



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS

Autor:

Nieto Cid, Neila

Tutor:

Alonso Sánchez, Gloria Esther

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente

Valladolid, julio 2024

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en el dimensionado de una planta piloto para la desmineralización de las cáscaras de crustáceos, en el proceso de valorización de este residuo.

Se ha desarrollado un estudio experimental con cáscaras *Litopenaeus Vannamei* obteniéndose las siguientes condiciones óptimas que maximizan la desmineralización de las cáscaras de crustáceos: ácido láctico 1M, relación sólido/líquido 10/200 w/v y un tiempo de agitación de 60 minutos a 30°C.

Se ha realizado el dimensionado de una planta piloto realizando un ciclo completo por día trabajando 8 h/d. Se emplean dos tanques agitados, uno donde se realiza la disolución de ácido y otro donde se produce la desmineralización de las cáscaras y un filtro prensa para separar la fase líquida de la fase sólida. De esta manera, se obtienen como productos el líquido filtrado (con el lactato de calcio) y sólido desmineralizado rico en proteínas y en quitina.

PALABRAS CLAVE

Desmineralización, crustáceos, ácido láctico, cáscaras y *Litopenaeus Vannamei*

ABSTRACT

This final degree project is focused on the design of a pilot plant for the demineralisation of crustacean shells, in the process of recovering this waste.

An experimental study with *Litopenaeus Vannamei* shells has been carried out with the following optimal conditions maximising crustacean shells demineralisation: 1M lactic acid, solid/liquid ratio of 10/200 w/v, and an agitation time of 60 minutes at 30°C.

The dimensioning of a pilot plant is carried out by performing a complete cycle per day working 8 h/d. Two agitated tanks are used, one where the acid dissolution is carried out and the other where the demineralisation of the shells takes place, and a filter press to separate the liquid phase from the solid phase. The products obtained are a filtered liquid (with calcium lactate) and demineralised solid rich in proteins and chitin.

KEYWORDS

Demineralization, crustaceans, lactic acid, shells and *Litopenaeus Vannamei*

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	8
1.1 CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS.....	8
1.2 PRODUCTOS DE VALORIZACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE LOS CRUSTÁCEOS.....	9
1.2.1 QUITINA	9
1.2.2 QUITOSANO	10
1.3 PROCESO DE DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARA DE CRUSTÁCEOS	11
1.3.1 DESMINERALIZACIÓN CON HCl	11
1.3.2 DESMINERALIZACIÓN CON ÁC. ORGANICOS, ÁC. FÓRMICO Y ÁC. LÁCTICO ...	11
1.3.3 OTRAS FORMAS DE DESMINERALIZACIÓN	12
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS.....	14
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS.....	15
3.1 MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1.1 MATERIA PRIMA.....	15
3.1.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	15
3.1.3 CUANTIFICACIÓN DE CENIZAS.....	19
3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA DESMINERALIZACIÓN CON ÁCIDOS	20
3.2.1 EFECTO DEL TIPO DE ÁCIDO.....	20
3.2.2 EFECTO DE LA RELACIÓN SÓLIDO/LÍQUIDO	22
3.2.3 EFECTO DEL TIEMPO	23
3.2.4 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO.....	24
3.2.5 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FILTRACIÓN Y LA CENTRIFUGACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS DESPUÉS DE LA ETAPA DE DESMINERALIZACIÓN	29
3.2.6 SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS.....	32
CAPÍTULO 4. CÁLCULO Y DIMENSIONADO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE LA CÁSCARAS DE LANGOSTINOS.....	33
4.1 DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO DEL PROCESO	33
4.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.....	33
4.1.2 HORAS DE OPERACIÓN	33
4.1.3 MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS.....	33
4.1.4 LOCALIZACIÓN.....	34
4.1.5 SERVICIOS AUXILIARES.....	34

4.1.6 CÓDIGOS DE DISEÑO.....	35
4.1.7 TIEMPO DE VIDA	35
4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	36
4.3 DIAGRAMA DE FLUJO	37
4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES	38
4.3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	38
4.3.3 SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS DEL PFD.....	39
4.3.4 BALANCE DE MATERIA	41
4.3.4.1 MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS.....	41
4.3.4.2 BALANCES A LA ETAPA DE FILTRACIÓN A VACÍO	42
4.3.4.2.1 Descripción del filtro	42
4.3.4.2.2 Ciclo de filtración	43
4.4 DISEÑO DE EQUIPOS	46
4.4.1 DIMENSIONADO Y ESPECIFICACIONES DEL TANQUE AGITADO (R-101)	46
4.4.1.1 DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO	46
4.4.1.2 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS	47
4.4.1.2.1 Dimensiones: Diámetro, altura del recipiente y tiempo de mezcla ..	47
4.4.1.2.2 Propiedades del sólido.....	47
4.4.1.2.3 Cálculo del número de Reynolds	48
4.4.1.3 DISEÑO MECÁNICO	50
4.4.1.3.1 Selección del material.....	50
4.4.1.3.2 Espesores de pared	50
4.4.1.3.3 Espesor de carcasa	51
4.4.1.3.4 Espesor de los cabezales.....	53
4.4.1.3.5 Presión de prueba hidrostática.....	55
4.4.2 DIMENSIONADO DEL TANQUE DE SUSPENSIÓN (V-101).....	56
4.4.3 DIMENSIONADO DEL TANQUE DE LAVADO (D-102).....	56
4.5 HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPO	57
4.6 SELECCIÓN DE TANQUE AGITADO COMERCIAL (R-101)	58
CAPÍTULO 5. IMPACTO EN LA MEJORA DE LA SOCIEDAD DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS DE LA AGENDA 2030	60
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	61
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	62

CAPÍTULO 8. ANEXOS.....	67
ANEXO 1. RESULTADOS EXPERIMENTALES	67
ANEXO 2. SELECCIÓN DE MATERIALES	69
ANEXO 3. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	67
ANEXO 4. DIAGRAMA DE FLUJO	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de la quitina.....	9
Figura 2. Estructura química del quitosano.....	10
Figura 3. Erlenmeyers con la muestra S/L agitando en el baño termostático multipuesto	16
Figura 4. Diagrama de sectores del proceso de desmineralización	17
Figura 5. Esquema del procedimiento experimental	18
Figura 6. Porcentaje de desmineralización frente a la misma relación S/L a distintos tiempos	23
Figura 7. Malvern Mastersizer 2000.....	25
Figura 8. Distribución del tamaño de partículas volumen (%) frente al tamaño de partículas	26
Figura 9. Centrifugadora Magnus 22 R.....	29
Figura 10. Cápsula después de estufa y cenizas obtenidas por centrifugación sin lavado	30
Figura 11. Cápsula después de estufa y cenizas obtenidas por centrifugación con ciclos de lavado	31
Figura 12. Curvas características de la bomba del filtro prensa.....	42
Figura 13. Curva de potencia para distintos agitadores.....	49
Figura 14. Reactor modelo VJR500S.....	58
Figura 15. Turbina de palas inclinadas	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de las cáscaras de langostino	8
Tabla 2. Composición mineral de las cáscaras de Litopenaeus Vannamei.....	9
Tabla 3. Composición de la materia prima	15
Tabla 4. Especificaciones técnicas del filtro usado en filtración a vacío	16
Tabla 5. Condiciones de los experimentos con ácidos	17
Tabla 6. Cuantificación de cenizas y % de desmineralización con distintos ácidos.....	21
Tabla 7. Cuantificación de cenizas y % de desmineralización en diferentes condiciones de relación S/L	22
Tabla 8. Condiciones de las muestras para estudiar el tamaño de partículas del sólido y su influencia en la filtración a vacío	25
Tabla 9. Diámetros de partículas calculados por Malvern Mastersizer 2000	26
Tabla 10. Especificaciones de los filtros para análisis cuantitativo de Filter-Lab	27
Tabla 11. Especificaciones técnicas de la centrífuga Magnus 22R	29
Tabla 12. Resultados del experimento 7A por filtración y 7B por centrifugación sin lavado.....	30
Tabla 13. Resultados del experimento 7C por filtración y 7D por centrifugación con lavado	31
Tabla 14. Parámetros comparativos entre el ácido láctico y el ácido fórmico.....	32
Tabla 15. Propiedades del agua tipo III	34
Tabla 16. Tabla de corrientes del diagrama de flujo	38
Tabla 17. Acrónimos del PFD.....	40
Tabla 18. Datos obtenidos en los balances de materia	42
Tabla 19. Datos de partida del tanque agitado	46
Tabla 20. Dimensiones del equipo de laboratorio	46
Tabla 21. Esfuerzos máximos permisibles según el código BPVC ASME sección VIII div.1	50
Tabla 22. Eficiencia máxima permitida según el código BPVC ASME sección VIII div.1	51
Tabla 23. Espesores mínimos de pared en función del diámetro del recipiente	52
Tabla 24. Características reactor VJR500S	58

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1.1 CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS

El *Litopenaeus Vannamei* o langostino blanco es una variedad de camarón blanco del Pacífico. Además de su valor gastronómico, el langostino también tiene un gran valor a nivel industrial debido a la cantidad de subproductos que se pueden obtener de los tratamientos de su carne y caparazón como la quitina y el quitosano (Cahú et al., 2012) (El Knidri et al., 2018).

El langostino blanco (*Litopenaeus Vannamei*) es la especie con mayor producción mundial por acuicultura, en 2020 se llegaron a producir 5.812.180 toneladas (“The State of World Fisheries and Aquaculture 2022,” 2022). El proceso de producción de los langostinos comienza con la selección de las larvas y la elección del agua adecuada para la etapa de cultivo. El agua debe tener unas condiciones de temperatura y salinidad adecuadas para el crecimiento de los langostinos (Hu et al., 2020). Su alimentación se compone principalmente de fitoplancton y zooplancton, aunque también se les puede alimentar con productos procesados. En la etapa de crecimiento, los langostinos se deshacen de su exoesqueleto, una estructura que proporciona soporte, rigidez e impermeabilidad al cuerpo, a través de la hidrólisis de componentes cuticulares y sintetizar un nuevo exoesqueleto que se adapte al tamaño del cuerpo. Este proceso se repite varias veces durante el ciclo de la vida de los langostinos, se conoce como muda o ecdisis (Rocha et al., 2012). Finalmente, cuando los langostinos alcanzan el tamaño deseado, se procede a la cosecha para su posterior comercialización y uso culinario (Cahú et al., 2012).

La Tabla 1 recoge la composición media de las cáscaras del langostino blanco.

Tabla 1. Composición de las cáscaras de langostino (El Knidri et al., 2018) (Ploydee & Chaiyanan, 2014)

Composición	Cantidad (%)
Proteínas	25-40
Quitina	15-30
Minerales	20-50
Humedad	5-15
Lípidos	1-3

La composición de la parte mineral de la cáscara de langostinos se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición mineral de las cáscaras de *Litopenaeus Vannamei* (Núñez-Gómez et al., 2021)

Elemento	Cantidad ppm (mg/kg)
Ti	80,98 ± 0,13
Fe	43,12 ± 0,54
Zn	22,32 ± 0,70
Mn	10,86 ± 0,93
Cu	9,50 ± 0,67
Al	6,80 ± 0,26
Cr	0,55 ± 0,12
Ni	0,31 ± 0,09

Elemento	Cantidad % (g/kg)
Ca	44,61 ± 5,56
Mg	3,86 ± 1,70
K	1,67 ± 1,28
Sr	1,22 ± 0,87
Na	0,85 ± 0,22
Ba	0,23 ± 0,06

1.2 PRODUCTOS DE VALORIZACIÓN DE LAS CÁSCARAS DE LOS CRUSTÁCEOS

1.2.1 QUITINA

La quitina es un biopolímero compuesto por cadenas lineales de N-acetilglucosamina como se puede ver en la Figura 1, un monosacárido que consta de una molécula de glucosa unida a un grupo acetamida (Lv et al., 2023).

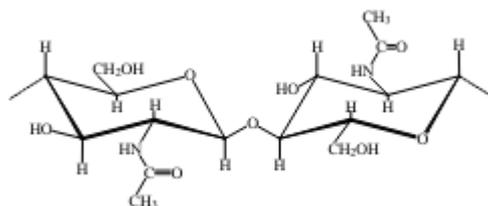


Figura 1. Estructura química de la quitina (Kumar Dutta et al., 2004)

La quitina es un polisacárido presente en la naturaleza y se encuentra en diversos organismos, como los artrópodos, los hongos y algunos animales marinos, como los equinodermos, crustáceos y moluscos. Es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza después de la celulosa (El-araby et al., 2022).

En la cáscara de los crustáceos se estima que hasta un 45% de su biomasa está compuesta por quitina. Sin embargo, para aplicaciones biológicas se requiere purificar la quitina, esto implica la eliminación de proteínas, minerales, lípidos y pigmentos mediante la desmineralización y desproteización de las cáscaras (Percot et al., 2003).

A pesar de que existen varios métodos de extracción para estos componentes, siempre hay una inevitable degradación de la quitina. Por lo tanto, existe un gran interés en la optimización de la extracción para minimizar la degradación y reducir los niveles de impurezas en la quitina (El-araby et al., 2022) (El Knidri et al., 2018).

La quitina tiene diversas aplicaciones en campos como la agricultura, industria alimentaria, farmacéutica, la biomedicina y la veterinaria. Por ejemplo, se utiliza como ingrediente en alimentos funcionales y suplementos dietéticos, como agente aglutinante en medicamentos, y como agente de control de calidad en la industria alimentaria. También se han desarrollado nuevos materiales, tales como membranas, geles y compuestos poliméricos para aplicaciones biotecnológicas y biomédicas (El-araby et al., 2022).

1.2.2 QUITOSANO

El quitosano es un polisacárido lineal de N-acetilglucosamina (GlcNAc) y glucosamina (GlcN) como puede verse en la Figura 2. La estructura química del quitosano incluye enlaces β (1 \rightarrow 4) de las unidades de GlcNAc y GlcN, y grupos amino protonados en las posiciones 2 y 3 del anillo de GlcN (Nour et al., 2024).

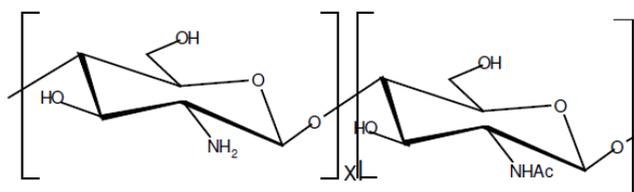


Figura 2. Estructura química del quitosano (Kumar Dutta et al., 2004)

El quitosano se obtiene a partir de la quitina mediante procesos químicos o enzimáticos de deacetilación. Una de sus propiedades más interesantes es su capacidad para formar geles, se usa para elaborar películas y recubrir alimentos prolongando su vida útil. Además, el quitosano tiene propiedades antimicrobianas, por lo que se utiliza en productos para el cuidado personal, como cremas y champús (Nour et al., 2024).

Uno de los usos más prometedores del quitosano es en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, eliminación de los hidrocarburos presentes en el medio ambiente y como coagulante en el tratamiento de aguas residuales (David Giraldo Pedraza, 2015).

1.3 PROCESO DE DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARA DE CRUSTÁCEOS

La cáscara de crustáceos constituye un residuo sólido que puede generar problemas ambientales. Sin embargo, su composición rica en quitina la convierte en una materia prima de alto valor que puede tener diversas aplicaciones, tales como la producción de quitosano y de oligosacáridos de quitina (COS). Para la obtención de estos compuestos, es necesario previamente un proceso de desmineralización de las cáscaras, con el objetivo de eliminar las sales inorgánicas y otros materiales no deseados. Este proceso puede hacerse mediante diversos métodos, tales como la extracción con ácidos, con enzimas específicas o mediante fermentación microbiana (Nour et al., 2024). Este TFG se centra en el estudio de desmineralización de cáscara de crustáceos mediante ácido clorhídrico (HCl), ácido fórmico y ácido láctico.

1.3.1 DESMINERALIZACIÓN CON HCl

El proceso de desmineralización con HCl tiene como objetivo retirar el carbonato de calcio presente en el exoesqueleto de los crustáceos, lo que se logra mediante la siguiente reacción,



Es recomendable llevar a cabo la desmineralización a temperatura ambiente al tratarse de una reacción exotérmica y con períodos de tiempo cortos para evitar la despolimerización y la ruptura de los enlaces iónicos de hidrógeno (Khan et al., 2018). La concentración del HCl y el tiempo de contacto con el sólido varían según el estudio, pero por lo general se utiliza una concentración entre 0,25M - 4M y tiempos de contacto entre 2 minutos hasta 1440 minutos (Benhabiles et al., 2012).

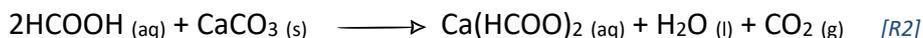
La desmineralización con HCl es un método extendido debido a su mayor eficacia en comparación con otros ácidos inorgánicos, como el HNO₃, H₂SO₄ y H₃PO₄ pero, tiene un coste elevado, riesgo al manipularlo y peligroso para el medio ambiente (Nguyen et al., 2017).

1.3.2 DESMINERALIZACIÓN CON ÁC. ORGANICOS, ÁC. FÓRMICO Y ÁC. LÁCTICO

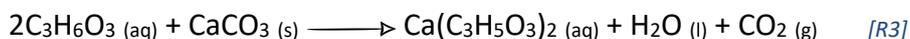
Desmineralizar la cáscara de crustáceos usando ácidos orgánicos (como el ácido fórmico, láctico, acético o cítrico) en vez de ácidos inorgánicos presenta una serie de ventajas, tales como una menor toxicidad, menos corrosividad y mayor selectividad en la extracción de minerales. Además, a diferencia de los ácidos inorgánicos, los ácidos orgánicos se pueden obtener fácilmente a partir de fuentes renovables y, por lo tanto, su producción es más sostenible (El-araby et al., 2022).

La desmineralización con ácido fórmico [R2] se ha determinado que puede alcanzar un rendimiento de desmineralización del 99% a un pH de 3.5 y del 98% a un pH de 4.0, dependiendo del volumen de la disolución. Además, se ha demostrado que combinando ácido fórmico y la enzima ASP (proteasa ácida estable) puede mejorar el rendimiento de la desmineralización. También, se ha analizado la cinética de la desmineralización en

condiciones estequiométricas y se ha estudiado el efecto de la relación molar y el volumen de reacción (El-araby et al., 2022) (Baron et al., 2017).



La desmineralización con ácido láctico [R3] ha demostrado ser efectiva, logrando hasta un 98.4% de desmineralización de los exoesqueletos, superando resultados de otros métodos biológicos. Un aspecto importante de trabajar con ácido láctico es la recuperación del lactato de calcio, se ha observado que los cristales de lactato de calcio se forman después de reposar a 4 °C durante 72 horas para luego llevar a cabo un proceso de lavado y secado antes de su utilización o comercialización como aditivo alimentario y excipiente en industria farmacéutica (Hermosillo, 2012).



1.3.3 OTRAS FORMAS DE DESMINERALIZACIÓN

Existen varias alternativas para la desmineralización sin el uso de ácidos. Una de ellas, es la desmineralización enzimática. La enzima proteasa proveniente de *Streptomyce griseus* se usa en la desmineralización de las cáscaras de crustáceos con una relación enzima-sólido de 55 U/g, pH 7,0 y un tiempo de incubación de 3 horas con un tamaño de partícula de 25-50 µm con una eficacia total de eliminación de proteínas del 91,10 % y un porcentaje de desmineralización del 98,64% (Hongkulsup et al., 2016).

Además, existen microorganismos tales como probióticos naturales, *Lactobacillus plantarum* y *Pseudomonas aeruginosa* A2 capaces de desmineralizar las cáscaras de crustáceos. Con probióticos naturales se obtuvo una desmineralización del 69%, se trata de un proceso eficaz y económico por lo que se convierte en una alternativa a los métodos químicos en la extracción de quitina (Prameela et al., n.d.). En el caso de *Lactobacillus plantarum* utiliza la fuente de carbono de las cáscaras de crustáceos para producir ácido láctico. Este ácido láctico ayuda en la desmineralización al precipitar sales orgánicas como el lactato de calcio. En el estudio realizado por Khorrami y col. (Khorrami et al., n.d.) con *L.plantarum* lograron una desmineralización del 54% y combinado a tratamientos químicos posteriores permitió la extracción de quitina de las cáscaras de crustáceos. Por último, la *Pseudomonas aeruginosa* A2 es una cepa de bacterias con una actividad proteolítica en la desmineralización y desproteínización de cáscaras de crustáceos en la producción de quitina (Ghorbel-Bellaaj et al., 2011).

Otra forma de desmineralización en la extracción de quitina en cáscaras de crustáceos es con ácido carbónico (H₂CO₃). Este proceso llamado HOW-CA destaca por la eficiencia en la eliminación de minerales con porcentajes superiores al 90%, consiste en sumergir las cáscaras de crustáceos en una disolución acuosa de CO₂ a presión atmosférica, esto provoca la disolución del carbonato de calcio presente en la cáscara. Al liberarse el dióxido

de carbono, el carbonato de calcio vuelve a precipitar permitiendo su recuperación por filtración. Este método reduce la necesidad de reactivos corrosivos y minimiza la generación de residuos, lo que convierte este método en una alternativa viable económicamente y sostenible con el medio ambiente (Yang et al., 2019).

Cada uno de los métodos mencionados presenta ventajas y desventajas, por lo que la elección de cuál es el adecuado dependerá de las necesidades específicas del producto final (David Giraldo Pedraza, 2015) .

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

Este TFG tiene dos objetivos globales:

1. Evaluar experimentalmente la etapa de desmineralización con ácidos de un residuo de *Litopenaeus Vannamei*.
2. Realizar un dimensionado básico de una planta piloto para la desmineralización de este tipo de residuo que se instalaría en el laboratorio del Grupo PressTech de la Universidad de Valladolid.

Estos dos objetivos se concretan en los siguientes objetivos específicos.

1.1. Estudiar el efecto de las variables de operación (tipo de ácido, tiempo, relación sólido/ácido) en la desmineralización de residuos de *Litopenaeus Vannamei* para sustituir el ácido clorhídrico del proceso convencional por un ácido orgánico de origen biológico.

1.2. Conocer y aplicar técnicas de análisis de biomasa (cuantificación de cenizas, filtración, centrifugación, tamaño de partícula, ...).

1.3. Realizar experimentos a escala de laboratorio.

1.4. Definir a partir del estudio experimental las condiciones de operación y de diseño para una planta piloto de laboratorio con una capacidad de tratamiento 25 kg/día de residuo

2.1. Plantear el diagrama de flujo de procesos de la planta piloto de desmineralización de cáscaras de crustáceos.

2.2. Realizar el dimensionado del tanque agitado para la desmineralización utilizando procedimientos de cambio de escala y el código ASME BPVC sección VIII, Div. 1 para el diseño mecánico.

Este TFG incluye un tercer objetivo:

3.1. Evaluar el impacto social que supone el desarrollo de esta tecnología de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. En concreto, en el objetivo 12. Producción y Consumo Responsables.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1 MATERIA PRIMA

En este TFG se va a trabajar con un residuo de *Litopenaeus Vannamei* proporcionado por la empresa GambaFresh en el mes de octubre del año 2023, en concreto de sus instalaciones en Valdorros (Burgos). 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 3 recoge la composición de la materia prima utilizada en la parte experimental de este TFG.

Tabla 3. Composición de la materia prima

RESIDUO GAMBAFRESH - oct2023		
Caracterización química (contenido)	Base seca	
	Av (%)	SD (%)
Extractivos acuosos	9,30	0,60
Acidos grasos	2,12	0,02
Cenizas	39,60	0,20
Quitina	16,90	0,80
Proteínas	19,40	0,90
Aminoácidos libres	0,86	0,02
Total	88,00	

3.1.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento llevado a cabo en los diferentes experimentos siempre es el mismo.

En primer lugar, se enciende el baño termostático con multipuesto para poder agitar las muestras sólido-líquido y se fija una temperatura de 30°C. A continuación, se prepara la muestra, para ello, se tara el Erlenmeyer y se pesan 10 g del sólido en la balanza analítica Adventurer Pro Analytical modelo AV64C (<i>AdventurerTM Pro Analytical Electronic Balance, AV64C | OHAUS</i>, n.d.) con una precisión de 0,1 mg. El siguiente paso es preparar la disolución de ácido en las concentraciones molares que se hayan fijado previamente para saber la cantidad de ácido y agua destilada que se deben echar. Una vez preparada la disolución, se echa la cantidad correspondiente, 100 ml o 200 ml en cada Erlenmeyer donde se encuentra el sólido introduciendo previamente un agitador magnético en cada uno. Se tapa el Erlenmeyer con Parafilm y con una aguja se hacen un par de agujeros para que se libere el CO₂ que se produce durante la agitación.

Se colocan los Erlenmeyers en los multipuestos del baño termostático y se enciende la agitación. Antes, en cada Erlenmeyer se colocan dos anillas que hagan de peso evitando que floten Figura 3.



Figura 3. Erlenmeyers con la muestra S/L agitando en el baño termostático multipuesto

A continuación, se filtra a vacío para ello, se emplea un embudo Büchner con un diámetro de 10 cm, sobre el que se coloca un filtro para análisis cuantitativo FILTER-LAB® (*Filtros Anóia*, n.d.) fabricado con fibras de celulosa y linters de algodón de elevada pureza, las especificaciones técnicas se recogen en la Tabla 4, previamente se ha pesado en la balanza analítica, y un matraz Kitasato (matraz con un vástago lateral para permitir conexiones) conectado mediante un tubo flexible a una bomba de vacío mecánica Edwards 1.5 E2M1.5 de paletas rotativas de doble etapa (*Vacuum Pumps and Services for General Industries, Research & Development - Edwards Vacuum*, n.d.) que trabaja a una presión negativa de 5 mmHg. La mezcla se vierte en el embudo, el líquido se recoge en el Kitasato y desecha mientras que el sólido se queda en el filtro.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del filtro usado en filtración a vacío

Ref.	Filtración	Gramaje (g/m ²)	Espesor (mm)	Poro (µm)	Cenizas (%)
1240	Media	85	0,200	14-18	< 0,01

El sólido que queda en el filtro debe tener un pH neutro (pH:7). Para ello, con un frasco lavador de agua tipo III se lava el sólido sobre el filtro varias veces y con papel indicador de pH se va comprobando el pH del sólido hasta conseguir pH neutro. Una vez logrado, se lleva el filtro con el sólido a la estufa de secado y esterilización de la marca J.P.Selecta (*Estufas y Hornos*, n.d.)

Tras 24 horas secando a 80°C, los filtros con el sólido se pasan a un desecador y tras 10 minutos, se pesan cada uno de ellos en la balanza analítica. Los diferentes experimentos se realizan siempre por duplicado, así que, en este momento, se unen los sólidos de ambos en un solo frasco, se homogeniza y se divide cada muestra en tres crisoles (que se pesan antes en la balanza analítica), en cada uno de ellos se depositan 2 g de sólido tras la estufa. A continuación, se introducen en la mufla durante 2 horas a 550 °C, después, los crisoles se introducen en la estufa para que descienda la temperatura y tras 10 minutos

se introducen en un desecador. Por último, se pesan las cenizas de cada crisol en la balanza analítica.

Los experimentos se realizan con ácido clorhídrico, ácido fórmico y ácido láctico. Las condiciones de los experimentos se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de los experimentos con ácidos

Número de experimento	Ácido	Concentración de la disolución (M)	Volumen disolución (mL)	Masa inicial cáscara (g)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	Ácido clorhídrico	1	100	10	30	60
2	Ácido clorhídrico	1	100	10	30	120
3	Ácido clorhídrico	1	200	10	30	120
4	Ácido láctico	1	100	10	30	60
5	Ácido láctico	1	100	10	30	120
6	Ácido láctico	1	200	10	30	120
7	Ácido fórmico	1	100	10	30	60
8	Ácido fórmico	1	100	10	30	120
9	Ácido fórmico	1	200	10	30	120
10	Ácido láctico	1	200	10	30	60
11	Ácido láctico	0,5	100	10	30	60
12	Ácido láctico	0,5	200	10	30	60

El esquema del procedimiento experimental ya explicado se puede ver en las Figuras 4 y 5.

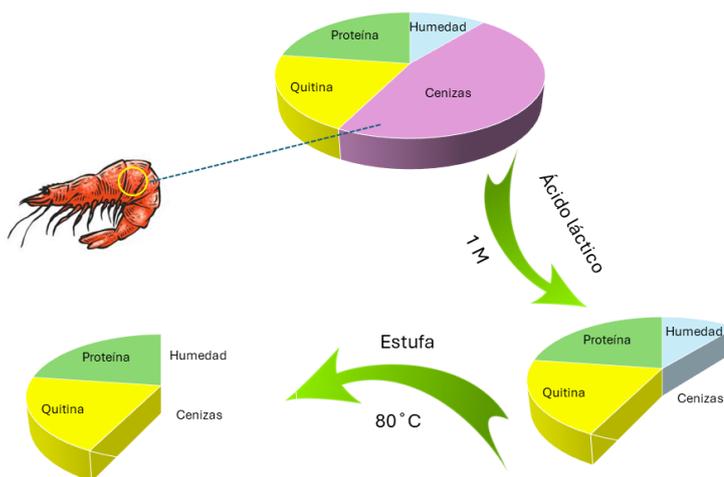


Figura 4. Diagrama de sectores del proceso de desmineralización

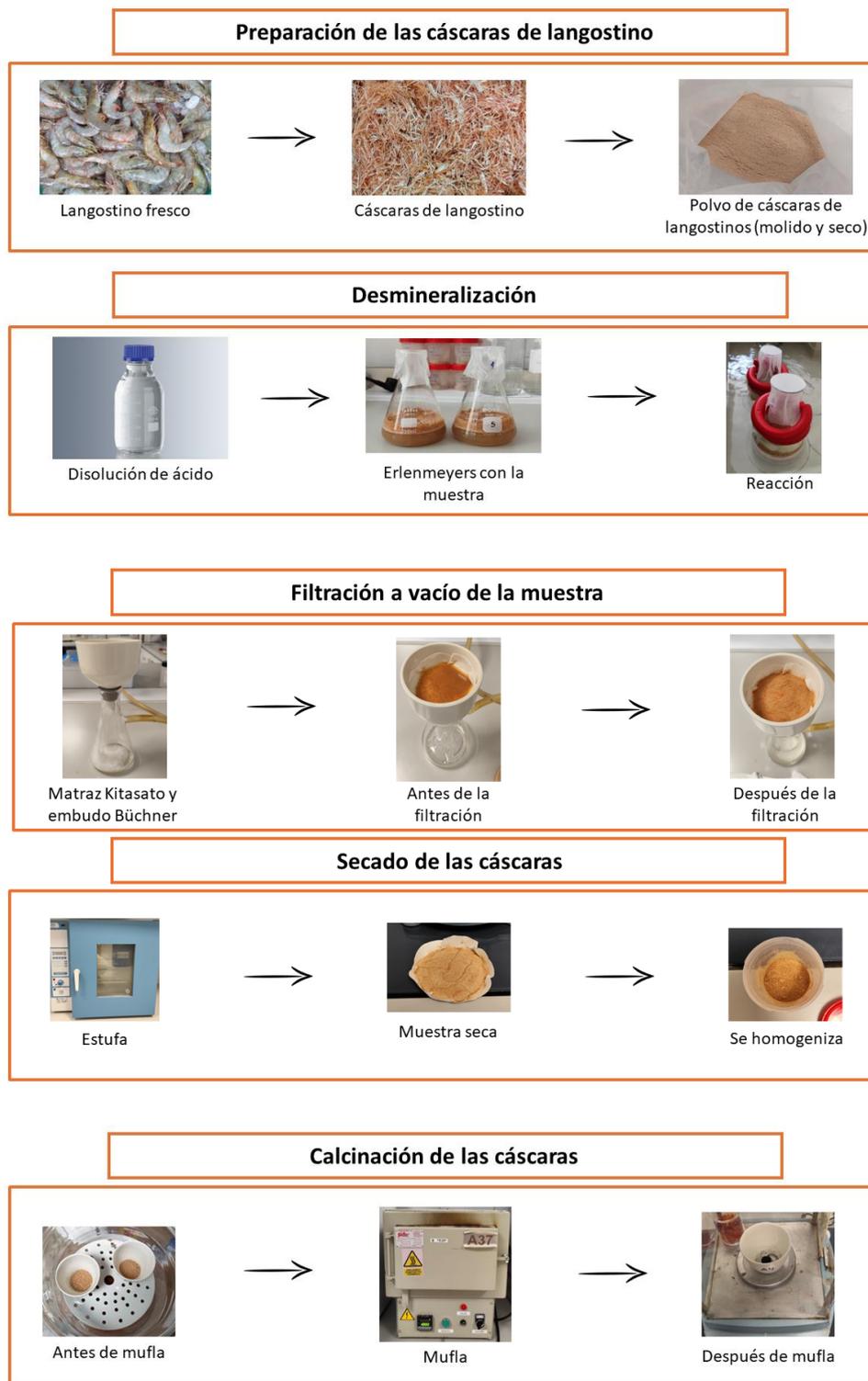


Figura 5. Esquema del procedimiento experimental

3.1.3 CUANTIFICACIÓN DE CENIZAS

La cuantificación de cenizas se ha realizado por gravimetría, este tipo de análisis químico se engloba dentro de las técnicas químicas (o clásicas) las cuales están basadas en una reacción química entre el analito (A), en este caso, el sólido (cáscaras de crustáceos), y un compuesto que reacciona específicamente con él (B), el ácido, originando un producto (C) según una relación estequiométrica determinada:



La gravimetría se basa en la medida de la masa del producto obtenido en un proceso en el que el analito se separa del resto de componentes de la muestra, separación que se lleva a cabo por volatilización (Bermejo & Moreno, 2014).

Metodología

Preparación de la muestra: las muestras de sólido una vez filtradas, se secan a 80 °C en una estufa durante 12 horas para eliminar cualquier traza de humedad. A continuación, se muele hasta obtener un polvo homogéneo.

Calcinación: la muestra preparada se divide en tres crisoles de porcelana, en cada crisol se colocan dos gramos de muestra y se someten a una temperatura de 550 °C en un horno mufla durante 2 horas. Este proceso permite la combustión completa del material orgánico.

Cuantificación: tras la calcinación, los residuos de cenizas se dejaron enfriar primero en la estufa durante 15 minutos y luego en un desecador y se pesaron en la balanza analítica.

Cálculo de contenido de cenizas: el contenido de cenizas se expresa en porcentaje,

$$\text{Porcentaje de cenizas} = \left(\frac{\text{Masa de cenizas}}{\text{Masa inicial de cáscara}} \right) \cdot 100 \quad [\text{Ec. 1}]$$

Cálculo de porcentaje de desmineralización: expresado en términos de porcentaje de desmineralización la ecuación que se utiliza es,

$$\text{Porcentaje de desmineralización} = \left(\frac{(\text{masa cáscara} \cdot \% \text{ de minerales cáscara}) - (\text{masa seca} \cdot \% \text{ cenizas})}{\text{masa cáscara} \cdot \% \text{ de minerales cáscara}} \right) \cdot 100 \quad [\text{Ec. 2}]$$

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA DESMINERALIZACIÓN CON ÁCIDOS

Las variables de interés que se han estudiado con la realización de los diferentes experimentos son el tipo de ácido, la relación sólido-líquido, el tiempo y la concentración de ácido.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada variable estudiada.

3.2.1 EFECTO DEL TIPO DE ÁCIDO

El efecto del tipo de ácido se ha analizado en los experimentos del 1 al 9 realizados todos con una concentración de ácido 1M. En estas condiciones se está trabajando con un 20% de exceso de ácido en una relación 10/100 g/mL, es decir, en los experimentos 1,2,4,5,7 y 8 y con un 60% de exceso de ácido en la relación 10/200 g/mL, experimentos 3,6 y 9, para una disociación completa del ácido. Los cálculos son:



$$10 \text{ g cáscara} \cdot 0,396 = 3,96 \text{ g CaCO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100,09 \text{ g CaCO}_3} = 0,04 \text{ mol CaCO}_3$$

$$0,04 \text{ mol CaCO}_3 \cdot \frac{2 \text{ moles de ácido}}{1 \text{ mol CaCO}_3} = 0,08 \text{ moles de ácido}$$

¿Cuántos moles hay de ácido en 1M?

$$c \text{ (mol/L)} = \frac{n \text{ (mol)}}{V \text{ (L)}} \rightarrow n \text{ (mol)} = c \text{ (mol/L)} \cdot V \text{ (L)} \quad [\text{Ec. 3}]$$

En el caso de 1M con relación 10/100,

$$n = 1 \text{ mol/L} \cdot 100 \text{ mL} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0,1 \text{ moles de ácido}$$

Y en el caso de 1M con relación 10/200,

$$n = 1 \text{ mol/L} \cdot 200 \text{ mL} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0,2 \text{ moles de ácido}$$

La cantidad estequiométrica son 0,08 moles de ácido, se calcula el % de exceso, en el caso de 1M con una relación 10/100,

$$\% \text{ exceso} = \frac{(0,1 - 0,08) \text{ moles de ácido}}{0,1 \text{ moles de ácido}} \cdot 100 = 20\%$$

Y en el caso de 1M con una relación 10/200,

$$\% \text{ exceso} = \frac{(0,2 - 0,08) \text{ moles de ácido}}{0,2 \text{ moles de ácido}} \cdot 100 = 60\%$$

Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Cuantificación de cenizas y % de desmineralización con distintos ácidos

Número de experimento	Ácido	pKa	pH	Relación sólido/líquido S/L (g/mL)	Tiempo t (min)	% Cenizas	% Desmineralización
1	Ácido clorhídrico	-6,30	-0,06	10/100	60	1,3188 ± 0,3531	97,96 ± 1,07
7	Ácido fórmico	3,68	3,03	10/100	60	2,0017 ± 0,0274	96,87 ± 0,09
4	Ácido láctico	3,86	3,19	10/100	60	2,5317 ± 0,0453	95,99 ± 0,11
2	Ácido clorhídrico	-6,30	0,11	10/100	120	1,2117 ± 0,2224	98,14 ± 0,66
8	Ácido fórmico	3,68	3,03	10/100	120	1,6079 ± 0,1021	97,48 ± 0,33
5	Ácido láctico	3,86	3,19	10/100	120	2,2293 ± 0,0836	96,49 ± 0,26
3	Ácido clorhídrico	-6,30	-0,49	10/200	120	1,5137 ± 0,0848	97,7 ± 0,24
9	Ácido fórmico	3,68	2,55	10/200	120	1,3799 ± 0,0424	97,86 ± 0,17
6	Ácido láctico	3,86	2,61	10/200	120	1,5517 ± 0,0760	97,6 ± 0,24

Cabe destacar, que en todas las condiciones estudiadas se ha obtenido un alto porcentaje de desmineralización por encima del 96%.

Analizando los datos de esta tabla, el ácido clorhídrico que es el que se quiere sustituir, ha llevado a porcentajes de desmineralización ligeramente superiores que los otros dos ácidos (a igualdad de condiciones) pero, las desviaciones son mayores. Durante los experimentos, se observa que el ácido clorhídrico es el que genera más espuma al poner en contacto la cáscara y la disolución de ácido en el Erlenmeyer lo que dificulta la agitación, también genera más espuma en la filtración a vacío cuando se separan las dos fases, y esto ha podido ser el origen de esas mayores desviaciones.

El ácido fórmico y el ácido láctico tienen un pKa similar, cercano al pH medido y por tanto, la ionización es parecida con ambos ácidos.

Como puede observarse en la Tabla 6, el ácido láctico es el ácido que da como resultado una mayor cantidad de cenizas en la relación 10/100 en un tiempo de agitación de 60 minutos. Por el contrario, teniendo en cuenta la desviación en los experimentos, el ácido fórmico es el ácido con el que se obtiene una menor cantidad de cenizas en una relación 10/200 agitando 120 minutos. También se puede observar cómo el resultado de la cuantificación de cenizas se asemeja más entre los tres ácidos cuanto mayor es el volumen de la disolución de ácido (10/200), indicando un pH inicial de trabajo inferior a 3.

3.2.2 EFECTO DE LA RELACIÓN SÓLIDO/LÍQUIDO

El efecto de la relación S/L se ha analizado con los experimentos 2,3,4,5,6,8,9 y 10 de la Tabla 5 trabajando con relaciones cáscara/disolución ácida de 10/100 g/mL y 10/200 g/mL a distintos tiempos de agitación con una concentración de ácido 1 M. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Cuantificación de cenizas y % de desmineralización en diferentes condiciones de relación S/L

Número de experimento	Ácido	pH	Relación sólido/líquido S/L (g/mL)	Tiempo t (min)	% Cenizas	% Desmineralización
4	Ácido láctico	3,19	10/100	60	2,5317 ± 0,0453	95,99 ± 0,11
10	Ácido láctico	3,03	10/200	60	1,2840 ± 0,2106	98,05 ± 0,72
5	Ácido láctico	3,19	10/100	120	2,2293 ± 0,0836	96,49 ± 0,26
6	Ácido láctico	2,61	10/200	120	1,5517 ± 0,0760	97,6 ± 0,24
8	Ácido fórmico	3,03	10/100	120	1,6079 ± 0,1021	97,48 ± 0,33
9	Ácido fórmico	2,55	10/200	120	1,3799 ± 0,0424	97,86 ± 0,17
2	Ácido clorhídrico	0,11	10/100	120	1,2117 ± 0,2224	98,14 ± 0,66
3	Ácido clorhídrico	-0,49	10/200	120	1,5137 ± 0,0848	97,7 ± 0,24

Con el ácido láctico y el ácido fórmico al disminuir la relación sólido/líquido la cantidad de cenizas es menor mientras que, con el ácido clorhídrico aunque con un tiempo de agitación de 120 minutos la cantidad de cenizas es mayor en la relación 10/200 g/mL que en la relación 10/100 g/mL, la desviación en el caso de la relación 10/100 g/mL es grande y en la relación 10/200 g/mL pequeña, por tanto, se puede decir que eliminan la misma cantidad de minerales. Con una relación sólido/líquido de 10/200 g/mL tanto con el ácido láctico como con el ácido fórmico se obtienen resultados favorables de la cuantificación de cenizas y porcentaje de desmineralización, el ácido láctico lo logra con un tiempo de agitación de 60 minutos mientras que con el ácido fórmico se ha necesitado un tiempo de agitación de 120 minutos.

3.2.3 EFECTO DEL TIEMPO

El efecto del tiempo de agitación se ha estudiado en los experimentos 1,2,4,5,6,7,8 y 10 de la Tabla 5 operando con tiempos de 60 y 120 minutos y con una concentración de ácido de 1M. Los resultados del efecto del tiempo con los distintos ácidos con la misma relación S/L se muestran en la Figura 6.

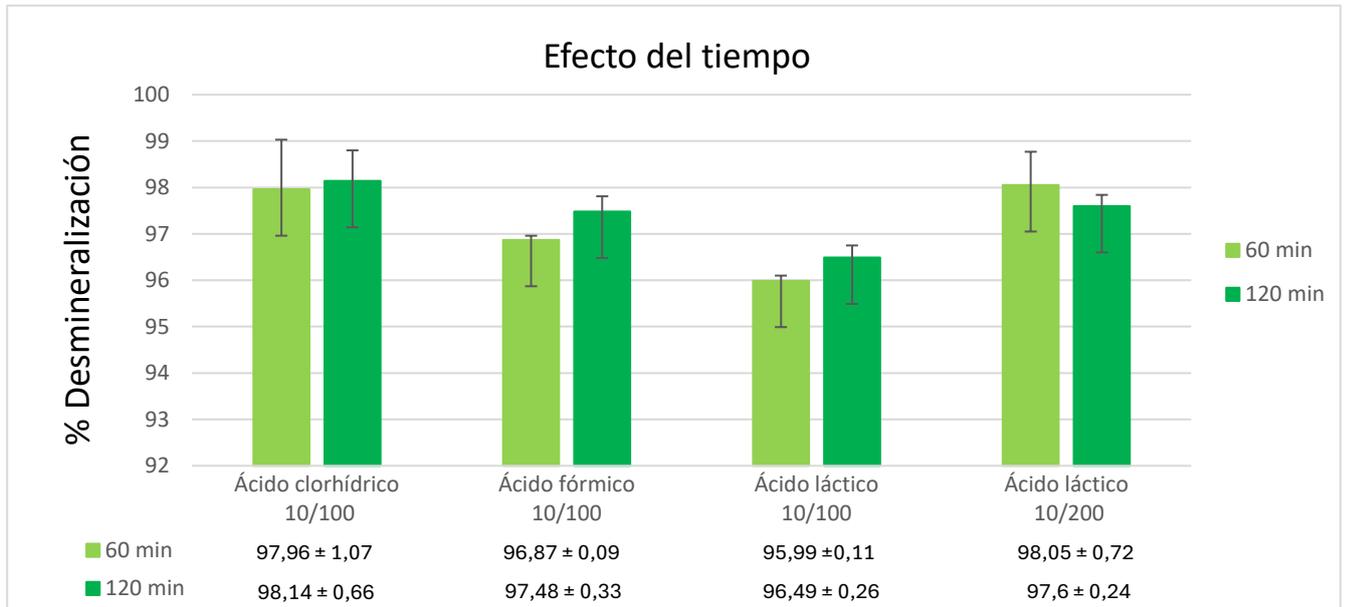


Figura 6. Porcentaje de desmineralización frente a la misma relación S/L a distintos tiempos

Los datos del porcentaje de desmineralización son similares en los tres ácidos para tiempos de agitación de 60 y 120 minutos. Los valores más altos son los del ácido clorhídrico con una relación 10/100 g/mL y un tiempo de 120 minutos y el ácido láctico con una relación 10/200 g/mL y tiempo de agitación de 60 minutos, analizando la barra de error del ácido láctico con una relación de 10/200 g/mL, la de 60 minutos es mayor que la de 120 minutos y se solapan por tanto, se puede concluir que no hay influencia del tiempo cuando se utiliza ácido láctico 1M con una relación 10/200 g/mL y por eso se elige un tiempo menor de agitación.

3.2.4 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO

El efecto de la concentración se estudió con el ácido láctico con un tiempo de 60 minutos para una relación 10/100 g/mL y 10/200 g/mL. Reducir la concentración de 1M a 0,5M supone estar en un defecto de ácido del 37,50% en el caso de tener una relación 10/100 g/mL y con un exceso del 20% en una relación 10/200 g/mL, los cálculos son



$$10 \text{ g cáscara} \cdot 0,396 = 3,96 \text{ g CaCO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100,09 \text{ g CaCO}_3} = 0,04 \text{ mol CaCO}_3$$

$$0,04 \text{ mol CaCO}_3 \cdot \frac{2 \text{ moles de ácido}}{1 \text{ mol CaCO}_3} = 0,08 \text{ moles de ácido}$$

¿Cuántos moles hay de ácido en 0,5M?

$$c \text{ (mol/L)} = \frac{n \text{ (mol)}}{V \text{ (L)}} \rightarrow n \text{ (mol)} = c \text{ (mol/L)} \cdot V \text{ (L)}$$

En el caso de 0,5M con relación 10:100,

$$n = 0,5 \text{ mol/L} \cdot 100 \text{ mL} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0,05 \text{ moles de ácido}$$

Y en el caso de 0,5M con relación 10:200,

$$n = 0,5 \text{ mol/L} \cdot 200 \text{ mL} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0,1 \text{ moles de ácido}$$

Como se necesitan 0,08 moles de ácido, se calcula el % de defecto, en el caso de 0,5M con una relación 10/100 g/mL,

$$\% \text{ defecto} = \frac{(0,08 - 0,05) \text{ moles de ácido}}{0,08 \text{ moles de ácido}} \cdot 100 = 37,5\%$$

Y en el caso de 0,5M con una relación 10/200 g/mL,

$$\% \text{ exceso} = \frac{(0,1 - 0,08) \text{ moles de ácido}}{0,1 \text{ moles de ácido}} \cdot 100 = 20\%$$

Al reducir la concentración de ácido en los experimentos 11 y 12 a 0,5M resultó que por filtración a vacío la disolución y el sólido no se conseguían separar porque quedaba todo retenido en el embudo Büchner tanto el líquido como el sólido de modo que, se decidió parar la filtración, recoger la suspensión y medir el tamaño de partículas del sólido para comprobar si era esta la razón que estaba ocasionando el problema.

Para determinar el tamaño de partículas de las muestras se usa un analizador de partículas (Figura 7), que utiliza la técnica de difracción láser para medir y caracterizar la distribución del tamaño de partículas.



Figura 7. Malvern Mastersizer 2000 (Laboratorios | Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Del Medio Ambiente, n.d.)

Metodología

Se prepararon tres muestras con agua tipo I como agente dispersante y con las siguientes condiciones de operación,

Tabla 8. Condiciones de las muestras para estudiar el tamaño de partículas del sólido y su influencia en la filtración a vacío

Muestra	Masa sólido (g)	Volumen agua (mL)
Muestra A (blanco)	2	20
Muestra B	2	20
Muestra C	2	40

Como blanco se utilizó la cáscara inicial (muestra A). Las muestras B y C son los sólidos resultantes de la desmineralización en los experimentos 11 y 12 respectivamente después de intentarlos filtrar a vacío.

Para realizar la medición de tamaño de las partículas primero se añaden 100 mL de agua al dispensador, se establece el parámetro índice de refracción tomando de referencia el del carbonato de calcio y se ajusta la velocidad de agitación a 2000 rpm, se inicia la medición a través del software. El láser pasa a través de la muestra y los detectores recogen los patrones de difracción de la luz dispersada por las partículas y entonces, el software recopila y procesa los datos. Se sigue el mismo procedimiento con las tres muestras de la Tabla 8. Después de la medición, se limpia la celda de medición con agua para evitar la contaminación en futuros experimentos.

Análisis de resultados

Para visualizar la distribución del tamaño de partículas se construye el gráfico (Figura 8) con los datos obtenidos en el análisis, Tabla 9. Se observa que el proceso de desmineralización ha disminuido el tamaño de los sólidos. Como puede verse, las curvas B y C se han desplazado hacia tamaños más pequeños respecto a la curva de la cáscara inicial (A). Además, la distribución de tamaños se ha expandido, el span de la muestra inicial (A) es menor que el de los sólidos desmineralizados (B y C).

Tabla 9. Diámetros de partículas calculados por Malvern Mastersizer 2000

Diámetro	Muestra A	Muestra B	Muestra C
D ₁₀ (μm)	105,023	26,936	48,168
D ₅₀ (μm)	323,781	171,648	230,016
D ₉₀ (μm)	648,334	454,903	549,460
<i>Span</i>	1,678	2,493	2,179

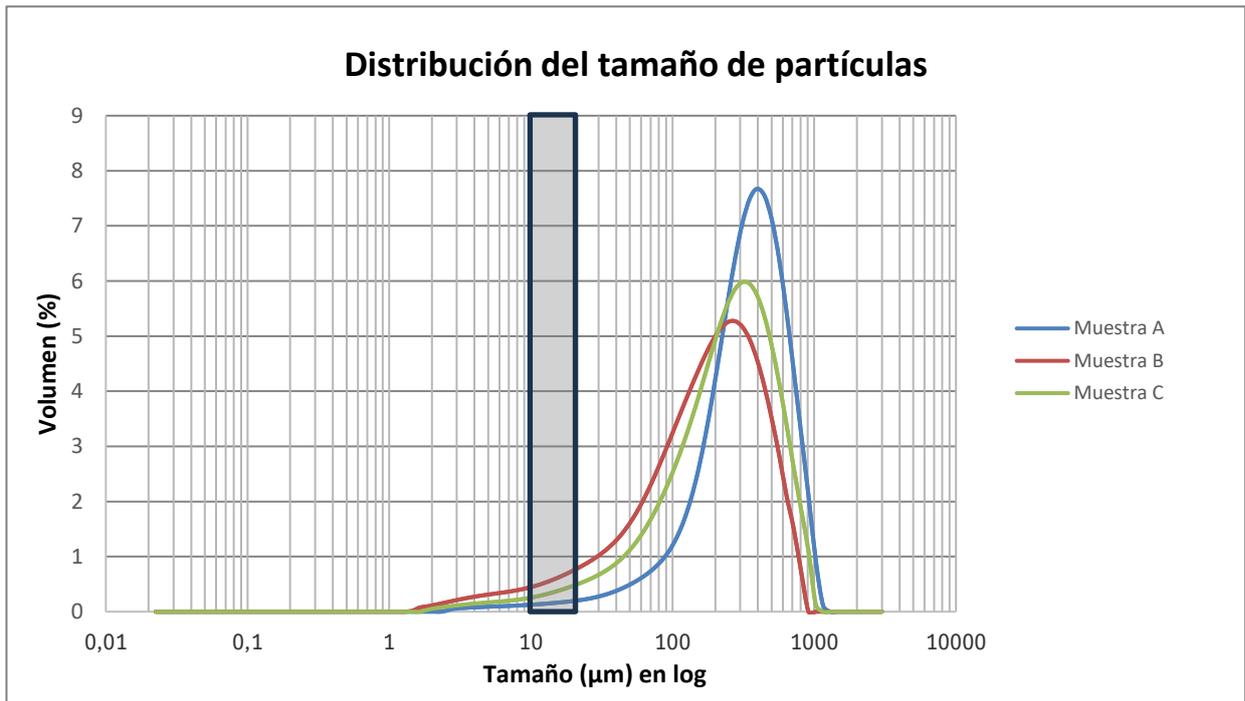


Figura 8. Distribución del tamaño de partículas volumen (%) frente al tamaño de partículas

- ✚ La muestra B obtenida en el experimento 11 de desmineralización con una relación 10/100 g/mL tiene los valores de diámetro más pequeños para D_{10} , D_{50} (tamaño medio de la muestra) y D_{90} , esto significa que el 10% de la muestra B tiene un tamaño menor que 26,936 μm , un 50% de la muestra B es menor de 171,648 μm y un 90 % es menor que 454,903 μm .
- ✚ Los tamaños medios de las muestras (D_{50}) tratadas con el ácido son mucho menores que la de la cáscara inicial.
- ✚ Las muestras B y C presentan al menos un 10% de partículas por debajo de 50 μm .
- ✚ Se ha utilizado un filtro con un tamaño de poro de 14-18 μm , por lo que las partículas entorno a ese tamaño son las que van a taponar los poros del filtro indicadas en el rectángulo gris de la Figura 8, y que suponen casi un 10% de la muestra B. También cierta fracción de la muestra C taponan el poro impidiendo la filtración a vacío.
- ✚ La cáscara inicial con un tamaño medio de 323,781 μm se va a filtrar bien, cuanto más grande es una partícula mejor se filtra por torta.

El filtro utilizado, es un filtro para análisis cuantitativo de filtración media (Filter-Lab). Dentro de la misma gama de filtros existen 7 calidades con diferentes retenciones de partículas y velocidades de filtración, y para estas muestras que contienen un porcentaje elevado de partículas finas, sería interesante utilizar otro de los filtros, por ejemplo, de velocidad media-lenta o lenta (Tabla 10)

Tabla 10. Especificaciones de los filtros para análisis cuantitativo de Filter-Lab
(https://Fanoia.Com/Media/Catalogos/Cat%C3%A1logo_general_FILTER-LAB_2017.Pdf#page=16, 2024)

Ref.	Filtración	Gramaje g/m ²	Espesor mm	Poro μm	Cenizas %
1232	Extra-rápida	85	0.220	25-35	< 0.01
1235	Muy rápida	85	0.200	25-30	< 0.01
1238	Rápida	85	0.200	20-25	< 0.01
1240	Media	85	0.200	14-18	< 0.01
1242	Medio-lenta	70	0.160	7-9	< 0.01
1244	Lenta	85	0.170	2-4	< 0.01
1246	Muy lenta	100	0.200	1-3	< 0.01

Con el papel de filtro y el sistema de vacío que hay disponible en el laboratorio no es posible la filtración a vacío de la suspensión resultante en los experimentos 11 y 12 para una relación 10/100 g/mL y 10/200 g/mL con una concentración 0,5 M de ácido láctico.

Otra alternativa, sería trabajar añadiendo coagulantes para que las partículas se aglomeren y se puedan filtrar pero, en este proceso no es interesante porque las partículas sólidas son las que tienen la quitina que luego se quiere extraer.

Estas soluciones serían para mejorar la filtración y poder elegir este método de separación a escala industrial. Para escala de laboratorio se propone como método de separación alternativo la centrifugación.

3.2.5 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA FILTRACIÓN Y LA CENTRIFUGACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS DESPUÉS DE LA ETAPA DE DESMINERALIZACIÓN

Centrifugación sin ciclos de lavado

Para estudiar la centrifugación por falta de stock de ácido láctico en el laboratorio en ese momento, se optó por utilizar ácido fórmico 1M como alternativa con una relación sólido/líquido de 10/100 g/mL y un tiempo de agitación de 60 minutos, que se corresponden con las condiciones del experimento 7 y que no había dado problemas en filtración. Para eso, se repite por duplicado el proceso de desmineralización y se llama 7A al experimento que se lleva a filtración y 7B el experimento que se lleva a centrifugación. Para la centrifugación, la suspensión después del tratamiento de desmineralización con el ácido se agita y se distribuye en cuatro tubos cónicos (Falcon) de manera que la masa sea similar dos a dos para poderlo introducir en la centrífuga modelo Magnus 22 R de la marca Orto Alresa (Ortoalresa - Expertos En Centrifugación, n.d.) (Figura 9). La centrífuga tiene un radio de X cm y se ha centrifugado a una velocidad de 8000 rpm. Esta centrífuga dispone de una amplia gama de accesorios para tubos de 750 ml, microplacas, microtubos y un gran número de posiciones para los tubos cónicos de 15 ml y 50 ml. Las especificaciones de la centrífuga se recogen en la Tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones técnicas de la centrífuga Magnus 22R

Parámetro	Descripción
Dimensiones (mm) (a x f x h)	530 x 640 x 870
Peso neto (kg)	137
Voltaje (V)	220-230
Frecuencia (Hz)	50
Consumo (W)	1450



Figura 9. Centrifugadora Magnus 22 R (Laboratorios y Equipamiento - PressTech, n.d.)

Después de la centrifugación, se desecha la fase líquida con precaución de no desechar parte del sólido, se vierte agua en el Falcon para ayudar a pasar el sólido a la cápsula y con un Vortex se agita el sólido con el agua para recolectarlo en una cápsula de porcelana. Se sigue el mismo procedimiento con los cuatro tubos cónicos y se lleva en la misma cápsula a estufa a 80 °C durante 24 horas. El sólido después de estufa es el de la Figura 10. Se cuantifican cenizas tal y como está descrito en el apartado 3.1.3.

Al analizar los resultados de los experimentos 7A y 7B recogidos en la Tabla 12 la cantidad de cenizas fue mucho mayor por centrifugación que en los experimentos hechos por filtración a vacío (Figura 10).



Figura 10. Cápsula después de estufa y cenizas obtenidas por centrifugación sin lavado

Tabla 12. Resultados del experimento 7A por filtración y 7B por centrifugación sin lavado

Número de experimento	Masa inicial cáscara (g)	Masa después de la estufa (g)	% Cenizas
Experimento 7A	10,0756	6,3267	1,7590 ± 0,0457
Experimento 7B	10,0629	6,3130	9,7190 ± 0,3110

La explicación dada a este resultado fue que se arrastra el formiato de calcio y el ácido fórmico sobrante hasta la mufla y por esto, la cuantificación de cenizas no es correcta ya que están todos los cationes incrementando el peso de las cenizas. El motivo por el cual no se hicieron ciclos de lavado de las muestras hasta un pH neutro fue que el ácido fórmico que quedara en la cápsula se evaporaría en la mufla sin afectar a la cuantificación de cenizas, pero lo que no se evapora es el calcio del formiato de calcio formado. Con esto se concluye que es necesario un lavado.

Centrifugación con ciclos de lavado

Para realizar el estudio comparativo entre filtración y centrifugación lavando se repite con las condiciones del experimento 7 y son el experimento 7C y 7D, donde 7C se lleva a filtración y 7D se lleva a centrifugación utilizando el mismo volumen de agua de lavado 615 mL en ambos métodos. En el procedimiento de la centrifugación se varió respecto al seguido sin lavado de manera que cada vez que se sacaba de la centrífuga se desechara el líquido sobrante, se recuperaban los sólidos del Falcon, se añadía agua, se agitaba y se llevaba otra vez a centrifugar hasta que el pH fuera neutro. Se hicieron un total de tres lavados hasta lograr un pH neutro para conseguir eliminar el ácido fórmico sobrante y que el formiato de calcio se elimine en disolución con agua. Es entonces cuando la cápsula se lleva a la estufa a 80 °C durante 24 horas. El sólido recuperado después de estufa es el de la Figura 11.



Figura 11. Cápsula después de estufa y cenizas obtenidas por centrifugación con ciclos de lavado

Tabla 13. Resultados del experimento 7C por filtración y 7D por centrifugación con lavado

Número de experimento	Masa inicial cáscara (g)	Masa después de la estufa (g)	% Cenizas
Experimento 7C	10,0927	6,2732	1,4691 ± 0,0841
Experimento 7D	10,0212	5,0000	1,2349 ± 0,1132

La cantidad de cenizas (Figura 11) en esta ocasión fue similar haciéndolo por filtración y con centrifugación con ciclos de lavado hasta pH neutro, los resultados se recogen en la Tabla 13. Por tanto, se concluye que este método de separación funciona y se podría utilizar para las partículas más pequeñas que se forman al disminuir la concentración del ácido orgánico a 0,5 M.

3.2.6 SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS

Tabla 14. Parámetros comparativos entre el ácido láctico y el ácido fórmico

PARÁMETROS	Ác. láctico	Ác. fórmico
pKa	3,86	3,68
pH en 10/100 g/mL	3,19	3,03
pH en 10/200 g/mL	2,61	2,55
Exceso de ácido en 10/100 g/mL, 1M	20%	20%
Exceso de ácido en 10/200 g/mL, 1M	60%	60%
Solubilidad de la sal	7-9 g/100 mL H ₂ O	16 g/100 mL H ₂ O
Sal formada en 10/100 g/mL, 1M (Valor estequiométrico)	8,73 g	5,20 g
Sal formada en 10/100 g/mL, 1M, 60 minutos (Valor real)	8,38 g	5,04 g
Sal formada en 10/100 g/mL, 1M, 120 minutos (Valor real)	8,42 g	5,07 g

Los dos ácidos orgánicos tienen un pKa muy parecido así que el grado de disociación y el control del pH no va a ayudar a la elección del ácido. En ambos ácidos se ha trabajado con 1M con una relación sólido/líquido 10/100 g/mL por tanto, el exceso de ácido es el mismo, un 20%. En el caso del ácido fórmico, la sal que se forma es el formiato de calcio el cual se disuelve por completo en la disolución con una relación 10/100 g/mL. En el caso del ácido láctico, la sal formada es el lactato de calcio, en el caso de la relación 10/100 g/mL, 1M la cantidad de sal formada está dentro del intervalo de la solubilidad del lactato de calcio en agua, y por tanto, se podría precipitar lactato de calcio durante el proceso de desmineralización. Por tanto, se debería trabajar con 10/200 g/mL para tener el lactato disuelto y que el sólido pueda seguir con el proceso de desproteínización para recuperar la quitina.

En cuanto al valor económico (*Merck | Spain*, n.d.) ambos ácidos tienen un precio aproximado de 50,00 €/500 mL. Teniendo en cuenta el valor económico del producto del lactato de calcio 393,00€/g en comparación con el formiato de calcio 127,00€/g se valora elegir el ácido láctico para trabajar.

De acuerdo con los resultados presentados en los apartados anteriores se seleccionan las siguientes condiciones experimentales: ácido láctico 1M con una relación sólido/líquido 10/200 g/mL, con un tiempo de agitación de 60 minutos a una temperatura de 30 °C que ha llevado a un porcentaje de desmineralización del 98,05%. El método de separación elegido es filtración con una proporción del volumen de agua de lavado respecto al volumen de líquido filtrado de 3,65.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO Y DIMENSIONADO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE LA CÁSCARAS DE LANGOSTINOS

4.1 DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO DEL PROCESO

Se va a realizar en este apartado del TFG el dimensionado básico de una planta piloto para la desmineralización de cáscaras de langostinos que se instalaría en el laboratorio del Grupo PressTech de la Universidad de Valladolid.

4.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

Se considera 1 día laboral con 8 horas de trabajo y se realiza un ciclo completo con una capacidad de tratamiento de 25 kg de cáscaras de crustáceos al día.

4.1.2 HORAS DE OPERACIÓN

Se suponen 235 días laborables parando el proceso durante las dos primeras semanas del mes de agosto por período vacacional y excluyendo fines de semana y festivos. Esto conlleva que las horas de operación de la planta de desmineralización de cáscaras de crustáceos serán 1880 h/año si en cada ciclo se emplean 8 horas se realizarán 235 ciclos/año

4.1.3 MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

La materia prima empleada son los residuos de *Litopenaeus Vannamei*.

La composición de estos residuos empleados en el diseño de los equipos es la misma que la empleada en la parte experimental, CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS (Tabla 3).

Tabla 3. Composición de la materia prima

RESIDUO GAMBAFRESH - oct2023		
Caracterización química (contenido)	Base seca	
	Av (%)	SD (%)
Extractivos acuosos	9,30	0,60
Acidos grasos	2,12	0,02
Cenizas	39,60	0,20
Quitina	16,90	0,80
Proteínas	19,40	0,90
Aminoácidos libres	0,86	0,02
Total	88,00	

De la planta piloto se obtienen dos productos diferentes, líquido filtrado y sólido desmineralizado. El líquido filtrado contiene agua y lactato de calcio que se puede lograr separar mediante un proceso de cristalización. Los cristales de lactato de calcio son un producto comercial de elevado coste económico (393,00€/g). El sólido desmineralizado continua hacia el proceso de desproteización para recuperar la quitina.

4.1.4 LOCALIZACIÓN

La planta piloto objeto de este TFG se va a ubicar en el laboratorio del Grupo de Investigación PressTech de la Universidad de Valladolid, situado en el Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, en la planta 0 de la sede Mergelina de la Escuela de Ingenierías Industriales.

4.1.5 SERVICIOS AUXILIARES

El laboratorio PressTech de la Universidad de Valladolid dispone de servicios auxiliares como líneas de venteo, campanas de extracción, electricidad y agua tratada.

Aire comprimido y Venteos:

Se dispone de una línea de aire comprimido y líneas de venteo, son líneas de extracción con circulación forzada para evitar la expulsión de gases a la atmósfera.

Electricidad:

Respecto a la electricidad, el laboratorio dispone de tomas tanto de corriente alterna (220 V) como de corriente trifásica (380 V y 16 A).

Agua tratada:

En el laboratorio se dispone de agua destilada tipo III las propiedades se recogen en la Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades del agua tipo III (Sistemas de Purificación de Agua. Diseño y Fabricación - Wasserlab, n.d.)

Parámetro	Descripción
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C)	4,00
Resistividad eléctrica (Mohmios-cm a 25°C)	0,25
TOC máximo ($\mu\text{g}/\text{L}$)	200

4.1.6 CÓDIGOS DE DISEÑO

Para asegurar un diseño económico y seguro, se siguen las ecuaciones y procedimientos normalizados para la fabricación y prueba de equipos, así como una buena elección de estructura y materiales. Para el diseño mecánico del recipiente (tanque agitado), se ha empleado el código *ASME Boiler & Pressure Vessel Code (BPVC) Sección VIII Div 1* (Subsection A GENERAL REQUIREMENTS, n.d.)

4.1.7 TIEMPO DE VIDA

La unidad de desmineralización de cáscaras de crustáceos está diseñada para funcionar unos 10 años, a efectos del balance económico.

No obstante, ésta no es la media de vida de los distintos equipos, pues cada uno presentará un tiempo de vida dependiendo de la función desempeñada y del fabricante. Mediante un mantenimiento adecuado, se podrá alargar tanto la vida de los equipos como de la instalación, a menos que se presenten serios problemas de carácter tecnológico, de diseño o de presupuesto.

4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

El diagrama de bloques se recoge en el Anexo 3.

4.3 DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama de flujo se recoge en el Anexo 4.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES

Las corrientes del diagrama de flujo se describen en la Tabla 16:

Tabla 16. Tabla de corrientes del diagrama de flujo

Número de corriente	Descripción de la corriente
1	Disolución de ácido
2	Disolución de ácido
3	Disolución de ácido
4	CO ₂ (gas)
5	Entrada de agua a T _{amb}
6	Salida de agua a T _{amb}
7	Fase sólida y fase líquida
8	Fase sólida y fase líquida
9	Fase sólida y fase líquida
10	Fase sólida y fase líquida
11	Agua tipo III
12	Agua tipo III

4.3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las cáscaras se almacenan en el depósito D-100 a temperatura ambiente. Primero las cáscaras se llevan por una cinta transportadora (A-100) para lavarlas, luego se muelen hasta obtener polvo de cáscara en un molino (Z-100). Este molino es el molino de cuchillas Retsch® SM 100, disponible en el laboratorio PressTech para obtener un diámetro de partícula de 125 µm. Por último, se llevan a la estufa (T-100) para secarlas. Esta estufa (T-100) se corresponde con la estufa Memmert EXCELLENT de convección forzada en el laboratorio.

Una vez secadas las cáscaras se almacenan en el depósito cerrado (D-101) a temperatura ambiente y se pesan en la balanza (A-101).

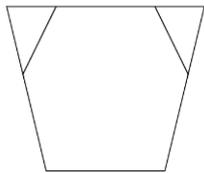
Por otro lado, con agua tipo III de uso común en el laboratorio y ácido láctico proporcionado por la empresa Merck, se prepara la disolución de ácido en un tanque agitado (R-100) modelo VJR500S y se almacena en un recipiente (V-100). Una vez que se tiene el volumen suficiente de disolución se bombea (P-100) a un reactor encamisado donde se junta con la cáscara molida y seca y se produce la reacción química [R3] para desmineralizar las cáscaras de crustáceos. En este reactor hay un flujo continuo de agua para mantener el reactor a temperatura ambiente. Después de la agitación la fase sólida y la fase líquida se almacena en un recipiente (V-101).

Una vez finalizada la agitación, la suspensión se bombea mediante una bomba peristáltica (P-101) a un filtro de placas y marcos (F-100) modelo MSM-250-c-05-06 con la finalidad de separar la fase sólida de la fase líquida, para la filtración se usa agua de lavado tipo III que se bombea (P-102) desde un depósito (D-102) para conseguir pH neutro en el filtro. Para la filtración se emplea la bomba DEPA® DL25 EE del laboratorio.

Una vez finalizada la filtración, se separan en dos productos, por un lado, una fase líquida que es el líquido filtrado y por otra parte, la fase sólida, el sólido desmineralizado.

4.3.3 SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS DEL PFD

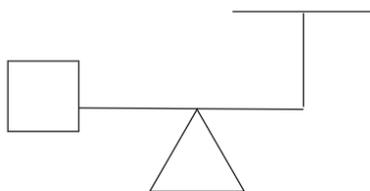
1. Molino



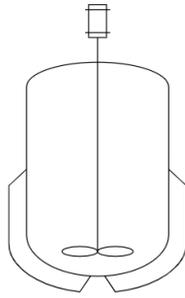
2. Horno de secado



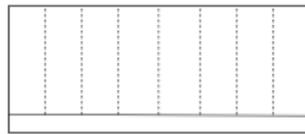
3. Balanza



4. Reactor encamisado



5. Filtro de placas y marcos



6. Bomba de líquido



7. Bomba peristáltica



Tabla 17. Acrónimos del PFD

Acrónimo	Significado
FC	Controlador de flujo
LC	Controlador de nivel
FI	Indicador de flujo
LI	Indicador de nivel
PI	Indicador de presión
TI	Indicador de temperatura
M	Motor
pH	Indicar de pH
TIC	Controlador indicador de temperatura

4.3.4 BALANCE DE MATERIA

4.3.4.1 MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS

Tal y como se indica en el apartado 4.1 (Datos de partida y bases de diseño), la capacidad de tratamiento establecida es de 1 día con 8 horas de producción. En este tiempo se realiza un ciclo de desmineralización y por cada ciclo se emplean 24,94 kg de cáscaras de crustáceos y 498,8 L de disolución de ácido láctico (1M),

Lo primero es calcular la cantidad máxima de torta que se puede formar en el filtro prensa del laboratorio con la ecuación [4]

$$\text{kg de cáscara entrada filtro/ciclo} = \text{volumen de torta} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot 1000 \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde se supone una porosidad de la torta de 0,3 y el volumen de torta es $0,0157 \text{ m}^3$ y se calcula la ecuación [4] y con las dimensiones del filtro descritas en el apartado 4.3.4.2.1.

$$0,0157 \text{ m}^3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 1,39 \text{ g/mL} \cdot 1000 = 15,26 \text{ kg de sólido filtro/ciclo}$$

En segundo lugar, se calcula la cantidad de cáscara inicial con la ecuación [5].

$$\text{Cáscara inicial} = 15,26 \text{ kg} + (\text{Cáscara inicial} \cdot \text{Cantidad de cenizas en la cáscara inicial} \cdot \% \text{ Desmineralización}) \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$\text{Cáscara inicial} = 15,26 \text{ kg} + (\text{Cáscara inicial} \cdot 0,3960 \cdot 0,9805)$$

La cantidad de cáscara inicial son 24,94 kg \approx 25 kg.

El volumen de disolución de ácido láctico se calcula con la ecuación [6].

$$\text{Volumen de disolución de ác. láctico} = \frac{\text{volumen de disolución (mL)} \cdot \text{kg de cáscara inicial/ciclo}}{\text{relación sólido/líquido (g)}} \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$\frac{200 \text{ mL} \cdot 25 \text{ kg de cáscara inicial/ciclo}}{10 \text{ g de cáscara inicial}} = 500 \text{ L de disolución de ác. láctico}$$

Por lo tanto, se necesita disponer de 25 kg de cáscara y 500 L de disolución de ácido láctico (1M) para realizar el proceso de desmineralización durante un día.

Las condiciones elegidas son las del experimento 10 de la Tabla 5. Se calculan los kilogramos de sólido desmineralizado con estas condiciones en un día de producción

$$25 \text{ kg de cáscara inicial} \cdot \frac{6,30 \cdot 10^{-3} \text{ kg de sólido desmineralizado}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ kg de cáscara inicial}} = 15,75 \text{ kg de sólido desmineralizado}$$

Por otro lado, se calculan los kilogramos de lactato de calcio que se obtienen en un día de producción con un porcentaje de desmineralización del 98,05% partiendo de que tenemos 0,2 moles de ácido láctico en un exceso del 20 % y por tanto, el reactivo limitante son los 0,04 moles de CaCO_3 . Estos cálculos están en el apartado 3.2.1 (Efecto del tipo de ácido). Para una relación 10:200 1M de ácido láctico la cantidad de lactato de calcio es

$$0,04 \text{ mol CaCO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol de lactato de calcio}}{1 \text{ mol CaCO}_3} \cdot \frac{218,22 \text{ g de lactato de calcio}}{1 \text{ mol de lactato de calcio}} = 8,73 \text{ g de lactato de calcio}$$

Partiendo de 25 kg de cáscara iniciales, se calculan los kilogramos de lactato de calcio

$$25 \text{ kg de cáscara inicial} \cdot \frac{0,9805 \cdot 8,73 \cdot 10^{-3} \text{ kg de lactato de calcio}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ kg de cáscara inicial}} = 21,4 \text{ kg de lactato de calcio}$$

Por tanto, en un día de producción se obtienen 21,35 kg lactato de calcio en un ciclo que se podrían recuperar por cristalización.

En la Tabla 18 se recogen todos los resultados obtenido por medio de los balances de materia.

Tabla 18. Datos obtenidos en los balances de materia

Necesidades/Producción	Cantidades diarias
Cáscaras de crustáceos	25 kg
Disolución de ác. Láctico	500 L
Sólido desmineralizado	15,75 kg
Lactato de calcio	21,40 kg

4.3.4.2 BALANCES A LA ETAPA DE FILTRACIÓN A VACÍO

4.3.4.2.1 Descripción del filtro

El filtro del prototipo en el laboratorio es un filtro prensa placas y marcos, específicamente el modelo MSM-250-c-05-06 de la marca AS FILTRACIÓN (ASFiltración, n.d.). Las dimensiones del filtro son 0,6 metros de altura, 0,8 metros de anchura y una longitud de 1,5 metros, con un número máximo de 5 marcos cuyas dimensiones son de 29 cm de altura, 24 cm de longitud y 4,5 cm de anchura. La presión máxima de alimentación es 6 bar.

El filtro está conectado a una bomba neumática, modelo DL25-Elastomer-External de la marca DEPA (Förderkurven DEPA-Druckluft-Membranpumpen Curves DEPA Air Operated Diaphragm Pumps, n.d.) cuyas curvas características se recogen en la Figura 12.

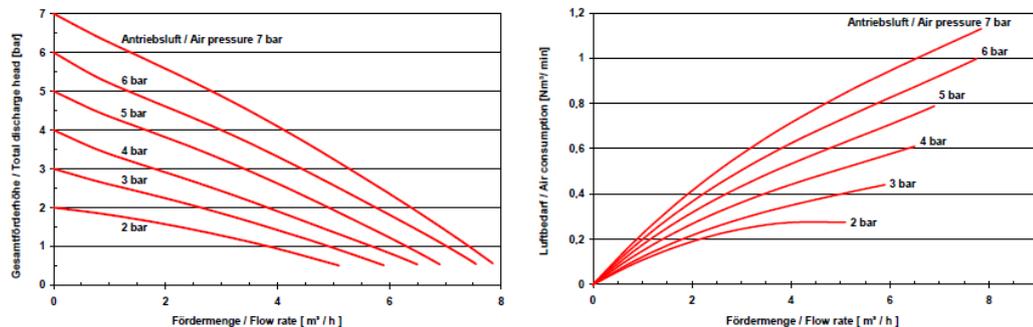


Figura 12. Curvas características de la bomba del filtro prensa

4.3.4.2.2 Ciclo de filtración

Condiciones de operación

Se trabaja con una filtración a caída de presión constante, por lo que el caudal va a disminuir progresivamente. Se relacionan el espesor de la torta (z) y el volumen de filtrado (V) que ha pasado en un tiempo t con un balance de materia entre los sólidos en suspensión y la torta. Para estudiar el efecto del medio filtrante trabajando a caída de presión constante se usa la ecuación [7]

$$\frac{t}{V} = \frac{r \cdot \mu \cdot v}{2 \cdot A^2 \cdot (-\Delta P)} V + \frac{r \cdot \mu \cdot z}{A \cdot (-\Delta P)} \quad [Ec.7]$$

Cálculo del tiempo de filtración por ciclo

Primero se calcula el producto $r \cdot \mu \cdot v$ de la ecuación [7] donde:

r es la resistencia específica de la torta, m^{-2} , se calcula para esferas con la ecuación [8]

$$r = \frac{180 \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot D_p^2} = 3,27E + 11 m^{-2} \quad [Ec. 8]$$

- ε : porosidad de la torta, se le da un valor de 0,3
- D_p : diámetro medio de partículas, 1,00E-04 m

v es el volumen de torta depositado por unidad de volumen de filtrado, se calcula con la ecuación [9]

$$v = \frac{x_w \cdot \rho}{(1-x_w) \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_s - x_w \cdot \varepsilon \cdot \rho} = 0,0296 \quad [Ec. 9]$$

- x_w : fracción másica de sólidos en suspensión. Se calcula con la ecuación [10]

$$x_w = \frac{\text{masa de sólido seco}}{\text{masa de sólido seco} + \text{masa de agua}} = 0,0278 \quad [Ec. 10]$$

- La masa de sólido seco son 6,30 g, es la masa después de la estufa en el experimento 10 de la Tabla 5
- La masa de agua son 181,93 g, se calcula multiplicando el volumen de agua del experimento 10 (182,5 mL) por la densidad de agua a temperatura ambiente ($\rho = 1$ g/mL)
- ρ_s : densidad del sólido (g/mL). Se calcula con la densidad y la composición de los dos componentes mayoritarios de la cáscara desmineralizada y seca, la quitina y la proteína, con la ecuación [11]

$$\rho_s = 0,466 \cdot \rho_{quitina} + 0,534 \cdot \rho_{proteína} = 1,39 \text{ g/mL} \quad [Ec. 11]$$

- La densidad de la proteína a temperatura ambiente es de 1,44 g/mL
- La densidad de la quitina a temperatura ambiente es de 1,35 g/mL

μ es la viscosidad del agua a temperatura ambiente 8,90E-04 (kg/m·s)

Por lo tanto, el producto $r \cdot \mu \cdot v$ tiene un valor de **8,59E+06 kg/m³·s**

Segundo se calcula el producto $2 \cdot A^2 \cdot (-\Delta P)$ donde:

A es el área de filtración en **m²**, se calcula con la ecuación [12]

$$A = \text{Área de marco} \cdot \text{Número de marcos} = \mathbf{0,696 \text{ m}^2} \quad [\text{Ec. 12}]$$

Las dimensiones del marco se especifican en el apartado 4.3.4.2.1 Descripción del filtro y también el número de marcos (5).

(-ΔP) es la caída de presión, es decir, la diferencia entre la presión de alimentación (entrada del filtro) y la presión atmosférica (salida del filtro).

$$(-\Delta P) = 1,1 \text{ bar} - 1,01325 \text{ bar} = \mathbf{0,08675 \text{ bar}} = 8675 \text{ Pa}$$

Tercero se calcula el producto $r \cdot \mu \cdot z$ de la ecuación [6] donde **z** es el espesor de la torta, se supone un valor de **0,015 m**. La resistencia específica de la torta se ha calculado en la ecuación [7] y la viscosidad del agua a temperatura ambiente es de 8,90E-04 (kg/m·s).

Por tanto, el producto $r \cdot \mu \cdot z$ tiene un valor de **4,36E+06 kg/m²·s**

Volumen de filtrado por ciclo (V) y el volumen de torta por ciclo

El volumen de filtrado se calcula con la ecuación [13]

$$v = \frac{\text{Volumen de torta}}{v} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde **v** es el volumen de torta depositado por unidad de volumen de filtrado calculada en la ecuación [8] y el volumen de torta por ciclo se calcula con la ecuación [14]

$$\text{Volumen de torta} = \text{Volumen del marco} \cdot \text{Número de marcos} = 0,0157 \text{ m}^3 \quad [\text{Ec. 14}]$$

Por tanto el volumen de filtrado por ciclo es de **0,53 m³**.

Se tienen definidos los parámetros de la ecuación [6], despejando el tiempo de filtrado (t) de la ecuación sale un **tiempo de filtración por ciclo de 669,81 s \cong 11,16 min.**

Cálculo del tiempo de lavado por ciclo

La proporción del volumen de agua de lavado respecto al volumen de líquido filtrado de 3,65. Sabiendo que el volumen de líquido filtrado es de $0,53 \text{ m}^3$, el volumen de agua de lavado es de $1,93 \text{ m}^3$.

De las curvas características de la bomba del filtro de la Figura 9 se elige un caudal de bomba de $6 \text{ m}^3/\text{h}$.

El tiempo de lavado se calcula con la ecuación [15]

$$\mathbf{T_{iempo\ de\ lavado}} = \frac{\mathbf{Volumen\ de\ lavado\ (m^3)}}{\mathbf{Caudal\ de\ la\ bomba\ (\frac{m^3}{h})}} = \mathbf{0,32\ h} \cong \mathbf{19,34\ min} \quad [Ec. 15]$$

Tiempo total de un ciclo de filtración

El tiempo total de un ciclo de filtración es la suma del tiempo de filtración, tiempo de lavado de la torta y tiempo de descarga (se suponen 2 minutos).

$$\mathbf{T_{iempo\ total\ de\ un\ ciclo}} = \mathbf{19,34\ min} + \mathbf{11,16\ min} + \mathbf{2\ min} = \mathbf{32,50\ min}$$

4.4 DISEÑO DE EQUIPOS

4.4.1 DIMENSIONADO Y ESPECIFICACIONES DEL TANQUE AGITADO (R-101)

4.4.1.1 DATOS DE PARTIDA Y BASES DE DISEÑO

Los datos de partida para el diseño del tanque agitado están en la Tabla 19

Tabla 19. Datos de partida del tanque agitado

Servicio	Recipiente encamisado sometido a agitación cuya función es desmineralizar las cáscaras de crustáceos
Capacidad	Volumen útil del tanque = 516,72 L
Tipo y forma	Recipiente abierto a la atmósfera con forma cilíndrica con una capacidad de 520 L y colocado en posición vertical
Código de diseño	El dimensionado mecánico del recipiente se ha realizado siguiendo el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sección VIII Div 1
Tiempo de vida	El tiempo de vida medio de este tipo de equipos es de 20 años, por lo que este será el tiempo en este caso
Temperatura y presión de diseño	$T_{\text{diseño}} = 25^{\circ}\text{C} + 25^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{diseño}} = 3,5 \text{ barg}$

Para el dimensionado del equipo es necesario aplicar un cambio de escala con respecto al equipo usado en el laboratorio, cuyas dimensiones se indican en la Tabla 20.

Se referencia el equipo de laboratorio, el modelo, con el subíndice 1 y al prototipo industrial con el subíndice 2.

Tabla 20. Dimensiones del equipo de laboratorio

Diámetro de la base D_{t_1}	85 mm
Diámetro de la boca	34 mm
Altura H_1	140 mm
Velocidad de agitación N_1	1500 rpm
Diámetro del agitador D_1	30 mm

4.4.1.2 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

4.4.1.2.1 Dimensiones: Diámetro, altura del recipiente y tiempo de mezcla

Para el cálculo de las dimensiones del prototipo se aplica el criterio de semejanza geométrica. Se establece el diámetro del tanque como dimensión característica, por lo que las relaciones diámetro del tanque – diámetro del agitador, el producto de velocidad de agitación por el diámetro del agitador y el producto de velocidad de agitación por el tiempo de mezcla tienen que ser las mismas tanto en el modelo como en el prototipo, ecuaciones [16], [17] y [18].

Además, también se conoce el volumen y la altura del tanque prototipo, ecuaciones [19] y [20].

$$\frac{D_{T1}}{D_1} = 2,83 = \frac{D_{T2}}{D_2} \quad [Ec. 16]$$

$$N_1 \cdot D_1 = 75 = N_2 \cdot D_2 \quad [Ec. 17]$$

$$N_1 \cdot t_{m1} = 1500 = N_2 \cdot t_{m2} \quad [Ec. 18]$$

$$\text{Volumen del tanque} = \frac{\text{Masa de sólido/ciclo}}{\text{Densidad del sólido}} + \text{Volumen de la disolución ác. láctico} = 517,96 \text{ L} \quad [Ec. 19]$$

$$\text{Altura del tanque prototipo} = \frac{4 \cdot \text{Volumen del tanque}}{\pi \cdot D^2} = 2,18 \text{ m} \quad [Ec. 20]$$

Para el diámetro del prototipo se dan valores hasta llegar a un valor coherente y se obtienen las dimensiones, velocidad de agitación y tiempo de mezcla del prototipo

$$\mathbf{D_{T2} = 0,55m}$$

$$\mathbf{D_2 = 20 cm}$$

$$\mathbf{N_2 = 3,75 rev/s}$$

$$\mathbf{t_{m2} = 6,7 h}$$

4.4.1.2.2 Propiedades del sólido

Estas propiedades se calculan con las propiedades del agua y de los sólidos. En primer lugar, se estima la densidad del sólido desmineralizado a partir de sus componentes mayoritarios después de la agitación.

Los componentes mayoritarios de las cáscaras son la quitina (16,9%), la proteína (19,4%) y carbonato de calcio (39,6%) considerando que entre los tres forman el 100% del sólido, cuyas propiedades son:

$$\rho_{quitina} = 1,44 \text{ g/mL}$$

$$\rho_{proteína} = 1,35 \text{ g/mL}$$

$$\rho_{CaCO_3} = 2,71 \text{ g/mL}$$

La densidad del sólido se calcula mediante la ecuación [21]:

$$\rho_{sólido} = z_{proteína} \cdot \rho_{proteína} + z_{quitina} \cdot \rho_{quitina} + z_{CaCO_3} \cdot \rho_{CaCO_3} \quad [Ec. 21]$$

$$\rho_{sólido} = 0,194 \cdot 1,35 + 0,169 \cdot 1,44 + 0,396 \cdot 2,71 = \mathbf{1,58 \text{ g/mL}}$$

Las propiedades del agua en las condiciones de diseño son (*Propiedades Termofísicas de Sistemas Fluidos*, n.d.)

$$\rho_{agua} = 1,1 \text{ g/mL}$$

$$\mu_{agua} = 0,00089 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

La fracción másica de sólidos en la suspensión

$$C = \frac{\text{g de sólido seco}}{\text{g de sólido seco} + \text{g de agua}} \quad [Ec. 22]$$

$$C = \frac{6,30 \text{ g}}{6,30 \text{ g} + 200 \text{ mL} \cdot 1,1 \text{ g/mL}} = \mathbf{0,0278 \text{ g}}$$

La densidad de la suspensión se calcula con la ecuación [23]

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{\% C}{\rho_s} + \frac{100 - \% C}{\rho}} \quad [Ec. 23]$$

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{0,0278 \cdot 100}{1390} + \frac{100 - 0,0278 \cdot 100}{1000}} = \mathbf{1008 \text{ kg/m}^3}$$

4.4.1.2.3 Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido en movimiento. Se define con la ecuación [24].

$$Re = \frac{\rho_m \cdot N \cdot D^2}{\mu} \quad [Ec. 24]$$

El parámetro de la densidad es la densidad de la mezcla y la viscosidad es la del agua, calculadas en el apartado 4.4.1.2.2.

Por lo tanto, el número de Reynolds del modelo y del prototipo son los siguientes:

$$Re_{modelo} = 25479$$

$$Re_{prototipo} = 1,53E + 09$$

Para definir el régimen del fluido es necesario calcular el número de Reynolds crítico definido en la ecuación [25], el fluido tendrá régimen turbulento si los números de Reynolds calculados son superiores al Reynolds crítico.

$$Re_c = \frac{6370}{N_{pt}^{\frac{1}{3}}} \quad [Ec. 25]$$

El valor de N_{pt} varía en función del tipo del agitador como se define en la Figura 13.

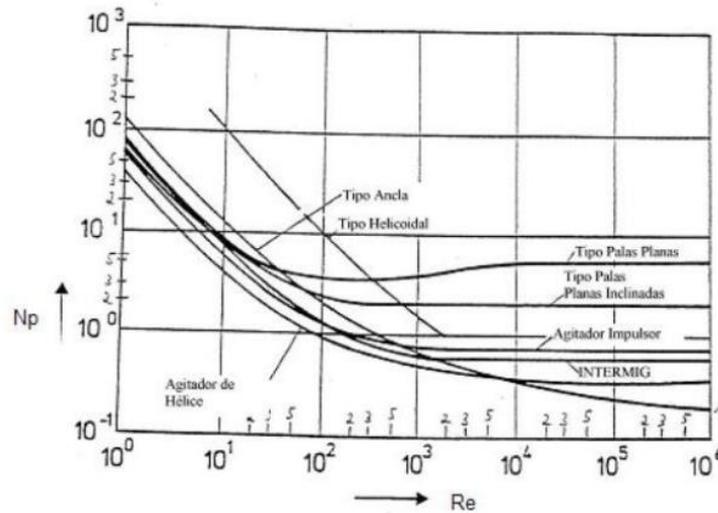


Figura 13. Curva de potencia para distintos agitadores

El Reynolds crítico es:

$$Re_{crítico} = 6862$$

Al ser ambos Reynolds mayores que el Reynolds crítico tanto modelo como prototipo están en régimen turbulento, lo que es adecuado para el cambio de escala.

4.4.1.3 DISEÑO MECÁNICO

4.4.1.3.1 Selección del material

Lo primero es elegir el material que debe cumplir:

- 1) Ser químicamente resistente al fluido
- 2) Soportar la presión y temperatura necesaria

La corriente líquida que entra al tanque contiene mayoritariamente agua y ácido láctico.

Para seleccionar el material con las condiciones de presión y temperatura necesarias, hay que coger el valor de las máximas de diseño, es decir, la presión de diseño máxima del tanque son 3,5 barg y la temperatura máxima de diseño es 50°C.

Una vez definido el fluido, la temperatura y la presión que ha de admitir, se elige el material, un acero inoxidable, según la tabla Table 11.1 Materials of construction (Moran, 2019). En las tablas hay dos tipos de acero inoxidable, el 304 y el 316, como el prototipo puede tener aplicaciones alimentarias se elige el acero inoxidable 304 18 Cr, 8 Ni.

4.4.1.3.2 Espesores de pared

En primer lugar, es necesario conocer la tensión máxima admisible (S) del material seleccionado la cual se define en la Tabla 21.

Tabla 21. Esfuerzos máximos permisibles según el código BPVC ASME sección VIII div.1 (Towler & Sinnott, 2013)

Material	Grade	Min. tensile strength (ksi)	Min. yield strength (ksi)	Maximum temperature (°F)	Maximum allowable stress at temperature °F (ksi = 1000 psi)				
					100	300	500	700	900
Carbon steel	A285 Gr A	45	24	900	12.9	12.9	12.9	11.5	5.9
Killed carbon steel	A515 Gr 60	60	32	1000	17.1	17.1	17.1	14.3	5.9
Low-alloy steel 1¼ Cr, ½ Mo, Si	A387 Gr 22	60	30	1200	17.1	16.6	16.6	16.6	13.6
Stainless steel 13 Cr	410	65	30	1200	18.6	17.8	17.2	16.2	12.3
Stainless steel 18 Cr, 8 Ni	304	75	30	1500	20.0	15.0	12.9	11.7	10.8
Stainless steel 18 Cr, 10 Ni, Cb	347	75	30	1500	20.0	17.1	15.0	13.8	13.4
Stainless steel 18 Cr, 10 Ni, Ti	321	75	30	1500	20.0	16.5	14.3	13.0	12.3
Stainless steel 16 Cr, 12 Ni, 2 Mo	316	75	30	1500	20.0	15.6	13.3	12.1	11.5

Note:

1. The stress values for type 304 stainless steel are not the same as those given for stainless steel 304L in Table 7.8.

2. 1 ksi = 1000 psi = 6.8948 N/mm²

Como la temperatura máxima son 50°C, equivalente a 122°F, con la Tabla 22 se busca la tensión máxima admisible para 300 °F y para el material elegido (Stainless steel 18 Cr, 8 Ni), la tensión máxima admisible es

$$S = 15,0 \text{ ksi} = 15000 \text{ psi} = 1,034\text{E}+08 \text{ N/m}^2$$

Por otro lado, la eficiencia de la soldadura (E) dependerá del tipo de unión y la calidad de la soldadura. El código BPVC ASME sec. VIII y div.1 define cuatro categorías de soldadura:

Categoría A: Soldaduras longitudinales o en espiral de la carcasa principal, los cuellos o las boquillas, o soldaduras circunferenciales que conectan las cabezas semiesféricas a la carcasa principal, los cuellos o las boquillas.

Categoría B: Soldaduras circunferenciales en la carcasa principal, o los cuellos o las boquillas, o que conecten una cabeza con forma que no sea semiesférica.

Categoría C: Soldaduras de conexión de bridas, placas tubulares o cabezas planas a la carcasa, la cabeza conformada, el cuello o la boquilla.

Categoría D: Soldaduras de conexión de las cámaras de comunicación o de las toberas a la carcasa, a los cabezales o a las cubiertas.

Tabla 22. Eficiencia máxima permitida según el código BPVC ASME sección VIII div.1 (Towler & Sinnott, 2013)

Joint description	Joint category	Degree of radiographic examination		
		Full	Spot	None
Double-welded butt joint or equivalent	A, B, C, D	1.0	0.85	0.70
Single-welded butt joint with backing strip	A, B, C, D	0.9	0.8	0.65
Single-welded butt joint without backing strip	A, B, C	NA	NA	0.60
Double full-fillet lap joint	A, B, C	NA	NA	0.55
Single full-fillet lap joint with plug welds	B, C	NA	NA	0.50
Single full-fillet lap joint without plug welds	A, B	NA	NA	0.45

Se escoge un valor de eficiencia de soldadura de E=0,85 por lo que se podría escoger cualquiera de las categorías de soldadura.

4.4.1.3.3 Espesor de carcasa

Para calcular el espesor de carcasa se sigue el código de diseño ASME BPVC sección VIII div.1.

Espesor mínimo de pared

Debe existir un espesor mínimo de pared para garantizar que el tanque es lo suficientemente rígido para soportar su peso y el de cualquier carga ocasional.

Con el diámetro del tanque de 0,55 m obtenemos un espesor mínimo de 5 mm según la Tabla 23.

Tabla 23. Espesores mínimos de pared en función del diámetro del recipiente (Towler & Sinnott, 2013)

Vessel Diameter (m)	Minimum Thickness (mm)
1	5
1 to 2	7
2 to 2.5	9
2.5 to 3.0	10
3.0 to 3.5	12

La geometría del tanque es cilíndrica, por lo que hay que calcular el espesor cuando se soporta tensión longitudinal y circunferencial y luego se elige de los dos el más restrictivo, es decir, aquel cuyo valor sea más grande.

Para el cálculo de estos espesores se sigue el código ASME BPVC sección VIII div.1 UG-27:

Espesor circunferencial

$$t_c = \frac{PR}{SE-0,6P} \quad [Ec. 26]$$

Para el cálculo de la tensión circunferencial se emplea la ecuación [26], siendo:

- t_c , espesor circunferencial (in)
- P, presión interna de diseño (psi)
- R, radio interno del tanque (in)
- S, tensión máxima admisible del material de construcción (psi)
- E, eficacia de la soldadura

Obteniendo como resultado

$$t_c = 0,0396 \text{ in} = 0,9977 \text{ mm}$$

Espesor longitudinal

$$t_l = \frac{PR}{2SE+0,4P} \quad [Ec. 27]$$

El espesor longitudinal se calcula con la ecuación [27], obteniendo como resultado

$$t_l = 0,0192 \text{ in} = 0,4877 \text{ mm}$$

Como ninguno de los espesores obtenido es mayor que el mínimo de pared, se escoge el mínimo de pared, el espesor de la carcasa es de 5 mm.

$$t_d = (t + CA) \cdot 1,125 \quad [Ec. 28]$$

Para calcular el espesor final de diseño de la carcasa se emplea la ecuación [26], es necesario aplicar un sobreespesor por corrosión (CA) y sobredimensionar dicho valor un 12,5 %, de tolerancia de fabricación. Como sobreespesor por corrosión se toma un valor

estándar y recomendado por la norma ASME, CA = 2 mm, ya incluidos en los espesores mínimos de la tabla 24. Por tanto el espesor final de diseño de carcasa es

$$t_d = 5 \cdot 1,125 = 5,625 \cong 6 \text{ mm}$$

4.4.1.3.4 Espesor de los cabezales

Cabezal superior

Entre los tres tipos de cabezales: hemisférico, toriesférico y elipsoidal, se selecciona el cabezal elipsoidal, ya que soporta presiones hasta 15 bar y es el modelo más común y económico.

Tanto la temperatura como el material empleado es el mismo que en la carcasa por lo tanto, el valor máximo de tensión admisible es el mismo $S = 15,0 \text{ ksi} = 15000 \text{ psi}$. Ahora como el cabezal está fabricado por moldeo, no lleva soldadura y la eficiencia de las juntas es $E = 1$. El espesor del cabezal elipsoidal se calcula con la ecuación [29] siendo,

$$t = \frac{P_i \cdot D_i}{2SE - 0,2P_i} \quad [\text{Ec. 29}]$$

- P, presión interna de diseño (psi)
- D, diámetro interno del tanque (in)

El resultado es

$$t = 0,0366 \text{ in} = 0,93 \text{ mm}$$

Sumando el sobreespesor por corrosión (CA = 2mm) y considerando la tolerancia de fabricación del 12,5%, el espesor mínimo calculado del cabezal superior es

$$t \cong 3,2 \text{ mm}$$

Cabezal inferior

Para decidir el tipo de cabezal inferior del tanque, se calculan los espesores para los distintos tipos de cabezales y se escoge el que menos espesor tenga para abaratar costes.

A. Fondo plano

Se calcula con la ecuación [30]

$$t = D \cdot \sqrt{\frac{CP}{SE}} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde,

- E, eficiencia de la junta, E=1

- D, diámetro del tanque 21,65 in (0,55 m)
- C es una constante de diseño, que depende de la restricción de borde, se coge un valor típico de 0,1
- P es la presión de diseño añadiendo la presión hidrostática del líquido contenido en el tanque. La presión hidrostática es

$$P_{hidr} = \rho g H_L$$

Donde ρ es la densidad de la mezcla calculada en la ecuación [23] ese valor es de 1008 kg/m^3 y el valor de H_L se calcula con la ecuación [31]

$$H_L = V_L \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) = 2,18 \text{ m} \quad [Ec. 31]$$

Por lo que la presión hidrostática es 30,63 psi

P es la presión de diseño 50,76 psi más la presión hidrostática 30,63 psi

P = 81,39 psi (este valor se usa para todos los tipos de fondo)

El espesor para el cabezal inferior plano sería de

$$t = 0,5043 \text{ in} = 12,81 \text{ mm}$$

B. Fondo semiesférico

$$t = \frac{PD}{4SE-0,4P} = 0,0294 \text{ in} (0,75 \text{ mm}) \quad [Ec. 32]$$

C. Fondo elipsoidal

$$t = \frac{PD}{2SE-0,2P} = 0,0587 \text{ in} (1,50 \text{ mm}) \quad [Ec. 33]$$

D. Fondo toriesférico

$$t = \frac{0,885 \cdot P_i \cdot R_c}{SE-0,1P_i} = 0,0324 \text{ in} (0,82 \text{ mm}) \quad [Ec. 34]$$

Donde,

- R_c es el radio interno del tanque, 10,83 in
- P, presión interna de diseño (psi)

Se escoge el fondo elipsoidal y a este valor se le suma el valor de sobreespesor por corrosión (CA = 2 mm) y se utiliza el factor de 1,125 como tolerancia de fabricación. El espesor calculado del cabezal inferior es

$$t = 3,89 \cong 4 \text{ mm}$$

Tanto el cabezal inferior como el superior requieren espesores menores que el mínimo sugerido en la tabla 24 para la carcasa, por tanto, se decide homogeneizar espesores y construir **ambos cabezales también con un espesor de 5 mm** como la carcasa.

4.4.1.3.5 Presión de prueba hidrostática

$$P_{prueba} = 1,3 \cdot P_{diseño} \cdot \frac{S_t}{S_d} = \mathbf{87,98 \text{ psi (6,07 bar)}} \quad [Ec. 35]$$

Los recipientes deben someterse a una prueba hidráulica ya que se debe comprobar que son capaces de soportar una presión superior a la presión de diseño. Esta presión es la prueba hidrostática, calculada mediante la ecuación [35], siendo:

- S_t es la tensión máxima admisible a la temperatura de la prueba. Dicho valor es 20000 psi
- S_d es la tensión máxima a la temperatura de diseño, 15000 psi
- P es la presión de diseño

Por tanto, el valor de la presión de prueba hidráulica es de 87,98 psi. Ahora se comprueba que los espesores anteriormente calculados son capaces de soportar esta presión. Para ello, se calculan de nuevo los espesores, si los nuevos espesores calculados son más pequeños que los anteriores, se entiende que el primer espesor es capaz soportar la presión de prueba hidráulica. Por el contrario, si el nuevo espesor calculado es mayor que el anterior, se entiende que el espesor de diseño no es suficiente y se toma como valor del espesor el último calculado.

Los nuevos espesores calculados con la presión de prueba hidráulica son:

Espesor de carcasa

- **Espesor circunferencial:** 1,65 mm
- **Espesor longitudinal:** 0,82 mm

Espesor del cabezal superior

- **Espesor elipsoidal:** 3,46 mm

Espesor del cabezal inferior

- **Espesor elipsoidal:** 3,46 mm

Los espesores requeridos para soportar la presión de la prueba hidráulica son menores que los espesores con los que se van a construir la carcasa y los cabezales (todos ellos 5 mm), así que, el diseño es correcto y se puede realizar la prueba hidráulica en las condiciones de 87,98 psi.

4.4.2 DIMENSIONADO DEL TANQUE DE SUSPENSIÓN (V-101)

Lo primero es calcular la **masa de suspensión (kg) por ciclo** con la ecuación [36]

$$\text{Masa de suspensión (kg)} = \text{Volumen torta (m}^3\text{)} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)} = \mathbf{15,26 \text{ kg}} \quad [\text{Ec. 36}]$$

El **volumen de suspensión por ciclo** (m³/ciclo) se calcula dividiendo la masa de suspensión entre la densidad de la mezcla calculada en la ecuación [23] y añadiendo el volumen de disolución de ácido láctico. El resultado es de **0,55 m³/ ciclo de suspensión**.

Para calcular el diámetro del tanque de suspensión se usa la ecuación [37]

$$\text{Diámetro del tanque} = \left(\frac{3 \cdot \text{Volumen de suspensión}}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{0,61 \text{ m}} \quad [\text{Ec. 37}]$$

La altura del tanque de suspensión se calcula con la ecuación [38]

$$\text{Altura del tanque} = 3 \cdot \text{Diámetro del tanque} = \mathbf{1,84 \text{ m}} \quad [\text{Ec. 38}]$$

Por último, el volumen del tanque se calcula con la ecuación [39] (ecuación del volumen de un cilindro)

$$\text{Volumen del tanque} = \frac{\pi}{4} \cdot \text{Diámetro del tanque}^2 \cdot \text{Altura del tanque} = \mathbf{0,55 \text{ m}^3} \quad [\text{Ec. 39}]$$

4.4.3 DIMENSIONADO DEL TANQUE DE LAVADO (D-102)

La proporción del **volumen de agua de lavado** respecto al volumen de líquido filtrado de 3,65. Sabiendo que el volumen de líquido filtrado es de 0,53 m³ (calculado en la ecuación 14) el volumen de agua de lavado es de **1,93 m³**.

Para calcular el diámetro del tanque de lavado se usa la ecuación [37]

$$\text{Diámetro del tanque} = \left(\frac{3 \cdot \text{Volumen de lavado}}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{0,936 \text{ m}}$$

La altura del tanque de suspensión se calcula con la ecuación [38]

$$\text{Altura del tanque} = 3 \cdot \text{Diámetro del tanque} = \mathbf{2,809 \text{ m}}$$

Por último, el volumen del tanque de lavado se calcula con la ecuación [39] (ecuación del volumen de un cilindro)

$$\text{Volumen del tanque} = \frac{\pi}{4} \cdot \text{Diámetro del tanque}^2 \cdot \text{Altura del tanque} = \mathbf{1,934 \text{ m}^3}$$

4.5 HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPO

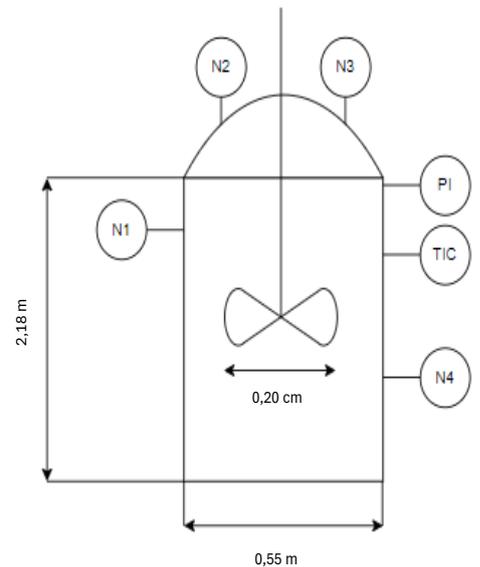


Universidad de Valladolid

TANQUE AGITADO HOJA DE DATOS DE PROCESO

REV.	0				Nº	101
FECHA	26-Jun-24				UNIT	101
POR	NNC				CLIENT	Laboratorio PressTech UVA
REV.	EA				LOCATION	VALLADOLID

REV.				
1	Nº equipo:	R-101	Cantidad:	1
2	Servicio:	Reactor encamisado con agitador		
3	Fluidos:	Cáscaras-Disolución de ác. láctico		
4	Volumen (L)	500	L	
5	Diámetro (ID)	0,55	m	Altura 2,18 m
6	Horizontal or Vertical	Vertical		
7	Agitador	Sí		
8				
9		PRESIÓN (barg)		TEMPERATURA (°c)
10		Operación	Diseño	Operación
11	Carcasa	1	3,5	25
12	Camisa	-	-	-
13	Serpentín	-	-	-
14				
15		MATERIAL		CORROSIÓN
16	Carcasa	SS 304		Nota 1
17	Cabezales	SS 304		Nota 1
18	Camisa	SS 304		Nota 1
19	Serpentín	-		-
20	Agitador	SS 304		Nota 1
21				
22	Dimensiones:			
23	Tipo de cabezal superior	Elipsoidal		
24	Tipo de cabezal inferior	Elipsoidal		
25	Código:	ASME BPVC sección VIII Div. 1		
26				
27				
28				
29	Alivio del estrés por razones de proceso:	NO		
30	Mínima elevación:	6350 mm		
31	Aislamiento	NO		
32		Espesor	8 mm	
33	Resistencia eléctrica	NO		
34		BOQUILLAS		
35	Marca Nº	Cantidad	Servicio	
36	N1	1	Entrada de la disolución	
37	N2	1	Entrada de la cáscara	
38	N3	1	Salida de CO ₂	
39	N4	1	Salida de la suspensión	
40	PI	1	Indicador de presión	
41	TIC	1	Controlador indicador temperatura	
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				



NOTES

(1) Pendiente de confirmación

4.6 SELECCIÓN DE TANQUE AGITADO COMERCIAL (R-101)

Tomando como base de dimensionado del equipo y las características de este se ha seleccionado el reactor comercial modelo VJR500S (*500L 1000L Jacketed Stainless Steel Reactor, Valuen Industrial, n.d.*), cuyas características se recogen en la Tabla 24.

Tabla 24. Características reactor VJR500S

Capacidad del tanque	500 litros
Material	Acero inoxidable 304
Modo de calefacción/enfriamiento	Camisa de circulación
Rango de temperatura de trabajo	-80 °C a 350 °C
Velocidad de rotación	0-500 rpm
Material del agitador	Acero inoxidable 304
Tipo de agitador	De palas

El reactor se puede ver en la Figura 14:



Figura 14. Reactor modelo VJR500S

También es necesario seleccionar un agitador adecuado que permita operar a 225 rpm.

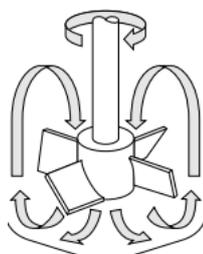


Figura 15. Turbina de palas inclinadas (Porco, 2012)

El agitador seleccionado es una turbina de palas inclinadas (Figura 15) adecuado para aplicaciones de líquidos/sólidos a alta velocidad. El ángulo de paso es de 45° y puede especificarse como flujo ascendente o descendente. Además, está provisto de un sólido eje. El diámetro de cada pala es de 20 cm.

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

En este capítulo se evalúa el impacto social del desarrollo de la tecnología en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (*La Asamblea General Adopta La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible*, n.d.), específicamente en el objetivo 12: Producción y Consumo Responsables.

Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables

El objetivo 12 busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. Este objetivo se enfoca en la eficiencia en el uso de recursos naturales, la reducción de desperdicios y estilos de vida sostenibles. En el contexto de este TFG, se busca sustituir el uso de un ácido mineral (HCl) por ácidos orgánicos de origen biológico, concretamente el ácido láctico para la desmineralización de cáscaras de crustáceos. La selección de ácido láctico también permite la obtención de lactato de calcio (valorización de subproductos, además de quitina y quitosán)

También tiene implicaciones en otros objetivos de la Agenda 2030:

Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura

La planta piloto de desmineralización de cáscaras de crustáceos con el uso del ácido láctico es más sostenible y eficiente, fomenta la innovación en tecnología verde y proceso industrial más limpio.

Objetivo 13: Acción por el clima

Al utilizar ácidos orgánicos y reducir la dependencia de ácidos minerales (HCl), el proceso contribuye a una menor emisión de gases de efecto invernadero, ayudando a minimizar el cambio climático

El proceso de desmineralización de cáscaras de crustáceos usando ácido láctico de origen biológico mejora la eficiencia y reduce el impacto al medio ambiente, también contribuye significativamente a varios objetivos de la Agenda 2030. La sustitución de ácido clorhídrico por ácido láctico y la valorización de subproductos son pasos fundamentales hacia una industria más sostenible y alineada con los principios de la economía circular.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El trabajo experimental realizado en el laboratorio ha permitido concluir que es posible la desmineralización de cáscaras de *Litopenaeus Vannamei* con ácidos orgánicos de origen biológico en lugar del método convencional donde se usa ácido clorhídrico (HCl) de origen mineral. La desmineralización de las cáscaras se optimiza trabajando con ácido láctico 1M con una relación S/L de 10/200 w/v, con un tiempo de agitación de 60 minutos a una temperatura de 30 °C.

En el diseño de la planta piloto para la desmineralización de las cáscaras se propone, en primer lugar, llevar a cabo un pretratamiento de las cáscaras para obtener polvo de cáscara seco, seguidamente juntar este polvo con la disolución de ácido láctico y agitar. Y finalmente, filtrar para separar la fase sólida y la fase líquida en un filtro de placas y marcos.

Se han determinado las dimensiones y condiciones de diseño del tanque agitado (R-101) donde se produce la desmineralización de las cáscaras. Las dimensiones calculadas para el tanque agitación son: 0,55 m de diámetro y 2,18 m de altura. El agitador requiere 18 cm de diámetro con una velocidad de agitación de 225 rpm. Comercialmente no existe un reactor de esas dimensiones exactas, por ello, se selecciona el reactor VJR500S de la marca Valuenlab, cuyas dimensiones son muy similares.

A partir de los balances de materia realizados se concluye que se necesitan 25 kilogramos de cáscara seca y 500 litros de disolución de ácido láctico (1M) por día para obtener 15,75 kilogramos de sólido desmineralizado/día. Como subproducto se obtienen 21,40 kg lactato de calcio/día.

Como trabajo futuro, la investigación podría continuar variando las concentraciones del ácido láctico a concentraciones más bajas de 1M, trabajar con tiempos más cortos de agitación (menores de 60 minutos) para seguir optimizando los resultados de desmineralización de cáscaras de crustáceos. Además, sería interesante plantear la recuperación del lactato de calcio.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

´Bermejo, R., & ´Moreno, A. (2014). *Análisis instrumental*. Síntesis, S.A.

500L 1000L Jacketed Stainless Steel Reactor, *Valuen Industrial*. (n.d.). Retrieved May 28, 2024, from

<https://www.valuenlab.com/product/300l500l1000ljacketed-stainless-steel-reactor>

Adventurer™ Pro Analytical Electronic Balance, AV64C | OHAUS. (n.d.). Retrieved June 17, 2024, from

<https://kr.ohaus.com/en-us/products/balances-scales/analytical-balances/adventurer-pro-analytical/electronic-balance-av64c>

ASFiltración. (n.d.). Retrieved May 26, 2024, from

<https://www.asfiltracion.com/>.

Baron, R., Socol, M., Kaas, R., Arhaliass, A., Rodriguez del Pino, J., Le Roux, K., Donnay-Moreno, C., & Bergé, J. P. (2017). Elements for optimizing a one-step enzymatic bio-refinery process of shrimp cuticles: Focus on enzymatic proteolysis screening. *Biotechnology Reports*, 15, 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.01.003>

Benhabiles, M. S., Salah, R., Lounici, H., Drouiche, N., Goosen, M. F. A., & Mameri, N. (2012). Antibacterial activity of chitin, chitosan and its oligomers prepared from shrimp shell waste. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.02.013>

Cahú, T. B., Santos, S. D., Mendes, A., Córdula, C. R., Chavante, S. F., Carvalho, L. B., Nader, H. B., & Bezerra, R. S. (2012). Recovery of protein, chitin, carotenoids and glycosaminoglycans from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processing waste. *Process Biochemistry*, 47(4), 570–577. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.12.012>

Chhabra, R., & Shankar, V. (2018). Liquid Mixing. In *Coulson and Richardson's Chemical Engineering* (pp. 333–377). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101099-0.00007-0>

David Giraldo Pedraza, J. (2015). *PROPIEDADES, OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES DEL QUITOSANO*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3350.9287>

El Knidri, H., Belaabed, R., Addaou, A., Laajeb, A., & Lahsini, A. (2018). Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 120, pp. 1181–1189). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.139>

- El-araby, A., El Ghadraoui, L., & Errachidi, F. (2022). Physicochemical Properties and Functional Characteristics of Ecologically Extracted Shrimp Chitosans with Different Organic Acids during Demineralization Step. *Molecules*, 27(23). <https://doi.org/10.3390/molecules27238285>
- Estufas y hornos*. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://grupo-selecta.com/equipos-laboratorio/estufas-y-hornos/>
- Filtros Anovia*. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://fanoia.com/catalogos>
- Förderkurven DEPA-Druckluft-Membranpumpen Curves DEPA Air Operated Diaphragm pumps*. (n.d.). Retrieved May 26, 2024.
- Ghorbel-Bellaaj, O., Jellouli, K., Younes, I., Manni, L., Ouled Salem, M., & Nasri, M. (2011). A solvent-stable metalloprotease produced by *Pseudomonas aeruginosa* A2 grown on shrimp shell waste and its application in chitin extraction. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 164(4), 410–425. <https://doi.org/10.1007/s12010-010-9144-4>
- Hermosillo, S. (2012). *Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS*.
- Hongkulsup, C., Khutoryanskiy, V. V., & Niranjana, K. (2016). Enzyme assisted extraction of chitin from shrimp shells (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(5), 1250–1256. <https://doi.org/10.1002/jctb.4714>
- https://fanoia.com/media/catalogos/Cat%C3%A1logo_general_FILTER-LAB_2017.pdf#page=16. (2024, June 26).
- Hu, X., Tian, Z., Li, X., Wang, S., Pei, H., Sun, H., & Zhang, Z. (2020). Green, Simple, and Effective Process for the Comprehensive Utilization of Shrimp Shell Waste. *ACS Omega*, 5(30), 19227–19235. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02705>
- Khan, A., Saha, G., & Pal, R. K. (2018). An approach for reduction of false predictions in reverse engineering of gene regulatory networks. *Journal of Theoretical Biology*, 445, 9–30. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.02.015>
- Khorrami, M., Najafpour, G. D., Younesi, H., & Hosseinpour, M. N. (n.d.). *Production of Chitin and Chitosan from Shrimp Shell in Batch Culture of Lactobacillus plantarum*.
- Kumar Dutta, P., Dutta, J., & Tripathi, V. S. (2004). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. In *Journal of Scientific & Industrial Research* (Vol. 63).
- La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible*. (n.d.). Retrieved June 28, 2024

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

Laboratorios | Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. (n.d.). Retrieved June 17, 2024, from <https://iqtma.uva.es/investigacion/laboratorios/>

Laboratorios y equipamiento - PressTech. (n.d.). Retrieved June 17, 2024, from <https://presstech.uva.es/laboratorios-y-equipamiento/>

Lv, J., Lv, X., Ma, M., Oh, D. H., Jiang, Z., & Fu, X. (2023). Chitin and chitin-based biomaterials: A review of advances in processing and food applications. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120142>

Merck | Spain. (n.d.). Retrieved May 26, 2024, from

https://www.sigmaaldrich.com/ES/es?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=20849921688&utm_content=156661392917&gclid=CjwKCAjwg8qzBhAoEiwAWagLrAfsbCum553adIZoB45PzrNZSUZpluv-JnzgkCpeUtW-R2PSotO-LBoCxEQAvD_BwE

Moran, S. (2019). An Applied Guide to Process and Plant Design. In *An Applied Guide to Process and Plant Design*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01972-9>

Nguyen, T. T., Barber, A. R., Smith, P., Luo, X., & Zhang, W. (2017). Application and optimization of the highly efficient and environmentally friendly microwave-intensified lactic acid demineralization of deproteinized Rock lobster shells (*Jasus edwardsii*) for chitin production. *Food and Bioproducts Processing*, 102, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.02.005>

Nour, S. A., Emam, M. T. H., El-Sayed, G. M., & Sakr, E. A. E. (2024). Utilizing chitooligosaccharides from shrimp waste biodegradation via recombinant chitinase A: a promising approach for emulsifying hydrocarbon and bioremediation. *Microbial Cell Factories*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02388-z>

Núñez-Gómez, D., Rodrigues, C., Lapolli, F. R., & Lobo-Recio, M. A. (2021). Physicochemical Characterization of White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Waste as a Low-Cost Chitinous Biomaterial. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(2), 576–587. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01887-5>

Ortoalresa - Expertos en centrifugación. ¡Conócenos! (n.d.). Retrieved May 26, 2024, from <https://ortoalresa.com/>

- Percot, A., Viton, C., & Domard, A. (2003). Optimization of chitin extraction from shrimp shells. *Biomacromolecules*, 4(1), 12–18. <https://doi.org/10.1021/bm025602k>
- Ploydee, E., & Chaiyanan, S. (2014). Production of high viscosity chitosan from biologically purified chitin isolated by microbial fermentation and deproteinization. *International Journal of Polymer Science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/162173>
- Porco, T. (2012). *E-catalog Product Literature Pressure Vessels • Laboratory Stirred Reactor • MagneDrives® Instrumentation • Systems*. Retrieved June 15, 2024, from www.AutoclaveEngineers.com
- Prameela, K., Mohan, C. M., Smitha, P. V., & Hemalatha, K. P. J. (n.d.). *BIOREMEDIATION OF SHRIMP BIOWASTE BY USING NATURAL PROBIOTIC FOR CHITIN AND CAROTENOID PRODUCTION AN ALTERNATIVE METHOD TO HAZARDOUS CHEMICAL METHOD*. www.ijabpt.com
- Propiedades termofísicas de sistemas fluidos*. (n.d.). Retrieved June 28, 2024, from <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- Rocha, J., Garcia-Carreño, F. L., Muhlia-Almazán, A., Peregrino-Uriarte, A. B., Yépiz-Plascencia, G., & Córdova-Murueta, J. H. (2012). Cuticular chitin synthase and chitinase mRNA of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* during the molting cycle. *Aquaculture*, 330–333, 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.12.024>
- Sistemas de Purificación de Agua. Diseño y Fabricación - Wasserlab*. (n.d.). Retrieved June 10, 2024, from <https://www.wasserlab.com//el-agua-pura/estandares-para-la-calidad-del-agua-6>
- Subsection A GENERAL REQUIREMENTS*. (n.d.). Retrieved June 15, 2024.
- The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. (2022). In *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). Design of Pressure Vessels. In *Chemical Engineering Design* (pp. 563–629). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096659-5.00014-6>
- Vacuum pumps and services for general industries, research & development - Edwards Vacuum*. (n.d.). Retrieved May 18, 2024, from <https://www.edwardsvacuum.com/es-es/vacuum-pumps>
- Yang, H., Gözaydın, G., Nasaruddin, R. R., Har, J. R. G., Chen, X., Wang, X., & Yan, N. (2019). Toward the Shell Biorefinery: Processing Crustacean Shell Waste Using Hot Water

and Carbonic Acid. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(5), 5532–5542.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06853>

CAPÍTULO 8.

ANEXOS

PRUEBA CON ÁCIDO FÓRMICO (1M) POR FILTRACIÓN A VACÍO Y CENTRIFUGACIÓN SIN LAVADO																	
FECHA (dd/mm/año)	MÉTODO DE SEPARACIÓN	Materia inicial	Ácido	Volumen ácido (mL)	Masa inicial cáscara (g)	Ratio Ac./cáscara (mL/g)	Tiempo (min)	Masa de filtro (g)	Masa después estufa (g)	Nombre del crisol	Masa crisol vacío (g)	Masa antes de mufla (g)	Masa después de mufla crisol-cáscara (g)	Masa después de mufla (g)	% Cenizas residual (w/w)	% Cenizas residual (Media)	SDDev.
08/05/2024	FILTRACIÓN A VACÍO	Cáscara Gambafresh-Oct2023 DUPLICADO CRISOL	Ácido fórmico 1M Ácido fórmico 1M	100 -	10,0756 -	9,9250 -	60 -	1,1087 -	6,3267 -	Crisol 3 Crisol H3	64,1671 63,3750	2,0039 2,0209	64,2017 63,4112	0,0346 0,0362	1,7266 1,7913	1,7590	0,0457

FECHA (dd/mm/año)	MÉTODO DE SEPARACIÓN	Materia inicial	Ácido	Volumen ácido (mL)	Masa inicial cáscara (g)	Ratio Ac./cáscara (mL/g)	Tiempo (min)	Nombre del falcon	Masa de falcon (g)	Masa de falcon antes de la centrifugación (g)	Masa de falcon, sólido y líquido sobrante, antes de la estufa (g)	Masa de la cápsula vacía (g)	Masa antes de la estufa (g)	Masa después estufa (g)	Nombre del crisol	Masa crisol vacío (g)	Masa antes de mufla (g)	Masa después de mufla crisol-cáscara (g)	Masa después de mufla (g)	% Cenizas residual (w/w)	% Cenizas residual (Media)	SDDev.
08/05/2024	CENTRIFUGACIÓN	Cáscara Gambafresh-Oct2023 DUPLICADO CRISOL	Ácido fórmico 1M Ácido fórmico 1M	100 -	10,0629 -	9,9375 -	60 -	Falcon A Falcon B Falcon C Falcon D masa suspensión:	12,4916 12,4574 12,4423 12,5350 49,9263 99,1196	39,1384 35,3511 39,0833 35,4731 149,0459	17,4372 18,7748 18,0603 20,5362 74,8085 99,1196	468,728	585,359	475,041	Crisol 13 Crisol A7	63,9186 66,2654	2,0044 2,0143	64,1090 66,4056	0,1904 0,2002	9,4991 9,9889	9,7190	0,3110

PRUEBA CON ÁCIDO FÓRMICO (1M) POR FILTRACIÓN A VACÍO Y CENTRIFUGACIÓN CON LAVADO																	
FECHA (dd/mm/año)	MÉTODO DE SEPARACIÓN	Materia inicial	Ácido	Volumen ácido (mL)	Masa inicial cáscara (g)	Ratio Ac./cáscara (mL/g)	Tiempo (min)	Masa de filtro (g)	Masa después estufa (g)	Nombre del crisol	Masa crisol vacío (g)	Masa antes de mufla (g)	Masa después de mufla crisol-cáscara (g)	% Cenizas residual (w/w)	% Cenizas residual (Media)	SDDev.	
21/05/2024	FILTRACIÓN A VACÍO	Cáscara Gambafresh-Oct2023 DUPLICADO CRISOL	Ácido fórmico 1M Ácido fórmico 1M	100 -	10,0927 -	9,9302 -	60 -	1,0920 -	6,2732 -	Crisol 9 Crisol A4	65,1960 65,8817	2,0018 2,0005	65,2266 65,9099	0,0306 0,0282	1,5286 1,4056	1,4691	0,0841

FECHA (dd/mm/año)	MÉTODO DE SEPARACIÓN	Materia inicial	Ácido	Volumen ácido (mL)	Masa inicial cáscara (g)	Ratio Ac./cáscara (mL/g)	Tiempo (min)	Nombre del falcon	Masa de falcon (g)	Masa de falcon antes de la centrifugación (g)	Masa de falcon, sólido y líquido sobrante, después primera centrifugación (g)	Masa de falcon, sólido y líquido sobrante, después segunda centrifugación (g)	Masa de falcon, sólido y líquido sobrante, después tercer lavado (g)	Masa de falcon, sólido y líquido sobrante, después tercer lavado (g)	Masa de la cápsula vacía (g)	Masa de la cápsula 14 horas estufa (g)	Masa de la cápsula 19 horas estufa (g)	Nombre del crisol	Masa crisol vacío (g)	Masa antes de mufla (g)	Masa después de mufla crisol-cáscara (g)	Masa después de mufla (g)	% Cenizas residual (w/w)	% Cenizas residual (Media)	SDDev.	
21/05/2024	CENTRIFUGACIÓN	Cáscara Gambafresh-Oct2024 DUPLICADO CRISOL	Ácido fórmico 1M Ácido fórmico 1M	100 -	10,0212 -	9,9788 -	60 -	Falcon A Falcon B Falcon C Falcon D masa suspensión:	12,61 12,62 12,60 12,57 50,40	39,6 44,4 39,6 44,5 138,1	16,7 18,9 17,0 20,6 73,2	44,9 50,8 50,8 50,8 195,4	18,6 17,1 20,5 22,6 78,8	60,3 60,2 45,8 45,9 212,2	56,4 44,7 56,4 42,5	41,4 44,3 44,3 41,4	467,7 5,00	472,7 472,7	Crisol 24 Crisol A10	64,5599 64,0739	2,0001 2,0002	64,5862 64,0970	0,0263 0,0231	1,3149 1,1549	1,2349	0,1132

ANEXO 2. SELECCIÓN DE MATERIALES

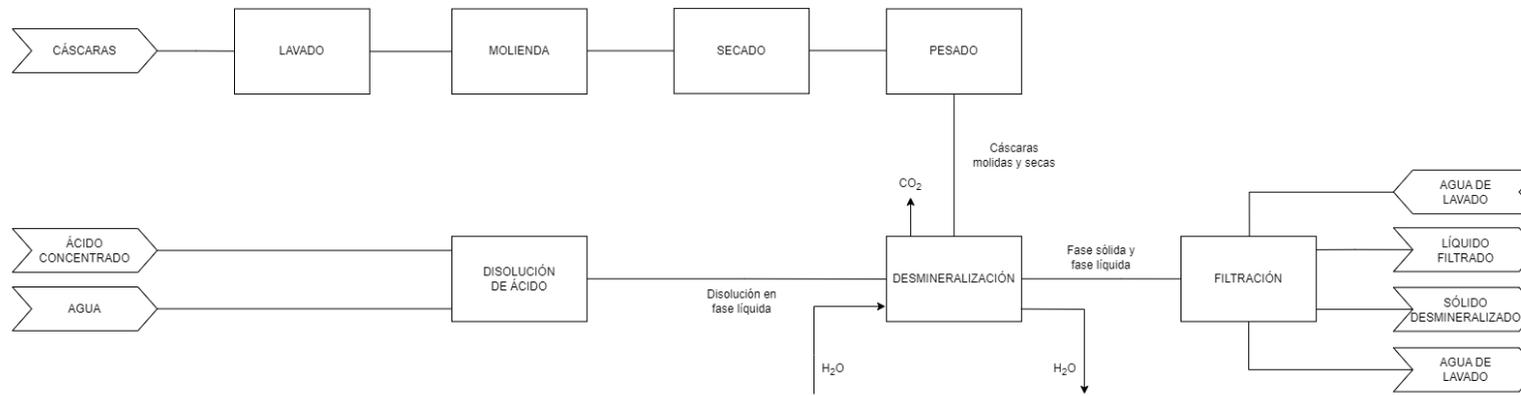
	Relative price	Temperature rating	Pressure rating	Water resistance ^a	Organic solvent resistance	Acid resistance	Alkali resistance	Abrasion resistance	Chloride resistance	UV resistance	Hardness	Toughness
<i>Metals</i>												
Cast iron	L	H	M/H	M	H	L	L/M	H	L	VH	H	M/H
Carbon steels	L	H	H	L	H	L	L	M/H	L	VH	H	H
Stainless steels	M	H	VH	H	H	L	L/M ^b	VH	L/M ^b	VH	H	VH
Bronzes	M	M/H	H	L	H	L	M	M	M	VH	M	M
Brasses	M	H	H	H	H	L	VL	M	M	VH	M	M
Hastelloy	VH	VH	VH	VH	H	H	M	H	H	VH	H	H
Tantalum	VH	VH	M/H	VH	H	VH	M	H	H	VH	H	VH
Inconel	VH	VH	VVH	VH	H	M/H ^b	H	H	M/H ^b	VH	H	H
Aluminum	M/H	M/H	M/H	H	H	L	L	M	L	VH	H	H
Titanium	H	H	M/H	H	H	M	L	H	VH	VH	H	H
Precious metals	VVH	H	L/M	H	H	M/H	VH	L/M	VH	VH	L/M	L/M
<i>Plastics</i>												
PVC ABS PP/PE PS	L L L L	VL/L ^b VL VVL	M/H ^b L	H H H H H	M ^b M L L	H H H H H	H H H H H	M M	H H H H H	VL M H H	M M L L	H H M H
Acrylic Nylon	M M H	VL	VL	M/H H	L/M H	M	H L	L/M L	H H	H H H	M M	H H H
Polybenzimidazole		L L/M M/H	L/M L/M M M			L/M		H H H				
<i>Fluoropolymers</i>												
PTFE PVDF	H VH	M M	VL L/M	H H	H H	H H	H H	M M	H H	H H	M/H M/H	M M/H
<i>Other</i>												
Ceramics	M	VVH	VVH	H	H	L/M	L	VH	H	VH	VH	L
Graphite	H	H	L/M	H	H	H	L/M	L	H	H	L	L
Glasses	M	M	L/M	H	VH	H	M	H	H	H	VH	L
Rubber	L	L	L/M	H	L/M	L	H	H	H	H	L	H
Composites	H	L	H	H	M/H	L/M	H	M	H	M	M	H

L , Low; M , Medium; H , High; V , Very. ^aCorrosive water by Langelier index (LSD). ^bVaries by grade.

Acetaldehyde	CC	CC	AA	AA	BB	AA	A	AA	AA	AA	AA	AA	NN	AA	NA	NA	AC	AC	A	N	AB	CC	BA	NA	A	AA	AA	A
Acetic acid, 20%	CC	CC	AA	AA	B	AA	A	AA	AA	AA	AA	AA	NN	A	BB	AN	CC	AC	NN	N	AA	CA	AB	CN	NC	AA	AA	A
Acetic acid, 80%	AC	AC	BA	AA	AN	NC	A	AA	AC	AA	AC	AC	CA	CA	CA	AC	N	AC	NN	N	A	AA	AC	NN	A	AA	AA	A
Acetic acid, glacial	CN	CN	CC	AA	CN	AC	AB	CA	A	AA	CN	CC	NN	C	AC	AA	CN	AA	N	N	AA	A	AA	AA	A	AA	AA	A
Acetone anhydride	NN	NN	AC	AA	CN	A	AC	AA	CA	AA	NN	CA	CC	A	AA	AA	NA	AA	AN	N	AA	A						
Aluminum chloride	NN	NC	AA	CA	NC	A	CA	AA	AA	AA	CC	CA	CC	AA	CA	AA	AN	AA	NN	A	B	AA	AA	AA	NN	AA	AA	A
Aluminum sulfate	BB	NN	AA	AA	A	AA	CA	AA	AA	AA	A	AN	C	NA	B	CN	NB	AN	N	NC	AA	NA	AN	AN	N	AA	AA	A
Ammonia, 10%	NN	AA	AA	AA	AA	AN	AC	A	CN	AA	NN	NN	AN	A	CB	CN	BN	A		A	BA	NN	AN	CN		AA	AA	A
Ammonium chloride	NA	A	AN	AC	NB	BB	A	AA	CA	A	AA	NN	CA		N	BC	AC	NN		N	A	BB	BN	NN		AA	AA	A
Ammonium nitrate	A	CA	BA	BA	AA	AA	AB	AA	A	AA	AA	AA	NN		AA	BA	C	AA		NC	A	A	AA	AA		AA	AA	A
Ammonium phosphate	AA	AC	AA	AA	AA	AA	A	AA	AA	A	A	AA			AN	AN	NN	AA		NC		AA	AA	AA		AA	AA	A
Ammonium sulfate	AN		AA	AA	CA	CA	NB	AA	AA	AA	AC	NA			BA	NN	AA	NN		AC		NC	BB	NN		AA	AA	A
Amyl acetate	C		AA	AA	C	A	BA	BA	AN		C	N			AA	AA	A	NA		N		AA	AA	AA		CA	AA	A
Amyl alcohol			A	A		N	A	A							B	N		A		N		N	A	A		A	A	A
Amyl chloride			N	A			A	A										N		A			N	B		A	A	A
Aniline							A													A								A
Aqua regia							A													A								A
Arsenic acid							A													A								A
Barium chloride							A													A								A
Barium sulfate							A													A								A
Beer Benzaldehyde							A													A								A
Benzene							A													A								A
Benzoic acid							A													AC								A
Borax							N													A								A
Boric acid																				A								A
Bromine water																				N								A
																												N

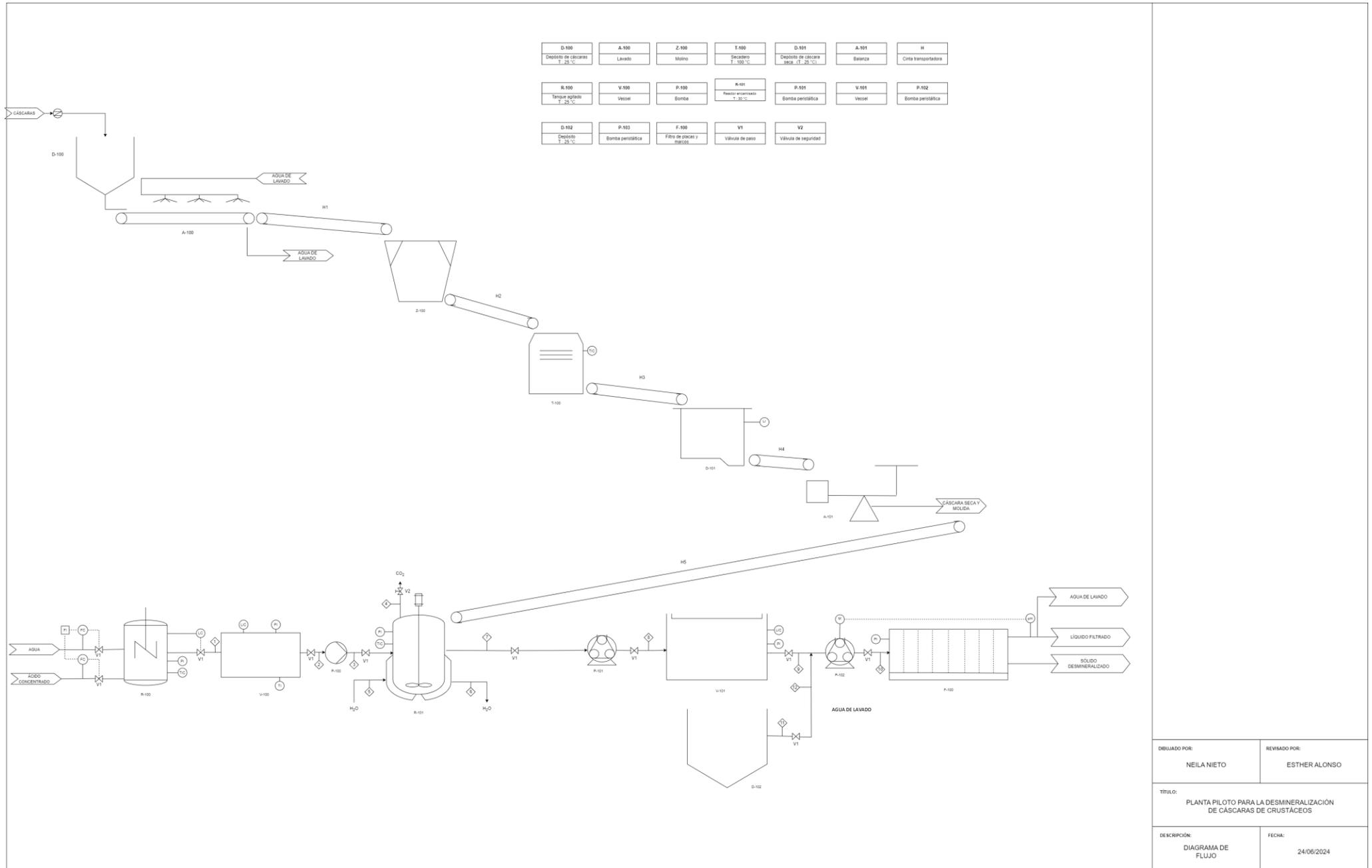
Butyl acetate Butyric acid	A B	A A	C A	A A	A A	C C	C A	A B	A A	A A	A A	B B	C C	A A	B C	N N	N A	N A	A A	A	N	N N	N A	N C	N N	A A	A A	A
Calcium bisulfate Calcium chloride	N	A A	C A	A A	N	C C	C A	C A	N A	A	A	A	A C	N A	A A	A A	N C	A N	A N	N	A A	A A	A A	A A	C A	A A	A A	A
Calcium hypochlorite	C A	C A	C A	C A	C A	C C	C C	A A	A A	A A	C A	C A	A A	C C	B B	A	B B	N N	C C	N	A A	N A	N A	B A	A C	A A	A A	A
Furfural	A A	A A	A A	A A	A A	A A	A A	A A	A A	A	A	A A	N	A	C B	C C	B B	A C	N	A	A A	N N	B B	A B	N A	A A	A A	A
Gasoline Glycerine	N N	N	N N	A C	N C	N N	N N	A C	N A	A A	N C	N N	N N	B N	C A	A A	N N	A	A A	A	A	A A	A A	A A	C C	A A	B B	A
Heptane Hexane	N	N N	N	C	C	N	N	C	A	A	C	N	N N	A N	A	A	N	A	N	A	A A	A	A	A	A C	A	B	A
Hydrobromic acid, 20%	N N	N N	A B	A A	A A	A B	A B	N N	A N	A N	N N	N N	C C	A	A A	A A	A A	A A	N N	A	A	A A	A A	B C	A A	B N	A	
Hydrochloric acid, 0%—25%	N N	N N	B B	A A	A A	B B	B B	N A	N N	N N	N N	N N	C C	N	A A	C A	A A	N C	C	N	A	A A	A A	B C	N	A A	N N	A
Hydrochloric acid, 25%—37%	N N	N A	A A	A A	N A	C C	A A	A A	C C	A A	C C	C C	N C		B	A C	N N	C N	N	N	A A	A N	B B	A B		A A	A A	A
Hydrocyanic acid	A A	A	A A	A A	A A	A B	A A	A A	N A	A A	A A	A A			A A	N A	N N	N A	N	N	B C	B A	B A	N B		A A	A A	A
Hydrofluoric acid, 10%	C A	C	A A	A A	A A	A A	B A	A A	A A	A	C A	A C			A A	N A	A A	N A	N	N		A A	A A	A A		A A	A A	A
Hydrofluoric acid, 30%	A A	A C	A A	A A		A A	A A	A A	A	A A	A	C			A A	A A	A C	A A	N	N		A A	A A	A A		A A	A A	A
Hydrofluoric acid, 60%	A		A A	A A		A A	A A	A A	A C			A N			A A	A A	A A	A N	N	N		A A	A A	A A		A A		A
Hydrogen peroxide, 30%																				N							A	
Hydrogen peroxide, 50%																				C A							A	
Hydrogen peroxide, 90%																				A							A	
Hydrogen sulfide, aqueous																				A							A	
Iodine in alcohol Kerosene																				A							A	
Lactic acid Lead acetate																				A							A	
Magnesium chloride																											A	
Magnesium nitrate																											A	
Magnesium sulfate Maleic acid																											A	
Methanol																											A	
Methyl chloride																											A	

ANEXO 3. DIAGRAMA DE BLOQUES



DIBUJADO POR: NEILÁ NIETO	REVISADO POR: ESTHER ALONSO
TÍTULO: PLANTA PILOTO PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE CÁSCARAS DE CRUSTÁCEOS	
DESCRIPCIÓN: DIAGRAMA DE BLOQUES	FECHA: 22/06/2024

ANEXO 4. DIAGRAMA DE FLUJO



DIBUJADO POR: NEILA NIETO	REVISADO POR: ESTHER ALONSO
TITULO: PLANTA PILOTO PARA LA DESMINERALIZACION DE CASCARAS DE CRUSTACEOS	
DESCRIPCION: DIAGRAMA DE FLUJO	FECHA: 24/06/2024