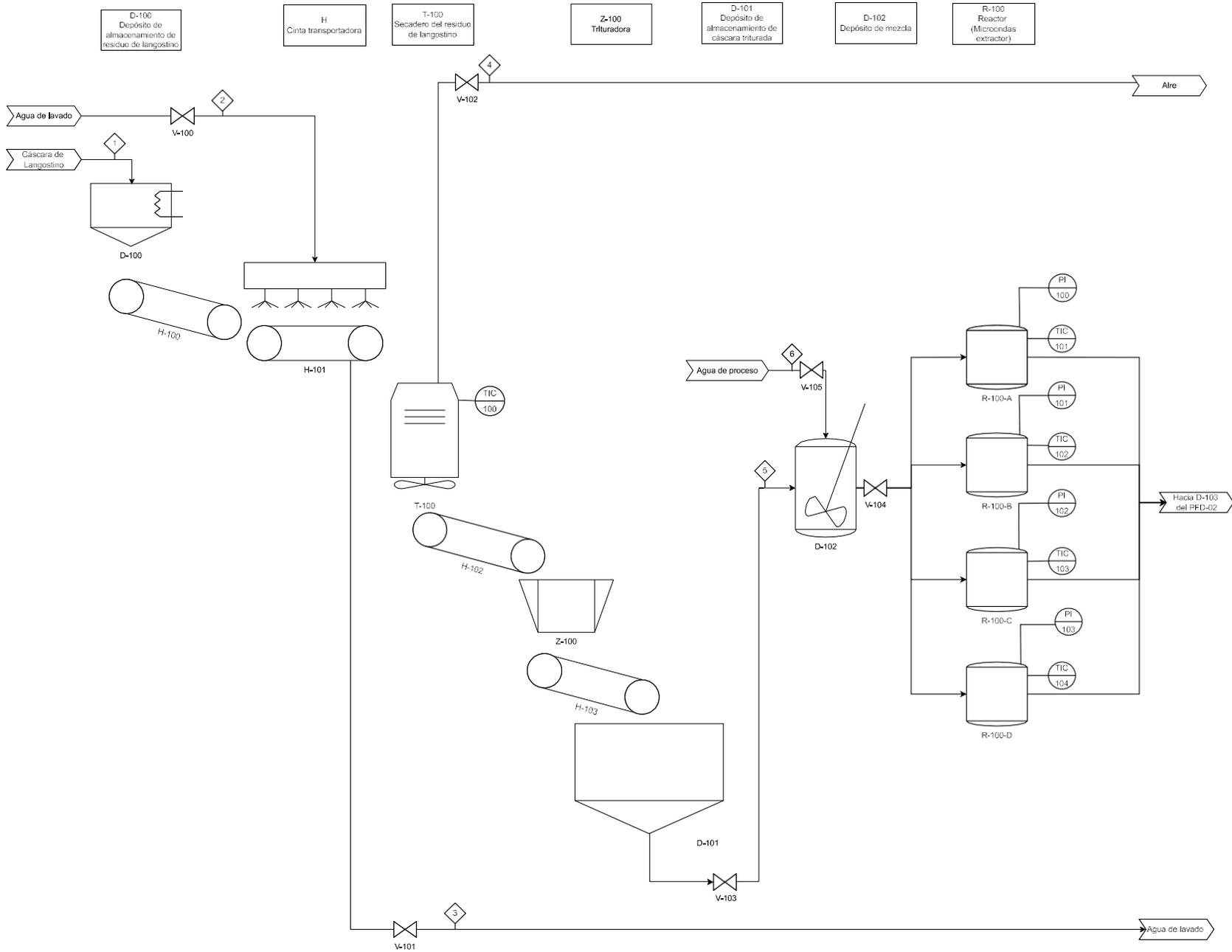
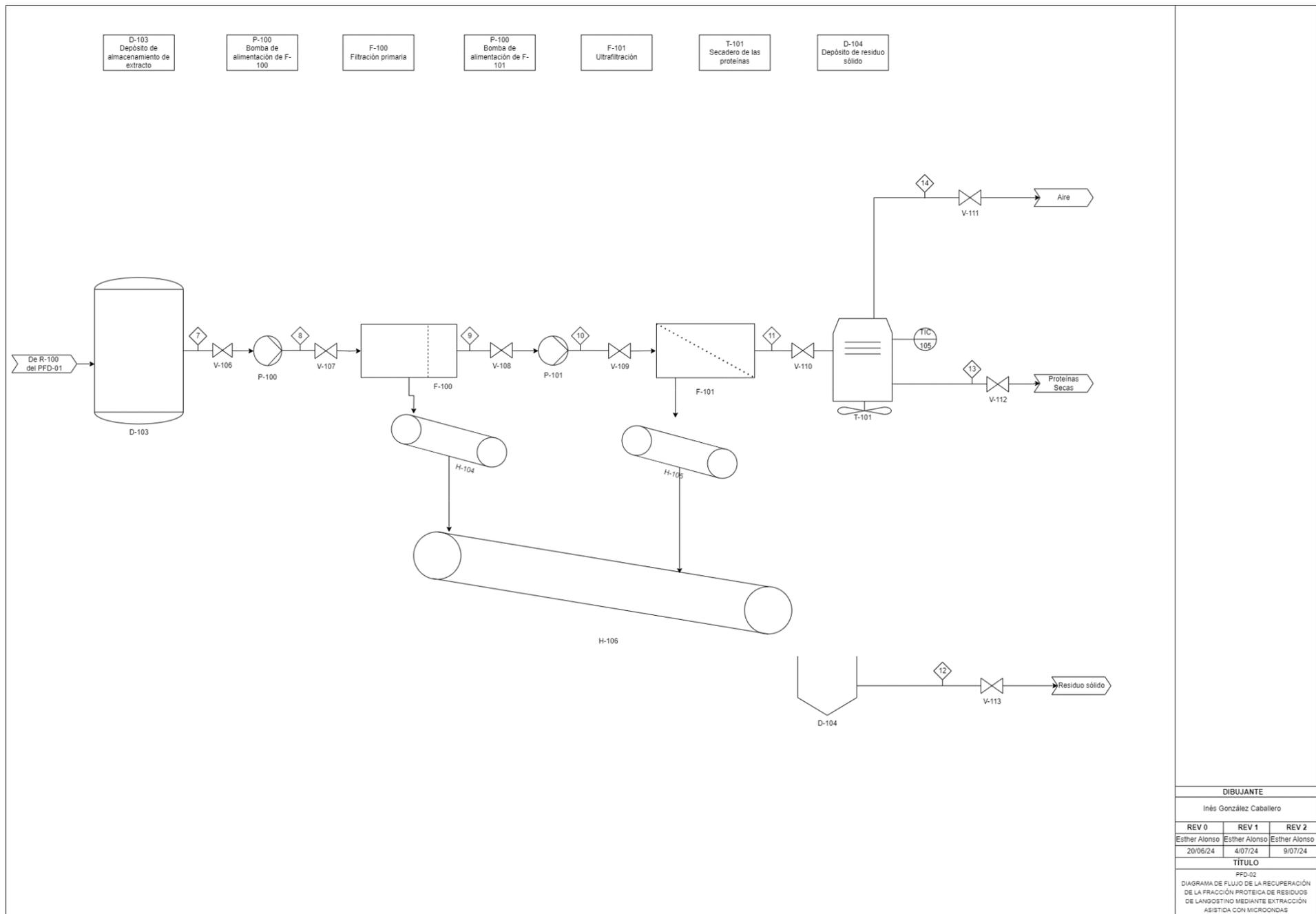


Figura 11. Diagrama de flujo 01.

DIBUJANTE		
Inés González Caballero		
REV 0	REV 1	REV 2
Esther Alonso	Esther Alonso	Esther Alonso
20/06/24	4/07/24	9/07/24
TÍTULO		
PFD-01		
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN PROTEICA DE RESIDUOS DE LANGOSTINO MEDIANTE EXTRACCIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS		



DIBUJANTE		
Inés González Caballero		
REV 0	REV 1	REV 2
Esther Alonso	Esther Alonso	Esther Alonso
20/06/24	4/07/24	9/07/24
TÍTULO		
PFD-02		
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN PROTEICA DE RESIDUOS DE LAMOSTINO MEDIANTE EXTRACCIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS		

Figura 12. Diagrama de flujo 02

4.2.1 TABLA DE CORRIENTES

Tabla 5. Tabla de corrientes.

Número	Descripción
1	Cáscara de langostino procedente de proveedor
2	Agua de lavado hacia duchas
3	Residuo de agua de lavado tras duchas
4	Salida de aire del secadero T-100
5	Cáscara molida procedente del silo D-101 hacia depósito D-102
6	Agua de proceso hacia depósito D-102
7	Extracto procedente del depósito D-103 hacia bomba P-100
8	Extracto procedente de la bomba P-100 hacia el filtro F-100
9	Extracto procedente del filtro F-100 hacia bomba P-101
10	Extracto procedente de la bomba P-101 hacia el filtro F-101
11	Extracto procedente del F-101 hacia el secadero T-101
12	Residuo sólido del depósito D-104
13	Proteínas secas del secadero T-101
14	Salida de aire del secadero T-101

4.2.2 SÍMBOLOS

1- Agitador.

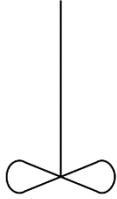


Figura 13. Agitador.

2- Bomba.

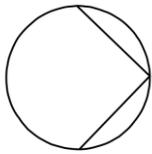


Figura 14. Bomba.

3- Cinta transportadora.



Figura 15. Cinta transportadora.

4- Depósito.



Figura 16. Depósito.

5- Ducha – Lavado.

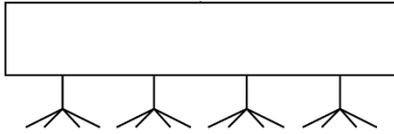


Figura 17. Ducha -Lavado.

5- Filtro.

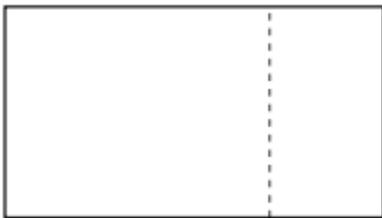


Figura 18. Filtro.

6- Filtro ultrafiltración.

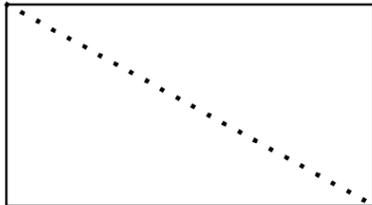


Figura 19. Filtro ultrafiltración.

7- Horno de secado.

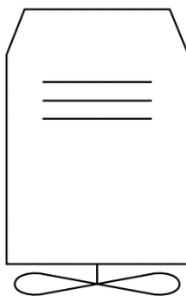


Figura 20. Horno de secado.

8- Silo.

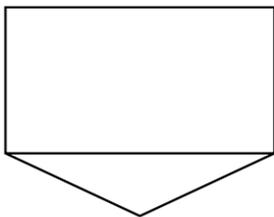


Figura 21. Silo.

9- Silo refrigerado.

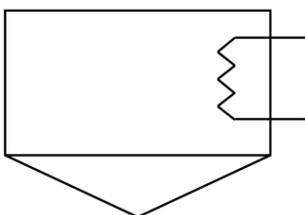


Figura 22. Silo refrigerado.

10- Trituradora.

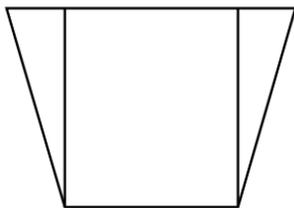


Figura 23. Trituradora.

11- Válvula.

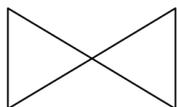


Figura 24. Válvula.

Tabla 6. Tabla de abreviaturas del diagrama de flujo.

Abreviatura	Significado
PI	Indicador de presión.
TIC	Controlador e indicar de temperatura

Tabla 7. Tabla de descripción de equipos.

Equipo	Abreviatura	Descripción
Silo refrigerado	D-100	Almacena las cáscaras de langostino a baja temperatura para mantener su frescura.
Cintas transportadoras	H-XXX	Transportan los sólidos entre etapas.
Ducha	H-101	Lava las cáscaras de langostino para eliminar impurezas.
Secador	T-100	Elimina el exceso de humedad de las cáscaras de langostino.
Trituradora	Z-100	Tritura las cáscaras de langostino hasta obtener un tamaño de partícula uniforme.
Silo de almacenamiento	D-101	Almacena la cáscara molida de langostino.
Depósito agitado	D-102	Mezcla la cáscara molida de langostino con agua de proceso.
Microondas	R-100	Libera las proteínas de las cáscaras de langostino utilizando energía de microondas.
Depósito intermedio	D-103	Almacena la mezcla resultante del tratamiento con microondas.
Bomba	P-100	Bombea la mezcla desde el depósito intermedio al filtro primario.
Filtro primario	F-100	Separa los sólidos (residuos de cáscara) del líquido rico en proteínas.
Bomba	P-101	Bombea el líquido rico en proteínas desde el filtro primario al filtro de ultrafiltración.
Filtro de ultrafiltración	F-101	Separa las proteínas de alta pureza (producto) de las moléculas más pequeñas (agua y otros solutos).
Secadero	T-101	Elimina la humedad restante del concentrado de proteínas purificadas.
Válvulas	V-XXX	Válvulas de protección de equipos

El proceso de obtención de proteínas de langostino que se muestra en el PFD-01 y PFD-02 (figuras 11 y 12) comienza con el almacenamiento del residuo congelado (D-100), donde las cáscaras se conservan para prevenir su deterioro. Cintas transportadoras (H) las llevan a duchas donde se lavan meticulosamente para eliminar impurezas y prepararlas para la siguiente etapa. Un secadero (T-100) elimina el exceso de humedad, facilitando su manejo y posterior procesamiento.

Las cáscaras secas se trituran en una trituradora (Z-100) hasta obtener un tamaño de partícula uniforme. Esto aumenta la superficie de contacto, crucial para una extracción de proteínas eficiente. La cáscara molida se almacena en un silo (D-101) hasta su uso.

En el corazón del proceso se encuentra la extracción de proteínas. La cáscara molida se mezcla con agua de proceso en un depósito agitado (D-102). La mezcla se bombea (habría que diseñar un sistema automático de llenado de los viales) a cuatro microondas (R-100) donde la energía de las microondas rompe las paredes celulares de la cáscara, liberando las proteínas.

La mezcla resultante, que contiene tanto las proteínas liberadas como los restos de cáscara, pasa a un depósito intermedio (D-103). Una bomba (P-100) la envía a un filtro primario (F-100) donde se realiza una separación inicial: los sólidos (residuos de cáscara) se retienen, mientras que el líquido rico en proteínas continúa su camino.

La clave para obtener proteínas de alta pureza radica en la ultrafiltración (F-101). Este proceso separa las proteínas de mayor tamaño (producto) de las moléculas más pequeñas (agua y otros solutos) que quedan atrás como residuo.

El producto final, un concentrado de proteínas purificadas, se seca cuidadosamente en un secadero (T-101) para eliminar la humedad restante. Este paso crucial garantiza la estabilidad y conservación de las proteínas a largo plazo.

El diagrama de flujo ilustrado no solo describe los pasos involucrados en la extracción de proteínas de langostino, sino que también destaca la importancia de cada etapa y los equipos utilizados. La optimización de las condiciones de cada proceso, desde el tratamiento con microondas hasta la selección de membranas de ultrafiltración, es fundamental para maximizar el rendimiento y la pureza de las proteínas obtenidas.

En la tabla 5, 6 y tabla 7 se incluyen las corrientes, las abreviaturas, equipos y sus descripciones. En las figuras 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, se muestra la leyenda del diagrama de flujo.

4.3. DIMENSIONADO DE UNA ETAPA DE EXTRACCIÓN

En este apartado, se procederá a dimensionar tres equipos necesarios para el proceso de extracción: un tanque atmosférico para almacenar la cáscara, el tanque intermedio para almacenar el extracto acuoso después de la extracción por microondas y antes de la filtración y la bomba que lleva el extracto de este tanque intermedio a la filtración a vacío.

Se considerarán factores como el volumen de procesamiento, las características de los materiales a utilizar, y las condiciones operativas específicas del proceso de extracción de proteínas de residuos de langostino.

4.3.1. TANQUE INTERMEDIO PARA ALMACENAR EL EXTRACTO (D-103)

DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO

➤ **Servicio o función**

El tanque intermedio en este proceso tiene la función de recolectar la suspensión que resulta del proceso de microondas. Actúa como un depósito de almacenamiento temporal ("surge drum") para las siguientes fases de filtración, asegurando un flujo continuo y estable hacia los equipos de filtración.

➤ **Fluidos, composición, flujos, presencia de sólidos**

El fluido que se maneja en este tanque es una mezcla de agua con proteínas disueltas y los restos sólidos de las cáscaras de langostino desproteinizado. Se estima que en cada carga de microondas se procesan 7,347 L de suspensión. Diseñando para 3 cargas de los microondas por hora, suponen un flujo de 22 litros por hora, contando con un sobredimensionamiento del 120% sería un flujo de unos 27 litros por hora. Como se trabaja durante 16 horas se diseña este tanque para almacenar 425 L, correspondiente al volumen de extracto diario.

➤ **Presión y Temperatura de diseño**

El fluido se encuentra a presión atmosférica siendo esta la presión máxima de operación, al ser menor a 2 barg se toma como presión de diseño 3,5 barg.

En el proceso de extracción en microondas el extracto se lleva la temperatura del fluido a la del ambiente. Tomando que la máxima temperatura ambiente sea de 35 °C y considerando un sobrediseño de 10 °C la temperatura de diseño será de 45 °C.

➤ **Tiempo de vida**

El tanque debe tener una vida útil de 10 años, típica en recipientes de proceso industriales, diseñados para uso continuo bajo las condiciones operativas mencionadas.

➤ **Factores de seguridad**

Se trabaja con un sobredimensionamiento del 20% en el flujo de diseño para manejar picos de producción o variaciones en la tasa de procesamiento, además de que no se tienen en cuenta pérdidas de fluido en el paso del microondas al tanque.

➤ **Código de diseño**

American Society of Mechanical Engineers (ASME): ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sec. VIII, Div. 1.

➤ **Materiales y diseño**

El tanque debe estar fabricado en acero inoxidable grado alimenticio (SS 304) para asegurar la resistencia a la corrosión del agua y la compatibilidad con el fluido. Además, debe contar con un diseño que permita fácil limpieza y mantenimiento, con conexiones adecuadas para la entrada y salida de fluidos, así como para la inspección y muestreo. (Moran, 2019)

➤ **Dimensiones**

Tomando que el volumen diario que tendrá que almacenar el depósito es de unos 425 litros y que el tanque puede llenarse como máximo un 80% se considera un volumen del depósito de 508 litros.

Para calcular el diámetro y altura del tanque se toma una relación altura/diámetro de 1 a 2. Sabiendo que el volumen de un cilindro es (ecuación 15):

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} = \pi \cdot \frac{D^3}{2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Siendo V el volumen del tanque, D su diámetro y H su altura. Dando lugar a un diámetro de 0,686 m. Ajustando los valores de altura y diámetro para obtener un depósito vertical ya que en este se puede calcular mejor el nivel se obtiene un diámetro de 0,686 m y altura de 1,377 m.

➤ **Diseño mecánico**

En esta sección se calculará el espesor del recipiente. Tras la elección del material, hay que definir la tensión máxima admisible y la eficiencia de la soldadura.

El acero inoxidable SS 304 en las tablas del código ASME (Martínez Massoni, 2008) indican que, a la temperatura de diseño se obtiene un valor de tensión máxima admisible a la temperatura de diseño (Sd) de **18700** en libras por pulgada cuadrada.

Por otro lado, se considera que a la hora de soldar el recipiente esta soldadura no es tan eficiente como la propia chapa, sino que, pese a no aportar corrosión y tener buen comportamiento mecánico, se trata de la zona más débil del depósito por lo que se considera una eficiencia del 85%.

Un depósito está sometido a tensiones en los tres ejes, suponiendo que la tensión radial es mucho menor a la longitudinal y circunferencial se hallan estas dos y se elige la mayor (ecuación 16):

$$t_1 = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} ; t_2 = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P} \quad \text{Ecuación 16}$$

Siendo P la presión de diseño, R el radio del separador, S la tensión máxima admisible a la temperatura de diseño y E la eficacia de soldadura (0,85).

Tras esto, se comprueba que cualquiera de estos valores es mayor que el mínimo valor recomendado de espesor en función del diámetro. Se suma a este valor de espesor un sobreespesor por corrosión (CA, corrosion allowance) de 2 mm por precaución y se multiplica por 1,125 debido a la tolerancia de fabricación de la propia chapa.

Se harán estos cálculos para dos presiones distintas, diseño y la de la prueba hidráulica (ecuación 17), y en este caso no se sumará el sobreespesor por corrosión.

$$P_{prueba_hidráulica} = 1,3 \cdot Pd \cdot \frac{St}{Sd} \quad \text{Ecuación 17}$$

Sd ya se conoce, St será el valor de tensión máxima admisible a la temperatura de la prueba que será temperatura ambiente. Este valor es de 18700 libras por pulgada cuadrada. Como en este caso ambas son iguales la presión de la prueba será 1,3 veces la de diseño teniendo así un valor de 4,55 barg.

El valor de espesor final será el mayor entre el obtenido para cada situación (presión de diseño, presión de prueba hidráulica). Finalmente se comprueba el valor de presión máxima que soporta el espesor y ver que es mayor a estas presiones. Esto significaría que el espesor seleccionado soporta presiones superiores a cualquiera de los casos en los que se va a encontrar y que por lo tanto tiene un valor adecuado.

El valor del espesor resulta ser de 3,86 milímetros el cual es inferior al mínimo requerido para un recipiente de 1 metro de diámetro, por lo que toma el valor mínimo de 5 mm (Tabla 8.).

Tabla 8. Espesores mínimos según ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Sec. VIII, Div. 1

Vessel diameter (m)	Minimum thickness (mm)
1	5
1–2	7
2–2.5	9
2.5–3.0	10
3.0–3.5	12

Para el diseño mecánico de los cabezales el elipsoidal es el más económico sin embargo el hemiesférico soporta mayores presiones. Para este caso, como es la presión ambiente se toma el cabezal torisférico estándar. El espesor de los cabezales se calcula con la ecuación 18.:

$$t_{cabezal} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Ecuación 18}$$

El procedimiento es similar a la envolvente cilíndrica. En este caso hay que tener en cuenta que el cabezal inferior está sometido a la presión de diseño sumando la máxima carga de líquido sin embargo el cabezal superior simplemente está sometido a la presión de diseño por lo que se simplifican los cálculos.

De igual forma se añaden el sobreespesor por corrosión y el coeficiente de tolerancia de fabricación. También se calcula si estos espesores son suficientes para soportar la prueba hidráulica y si no, se toma el espesor correspondiente sin añadir el sobreespesor por corrosión.

Calculando todos estos espesores y tomando el superior de ellos se obtienen en ambos casos, tanto para el cabezal inferior como superior, valores cercanos a 1mm. Como se ha comentado anteriormente, para este tipo de recipientes el mínimo recomendable es de 5mm, el cual se considera el valor final del espesor.

La hoja de especificaciones del depósito D-103 está en el Anexo IV.

4.3.2. TANQUE ATMOSFÉRICO (SILO) PARA ALMACENAR LA CÁSCARA (D-101)

DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO

➤ **Servicio o función**

El tanque atmosférico está destinado a almacenar la cáscara de langostino tras ser molida. Este tanque actúa como un punto de almacenamiento temporal, garantizando que la cáscara esté disponible en cantidades adecuadas para los procesos posteriores.

➤ **Fluidos, composición, flujos, presencia de sólidos**

El contenido del tanque consiste principalmente en cáscara molida y seca, esta contiene proteínas y otros componentes biológicos.

➤ **Presión y Temperatura de diseño**

Dado que se trata de un tanque atmosférico, la presión de diseño es la presión atmosférica estándar. La temperatura del contenido se mantiene a temperatura ambiente, ya que no se requiere control de temperatura específico para la cáscara molida y seca.

Entonces, se toma una presión de diseño 3,5 barg y una temperatura de diseño de 45 °C considerando la máxima temperatura ambiente sumando 10 °C de sobrediseño.

➤ **Tiempo de vida**

El tiempo de vida del tanque atmosférico típico puede ser de 20 a 30 años, siempre que se realicen mantenimientos periódicos y se eviten condiciones de operación extremas.

➤ **Factores de seguridad**

Se trabaja con un sobredimensionamiento del 20% en el flujo de diseño para manejar picos de producción o variaciones en la tasa de procesamiento.

➤ **Código de diseño**

UNE-EN-1991-4, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 4: silos y depósitos para el silo de almacenamiento de cáscara seca.

➤ **Materiales y diseño**

El tanque debe estar fabricado en acero inoxidable grado alimenticio (SS 304). Además, debe contar con un diseño que permita fácil limpieza y mantenimiento, con conexiones adecuadas para la entrada y salida de sólidos, así como para la inspección y muestreo. (Moran, 2019)

➤ **Dimensiones**

Para calcular el diámetro y altura del tanque se considera primeramente que ambos valores sean iguales. Sabiendo que el volumen de un cilindro es (ecuación 19):

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} = \pi \cdot \frac{D^3}{4} \quad \text{Ecuación 19}$$

Siendo V el volumen del tanque, D su diámetro y H su altura.

El volumen de procesado se calcula tomando el almacenamiento durante 3 meses. Esto se debe a que los langostinos mudan cada 4 meses aproximadamente según lo comentado en apartados anteriores, considerando que el proveedor proporciona cada este tiempo su residuo. Conociendo también que se tienen 4 microondas se almacenan unos 528 kg de residuo. Con esto y la densidad del sólido calculada más adelante se puede obtener el volumen necesario.

El volumen obtenido es de 0,51 m³, sobredimensionando un 120% y hallando el diámetro despejando de la ecuación 15, se obtiene un diámetro de 0,86 metros.

Según las consideraciones anteriormente mencionadas este valor corresponderá también a la altura del silo.

➤ **Diseño mecánico**

Para calcular los parámetros de diseño del silo específico según el Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 4 (EN 1991-4) se necesitan los siguientes datos

- Densidad aparente sólido (ρ): 1251 kg/m³.
- No se proporcionan ángulos y coeficientes; se usarán valores típicos.
- Diámetro del silo: 0,86 m.
- Altura del silo: 0,86 m.
- Material de las paredes: Acero SS 304.
- Altura de llenado: 80% de 1,37 m = 1,096 m.
- Condiciones de carga y descarga: Descarga central.
- Temperaturas de operación: 18°C a 35°C.

Para los cálculos, se utilizan los valores típicos:

- Ángulo de rozamiento interno (ϕ): 30°
- Ángulo de reposo (θ): 35°

Cálculos

- Coeficiente de presión en reposo (Ecuación 20.):

$$k_0 = 1 - \text{sen}(\phi) = 0,5 \quad \text{Ecuación 20}$$

- Coeficiente de presión activa (Ecuación 21.):

$$k_a = \frac{1 - \text{sen}(\phi)}{1 + \text{sen}(\phi)} = 0,33 \quad \text{Ecuación 21}$$

- Coeficiente de presión pasiva (Ecuación 22):

$$k_p = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)} = 3 \quad \text{Ecuación 22}$$

- Ángulo de rozamiento con la pared (Ecuación 23.):

$$\delta = 0,6 \cdot \phi = 18^\circ \quad \text{Ecuación 23}$$

- Presión vertical (Ecuación 24):

$$P_v = \rho \cdot g \cdot h = 1251 \cdot 9,81 \cdot 1,096 = 8,48 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 24}$$

- Presión horizontal (Ecuación 25.) (Ecuación 26.) (Ecuación 27.):

$$P_{h, \text{reposo}} = k_0 \cdot P_v = 0,5 \cdot 13,41 = 4,24 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$P_{h, \text{activa}} = k_a \cdot P_v = 0,33 \cdot 13,41 = 2,83 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$P_{h, \text{pasiva}} = k_p \cdot P_v = 3 \cdot 13,41 = 25,44 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 27}$$

El espesor de las paredes depende de las cargas ejercidas por el material almacenado y las propiedades del material del silo. Para silos de acero inoxidable como SS304, el espesor mínimo suele calcularse para resistir la presión interna y las fuerzas externas. Un cálculo preciso requiere un análisis detallado de tensiones, pero una regla general para silos pequeños de acero inoxidable es un espesor mínimo de 3 mm a 5 mm.

Para calcular este espesor se utilizan las tensiones. Para un silo cilíndrico, la tensión circunferencial en las paredes se calcula utilizando la presión horizontal. (Ecuación 28.)

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_h \cdot D}{2t} \quad \text{Ecuación 28}$$

Siendo σ_{θ} la tensión circunferencial, D el diámetro del silo y t el espesor de la pared del silo.

La tensión vertical viene dada por la ecuación 29.:

$$\sigma_z = \frac{P_v \cdot H}{t} \quad \text{Ecuación 29}$$

El espesor mínimo de la pared del silo se determina a partir de las tensiones calculadas y las propiedades del material de construcción. Según el Eurocódigo, el espesor debe satisfacer los siguientes criterios (Ecuación 30.) (Ecuación 31.):

$$t \geq \frac{P_h \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\theta, \text{máx}}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$t \geq \frac{P_v \cdot H}{2 \cdot \sigma_{z, \text{máx}}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Tomando las tensiones máximas admisibles y las presiones anteriormente calculadas el mayor valor de espesor es de 1,24 mm, como es inferior que el mínimo recomendado se toma el valor de 3 mm.

Dado las dimensiones del silo se sugiere un silo cilíndrico simple. Además, el uso de descarga central sugiere que este silo probablemente tiene una tolva cónica en la parte inferior para facilitar la descarga del material almacenado.

Las tolvas son típicas en los silos de almacenamiento para facilitar la descarga del material por gravedad. Para un silo cilíndrico con descarga central, una tolva cónica es común. La pendiente de la tolva depende del ángulo de reposo del material y del ángulo de rozamiento interno.

La altura y ángulo de la tolva pueden ser calculados considerando la geometría y las propiedades del material almacenado. (Ecuación 32)

$$h_{tolva} = \frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) = \frac{1,37}{2} \cdot \tan(35^\circ) = 0,21\text{m} \quad \text{Ecuación 32}$$

Para una tolva cónica, el ángulo (α) debe ser mayor que el ángulo de reposo del material. Además, para asegurar el flujo continuo, se utiliza una relación empírica que puede involucrar tanto el ángulo de reposo como el ángulo de fricción interna.

Una fórmula empírica utilizada comúnmente para silos y tolvas es la recogida en la ecuación 33.

$$\alpha = \theta + 5^\circ = 35^\circ + 5^\circ = 40^\circ \quad \text{Ecuación 33}$$

Por lo tanto, el ángulo de la tolva debería ser al menos 40° para asegurar un flujo adecuado del material almacenado.

Los silos pueden tener diferentes tipos de tapas, dependiendo de la necesidad de proteger el material almacenado de la contaminación y de las condiciones ambientales. Una tapa abovedada o cónica puede ser preferible para evitar la acumulación de polvo y para facilitar la ventilación. Se escoge la tapa cónica.

La hoja de especificaciones del tanque D-101 está en el Anexo V.

4.3.3. BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE EXTRACTO A LA FILTRACIÓN (P-100)

DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO

- **Servicio o función**
Alimentar el filtro F-100 con extracto almacenado en el recipiente D-103.
- **Fluidos de proceso**
La corriente de entrada a la bomba está compuesta por una corriente líquida de agua con proteínas disueltas y sólido residual. La densidad aproximada es similar al agua, cerca de 1000 kg/m^3 , ya que la cantidad de sólidos es relativamente baja. La viscosidad se considera también similar al agua, aunque puede aumentar ligeramente debido a las proteínas y los residuos sólidos.
- **Temperatura y Presión de diseño**
La presión máxima de salida es de 6 bar ya que es la máxima necesaria para que se dé el proceso de filtración posterior, la presión de entrada a la bomba es la atmosférica ya que es a la que sale del depósito. La presión de diseño será entonces 6 bar. La temperatura de diseño de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ considerando la máxima temperatura ambiente sumando $10 \text{ }^\circ\text{C}$ de sobrediseño.
- **Tiempo de vida**
El tiempo de vida de un equipo es el periodo de tiempo estimado en que un determinado equipo podrá operar a máximo rendimiento realizando un determinado servicio. En el caso de las bombas, el tiempo de vida útil estimado es de máximo 10 años.
- **Factores de seguridad**
Se diseñará la bomba dando un valor de sobrediseño del caudal del 125%. Dado que el fluido contiene partículas sólidas (residuos de cáscara de langostino), se debe seleccionar una bomba de alta resistencia a la abrasión para prolongar la vida útil del equipo. En aplicaciones alimenticias, es crucial que la bomba sea fácil de limpiar para mantener estándares higiénicos.
- **Código de diseño**
El código para diseñar las bombas es: Norma UNE-EN ISO 2858

Cálculos específicos de la bomba P-100:

El caudal de la bomba se calcula sabiendo que el filtro posterior trabaja por cargas, cada carga es de 425L de extracto por día, sabiendo que se hacen 4 ciclos de filtración por día esto supone 106,25L por ciclo y 106,25L por hora.

Se selecciona una bomba peristáltica. Una bomba peristáltica funciona mediante la compresión alternante de un tubo flexible por un conjunto de rodillos o zapatos que giran dentro de la carcasa de la bomba. La acción de los rodillos empuja el fluido a través del tubo sin que éste entre en contacto con ninguna parte móvil de la bomba, lo cual es ideal para aplicaciones alimenticias y manejo de fluidos con sólidos en suspensión. La carcasa es de acero inoxidable SS304, adecuado para aplicaciones alimenticias.

En cuanto al rotor, se determina su velocidad en función del caudal requerido y el diámetro del tubo. Suponiendo una velocidad de 50 RPM (valor típico para bombas peristálticas), se puede ajustar el diseño para alcanzar el caudal requerido.

Típicamente, las bombas peristálticas tienen entre 2 y 4 rodillos. Un mayor número de rodillos proporciona un flujo más uniforme, pero requiere más energía.

Para diseñar una bomba hay que tener en cuenta la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 \cdot \rho + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 \cdot \rho + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 + h_f$$

P_1 y P_2 son las presiones en los puntos 1 y 2, ρ es la densidad del fluido, v_1 y v_2 son las velocidades del fluido en los puntos 1 y 2, g es la aceleración debido a la gravedad, h_1 y h_2 son las alturas del fluido en los puntos 1 y 2 y h_f la pérdida de energía por fricción. El punto 1 se sitúa en la base del depósito D-103 y el punto 2 en la entrada del filtro F-100.

Para calcular el cabezal de la bomba es necesario realizar este tipo de balances. Considerando que la contribución del término de energía cinética es nula debido a las bajas velocidades frente al resto de términos. También se toma como nulo el término de energía potencial ya que se colocará la bomba, depósito y filtro en posiciones relativas adecuadas.

Para calcular las pérdidas por fricción, utilizamos la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 34.):

$$\Delta P_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2} \right) \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde: ΔP_f es la pérdida de presión por fricción (Pa), f es el factor de fricción de Darcy, L la longitud de la tubería (m), D el diámetro interno de la tubería (m), ρ la densidad del líquido (kg/m^3) y v la velocidad del flujo (m/s)

Se calcula el diámetro del tubo y la velocidad (Ecuación 35.):

$$v_{rev} = \frac{Q}{rpm} = \frac{106,25 \text{ L/h}}{50 \frac{rev}{min} \cdot \frac{60min}{1h}} = 0,0345 \text{ L/rev} \quad \text{Ecuación 35}$$

Asumiendo un contacto de 0.1 m por revolución:

$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot 0,1 = 0,0345 \frac{L}{rev} \rightarrow d = 0,212m$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = 8,31 \text{ m/s}$$

Se calcula ahora el número de Reynolds (Ecuación 36.):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = 1,76 \cdot 10^3 \quad \text{Ecuación 36}$$

Este valor indica un flujo turbulento. Para flujos turbulentos, en tubos lisos se utiliza la ecuación de Colebrook-White. (Ecuación 37.):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 37}$$

En tubos lisos se aproxima $\frac{\epsilon}{D}$ a 0, por lo que, iterando, se consigue un valor de $f=0,01$.

Se asume una longitud de tubería de 5 metros.

Con todo esto las pérdidas de fricción serán de $\Delta P_f = 82,8kPa$

El cabezal de la bomba total (H) es la suma del cabezal estático y las pérdidas por fricción (Ecuación 38.):

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta P_f}{\rho g} = \frac{600kPa - 100kPa}{1000 \cdot 9,81} + \frac{82,8kPa}{1000 \cdot 9,81} = 59,41m \quad \text{Ecuación 38}$$

La potencia de la bomba (P) se calcula como (Ecuación 39.):

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde η es la eficiencia de la bomba asumiendo un valor de 0,7. Esto implica un valor de potencia de 24,57kW.

La hoja de especificaciones de la bomba P-100 está en el Anexo VI.

CAPÍTULO 5. IMPACTO EN LA MEJORA SOCIAL DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS DE LA AGENDA 2030

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se estudia la valorización de la fracción proteica presente en las mudas de langostino generadas como residuos durante el proceso de cría de langostinos en acuicultura. Con ello se contribuye al desarrollo del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (Producción y consumos responsables) desde dos puntos de vista, por un lado, contribuyendo al desarrollo de la industria de acuicultura como modelo de producción sostenible para atender la creciente demanda de población prevista, y por otro, obteniendo como producto proteínas de origen natural con alto valor añadido y múltiples aplicaciones.

En este TFG se utiliza la tecnología de calentamiento con microondas buscando incrementar la sostenibilidad del proceso reduciendo considerablemente el tiempo de extracción y utilizando exclusivamente agua como disolvente. Este enfoque, que evita el uso de solventes químicos tradicionales. Desde una perspectiva ambiental, elimina la necesidad de ácidos y bases fuertes, reduciendo significativamente la generación de residuos. Este enfoque está alineado con los principios de la química verde, que buscan minimizar el impacto ambiental de los procesos químicos. Económicamente, este método es más accesible y rentable, ya que se eliminan los costes asociados con la compra y disposición de productos químicos. El proceso también se simplifica al evitar múltiples etapas de neutralización y lavado. Con ello se contribuye al desarrollo del Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (acción por el clima).

La agenda 2030 para el desarrollo sostenible exige apoyo para las industrias pesqueras para garantizar la seguridad alimentaria debido al alto contenido nutricional valor y beneficios para la salud asociados de los productos del mar. Entre diferentes tipos de mariscos, camarones y langostinos son preferencias saludables y alimento deseable en todo el mundo, con una producción global de 8,25 millones toneladas métricas en 2015 y 9,66 millones de toneladas métricas en 2019, con una tasa de crecimiento del 2 al 3%. Dado que aproximadamente el 45% en peso del peso corporal total de los camarones son carne, alrededor del 55% en peso termina como desperdicio, lo cual es altamente perecedero y se descompone rápidamente debido al deterioro microbiano, lo que resulta en peligros para la salud pública. Sin embargo, este flujo de residuos también contiene valiosos compuestos naturales, sobre todo quitina, una valiosa fuente para producir quitosano.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este Trabajo Fin de Grado, se ha investigado la extracción de proteínas a partir de mudas de *Litopenaeus Vannamei*, proporcionando una comprensión detallada de los procesos cinéticos involucrados. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas:

La materia prima utilizada mostró una composición significativa de proteínas (10,6%) y otros componentes valiosos como la quitina (17,8 %)

A través de los experimentos realizados, se determinó que **la temperatura óptima para la extracción de proteínas es de 200 °C con un tiempo de retención de 6 minutos**. Estas condiciones permiten maximizar el rendimiento sin degradar las proteínas.

Se ajustaron los datos experimentales a varios modelos cinéticos, incluyendo el modelo basado en la ley de Fick, el modelo de la ley de potencias, el de primer orden y el modelo de segundo orden. Estos modelos permitieron describir y predecir el comportamiento de la extracción de proteínas bajo diferentes condiciones de operación **siendo el modelo cinético basando en la difusión de Fick el más adecuado**.

El análisis del efecto de la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius proporcionó el valor de **energía de activación de 9371 J/mol** y el **factor pre-exponencial 3,1644 min⁻¹**, permitiendo una mejor comprensión de la influencia de la temperatura en la cinética de extracción de proteínas.

En el dimensionado básico se realizaron cálculos para tres elementos de la etapa de extracción, los resultados determinaron que es necesario un silo de almacenamiento del sólido molido de 510L y un depósito intermedio de almacenamiento de extracto tras la etapa de microondas de 508 L. Además del empleo de una bomba peristáltica de 24,57 kW y 59,41m de carga de bomba.

En cuanto a líneas futuras puede ser interesante realizar una caracterización más detallada de las proteínas extraídas (como perfil de aminoácidos y peso molecular) y desarrollar procesos de purificación y concentración de proteínas post-extracción para mejorar la calidad del producto final y ampliar sus aplicaciones comerciales.

Realizar estudios sobre la vida útil y estabilidad de las proteínas extraídas bajo diferentes condiciones de almacenamiento y procesamiento para asegurar su viabilidad en aplicaciones comerciales.

Además, de valorizar el residuo sólido que se obtiene de esta etapa de obtención de proteínas par obtención de otros componentes como la quitina, para explorar su posible aplicación en diferentes industrias (alimentaria, farmacéutica, etc.).

Con estas conclusiones y líneas futuras, se establece una base sólida para la continuación de la investigación y el desarrollo en el campo de la extracción de proteínas de residuos de

crustáceos, contribuyendo al avance de tecnologías sostenibles y eficientes en la industria alimentaria y otras aplicaciones relacionadas.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abuzar, Hafiz Rizwan, Mian Kamran Sharif, Rizwan Arshad, & Absur Rehman. (2023). Potential industrial and nutritional applications of shrimp by-products: a review. *International Journal of Food Properties*, 2.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2023.2283378>
- Bioaquafloc website. (16/4/24). *Litopenaeus Vannamei (Whiteleg Shrimp)*.
- C. Baldasso, T.C. Barros, & I.C. Tessaro. (2011). Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*, 278(1-3).
- Chemat, F., Abert Vian, M., Fabiano-Tixier, A. S., Nutrizio, M., Režek Jambrak, A., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Binello, A., & Cravotto, G. (2020). A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. En *Green Chemistry* (Vol. 22, Número 8, pp. 2325-2353). Royal Society of Chemistry.
<https://doi.org/10.1039/c9gc03878g>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture. En *INFORM* (Vol. 32, Número 6, pp. 6-10). American Oil Chemists Society.
<https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Majid Pakizeh, Ali Moradi, & Toktam Ghassemi. (2021). Chemical extraction and modification of chitin and chitosan from shrimp shells. *European Polymer Journal*, 159.
- Martínez Massoni, J. M. (2008). *Normas de construcción de recipientes a presión : guía del código ASME, sección VIII, Div.1* [Book]. Bellisco.
- Merck Ultrafiltration Discs, 5 kDa NMW, Ultracel™ Regenerated Cellulose. (s. f.). Recuperado 14 de junio de 2024, de <https://www.fishersci.es/shop/products/ultrafiltration-discs-5-kda-nmw-ultracel-regenerated-cellulose/p-7232143#>
- Moran, S. (2019). An Applied Guide to Process and Plant Design. *An Applied Guide to Process and Plant Design*, 1-544. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01972-9>
- Product name Multiwave 5000. (s. f.).
- Rossi, N., Grosso, C., & Delerue-Matos, C. (2024). Shrimp Waste Upcycling: Unveiling the Potential of Polysaccharides, Proteins, Carotenoids, and Fatty Acids with Emphasis on Extraction Techniques and Bioactive Properties. En *Marine Drugs* (Vol. 22, Número 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/md22040153>
- Surendra Kumar Sharma, & Sushil Kumar Kansal. (2020). Extraction of Natural Pigment Gossypol from Defatted Cottonseed Using 2-Propanol-Water Green Solvent, Its Kinetics and Thermodynamic Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 7593-7550.
- Xie, Y.-Y., Shu, Y.-L., Li, D.-L., Li, B., Sun, Z., Zou, Y., Qiao, C.-S., Jia, S.-R., Li, Z.-X., & Zhong, C. (s. f.). *Modeling Kinetics of the Water Extraction of Protein from Caragana korshinskii Kom.*

CAPÍTULO 8.

ANEXOS

8.1. ANEXO I RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 9. Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos

Temperatura	Tiempo Isotérmico	Masa de sólido pesada	Masa de agua + sólido pesado	Masa de líquido extraída	Proteínas extraídas del residuo			Rendimiento de extracción total
					(%)	Media (%)	Desviación (%)	
(°C)	(min)	(g)	(g)	(g)	(%)	Media (%)	Desviación (%)	(%)
100	0	0,334	20,2451	15,676	2,12	2,16	0,05	20,33 ± 0,13
		0,332	20,1436	15,033	2,19			20,90 ± 0,00
	2	0,33	20,1981	16,419	2,22	2,22	-	21,93 ± 0,18
	4	0,33	20,1588	16,578	2,38	2,32	0,07	21,70 ± 0,00
		0,333	19,9896	16,407	2,27			22,33 ± 0,00
	6	0,335	20,1503	16,633	2,30	2,30	-	22,96 ± 0,00
	8	0,333	20,1848	16,697	2,37	2,37	-	23,52 ± 0,00
	10	0,333	20,2011	16,777	2,43	2,43	-	21,47 ± 0,11
12	0,332	20,1583	16,564	2,49	2,49	-	20,90 ± 0,00	
135	0	0,335	20,0825	16,486	2,24	2,28	0,06	24,19 ± 0,54
		0,334	20,1663	16,84	2,31			29,37 ± 0,00
	2	0,331	20,1044	16,463	2,66	2,66	-	32,24 ± 0,00
	4	0,332	20,0054	15,307	2,80	2,80	-	33,96 ± 0,00
	6	0,331	20,0928	16,262	3,11	3,11	-	35,98 ± 0,00
	8	0,331	20,1162	16,508	3,42	3,42	-	29,18 ± 0,65
	10	0,332	20,1869	16,434	3,60	3,60	-	46,45 ± 0,15
	12	0,332	20,1885	16,235	3,81	3,81	-	52,83 ± 0,59
150	0	0,333	20,0225	16,483	3,28	3,10	0,30	54,72 ± 0,00
		0,333	19,9586	16,853	2,91			20,33 ± 0,13
	6	0,334	20,0118	16,445	4,97	4,92	0,06	20,90 ± 0,00
		0,333	19,6732	16,514	4,88			21,93 ± 0,18
	12	0,333	19,7869	16,734	5,93	5,80	0,20	21,70 ± 0,00
		0,334	19,7692	15,580	5,60			22,33 ± 0,00
18	0,334	19,7176	16,524	5,61	5,60	-	22,96 ± 0,00	

Tabla 10. (cont.) Resultados experimentales de la extracción de proteínas a diferentes temperaturas y tiempos.

Temperatura	Tiempo Isotérmico	Masa de sólido pesada	Masa de agua + sólido pesado	Masa de líquido extraída	Proteínas extraídas del residuo			Rendimiento de extracción total
					(%)	Media (%)	Desviación (%)	
(°C)	(min)	(g)	(g)	(g)	(%)	Media (%)	Desviación (%)	(%)
170	0	0,334	19,7511	15,796	3,28	3,33	0,07	31,37 ± 0,17
		0,333	19,9795	16,679	3,37			
	6	0,333	19,9038	15,820	6,77	6,50	0,40	61,40, ± 0,92
		0,334	20,7788	16,694	6,25			
	12	0,333	20,0037	17,034	7,80	7,50	0,40	70,64 ± 1,12
		0,334	20,0602	16,266	7,17			
18	0,334	19,788	16,677	6,80	6,80	-	63,87 ± 0,00	
200	0	0,334	20,4177	18,006	7,55	7,80	0,30	73,42 ± 0,82
		0,334	20,2427	17,145	8,01			
	6	0,333	20,5697	17,585	8,04	8,40	0,50	79,08 ± 1,21
		0,333	20,0557	17,090	8,73			
	12	0,334	19,9639	16,311	8,81	8,50	0,40	80,16 ± 1,11
		0,333	20,0094	17,276	8,18			
230	0	0,333	19,9642	17,443	8,69	8,90	0,30	84,06 ± 0,79
		0,335	20,2196	16,942	9,13			
	6	0,334	20,1075	15,666	7,17	7,25	0,12	68,38 ± 0,29
		0,333	19,9924	17,747	7,33			
	12	0,333	19,9354	17,132	6,96	6,86	0,14	64,72 ± 0,34
		0,333	20,0424	16,193	6,76			

8.2. ANEXO II CÁLCULOS DE LOS MODELOS CINÉTICOS

Tabla 11. Cálculos del modelo cinético de difusión de en estado no estacionario para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C

T (°C)	t (min)	C %*	C ∞ %*	(C ∞)/(C ∞ -C)	ln ((C ∞)/(C ∞ -C))
100	0	2,16	2,49	1,27	0,24
	0				
	2	2,22	2,49	1,55	0,44
	2				
	4	2,32	2,49	2,55	0,94
	4				
	4				
	6	2,30	2,49	2,22	0,80
	6				
	8	2,37	2,49	3,40	1,22
	8				
	10	2,43	2,49	7,24	1,98
	10				
	12	2,49			
12					
135	0	2,28	3,81	1,79	0,58
	0				
	2	2,22	3,81	1,72	0,54
	2				
	4	2,56	3,81	2,20	0,79
	4				
	4				
	6	3,11	3,81	3,92	1,37
	6				
	8	3,42	3,81	6,94	1,94
	8				
	10	3,60	3,81	12,81	2,55
	10				
	12	3,81			
12					
150	0	3,09	5,80	1,44	0,36
	0				
	6	4,92	5,80	4,44	1,49
	6				
	12	5,60	5,80	19,44	2,97
	12				
	18	5,80	5,80		

T (°C)	t (min)	C %*	C _{inf} %*	(C _∞)/(C _∞ -C)	ln ((C _∞)/(C _∞ -C))
170	0	3,33	7,49	1,47	0,39
	0				
	6	6,51	7,49	6,26	1,83
	6				
	12	7,49	7,49		
	12				
	18				
200	0	7,78	8,50	1,73	0,55
	0				
	6	8,38	8,50	10,74	2,37
	6				
	12	8,50	8,50		
	12				

%* Unidades de concentración: Proteínas extraídas (g/100 g de sólidos disueltos)

Tabla 12. Cálculos del Modelo de la Ley de las Potencias para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C

T (°C)	t (min)	t total (min)	ln (t total) (min)	C %*	ln(C) %*
100	0	0,50	-0,69	2,155	0,768
	0	0,50			
	2	2,50	0,92	2,215	0,795
	2	2,50			
	4	4,50	1,50	2,325	0,844
	4	4,50			
	4	4,50			
	6	6,50	1,87	2,300	0,833
	6	6,50			
	8	8,50	2,14	2,367	0,862
	8	8,50			
	10	10,50	2,35	2,434	0,889
	10	10,50			
	12	12,50	2,53	2,493	0,914
12	12,50				
135	0	1,00	0,00	1,967	0,676
	0	1,00	0,00		
	2	3,00	1,10	2,215	0,795
	2	3,00	1,10		
	4	5,00	1,61	2,565	0,942
	4	5,00	1,61		
	4	5,00	1,61		
	6	7,00	1,95	3,113	1,136
	6	7,00	1,95		
	8	9,00	2,20	3,418	1,229
	8	9,00	2,20		
	10	11,00	2,40	3,599	1,281
	10	11,00	2,40		
	12	13,00	2,56	3,814	1,339
12	13,00	2,56			
150	0	1,14	0,13	3,093	1,129
	0	1,14	0,13	0,000	
	6	7,14	1,97	4,924	1,594
	6	7,14	1,97	0,000	
	12	13,14	2,58	5,600	1,723
	12	13,14	2,58	0,000	
	18	19,14	2,95	5,800	1,758

T (°C)	t (min)	t total (min)	ln (t total) (min)	C %*	ln(C) %*
170	0	1,25	0,23	3,33	1,20
	0	1,25	0,23	0,00	
	6	7,25	1,98	6,51	1,87
	6	7,25	1,98	0,00	
	12	13,25	2,58	7,49	2,01
	12	13,25	2,58	0,00	
	18	19,25	2,96	0,00	
200	0	1,41	0,35	7,78	2,05
	0	1,41	0,35	0,00	
	6	7,41	2,00	8,38	2,13
	6	7,41	2,00	0,00	
	12	13,41	2,60	8,50	2,14
	12	13,41	2,60	0,00	

%* Unidades de concentración: Proteínas extraídas (g/100 g de sólidos disueltos)

Tabla 13. Cálculos del Modelo de primer orden para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C

T (°C)	t (min)	t total (min)	C %*	ln(C) %*
100	0	0,50	2,16	0,77
	0	0,50		
	2	2,50	2,22	0,80
	2	2,50		
	4	4,50	2,32	0,84
	4	4,50		
	4	4,50		
	6	6,50	2,30	0,83
	6	6,50		
	8	8,50	2,37	0,86
	8	8,50		
	10	10,50	2,43	0,89
	10	10,50		
	12	12,50	2,49	0,91
12	12,50			
135	0	1,00	1,97	0,68
	0	1,00		
	2	3,00	2,22	0,80
	2	3,00		
	4	5,00	2,56	0,94
	4	5,00		
	4	5,00		
	6	7,00	3,11	1,14
	6	7,00		
	8	9,00	3,42	1,23
	8	9,00		
	10	11,00	3,60	1,28
	10	11,00		
	12	13,00	3,81	1,34
12	13,00			
150	0	1,14	3,09	1,13
	0	1,14	0,00	
	6	7,14	4,92	1,59
	6	7,14	0,00	
	12	13,14	5,60	1,72
	12	13,14	0,00	
	18	19,14	5,80	1,76

T (°C)	t (min)	t total (min)	C %*	ln(C) %*
170	0	1,25	3,33	1,20
	0	1,25	0,00	
	6	7,25	6,51	1,87
	6	7,25	0,00	
	12	13,25	7,49	2,01
	12	13,25	0,00	
	18	19,25	0,00	
200	0	1,41	7,78	2,05
	0	1,41	0,00	
	6	7,41	8,38	2,13
	6	7,41	0,00	
	12	13,41	8,50	2,14
	12	13,41	0,00	

%* Unidades de concentración: Proteínas extraídas (g/100 g de sólidos disueltos)

Tabla 14. Cálculos del Modelo de segundo orden para 100, 135, 150, 170, 200 y 230 °C

T	t	C	1/C
(°C)	(min)	%*	
100	0	2,16	0,46
	0		
	2	2,22	0,45
	2		
	4	2,32	0,43
	4		
	4		
	6	2,30	0,43
	6		
	8	2,37	0,42
	8		
	10	2,43	0,41
	10		
	12	2,49	0,40
12			
135	0	1,97	0,51
	0		
	2	2,22	0,45
	2		
	4	2,56	0,39
	4		
	4		
	6	3,11	0,32
	6		
	8	3,42	0,29
	8		
	10	3,60	0,28
	10		
	12	3,81	0,26
12			
150	0	3,09	0,32
	0	0,00	
	6	4,92	0,20
	6	0,00	
	12	5,60	0,18
	12	0,00	
	18	5,80	0,17

T (°C)	t (min)	C %*	1/C
170	0	3,33	0,30
	0	0,00	
	6	6,51	0,15
	6	0,00	
	12	7,49	0,13
	12	0,00	
	18	0,00	
200	0	7,78	0,13
	0	0,00	
	6	8,38	0,12
	6	0,00	
	12	8,50	0,12
	12		
	12		

%* Unidades de concentración: Proteínas extraídas (g/100 g de sólidos disueltos)

Tabla 15. Cálculos para la linealización de la Ecuación de Arrhenius

T(°C)	k (min ⁻¹)	T(K)	1/T	ln (k)
100	0,1561	373,15	0,0027	-1,8573
135	0,2087	408,15	0,0025	-1,5669
150	0,2171	423,15	0,0024	-1,5274
170	0,2412	443,15	0,0023	-1,4221
200	0,3043	473,15	0,0021	-1,1897
230	-	503,15	0,0020	-

8.3. ANEXO III CÁLCULOS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO

Tabla 16. Tiempos del proceso de extracción.

Tiempos (min) y Ciclos	
Tiempo calentamiento	2
Tiempo mantenimiento	6
Tiempo enfriamiento	2
Tiempo carga	5
Tiempo descarga	5
Tiempo por ciclo	20
Ciclos por hora	3

Tabla 17. Cálculos capacidad total por carga

Número de viales	41	viales
Capacidad vial	56	ml
Capacidad total por carga	2296	ml
Capacidad total por carga	2,296	l
Número de Microondas	4	Microondas
Volumen útil	80%	
Capacidad total por carga	7,3472	l

8.4. ANEXO IV HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL RECIPIENTE D-103



Universidad de Valladolid

DEPÓSITO D-103

REV.	0				
FECHA	4 Julio 2024				
POR	Inés González Caballero				
REV.					
1	Número:	D-103	Cantidad:	1	
2	Servicio:	Almacenamiento de extracto			
3	Fluido:	Agua con proteínas disueltas y sólido residual			
4	Volumen	0,508	m ³		
5	Diámetro	0,69	m	Altura	1,377 m
6	Horizontal o Vertical	Vertical			
7		PRESSURE bar		TEMPERATURE °C	
8		Operación	Diseño	Operación	Diseño
9	Carcasa	1	6	35	45
10	Camisa	-	-	-	-
11					
12		MATERIAL			
13	Carcasa	SS 304			
14	Cabezales	SS 304			
15	Camisa	-			
16	Demister	-			
17					
18	Tipo Cabezal	Toriférico			
19	Código	ASME VIII Div 1			
20	Espesor envolvente cilíndrica	5		mm	
21	Espesor cabezal	5		mm	

8.5. ANEXO V HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL SILO D-101



DEPÓSITO D-101

Universidad de Valladolid

REV.	0				
FECHA	4 Julio 2024				
POR	Inés González Caballero				
REV.					
1	Número:	D-101	Cantidad	1	
2	Servicio:	Almacenamiento cáscara molida			
3	Contenido:	Cáscara de langostino molida			
4	Volumen	0,51	m ³		
5	Diámetro	0,86	m	Altura	0,86 m
6	Horizontal o Vertical	Vertical			
7		PRESSURE bar		TEMPERATURE °C	
8		Operación	Diseño	Operación	Diseño
9	Carcasa	1	3,5	35	45
10	Camisa	-	-	-	-
11					
12		MATERIAL			
13	Carcasa	SS 304			
14	Cabezales	SS 304			
15	Camisa	-			
16	Demister	-			
17					
18	Tapa	Cónica			
19	Código	UNE-EN-1991-4, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras.			
20	Espesor pared	3	mm		
21	Altura tolva	0,21	m		
22	Ángulo tolva	40	°		

8.6. ANEXO VI HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA P-100

 Universidad de Valladolid		BOMBA- P-100		
REV.		0		
FECHA		4 Julio 2024		
POR		Inés González Caballero		
1	NÚMERO		P-101	
2	SERVICIO		Bomba de alimentación del Filtro F-100	
3	TIPO		Peristáltica	
4	NÚMERO DE BOMBAS		2	
5	EN OPERACIÓN		1	
6	REPUESTO		1	
7			MOTOR	X
8	FUERZA IMPULSORA		TURBINA	
9			OTHERS	
10	LÍQUIDO BOMBEADO		Fluido de proceso compuesto por agua y residuo sólido	
11	TEMPERATURA DE BOMBEO	°C	45	
12	VISCOSIDAD	Pa·s	0,001	
13	PRESIÓN	bar	6	
14	DENSIDAD	kg/m3	1000	
15	CAPACIDAD NORMAL	m3/h	0,106	
16	PRESIÓN DE DESCARGA	bar	6	
17	PRESIÓN DE SUCCIÓN	bar	1	
18	PRESIÓN DIFERENCIAL	Pa	5	
19	CABEZAL	m3/h	59,41	
20	(Continuos/Intermitente)		Intermitente	
21	CORROSIÓN O EROSIÓN		Sí, debido a los sólidos presentes	
22	SOLIDOS EN SUSPENSIÓN		Sí	
23	LOCALIZACIÓN		Dentro de la fábrica	
24	POTENCIA	W	24570,0	
25	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN		SS 304	