

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“PROCESO DE SECADO DEL ALGA LESSONIA
NIGRESCENS (ARACANTO NEGRO) EN UN SECADOR
ROTATORIO DISCONTINUO.”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADA POR:

DAGA MANRIQUE LUIS DAVID GUILLERMO

GARCÍA YAHUANA RAÚL DE LA CRUZ

ASESOR: ING.CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO

Callao, Octubre – 2017

PERÚ

PROLOGO DEL JURADO

El presente informe fue Expuesto por el bachiller **DAGA MANRIQUE LUIS DAVID GUILLERMO** y **GARCIA YAHUANA RAUL DE LA CRUZ** ante el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** conformado por los siguientes profesores ordinarios:

ING. MACHACA GONZALES LEONARDO FELIX : PRESIDENTE

ING.CHAMPA HENRIQUEZ OSCAR MANUEL : SECRETARIO

ING.RANGEL MORALES FABIO MANUEL : VOCAL

ING.CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO : ASESOR

Tal como está asentado en el libro de actas N°2 de Tesis Fólíto N°98 y Acta N°274 de fecha **VEINTE DE OCTUBRE DE 2017**, para la obtención del título profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Titulación por Tesis, de conformidad establecido por el reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N°082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011, Resolución N°221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012

DEDICATORIA

A Dios, a nuestro asesor de tesis el Ing. Luis Américo Carrasco Venegas, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo.

Dedicamos también el presente trabajo a todos los que participaron en cada fase del proyecto desde el planteamiento, desarrollo experimental e informe del proyecto, de manera especial a nuestros padres: Soledad Manrique Avellaneda, Aurelia Yahuana Rondoy y Rómulo García Peña. Por ser nuestra fortaleza moral y espiritual para poder afrontar cada reto que la vida nos da, por el amor que nos dan y su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos:

A la universidad Nacional del Callao (UNAC), presente a través del Laboratorio de Investigación de pregrado de la Facultad de Ingeniería Química. Al Instituto del Mar Peruano (IMARPE), por el apoyo en el análisis taxonómico de las muestras concernientes al desarrollo del proyecto de tesis.

Al Ing. Luis Américo Carrasco Venegas por su constante apoyo y valiosa colaboración mediante la asesoría, aportes técnicos y logísticos desde la creación del proyecto de tesis hasta la terminación del proyecto. A nuestros padres y familiares de manera especial por darnos la fortaleza durante todo el tiempo de estudios para lograr terminar la carrera y poder concluir el proyecto e informe de tesis. En general agradecemos enormemente a los colegas profesionales, e instituciones que nos permitieron terminar este trabajo de investigación.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN | |
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTO | |
| ÍNDICE..... | 1 |
| TABLAS DE CONTENIDO..... | 3 |
| RESUMEN..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 6 |
| I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 7 |
| 1.1 Identificación del problema..... | 7 |
| 1.2 Formulación del problema..... | 8 |
| 1.2.1 Problema General..... | 8 |
| 1.2.2 Problemas específicos..... | 8 |
| 1.3 Objetivos de la investigación..... | 8 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 8 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 9 |
| 1.4 Justificación..... | 9 |
| 1.5 Importancia..... | 10 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 11 |
| 2.1 Antecedentes de Estudio..... | 11 |
| 2.2 Marco Teórico..... | 13 |
| 2.2.1 Principios de secado..... | 13 |
| 2.2.2 Comparación entre el secado natural y secado artificial..... | 15 |
| 2.2.3 Operaciones de secado..... | 16 |
| 2.2.4 Secadores rotatorios..... | 17 |
| 2.2.5 Curvas de velocidad de secado..... | 20 |
| 2.2.6 Transferencia de calor sobre superficies tubulares..... | 30 |
| 2.2.7 Las algas <i>Lessonia nigrescens</i> en el Perú..... | 32 |
| 2.2.8 Importancia de las algas <i>Lessonia nigrescens</i> | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3 | Definición de términos básicos usados en el planteamiento de la tesis..... | 36 |
| III. | VARIABLES E HIPÓTESIS..... | 40 |
| 3.1 | Variables de la investigación | 40 |
| 3.2 | Operacionalización de variables..... | 42 |
| 3.3 | Hipótesis..... | 42 |
| 3.3.1 | Hipótesis General..... | 42 |
| 3.3.2 | Hipótesis Específicas | 43 |
| IV. | METODOLOGÍA | 44 |
| 4.1 | Tipo de Investigación..... | 44 |
| 4.2 | Diseño de Investigación..... | 44 |
| 4.3 | Población y muestra | 46 |
| 4.4 | Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 46 |
| 4.4.1 | Materiales y reactivos..... | 46 |
| 4.4.2 | Método | 47 |
| 4.5 | Procedimientos de recolección de datos..... | 50 |
| 4.6 | Procesamiento estadístico y análisis de datos..... | 50 |
| V. | RESULTADOS..... | 52 |
| 5.1 | Especificaciones del Secador Rotatorio | 52 |
| 5.2 | Curvas de secado..... | 53 |
| VI. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 56 |
| 6.1 | Contrastación de hipótesis con los resultados..... | 56 |
| 6.2 | Contrastación de resultados con otros estudios similares..... | 57 |
| VII. | CONCLUSIONES | 59 |
| VIII. | RECOMENDACIONES | 60 |
| IX. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 61 |
| | ANEXOS..... | 64 |

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1: Modelos de interacción Gas – Sólido en Secadores | 14 |
| Figura 2. 2: Secador Rotatorio | 18 |
| Figura 2. 3: Humedad En función del tiempo | 22 |
| Figura 2. 4: Velocidad de Secado en función de la humedad | 24 |
| Figura 2. 5: Fotografía del alga <i>L. Nigrescens</i> | 34 |
| Figura 2. 6: Usos del alga <i>L. Nigrescens</i> | 36 |

CAPITULO III

| | |
|--|----|
| Figura 3. 1: Relación de las variables de la investigación | 41 |
|--|----|

CAPITULO IV

| | |
|---|----|
| Figura 4. 1: Diseño de la investigación | 45 |
| Figura 4. 2: Diagrama de bloques para el proceso de secado del alga <i>Lessonia Nigrescens</i> (aracanto negro) en un secador rotatorio discontinuo | 51 |

CAPÍTULO V

| | |
|---|----|
| Figura 5. 1: Curva de secado de %perdida H ₂ O en función del tiempo ... | 53 |
| Figura 5. 2: Curva de secado de la humedad en base seca del alga en función del tiempo | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO II

| | |
|---|----|
| Tabla 2. 1: Factores de comparación entre el secado natural y el secado artificial..... | 15 |
| Tabla 2. 2: Ubicación taxonómica de <i>Lessonia Nigrescens</i> | 33 |
| Tabla 2. 3: Composición química de algas (gr/100 gr base seca) | 35 |

CAPÍTULO III

| | |
|---|----|
| Tabla 3. 1: Operacionalización de las Variables | 42 |
|---|----|

CAPITULO V

| | |
|--|----|
| Tabla 5. 1: Pruebas estadísticas para la validación de los datos para cada temperatura de secado | 54 |
|--|----|

CAPITULO VI

| | |
|--|----|
| Tabla 6. 1: Condiciones de operación y resultados obtenidos de estudios similares..... | 58 |
|--|----|

RESUMEN

En el presente trabajo, se desarrolló el proceso para el secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo, lográndose determinar a tres temperaturas (30, 50 y 60 °C), tiempos de secado de 360, 130 y 126 min respectivamente, con una velocidad de rotación de 13.20 rpm y un flujo de aire 7.9693 m³/s. De acuerdo al análisis estadístico que se utiliza (R^2), se muestra la mejor calidad de ajuste sobre los datos experimentales, otorgando así una buena herramienta para el modelado de la cinética de secado industrial de la *Lessonia nigrescens* y el cálculo del tiempo de secado a diferentes temperaturas, con el fin de alcanzar un contenido de humedad comercial 18% b.h. (0.219 g agua/g m.s.) aceptable internacionalesmente. Además comprobándose que el secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo es el más recomendable.

ABSTRACT

In the present work, the process for the drying of the *Lessonia nigrescens* algae was developed in a discontinuous rotary dryer. Three temperatures (30, 50 and 60 °C) were obtained, drying times of 360, 130 and 126 min respectively, with a velocity of rotation of 13.20 rpm and an airflow 7.9693 m³ / s. According to the statistical analysis that is used (R^2), the best adjustment quality is shown on the experimental data, thus providing a good tool for modeling the industrial drying kinetics of the *Lessonia nigrescens* and calculating the drying time at Different temperatures, in order to reach a commercial moisture content of 18% bh (0.219 g water / g m.s.) acceptable internationally. In addition, it is verified that the drying of the *Lessonia nigrescens* seaweed in a discontinuous rotary dryer is the most advisable.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema

El secado es una operación en la cual se elimina parcialmente la cantidad de agua que poseen los productos al natural hasta que contenga la humedad que permita almacenarlo durante un periodo largo en condiciones ambientales ordinarias, sin que pierda sus propiedades naturales y organolépticas.

El secado mejora la posibilidad de almacenamiento de los materiales, lo que significa una prolongación del tiempo de almacenamiento. Además, que el producto seco, a causa de que cesan casi totalmente sus actividades metabólicas, se dan condiciones desfavorables para el desarrollo de los microorganismos.

Hoy en día en el país se utilizan métodos de secado que no garantizan la calidad del producto y el tiempo requerido para este proceso es excesivo ya que el secado de las algas se realizan de manera artesanal, es decir al aire libre ateniéndose a las condiciones climáticas.

Por otro lado es importante que el proceso de secado de las algas marinas se lleve adecuadamente, para que los microorganismos que viven en asociación con las algas, continúen viables, propagándose donde se apliquen, potenciando su acción.

Además de que puede brindar al organismo humano, los nutrientes necesarios para fortalecer los diferentes aparatos del cuerpo humano,

brindando una fuente de energía que no la pueden ofrecer muchos alimentos importados o que se consumen en la actualidad.

Por lo tanto existe la necesidad de desarrollar un proceso para el secado de las algas *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo, que realice un secado uniforme del producto en menor tiempo.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo desarrollar el proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del alga *Lessonia nigrescens*?
- b. ¿Cuáles son las condiciones de secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador discontinuo?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar el proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a. Obtener las propiedades fisicoquímicas del alga *Lessonia nigrescens*.
- b. Obtener las condiciones más apropiadas para el secado del alga *Lessonia nigrescens*.

1.4 Justificación

Las razones que justifican la investigación propuesta son las siguientes:

- **Tecnológica.** Permitirá emplear una tecnología para mejoramiento en la productividad y desempeño ambiental.
- **Económica.** Permitirá un ahorro de energía y conservación de los recursos valiosos en el proceso de secado de las algas por un secador rotatorio discontinuo.
- **Social.** Al desarrollarse esta actividad no solo permitirá disminuir los costos sino también crear nuevas fuentes de trabajo y una alternativa para la comunidad en el secado de las algas.
- **Práctica.** Una vez obtenido el producto podrá ser empleado directamente en beneficio de la población y poder elegir entre nuevas formas de operación.

1.5 Importancia

El presente trabajo de investigación reviste una importancia significativa, porque representa una alternativa para disminuir el tiempo de secado. Asimismo la conservación de las propiedades fisicoquímicas de la materia prima.

Además, es de vital importancia el aporte de la comunidad científica en la búsqueda de nuevos procesos cuyo principio básico es el de reducir el contenido de agua del alimento, facilitando su estudio, transporte y almacenamiento.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de Estudio

Vega y Martínez (2015), describieron e implementaron un sistema rotatorio de flujo constante para secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo. Se realizó un algoritmo de control predictivo basado en modelo con el cual se regula el flujo másico de gas, la energía calorífica necesaria para realizar el secado de cacao dentro del cilindro rotatorio cámara de secado. Los ensayos se realizaron en un sistema prototipo para secado de cacao que mide 2 m de longitud y un diámetro de 0.5 m en el cual ingresan 310 Kgr. Obteniendo una reducción de humedad de 60% a 12% durante un tiempo de 10 horas.

Castaño, Rubio y Ortega (2009), realizaron un estudio del comportamiento de secadores rotatorios basado en el planteamiento de ecuaciones generales básicas con parámetros distribuidos y de correlaciones que permiten sistematizar su modelado. Se utilizó el secado de arena y los resultados que obtuvieron para el flujo del producto admisible fueron entre 2 y 4 Kgr/hr, mientras que el flujo de combustible estaban entre 0.7 y 4 kgr/hr, aproximadamente. Consiguiendo una humedad del producto de salida con valores aproximados entre 0.5% y 2%, mientras que la temperatura de salida osciló entre los 25 °C y los 55 °C.

Torres y Sper (2009), diseñaron una planta deshidratadora de banano usando un secador rotatorio. Se logró deshidratar obteniéndose un producto con una humedad promedio del 8%. Seguidamente el producto pasó al sistema de molienda, el cual consiste de un molino de martillo que ha sido diseñado en función de las características del producto, tamaño de partícula y flujo másico requerido. Para el proceso de secado se utilizó gas licuado de petróleo por su mejor combustión, bajo nivel de contaminación del producto y del medio ambiente.

Rueda y Rueda (2009), diseñaron y construyeron un secador rotativo directo cilíndrico, logrando reducir la humedad presente en la pollinaza hasta de un 15%. También se logró mantener una cantidad de proteína del 30%. Se concluyó que lo más apropiado era trabajar con partículas de 2 a 5 cm de diámetro, ya que se tuvieron problemas con las partículas más finas debido a que eran arrastrados por la velocidad del viento.

Navarro, Chang, Llanos, y Cuizano (2007), evaluaron las propiedades ácido-básicas de dos algas marinas recolectadas del litoral peruano: *Macrocystis integrifolia* y *Lessonia nigrescens* mediante titulación potenciométrica. Ambas algas muestran fuertes propiedades ácidas con pKa de 2,13 y 2,67, respectivamente. Esta ligera diferencia se atribuye a la relación en contenido fucooidanos/alginate más las proteínas fosfatadas presentes en las algas. De los resultados, las algas estudiadas son

biosorbentes potenciales para su aplicación en la eliminación de contaminantes de aguas residuales a condiciones reales, las cuales son extremas por su composición y acidez.

2.2 Marco Teórico

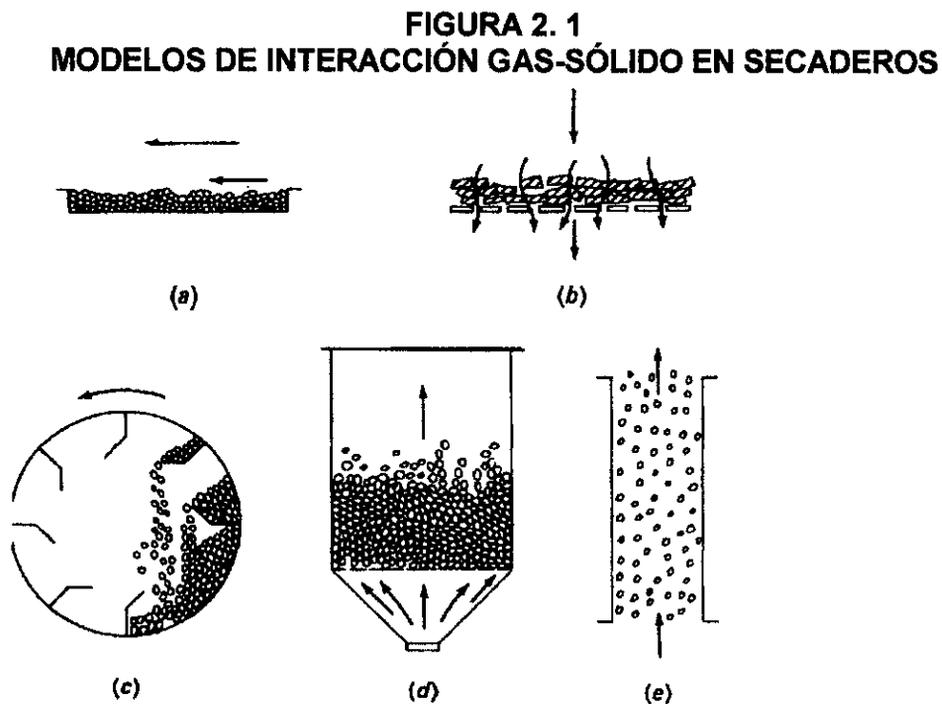
2.2.1 Principios de secado

Secado generalmente se refiere a la remoción de líquido de un sólido por evaporación. El secado es el proceso más antiguo utilizado para la preservación de alimentos, siendo uno de los métodos más comunes vigentes de mayor importancia en todos los sectores para la producción de productos sólidos (Perry, 2009).

Cuando intervienen transmisión de calor y transferencia de materia, el mecanismo del secado depende de la naturaleza de los sólidos y del método de contacto entre los sólidos y el gas. Existen tres tipos de sólidos: cristalinos, porosos y no porosos. Las partículas cristalinas no contienen líquido interior y el secado tiene lugar solamente en la superficie del sólido. Un lecho de tales partículas puede considerarse, por supuesto, como un sólido altamente poroso. Los sólidos verdaderamente porosos, tales como pastillas de catalizadores, contienen líquido en el interior de los poros. Los sólidos no porosos comprenden geles coloidales tales como jabón, cola y arcilla plástica, sólidos celulares densos tales como madera y cuero, y muchos otros materiales poliméricos (McCabe et al., 2007).

- **Modelos de temperatura en secadores**

En un secador discontinuo con un medio de calentamiento a temperatura constante la temperatura de los sólidos húmedos aumenta desde su valor inicial T_{as} hasta la temperatura de vaporización T_v . En un secador si se utiliza un gas de barrido, o el secador es adiabático, T_v es la temperatura de bulbo húmedo del gas, o un valor muy próximo a ella (dicha temperatura es la de saturación adiabática si el gas es aire y el líquido que se evapora es agua) (McCabe et al., 2007).



Fuente: McCabe et al., 2007

En la figura 2.1, (a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos, (b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos, (c) acción en un secadero

rotatorio, (d) lecho fluidizado de sólidos, (e) flujo en paralelo gas-sólido en un secadero flash de transporte neumático.

2.2.2 Comparación entre el secado natural y secado artificial

TABLA 2. 1

FACTORES DE COMPARACIÓN ENTRE EL SECADO NATURAL Y EL SECADO ARTIFICIAL

| Factores | Secado natural | Secado artificial |
|------------------------|---|--|
| Tiempo | 60 días al aire ambiente cualquier cantidad. | 250kgr. de algas por hora de trabajo. |
| Contaminación | Proliferación de moscas y malos olores. | Se evita la acumulación de algas por lo tanto la proliferación de plagas y malos olores. |
| Propiedades | No se lleva a cabo un control de agentes patógenos ni de sus nutrientes y niveles de humedad. | Control de humedad y de los porcentajes de nutrientes, y remoción de agentes patógenos. |
| Economía | Falta de cumplimiento en la demanda del producto mientras está almacenada. | Producción inmediata. |
| Área de almacenamiento | Se ocupa gran área durante el tiempo de secado sin oportunidad de evacuación. | Área con evacuación rápida. |

Fuente: Gelvez 2009

2.2.3 Operaciones de secado

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando. Así, la operación denominada secado por lotes, generalmente es un proceso en semilotes, en donde una cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad (Treybal, 1980).

El equipo que se utiliza para el secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo del equipo y por la naturaleza del proceso de secado. La clasificación siguiente es útil para delinear las teorías de secado y los métodos de diseño.

- a) Método de operación, o sea, por lotes o continuo: el equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario.
- b) Método de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad: En los secadores directos, el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En los secadores

indirectos, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrearla humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica en contacto con una sustancia.

- c) Naturaleza de la sustancia que se va a secar: La sustancia puede ser un sólido rígido como madera o triplay, un material flexible como tela o papel, un sólido granular, como una masa de cristales, una pasta ligera o un lodo ligero, o una solución. Si es un sólido, puede ser frágil o fuerte. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesarios tienen tal vez, la mayor influencia sobre el secador que se va utilizar.

2.2.4 Secadores rotatorios

Los secadores rotatorios son usados para materiales que no sean tan frágiles o sensibles al calor. Este tipo de secador es uno de los más usados en la industria y son efectivos para medianas y grandes escalas de producción.

Consta de una coraza cilíndrica, usualmente construida de plancha de acero, dentro de la cual el material a secar ingresa por un lado y se descarga seco del otro.

- Mal control de la temperatura del producto final.
- Arrastres de partículas húmedas.

A su favor la operación en contraflujo asegura una distribución más uniforme de la diferencia de temperatura. Consecuentemente, la eficiencia en el secador es maximizada.

En resumen si el material resiste altas temperaturas se usará contraflujo, de no ser así la operación en paralelo es la más aceptable aunque se sacrifique un poco de la eficiencia térmica (Torres y Sper, 2009).

- **Diseño de secadores**

La velocidad másica permitida para el gas en un secadero rotatorio de contacto directo depende de las características de formación de polvos del material que se seca y varía entre 400 lb/pie²-h (1950 kg/m²-h) y 5000 lb/pie²-h (24000 kg/m²-h) para partículas gruesas. Las temperaturas típicas del gas a la entrada están comprendidas entre 250 a 350 °F (120 a 175 °C) para aire calentado con vapor y entre 1000 a 1500 °F (540 a 815 °C) para gases de combustión procedentes de un horno. Los diámetros de los secaderos están comprendidos entre 3 a 10 pies (1 a 3 m) y la velocidad periférica de la carcasa generalmente varía entre 60 a 75 pies/min (20 a 25 m/min) (McCabe et al., 2007).

Los secaderos rotatorios se diseñan basándose en la transmisión de calor. Una ecuación empírica dimensional para el coeficiente volumétrico de transmisión de calor U_a es:

$$U_a = \frac{0.5G^{0.67}}{D} \quad (2.5-1)$$

Dónde:

U_a : Btu/pie²-h-°F

G: velocidad másica del gas (lb/pie²-h)

D: diámetro del secadero (pie)

2.2.5 Curvas de velocidad de secado

El estudio de la desecación de un sólido se enfoca desde dos líneas distintas: una basada en los mecanismos internos de la circulación del líquido dentro del sólido, y otra basada en el examen de las condiciones externas.

El análisis de los mecanismos internos resulta muy complejo ya que hay que tratar con fenómenos de difusión, circulación por efecto capilar, circulación producida por gradientes de presión y concentración, circulación causada por la gravedad, circulación causada por evaporaciones y condensaciones, etc.

Para todos los mecanismos existen teorías desarrolladas, pero son difíciles de manejar en el terreno práctico. Debido a estas dificultades

prácticas, el diseño de secadores industriales se aborda con el examen de las condiciones externas.

El fenómeno de secado se describe por curvas que representan la humedad del sólido en función del tiempo para unas condiciones externas fijadas (Liptak, 1999).

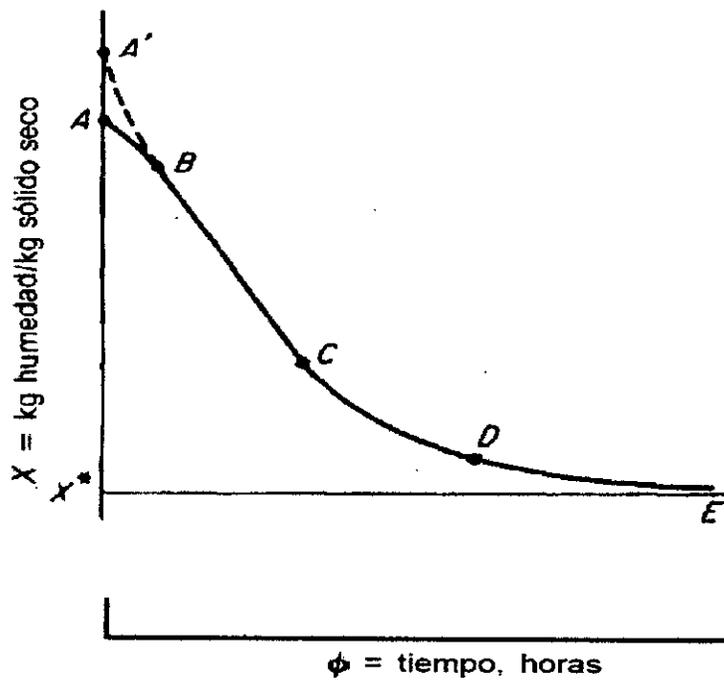
- **Humedad**

A medida que transcurre el tiempo, el contenido de humedad X_T disminuye generalmente como se representa en la Figura 2.3.

Después de un corto período de tiempo durante el que se calienta la alimentación hasta la temperatura de vaporización, la representación gráfica se hace lineal, posteriormente se curva hacia el eje de abscisas y finalmente se hace horizontal (McCabe et al., 2007).

FIGURA 2. 3

HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Fuente: McCabe et al., 2007

- Humedad en base húmeda es la cantidad de agua que tiene el grano en total, o sea, sobre su peso de materia seca más agua.

$$H_{BH} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_w}{m_t} \quad (2.6 - 1)$$

Dónde:

H_{BH} : Humedad en base húmeda

m_w : Masa de agua

m_s : Masa de materia seca

m_t : Masa total

- Humedad en base seca que es la cantidad de agua que tiene el grano en relación solamente a la cantidad de materia seca. Esta humedad será siempre mayor que la anterior.

$$H_{BS} = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.6 - 2)$$

Dónde:

H_{BS} : Humedad en base seca

- **Velocidades de secado**

Generalmente hay dos partes principales en la curva de rapidez de la figura 2.4, un periodo de rapidez constante y uno de rapidez decreciente, como se señala en la figura. Aunque a menudo sólidos diferentes y condiciones distintas de secado dan lugar a curvas de formas muy diferentes en el periodo decreciente de la rapidez, la curva que se muestra ocurre con frecuencia.

esta fase se mantiene prácticamente constante la temperatura de la superficie del sólido y esta se corresponde con la temperatura húmeda. Por último, hay una fase de caída de la velocidad de evaporación a partir del punto C (contenido crítico de humedad) hasta el punto D (contenido de humedad de equilibrio del sólido). En esta última fase dominan los mecanismos internos de transporte en el sólido (Liptak, 1999).

Durante el período de velocidad constante, la velocidad de secado por unidad de área, R , puede estimarse con bastante precisión a partir de las correlaciones desarrolladas para evaporación desde la superficie libre de un líquido. Los cálculos pueden basarse en transferencia de calor:

$$m_v = \frac{H_y * (T - T_i) * A}{\lambda_i} \quad (2.6-3)$$

Dónde:

m_v = velocidad de evaporación

A = área de secado

H_y = coeficiente de transmisión de calor

T = temperatura del gas

T_i = temperatura de la interfase

λ_i = calor latente de vaporización a la temperatura T_i

Para estimar el coeficiente para un gas en flujo turbulento paralelo a la superficie de un sólido, como en un secador de bandeja, se recomienda la siguiente ecuación (McCabe et al., 2007):

$$N_u = \frac{H_y D_e}{k} = 0.037 * R_e^{0.8} * P_r^{0.33} \quad (2.6-4)$$

Dónde:

H_y = coeficiente de transmisión de calor, Btu/pie²-°F

G = velocidad másica, lb/pie²-h

Quando el flujo es perpendicular a la superficie, a velocidades del aire de entre 0.9 y 4.5 m/s, la ecuación es:

$$H_y = 24.2 * G^{0.37} \quad (2.6-5)$$

La velocidad constante de secado R, es simplemente:

$$R_c = \frac{m_v}{A} = \frac{H_y(T-T_i)}{\lambda_i} \quad (2.6-6)$$

- **Calculo del tiempo de secado para condiciones de secado constantes**

En el diseño de secaderos una variable importante es el tiempo que se requiere para secar el material en las condiciones existentes en el

secadero, ya que esto determina el tamaño del equipo que se necesita para obtener una eficacia determinada. Para el secado en condiciones constantes (las condiciones de la corriente de aire son constantes) el tiempo de secado se puede determinar a partir de la curva de la velocidad de secado cuando puede disponer de la misma (McCabe et al., 2007).

Con frecuencia esta curva se obtiene en un experimento de secado con el material en cuestión, y esto conduce directamente al tiempo de secado. Las curvas de velocidad de secado en unas condiciones con frecuencia pueden modificarse para otras condiciones y, por tanto, resulta útil calcular el tiempo de secado a partir de la curva de velocidad de secado. Por definición:

$$R = -\frac{dm_v}{A dt} = \frac{m_s dX}{A dt} \quad (2.6-7)$$

Integrando la ecuación (2.6-7) entre X_1 y X_2 , los contenidos iniciales y final de humedad libre, respectivamente, resulta:

$$t_T = \frac{m_s}{A} * \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \quad (2.6 -8)$$

Donde t_T es el tiempo total de secado. La ecuación se puede integrar numéricamente a partir de la curva de la velocidad de secado, o bien analíticamente si se dispone de ecuaciones de R en función de X.

Para periodo de velocidad constante $R = R_c$ y el tiempo de secado es simplemente:

$$t_c = \frac{m_s(X_1 - X_2)}{A * R_c} \quad (2.6-9)$$

En el periodo de velocidad decreciente, cuando la difusión es controlada, el tiempo de secado t_f para una lámina viene dado por:

$$t_f = \frac{4s^2}{D_v \pi^2} * \ln\left(\frac{8X_1}{\pi^2 * X}\right) \quad (2.6-10)$$

Dónde:

D_v : Difusividad a través del sólido.

S: semiespesor de la lámina.

X_1 : Contenido inicial de humedad libre.

X: contenido medio de humedad libre para el tiempo t_f .

Para un R que varía linealmente con X, como ocurre en muchos sólidos porosos,

$$R = aX + b \quad (2.6-11)$$

Donde a y b son constantes, y $dR = adX$, sustituyendo dX en la ecuación (2.6-8) se obtiene para el tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente:

$$t_f = \frac{m_s}{aA} * \int_{R_2}^{R_1} \frac{dR}{R} = \frac{m_s}{aA} * \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2.6-12)$$

Donde R1 y R2 son las ordenadas de las humedades inicial y final, respectivamente. La constante a es la pendiente de la curva de la velocidad de secado y puede escribirse así:

$$a = \frac{R_c - R}{X_c - X} \quad (2.6-13)$$

Dónde:

R_c = velocidad en el primer punto crítico

R = velocidad en el segundo punto crítico

X_c = contenido de humedad libre en el primer punto crítico

X = contenido de humedad libre en el segundo punto crítico

Sustituyendo a de la ecuación (2.6-13) en la ecuación (2.6-12) se obtiene:

$$t_T = \frac{m_s(X_c - X)}{A * (R_c - R)} * \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (2.6-14)$$

Cuando el proceso de secado abarca ambos períodos de velocidad constante y de velocidad decreciente, el tiempo total de secado t_T viene dado entonces por:

$$t_T = t_c + t_f \quad (2.6-15)$$

2.2.6 Transferencia de calor sobre superficies tubulares

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor. Se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. La convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Por ejemplo, al trasegarlo mediante bombas o al calentar agua en una cacerola: el agua en contacto con la base de la cacerola asciende, mientras que el agua de la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural, un fluido es más caliente o más frío. En contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del enfriamiento de Newton:

$$Q_{CONV} = hA(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2.7-1)$$

- **Transferencia de calor por convección forzada en flujo turbulento**

La turbulencia se presenta para números de Reynolds superiores aproximadamente a 2100 y, como la velocidad de transferencia de calor es mayor para flujo turbulento que para flujo laminar, la mayoría de equipos operan en el intervalo de turbulencia.

Los primeros estudios sobre este caso estaban basados en correlaciones empíricas por prueba de datos, tomando como guía el análisis dimensional. Se ha alcanzado un profundo conocimiento del mecanismo de la transferencia de calor con flujo turbulento, a la vez que se han mejorado las ecuaciones aplicables a intervalos de condiciones más amplios.

- **Unidades de transferencia de calor**

Algunos secadores adiabáticos, en especial los secadores rotatorios, se diseñan en función del número de unidades de transferencia de calor que contienen, se basan en la fase gaseosa. El número de unidades de transferencia en un secador y para un sistema aire-agua $T_{wb} = T_{wa}$ viene dado por:

$$N_t = \ln \frac{T_{hb} - T_{wb}}{T_{ha} - T_{wb}} \quad (2.7-2)$$

Dónde:

T_{ha} : Temperatura de salida del fluido caliente

T_{hb} : Temperatura de entrada del fluido caliente

T_{wb} : Temperatura de bulbo húmedo a la entrada

En la ecuación (2.7-2) se supone que $T_v = T_{wb}$ lo cual puede ser válido o no. Sin embargo, para fines de cálculo, con frecuencia se hace esta suposición, debido a que T_v por lo general se desconoce.

La temperatura más conveniente del gas a la salida es una cuestión económica; se estima a partir de la ecuación (2.7-2), ya que se ha demostrado empíricamente que los secadores rotatorios resultan más económicos cuando N_t varía entre 1.5 y 2.5 (McCabe et al., 2007).

2.2.7 Las algas *Lessonia nigrescens* en el Perú

Esta especie presenta un patrón de distribución subantártica, encontrándose desde Callao en Perú Central, hasta Cabo de Hornos en Chile. Las *L. nigrescens* se distribuye en el intermareal en las costas rocosas expuestas y semi expuestas, formando cinturones continuos interrumpidos sólo por la presencia de playas de arena. La extensión de estos cinturones es variable dependiendo de la extensión del sustrato y el grado de acción del oleaje (Alveal, 1995).

TABLA 2. 2

UBICACIÓN TAXONÓMICA DE LESSONIA NIGRESCENS

| |
|------------------------|
| Clase : Phaeophyceae |
| Orden: Laminariales |
| Familia: Laminariaceae |
| Género: Lessonia |
| Especie: L. nigrescens |

Fuente: Manual de cultivo de Macroalgas Pardas 2010

Las algas *L. nigrescens* de color verde pardusco o casi negro, de tamaño intermedio crecen en la zona intermareal-submareal formando densos cinturones.

Durante todo el año es posible observar en la superficie de las frondas manchas oscuras de tamaño variable que corresponden a soros esporangiales maduros. El disco de fijación sirve de hábitat y refugio a numerosas especies de invertebrados y algas. *L. nigrescens* alcanza tamaños de hasta 3 a 4 m de longitud, el disco basal puede tener hasta 50 cm de diámetro.

Estas algas viven normalmente en sectores rocosos expuestos y de gran movimiento de agua (Méndez, 2002).

FIGURA 2. 5

FOTOGRAFÍA DEL ALGA L. NIGRESCENS



Fuente: Manual de cultivo de Macroalgas Pardas 2010

2.2.8 Importancia de las algas *Lessonia nigrescens*

Por razones económicas, la biotecnología ha prestado mucha atención a las algas marinas, porque son producidas naturalmente en grandes cantidades, yaciendo en las orillas de las playas y siendo alguna de ellas consideradas material de desecho. Su aplicación como biosorbentes para la eliminación de contaminantes, podría interpretarse como el uso de desechos para eliminar desechos. Las embarcaciones pesqueras que arrastran enormes cardúmenes de peces, arrastran también gran cantidad de algas, las cuales pueden ser vendidas, ahorrándose de esta manera el gasto asociado a su eliminación (Navarro y otros, 2004).

TABLA 2. 3**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGAS (gr/100 gr base seca)**

| Alga | Proteínas | Lípidos | Cenizas | Fibra dietética total |
|-------------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------------|
| Grateloupia turuturu | 22.9 ± 2.0 | 2.6 ± 0.1 | 18.5 ± 0.6 | 60.4 ± 2.3 |
| Ulva clathrata | 20.1 ± 0.1 | 2.2 ± 0.1 | 27.5 ± 0.2 | 40.6 |
| Ulva lactuca | 27.2 ± 1.1 | 0.3 ± 0.0 | 11.0 ± 0.1 | 60.5 |
| Durvillaea antarctica (tallo) | 11.6 ± 0.9 | 4.3 ± 0.6 | 25.7 ± 2.5 | - |
| Laminaria saccharina | 25.70 ± 0.11 | 0.79 ± 0.07 | 34.78 ± 0.08 | - |
| Hizikia fusiforme | 10.9 ± 1.0 | 1.4 ± 0.1 | - | -62.3 ± 0.7 |

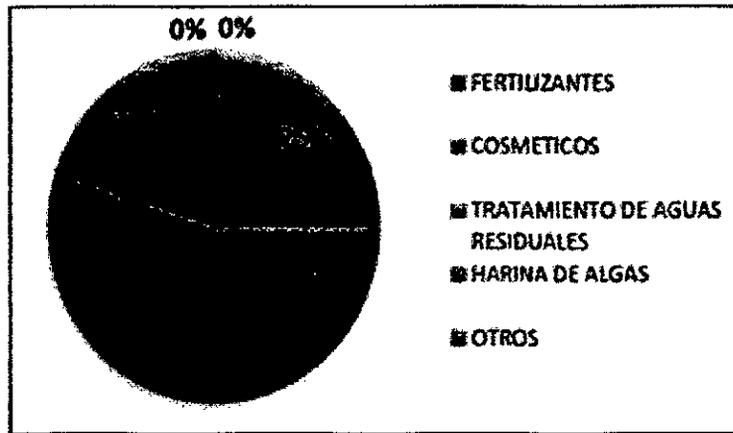
Fuente: Quiral et al., 2012

Muchas empresas realizan sus operaciones de forma empírica, dado que no ejecutan procesos de investigación de mercado que sean sistemáticos y eficientes, lo que repercute en la poca o inexistente preparación, en la extracción y recolección de algas marinas en el Litoral Sur del Perú.

En la zona sur del Perú, se extrae con poca frecuencia *L. trabeculata*, debido a la preferencia de las empresas procesadoras por *L. nigrescens*, por el alto rendimiento en alginatos que estos producen y por el alto costo que demanda la extracción de *L. trabeculata*, pero recientemente su extracción se viene incrementando debido a la mejora en la estructura de precios (Ayala, 2012).

FIGURA 2. 6

USOS DEL ALGA L. NIGRESCENS



Fuente: Ayala 2012

De la figura 2.6 se observa que el mayor uso que se da a las algas *Lessonia nigrescens* (Aracanto negro) es para harina de algas, seguido del uso que se da para tratamiento de aguas, ya que son biosorbentes potenciales para su aplicación en la eliminación de contaminantes de aguas residuales a condiciones reales.

2.3 Definición de términos básicos usados en el planteamiento de la tesis.

- **Alginatos:** sustancia química proveniente de las algas pardas, con la capacidad de gelificar. Son usados como gelificantes, estabilizantes, espesantes, entre otros.

- **Carta psicométrica:** Diagrama que representa el sistema aire – vapor de agua correspondiente a diferentes temperaturas.

- **Contenido de humedad, en base húmeda:** el contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que esta expresado en base húmeda, es decir, como $(\text{Kg humedad/kg solido húmedo}) 100 = (\text{kg humedad/ (kg solido seco + kg humedad)}) 100 = 100X / (1+X)$

- **Contenido de humedad, en base seca:** se expresa como $\text{kg humedad/kg solido seco} = X$, base seca = $100X$

- **Humedad en equilibrio X*:** es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

- **Humedad ligada:** se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

- **Humedad no ligada:** se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
- **Humedad libre:** la humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio: $X_T - X^*$. Solo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.
- **Gas saturado:** es un gas en el que el vapor está en equilibrio con el líquido a la temperatura del gas. La presión parcial del vapor en un gas saturado es igual a presión de vapor del líquido a la temperatura del gas.
- **Punto de rocío** Temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura.
- **Secado por lotes:** Proceso semicontinuo que mientras se lleva a cabo no entra ni sale masa, pero existe un flujo de aire continuo.

- **Temperatura de saturación adiabática T_s** : cuando el gas se lleva a la saturación (el gas llegue a equilibrio con el agua) en una cámara adiabática, a la temperatura de salida del gas se le llama temperatura de saturación adiabática.
- **Temperatura de bulbo húmedo**: Temperatura de equilibrio termodinámico entre la velocidad de transferencia de calor por convección y velocidad de transferencia de materia que abandona la superficie.
- **Temperatura de bulbo seco**: Temperatura del aire que no considera los factores ambientales, que es medida con un termómetro convencional.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Variables de la investigación

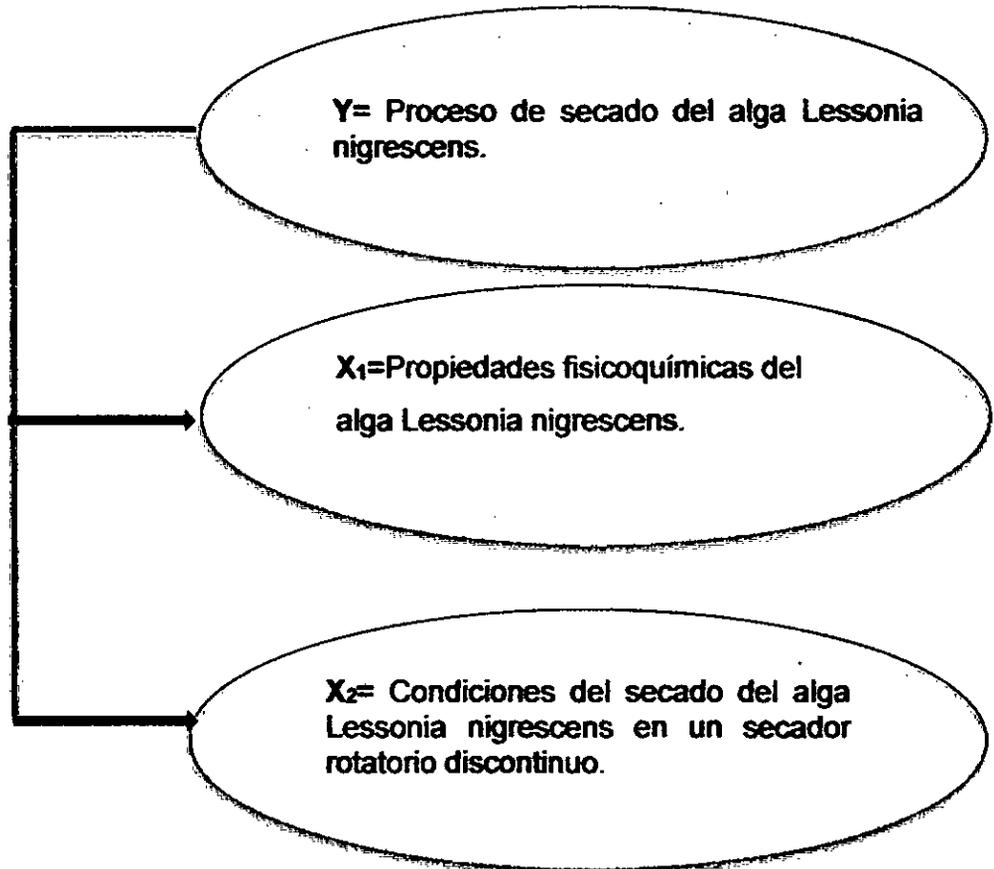
La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal estudiando la variable a lo largo del tiempo establecido, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

Por su naturaleza, todas las variables identificadas son del tipo cualitativas. Por su dependencia Y es dependiente, y las variables X_1 y X_2 son independientes.

Es decir: $Y=f(X_1, X_2)$. La figura 3.1 muestra la relación entre las variables.

FIGURA 3. 1

RELACIÓN DE LAS VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN



Fuente: Elaboración propia

3.2 Operacionalización de variables

TABLA 3. 1

OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES

| VARIABLE DEP. | DIMENSIONES | INDICADORES | METODO |
|--|---|-------------------------------------|--|
| Y= Proceso de secado del alga <i>Lessonia nigrescens</i> . | -Humedad final del producto secado | - % | • Experimental |
| VARIABLES IND. | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
| X ₁ = Propiedades fisicoquímicas del alga <i>Lessonia nigrescens</i> | - Densidad -Humedad inicial -Temperatura de estabilidad química | -g/cm ³ -% -°C | • Bibliografía • Experimental • Experimental |
| X ₂ = Condiciones del secado del alga <i>Lessonia nigrescens</i> en un secador rotatorio discontinuo | -Flujo de aire caliente. -Tiempo de secado. -Velocidad de rotación. | -m ³ /hr -min -rpm | • Experimental • Experimental • Experimental |

Fuente: Elaboración propia

3.3 Hipótesis

3.3.1 Hipótesis General

El proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens* da buenos resultados en un secador rotatorio discontinuo.

3.3.2 Hipótesis Específicas

- a) Las propiedades físico químicas del alga *Lessonia nigrescens* es apropiada para el proceso de secado.
- b) El secado de las partículas del alga *Lessonia nigrescens* se realiza con un flujo de aire caliente que no supera a la temperatura de 50°C y un tiempo máximo de 2 horas.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de Investigación

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se llevó a cabo una investigación cualitativa-experimental, en la cual se evaluó el comportamiento dinámico del sistema para diferentes valores de las condiciones de operación, lo que permitió establecer las condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso.

Los tipos de investigación que se realizaron en el presente trabajo de tesis son:

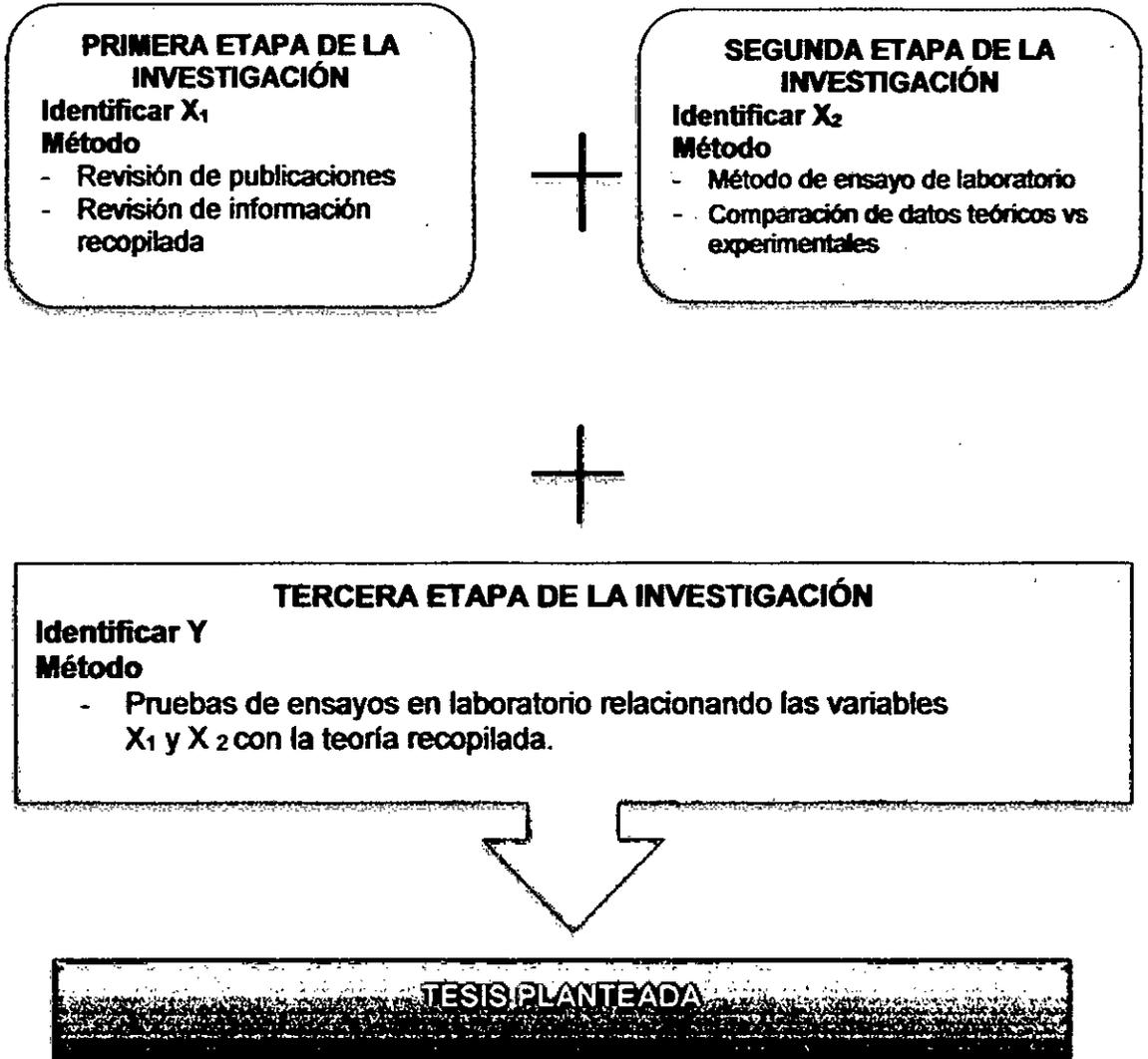
- Por su finalidad la investigación es de tipo aplicada, ya que los resultados obtenidos lo podemos llevar a la práctica.
- Por su diseño interpretativo es experimental, porque requiere de observación, registro y análisis de las variables que intervienen.
- Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados es del tipo cualicuantitativa porque las variables de la investigación son cualitativas y cuantitativas.
- Por el ámbito de desarrollo es de laboratorio, ya que la investigación se realizó a nivel laboratorio.

4.2 Diseño de Investigación

El diseño de la presente investigación ha considerado 3 etapas, los cuales se muestran en la figura 4.1:

FIGURA 4. 1

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN



Fuente: Elaboración propia

4.3 Población y muestra

La población estará conformada por especialistas en el área de transferencia de masa, transferencia de calor, microbiológico e ingenieros químicos de la Universidad Nacional del Callao. Asimismo la recolección de las muestras será obtenida de la zona costera del distrito de Chala, provincia de Caraveli y departamento de Arequipa, donde las algas se encuentran varadas en las playas.

- a) **Muestras en la primera etapa de investigación:** en esta primera etapa se realizara con el propósito de conocer las características físicas y químicas del alga *Lessonia nigrescens*.

- b) **Muestras en la segunda etapa de investigación:** en esta etapa se hace la caracterización del proceso de secado calculando el % sólidos secos, %humedad en base seca para luego obtener las gráficas características del alga *Lessonia nigrescens*

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Materiales y reactivos

Equipos

- Estufa , temperatura máxima 250°C, sensibilidad 1°C
- Balanza analítica (METTLER TOLEDO), e=10mg
- Balanza de humedad

- Secador rotatorio discontinuo

Materiales

- Pipetas graduadas
- Tubos de ensayo
- Pipeta 1ml, div 1:100
- Papel de aluminio
- Pinzas de metal
- Papel de filtro
- Cuchillo

Insumos

- Alga *Lessonia nigrescens*.

4.4.2 Método

A. PRE TRATAMIENTO

La materia prima se obtuvo de la zona costera del distrito de Chala, provincia de Caraveli y departamento de Arequipa, donde las algas se encuentran varadas en las playas.

B. LIMPIEZA

Se eliminó cualquier material extraño que pueda afectar el proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens*. Para ello se utilizó agua destilada.

C. SELECCIÓN Y TAMAÑO

Después del pre tratamiento se llevó a cabo el cortado del alga *Lessonia nigrescens*, para tener una medida estándar y así facilitar las mediciones de la humedad. El corte fue de 2cm de diámetro y 0.5 cm. espesor aproximadamente. Luego la masa se registró con una balanza analítica (METTLER TOLEDO) de precisión 0.01 g a intervalos de tiempo definidos y se midió la humedad.

D. EQUIPO DE SECADO Y PROCESO

En esta sección se detallará algunos de los materiales a utilizarse en la construcción del secador rotatorio:

- La coraza cilíndrica fija será hecha de plancha de 3 mm de acero, la cual deberá ser rolada para adquirir la forma requerida. La malla será de acero inoxidable mesh 16 rolada. El secador cuenta con sus respectivas tolvas de entrada y salida del producto. Todas las tolvas serán hechas de acero de plancha de 1.5mm.

8.1.2.4 Determinación y ejecución de operaciones en planta.

La determinación de que operación ejecutar la tomamos mi jefe y yo, luego de analizar cada etapa y definir cuál es el objetivo buscado. La ejecución se da con mi equipo del área de operaciones, para lo cual se les da las pautas y toda la logística necesaria. Operaciones como transferencia de salmuera o lodos, cosechas de carnalita con personal, adición de componentes, evaluación de producción, nivelación de pozas de NaCl con maquinaria pesada, apertura o anulación de pases entre pozas, preparación y despachos de cargas de carnalita, refacción de pozas, habilitación de calicatas en torno a la planta, seguimiento a poza específica por todo el día y área, operación de brine mixing en las pozas, evaluación de esponjamiento de la sal, etc. Con respecto a la estación de bombeo, se gestiona su operación, mantenimiento correctivo, preventivo y todo lo necesario para que brinde el servicio de abastecimiento de la materia prima para el proceso.

8.1.3 Gestión de Operaciones en el área de la concesión.

En cuanto al área total del proyecto tenemos la responsabilidad de mantener en buen estado los 16 pozos perforados tanto de producción como de observación. A su vez mantenemos un monitoreo mensual de sus parámetros de densidad, temperatura y nivel estático.

8.2 APORTES REALIZADOS EN BENEFICIO DE LA EMPRESA

El principal aporte es el haber logrado en equipo, "producir carnalita", teniendo en cuenta que algunos asesores de los inversionistas pusieron en tela de juicio la posibilidad de lograrlo.

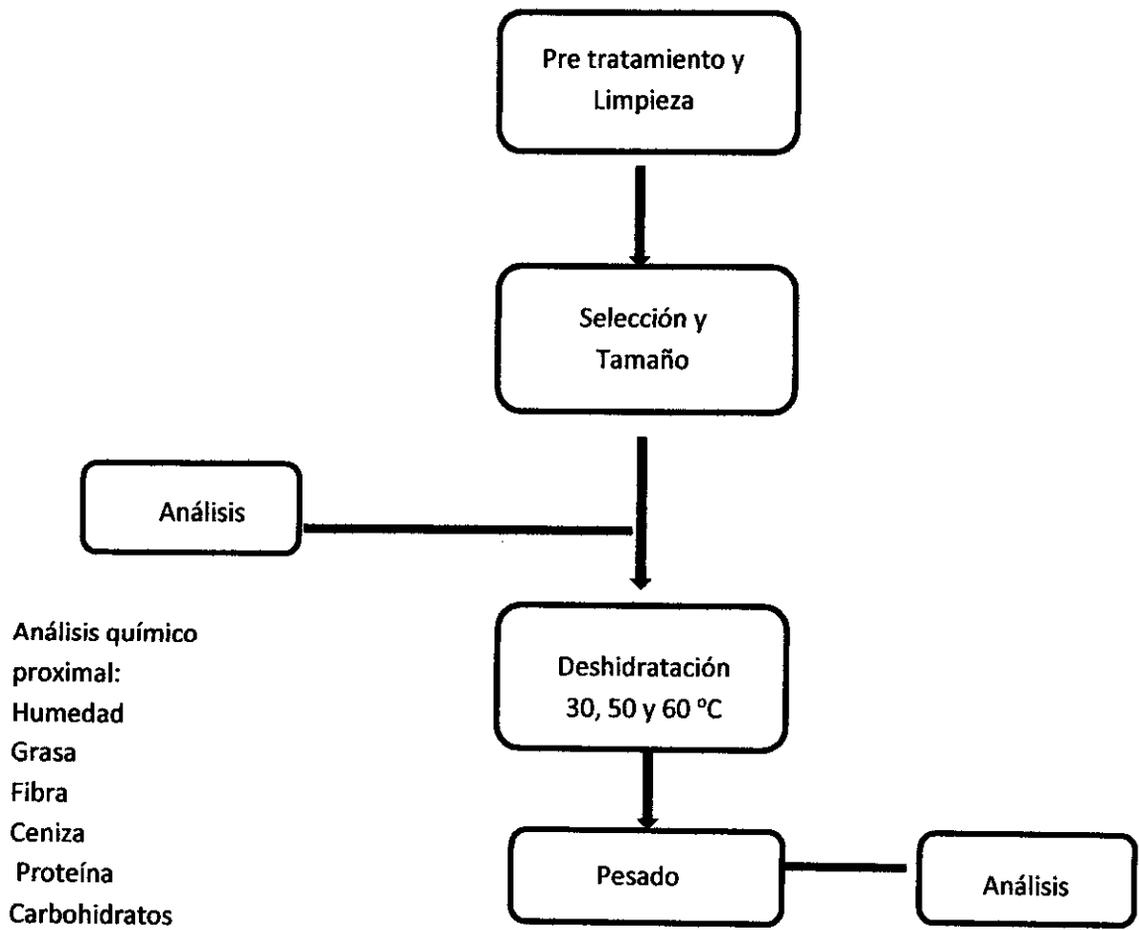
Entregar el diseño de planta, con el cual se obtiene carnalita, teniendo bajo control determinados parámetros. Cabe mencionar que se deben seguir con pruebas como el aislamiento de toda el área de las pozas, ya que en la actualidad el volumen de salmuera que retorna al acuífero por filtraciones subterráneas es significativa.

Diseñar y administrar información del proceso a través de gráficos de control.

Capacitar a todo un equipo de trabajadores de la comunidad para poder cubrir posiciones durante la etapa de explotación.

Desarrollar pruebas de lixiviación de carnalita y silvinita con la cual se optimizara el modelo matemático para determinar la producción de KCl y % de recuperación de K.

FIGURA 4. 2
DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL PROCESO DE
SECADO DEL ALGA LESSONIA NIGRESCENS
(ARACANTO NEGRO) EN UN SECADOR ROTATORIO
DISCONTINUO.



Fuente: Elaboración propia

V. RESULTADOS

Con el objetivo de comparar y validar el secador rotatorio discontinuo respecto de la metodología tradicional, se procedió a realizar pruebas de secado del alga *Lessonia nigrescens* de 2.0 cm. de diámetro y 0.5 cm. de espesor, considerando tres temperaturas de trabajo (30, 50 y 60 °C) y un flujo de aire de 7.9693 m³/s (Ver Anexo N° 10) hasta alcanzar una humedad aproximada del 18% b.h. (0.219 g agua/g m.s.). La humedad inicial de la muestra en fresco se determinó por diferencia de peso hasta peso constante. El valor promedio fue de 68.476 % b.h. (2.174 g agua/g m.s.) (Ver Anexo N° 8).

Los experimentos de secado se llevaron a cabo por triplicado utilizando un secador rotatorio discontinuo que se encuentra implementado en la Universidad Nacional del Callao, donde se pudo observar y registrar la información experimental en forma remota a través de un PC en tiempo real.

5.1 Especificaciones del Secador Rotatorio

En la Universidad Nacional del Callao se tiene implementado un secador rotatorio discontinuo con las siguientes especificaciones:

Longitud, L=45.5 cm

Diámetro, D=33.5 cm

Peso =1 Kg.

Potencia motor o drum: 0.75 HP

Potencia motor del ventilador 1 (inyector de aire): 1800W

Temperatura del solido alimentado: 5 °C

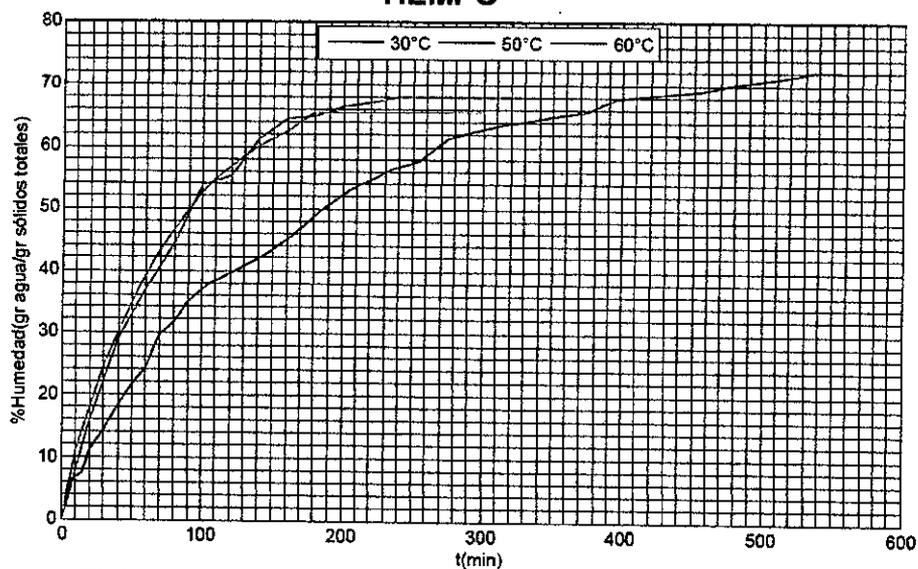
5.2 Curvas de secado

Los resultados que se muestran a continuación, revelan el comportamiento experimental de la pérdida de masa del alga *Lessonia Nigrescens* (Aracanto negro) en función de variables controladas, durante todo el proceso.

Las curvas de secado muestran el comportamiento de extracción de agua líquida por medio del aire caliente a través del mecanismo de secado.

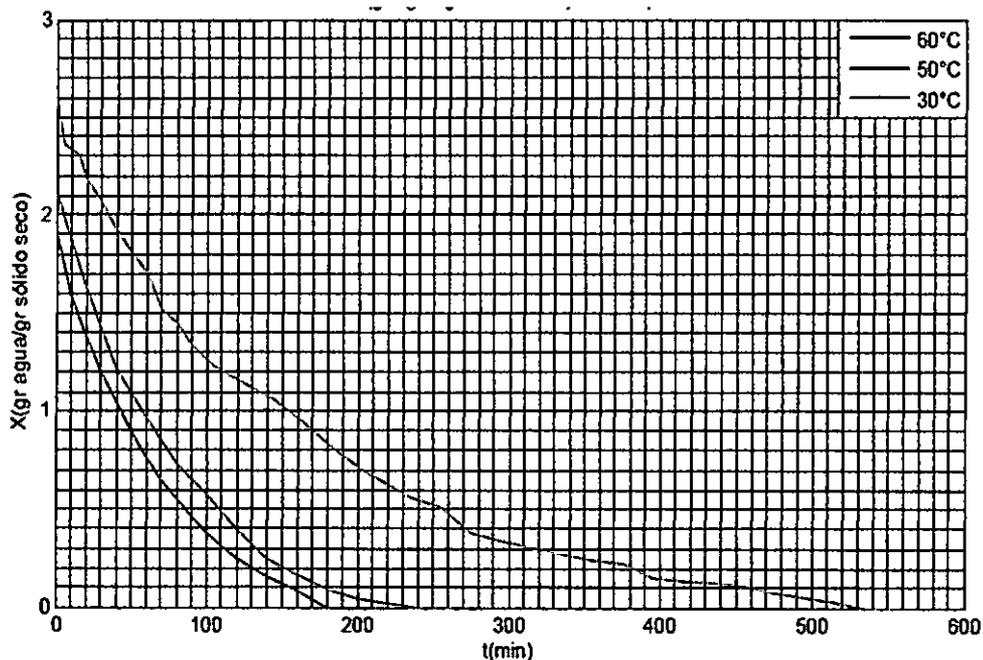
FIGURA 5. 1

CURVA DE SECADO DE %PERDIDA DE H₂O EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 5. 2
CURVA DE SECADO DE LA HUMEDAD EN BASE SECA DEL ALGA
EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Fuente: Elaboración propia

TABLA 5. 1
PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARA LA VALIDACIÓN DE LOS DATOS
PARA CADA TEMPERATURA DE SECADO

| T (°C) | R ² | Y=C*exp(- K*t) | |
|--------|----------------|----------------|-------|
| | | C | K |
| 30 | 0.980 | 2.7349 | 0.007 |
| 50 | 0.973 | 2.8895 | 0.002 |
| 60 | 0.984 | 2.1279 | 0.018 |

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar claramente la diferencia entre las curvas, básicamente atribuible a los menores tiempos de secado que se obtienen al aumentar la temperatura, específicamente para 30, 50 y 60 °C, se lograron tiempos de secado de 360, 130 y 126 min., respectivamente. Así mismo se comprueba que para todas las temperaturas ensayadas, las curvas de secado presentan una tendencia exponencial decreciente.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

HIPÓTESIS GENERAL:

El proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens* da buenos resultados en un secador rotatorio discontinuo ya que disminuye el tiempo de secado a 126 minutos a una temperatura de 60°C, con un flujo de aire de 7.9693 m³/s y una velocidad de rotación de 13.20 rpm.

Por lo que la hipótesis general del presente estudio es aceptada.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS:

- a) Las propiedades físico químicas del alga *Lessonia nigrescens* es apropiada en el proceso de secado hasta una temperatura máxima de 60°C ya que se logró el objetivo de reducir la humedad presente del alga *Lessonia nigrescens*.

Por lo que la hipótesis específica N°1 del presente estudio queda aceptada.

- b) El secado de las partículas del alga *Lessonia nigrescens* se realiza con un flujo de aire caliente de 7.9693 m³/s, con una temperatura adecuada de 60°C y un tiempo de 126 minutos.

6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares

Vega y Martínez (2015), describieron e implementaron un sistema rotatorio de flujo constante para secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo. Se realizó un algoritmo de control predictivo basado en modelo con el cual se regula el flujo másico de gas, la energía calorífica necesaria para realizar el secado de cacao dentro del cilindro rotatorio cámara de secado. Los ensayos se realizaron en un sistema prototipo para secado de cacao que mide 2 m de longitud y un diámetro de 0.5 m en el cual ingresan 310 Kgr. Obteniendo una reducción de humedad de 60% a 12% durante un tiempo de 10 horas, mientras que en este estudio se realizó el estudio del proceso de secado de las partículas del alga *Lessonia nigrescens* realizándose con un flujo de aire caliente de 7.9693 m³/s, a una temperatura adecuada de 60°C y un tiempo de 126 minutos.

Asimismo, se encontraron estudios similares con otros tipos de materias primas y otro tipo de Sistema de secado que se detallan en la tabla 6.1.

TABLA 6. 1
CONDICIONES DE OPERACIÓN Y RESULTADOS
OBTENIDOS DE ESTUDIOS SIMILARES.

| Referencia | Materia | Sistema de secado | Longitud (m) | Diámetro (m) | Humedad Final (%) | Tiempo (min) | Flujo másico de aire(kg/s) | Temperatura (°C) |
|--------------------------------|--|--|--------------|--------------|-------------------|--------------|----------------------------|------------------|
| Vega y Martínez (2015) | cacao | Secador Rotatorio de flujo constante | 2 | 0.5 | 12 | 600 | 0.5 | 50 |
| Castaña, Rubio y Ortega (2009) | arena | Secador rotatorio continuo en isocorriente | 4 | 0.8 | 5 | - | 1.5 | 60 |
| Torres y Sper (2009) | Pulpa de plátano | Secador rotatorio de malla | 6.7 | 1.338 | 8 | 45 | 3.61 | 60 |
| Rueda y Rueda (2009) | Pollinaza | Secador rotatorio continuo | 2.4 | 0.64 | 15 | - | 1.37 | 120 |
| Vega, Tello y Lemus (2007) | Alga Gracilaria (Gracilaria Chilensis) | Secador convectivo de bandejas | - | - | 18 | 316 | - | 60 |
| Giraldo, Arevalo y otros. | Pulpa de Cupuacu | Secador convectivo de bandejas | - | - | 20 | 486 | - | 60 |

Fuente: Elaboración propia

VII. CONCLUSIONES

- Se desarrolló el proceso de secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo, permitiendo realizar experiencias de secado a distintas temperaturas de manera automática, prescindiendo de manipulación humana tanto de la muestra de alimento y como de las variables de proceso. Esto facilito el manejo y registro de los datos resultando en un proceso más flexible y con menos error asociado.
- Se determinó las propiedades fisicoquímicas del alga *Lessonia nigrescens* para el secado optimo resultando de Humedad de 71,17%, Proteína (2.38%), Grasa (0.15%) y Carbohidratos (19.08%).
- Se determinó las condiciones de secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo que deberá ser en un tiempo de secado a 126 minutos, a una temperatura de 60°C, con un flujo de aire de 7.9693 m³/s y una velocidad de rotación de 13.20 rpm.

VIII. RECOMENDACIONES

- Secar por más tiempo el alga *Lessonia Nigrescens* al aire libre para que cuando ingrese al secador lo haga con una menor humedad y así reducir el consumo de energía a secar.
- Para trabajos futuros se recomienda estudiar el efecto de las diferentes configuraciones de flujo de aires con el objetivo de aumentar la eficiencia de secado.
- Se recomienda hacer un estudio termo- económico para evaluar las posibilidades de ahorro de energía.
- Se recomienda también realizar un estudio para implementar un control automático para el Sistema Secador Rotatorio Discontinuo.
- Se recomienda estudiar para los modelos matemáticos las constantes de la ecuación de la cinética de secado.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AYALA, C. **Proyecto de plan de Investigación de mercados para la extracción y recolección natural de algas marinas en el litoral Sur del Perú.** Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/140585195/TRABAJO-FINAL-de-Plan-de-Investigacion-de-Mercado-Extraccion-y-Recoleccion-de-Algas-Marinas>. Consultada el 13 de abril del 2016.
2. HERNÁNDEZ, V. **Estudio de la reducción del contenido de sodio y deshidratación del Alga Luche (*Porphyra sp*).** Tesis de pregrado. Chile. Universidad Austral de Chile. 2013.
3. INSTITUTO DEL MAR PERUANO. **Evaluación de las praderas de algas marinas *Lessonia nigrescens* y *L. trabeculata* (laminariales, phaeophyta), en la zona costera de Quilca a Matarani, región Arequipa.** Disponible en: http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_inf_algas_20-07_08_correg.pdf. Consultada el 30 de marzo del 2016.
4. MÉNDEZ, L. **Macrofauna y algas marinas.** *Guía de biodiversidad*. Vol. 1 (4): 22 a 23. Abril 2002.
5. MCCABE, W., y Otros. **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.** España. Editorial McGraw-Hill. Séptima edición. 2007.

6. MIRANDA, R., VIZCARRA, N., y ANAYA, I. **Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz Nixtamalizada.** *Revista Mexicana de Ingeniería Química.* Vol. 13 (1): 165 a 178. Noviembre 2013.
7. NAVARRO, A., CHANG, L., LLANOS, B., y CUIZANO, N. **Equilibrio ácido-base de algas marinas del litoral peruano elucidada su alta afinidad por contaminantes ambientales.** *Revista de la Sociedad Química del Perú.* Vol. 73 (2): 85 a 93. 2007.
8. PERRY, R., GREEN, D., y MALONEY, J. **Manual del Ingeniero Químico.** México. Editorial McGraw-Hill. Sexta edición. 2009.
9. QUITRAL, V., MORALES, C., y SCHWARTZ, M. **Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional.** *Revista Chilena de Nutrición.* Vol. 39 (4). Diciembre 2012.
10. RUEDA, Y., y RUEDA, D. **Diseño y construcción de un secador rotatorio directo cilíndrico para pollinaza.** Tesis de pregrado. Colombia. Universidad Industrial de Santander. 2009.
11. SPER, J., y TORRES, I. **Diseño de una planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio.** Tesis de pregrado. Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009.
12. TREYBAL, R. **Operaciones de transferencia de masa.** México. Editorial McGraw-Hill. Segunda edición. 1980.

13. VEGA, R., y MARTÍNEZ, W. **Diseño e Implementación de un sistema rotatorio de flujo constante para el secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en modelo.** Tesis de pregrado. Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. 2015.
14. VEGA, A., TELLO, C., y LEMUS, R. **Simulación matemática el proceso de secado de la Gracilaria Chilena (Gracilaria Chilensis).** *Revista Chilena de Ingeniería.* Vol. 15 (1): 55 a 64. Agosto 2006.

ANEXOS

ANEXO N° 01

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: PROCESO DE SECADO DEL ALGA LESSONIA NIGRESCENS (ARACANTO NEGRO) EN UN SECADOR ROTATORIO

DISCONTINUO.

| PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS GENERAL | VARIABLE DEP. | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
|--|--|--|---|---|------------------------------------|--|
| ¿Cómo desarrollar el proceso de secado del alga Lessonia nigrescens en un secador rotatorio discontinuo? | Desarrollar el proceso de secado del alga Lessonia nigrescens en un secador rotatorio discontinuo. | El proceso de secado del alga Lessonia nigrescens da buenos resultados en un secador rotatorio discontinuo. | Y= Proceso de secado del alga Lessonia nigrescens. | - Humedad final del producto secado. | - % | • Experimental |
| PROB. ESPECÍFICOS | OBJ. ESPECIFICOS | HIP. ESPECIFICAS | VARIABLES IND. | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
| a) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del alga Lessonia nigrescens? | a) Obtener las propiedades fisicoquímicas del alga Lessonia nigrescens. | a) Las propiedades físico químicas del alga Lessonia nigrescens es apropiada para el proceso de secado. | X ₁ = Propiedades fisicoquímicas del alga Lessonia nigrescens. | - Densidad -Humedad inicial -Temperatura de estabilidad química | -g/cm ³ -% -°C | • Bibliografía • Experimental • Experimental |
| b) ¿Cuáles son las condiciones de secado del alga Lessonia nigrescens en un secador discontinuo? | b)Obtener las condiciones más apropiadas para el secado del alga Lessonia nigrescens | b) El secado de las partículas del alga Lessonia nigrescens se realiza con un flujo de aire caliente que no supera a la temperatura de 50°C y un tiempo máximo de 2 horas. | X ₂ = Condiciones del secado del alga Lessonia nigrescens en un secador rotatorio discontinuo. | - Flujo de aire caliente - Tiempo de secado - Velocidad de rotación | -m ³ /h -min -rpm | • Experimental • Experimental • Experimental |

RELACIÓN DE VARIABLES: $Y = f(X_1, X_2)$

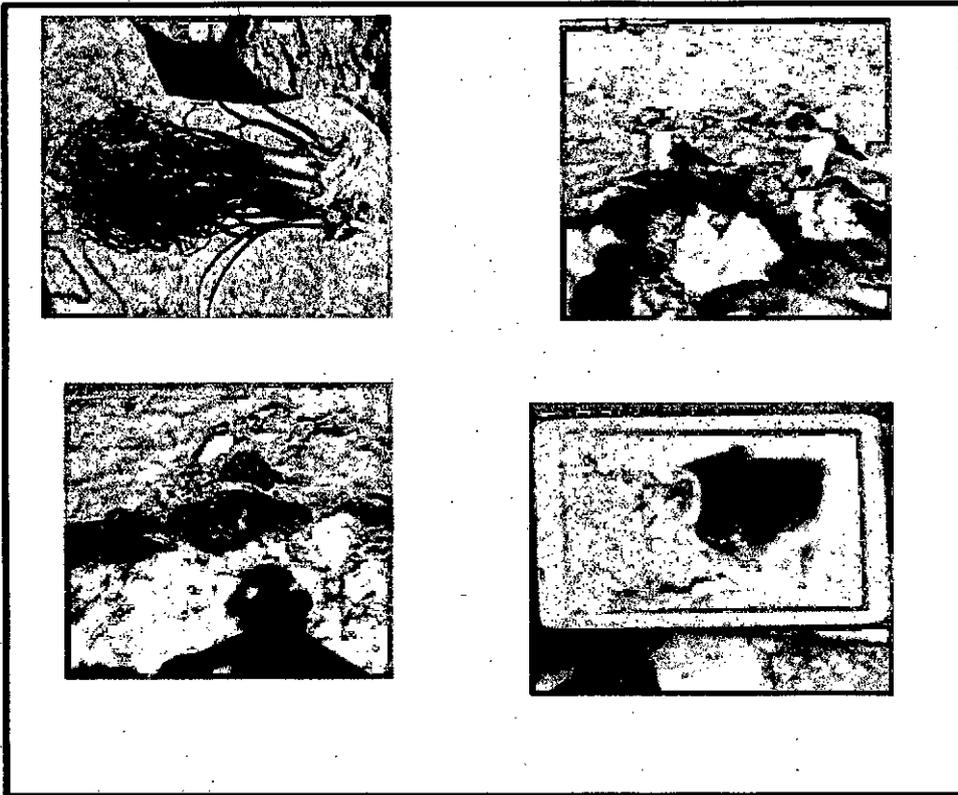
Y = Proceso de secado del alga Lessonia nigrescens.

X₁ = Propiedades fisicoquímicas del alga Lessonia nigrescens.

X₂ = Condiciones del secado del alga Lessonia nigrescens en un secador rotatorio discontinuo.

ANEXO N° 02

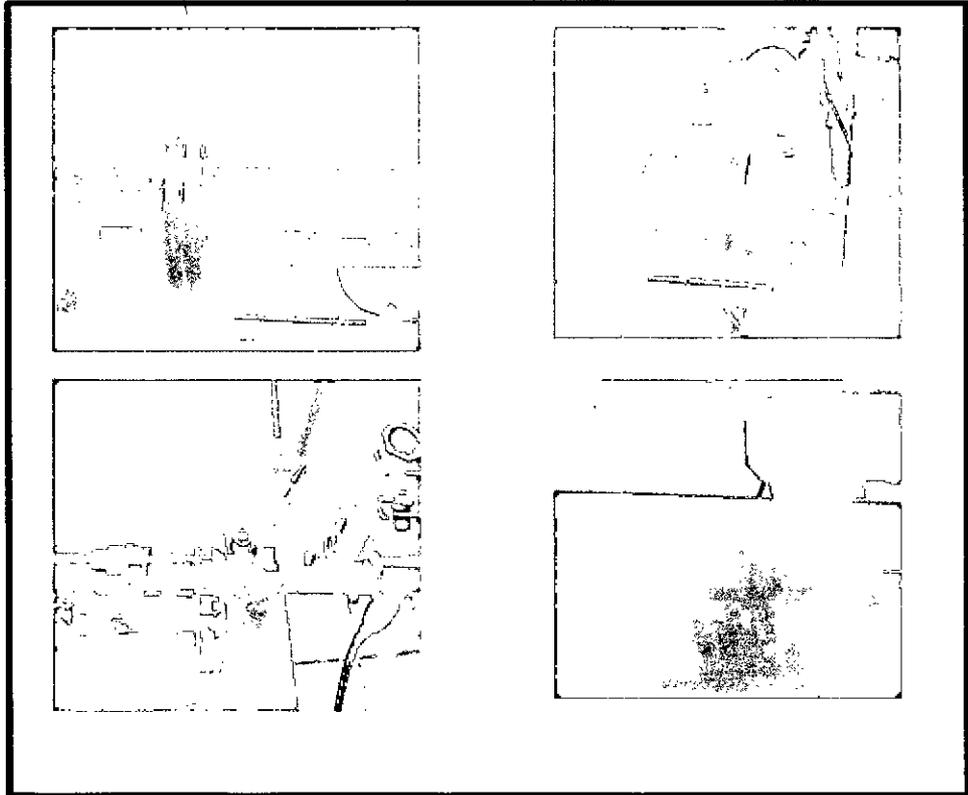
ETAPA DE RECOLECCIÓN DEL ALGA LESSONIA NIGRESCENS



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 03

FOTOGRAFÍAS DEL SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 04

COMPOSICIÓN QUÍMICA APROXIMAL Y DE ENERGÍA DE LAS ALGAS LESSONIA NIGRESCENS

| Resultados | | |
|--|---------------|-----------|
| Ensayos | Unidad | n1 |
| Proteína (N x 6,25) | g/100 g | 2,38 |
| Grasa | g/100 g | 0,15 |
| Humedad | g/100 g | 71,17 |
| Ceniza | g/100 g | 7,22 |
| Carbohidratos | g/100 g | 19,08 |
| Calorías | Kcal/100g | 87,19 |
| Calorías provenientes de proteínas | Kcal/100g | 9,52 |
| Calorías provenientes de grasa | Kcal/100g | 1,35 |
| Calorías provenientes de carbohidratos | Kcal/100g | 76,32 |

Fuente: Elaboración propia.

MÉTODOS

Proteína: AOAC 978.04, c3, 20 th Ed. 2016. Nitrogen (total) (crude protein) in plants. Kjeldahl methods.

Grasa: AOAC 930.09, c3, 20 th Ed. 2016. Ether Extract of plants. Gravimetric method.

Humedad: AOAC 930.04, c3, 20 th Ed.2016. Loss on Drying (Moisture) in plants.

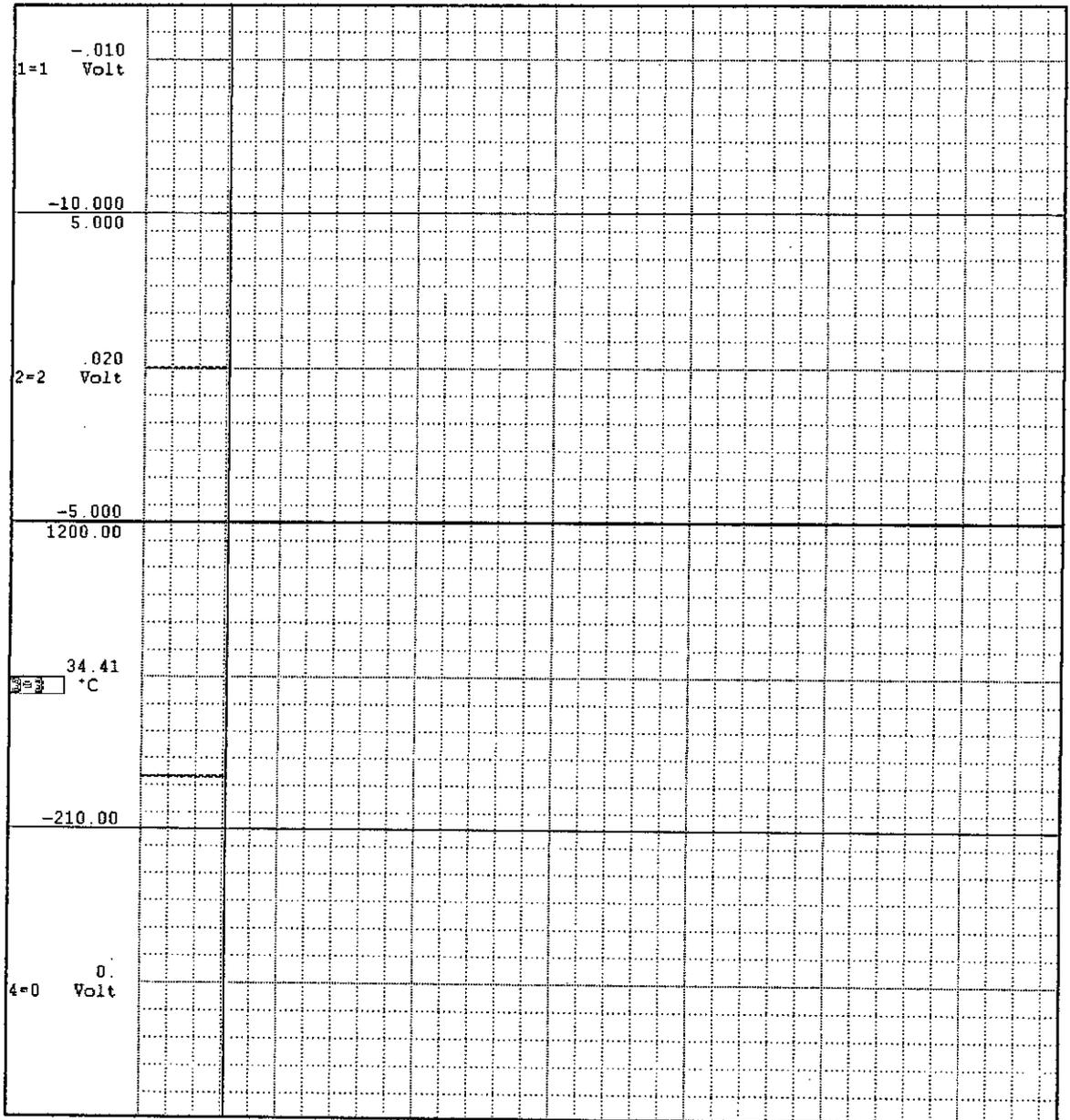
Ceniza: AOAC 930.05, c3, 20 th Ed 2016. Ash of plants.

Carbohidratos, Caloría, Caloría proveniente de las proteínas, grasas y carbohidratos: Por cálculo.

ANEXO N° 05

PERFIL DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Tprom=30 °C

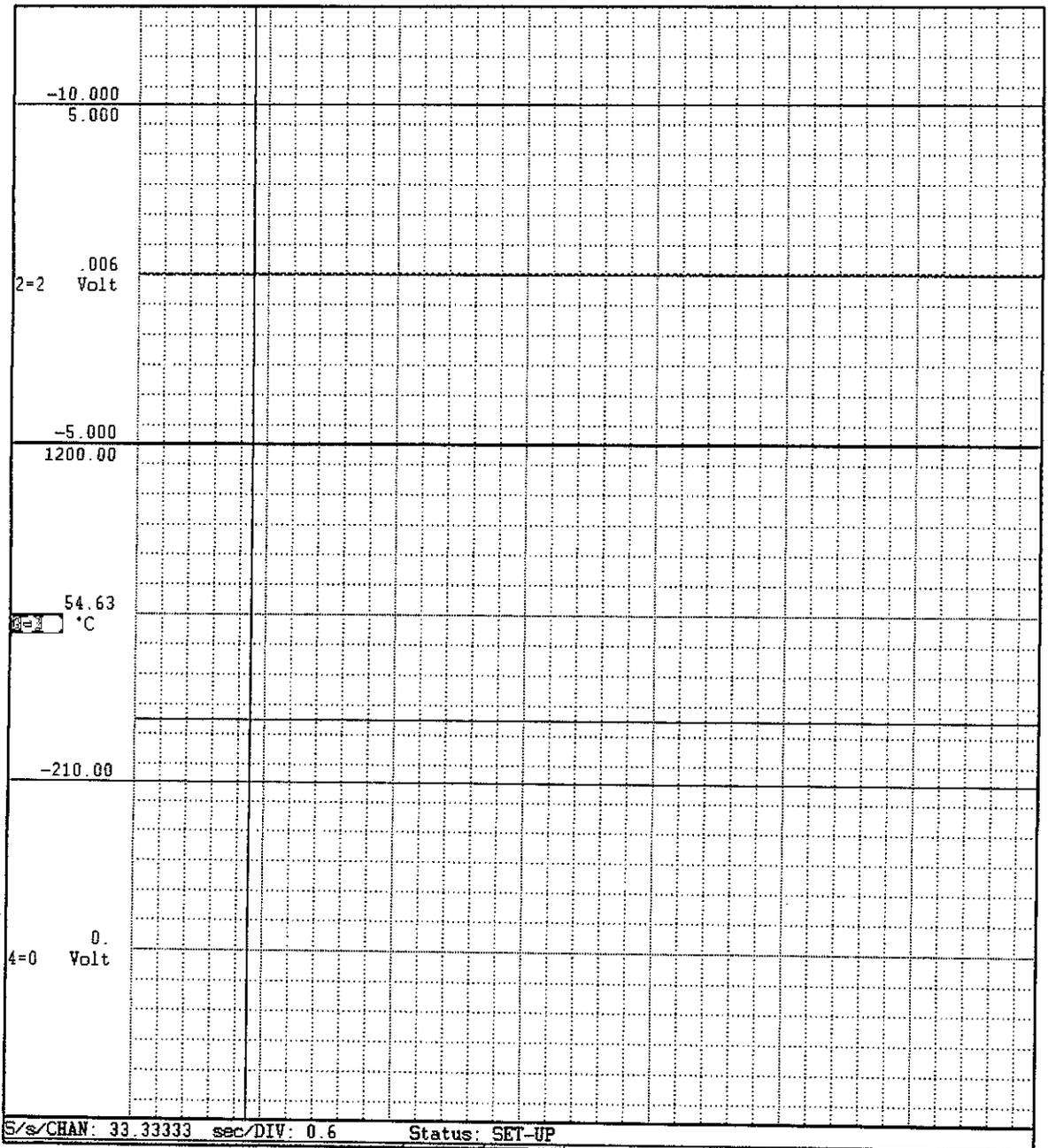


Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 06

PERFIL DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

T_{prom}=50 °C

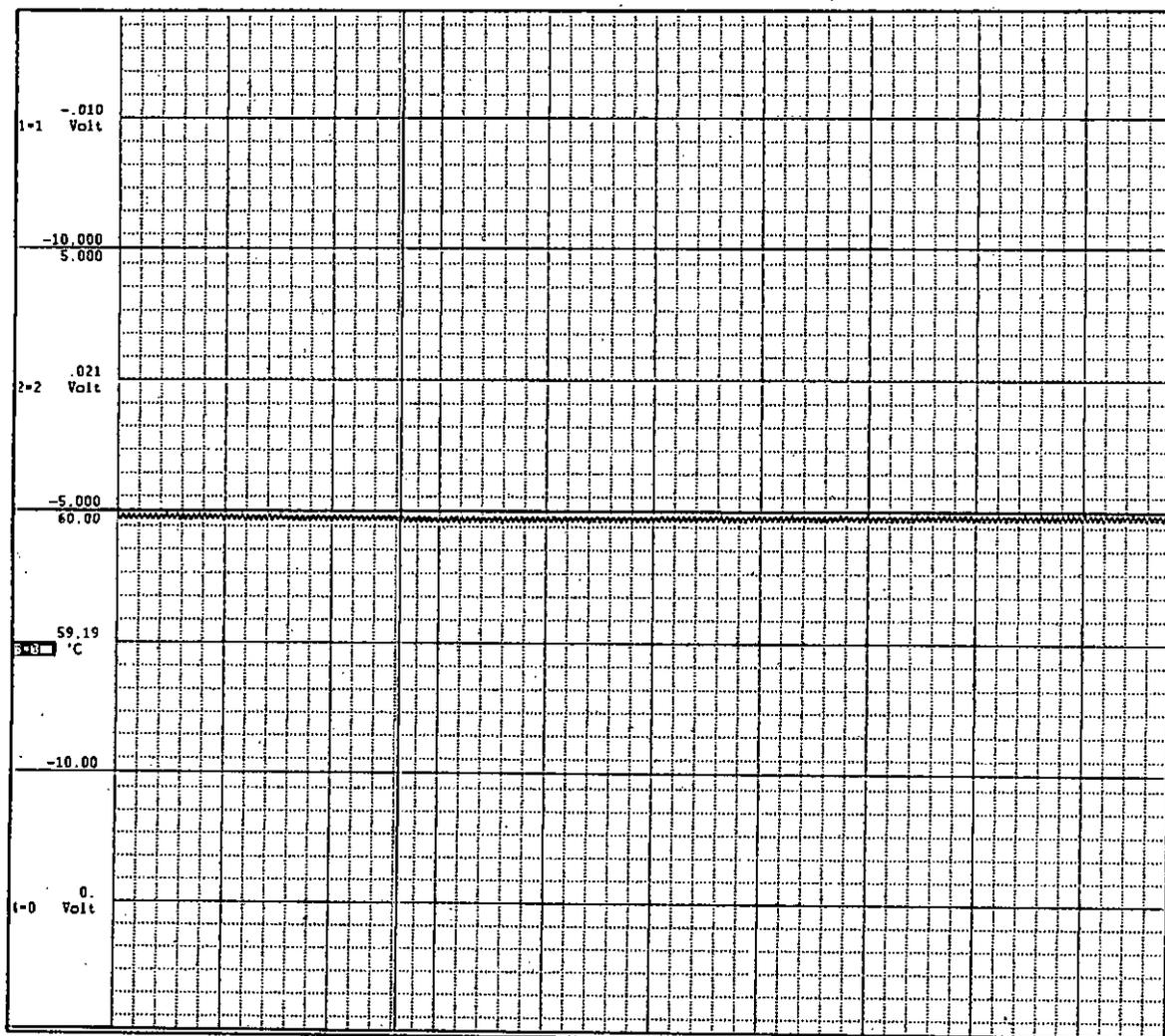


Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 07

PERFIL DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

$T_{prom}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 08

TABLAS DE DATOS DE TIEMPO, MASA, HUMEDAD EN BASE SECA Y HUMEDAD EN BASE HÚMEDA.

| T=30°C | | | |
|---------|--------|---------------------------|--------------------------------------|
| t (min) | W (gr) | X(gr agua/gr solido seco) | %humedad(gr agua/gr solidos totales) |
| 0 | 3.379 | 2.576 | 0.000 |
| 5 | 3.179 | 2.364 | 5.919 |
| 15 | 3.123 | 2.305 | 7.576 |
| 20 | 3.005 | 2.180 | 11.068 |
| 30 | 2.895 | 2.063 | 14.324 |
| 40 | 2.760 | 1.921 | 18.319 |
| 50 | 2.648 | 1.802 | 21.634 |
| 60 | 2.560 | 1.709 | 24.238 |
| 70 | 2.380 | 1.519 | 29.565 |
| 80 | 2.312 | 1.447 | 31.577 |
| 90 | 2.201 | 1.329 | 34.862 |
| 105 | 2.105 | 1.228 | 37.701 |
| 125 | 2.023 | 1.140 | 40.144 |
| 145 | 1.943 | 1.056 | 42.491 |
| 165 | 1.830 | 0.937 | 45.842 |
| 185 | 1.704 | 0.803 | 49.571 |
| 205 | 1.593 | 0.686 | 52.856 |
| 235 | 1.475 | 0.561 | 56.348 |
| 255 | 1.429 | 0.512 | 57.709 |
| 275 | 1.307 | 0.383 | 61.320 |
| 295 | 1.264 | 0.338 | 62.592 |
| 315 | 1.231 | 0.303 | 63.569 |
| 335 | 1.207 | 0.277 | 64.279 |
| 355 | 1.176 | 0.244 | 65.197 |
| 375 | 1.159 | 0.226 | 65.700 |
| 385 | 1.123 | 0.188 | 66.765 |
| 395 | 1.089 | 0.152 | 67.772 |
| 415 | 1.073 | 0.135 | 68.245 |
| 435 | 1.064 | 0.126 | 68.511 |
| 455 | 1.047 | 0.108 | 69.015 |
| 475 | 1.019 | 0.078 | 69.843 |
| 515 | 0.974 | 0.031 | 71.175 |
| 535 | 0.945 | 0.000 | 72.033 |
| 555 | 0.945 | 0.000 | 72.033 |

Fuente: Elaboración propia

| T=50°C | | | |
|----------------|---------------|----------------------------------|---|
| t (min) | W (gr) | X(gr agua/gr solido seco) | %humedad(gr agua/gr solidos totales) |
| 0 | 2.327 | 2.111 | 0.000 |
| 20 | 1.962 | 1.623 | 15.685 |
| 40 | 1.656 | 1.214 | 28.835 |
| 60 | 1.47 | 0.965 | 36.829 |
| 80 | 1.291 | 0.726 | 44.521 |
| 100 | 1.078 | 0.441 | 53.674 |
| 120 | 1.041 | 0.392 | 55.264 |
| 140 | 0.905 | 0.210 | 61.109 |
| 160 | 0.829 | 0.108 | 64.375 |
| 180 | 0.819 | 0.095 | 64.804 |
| 200 | 0.78 | 0.043 | 66.480 |
| 220 | 0.766 | 0.024 | 67.082 |
| 240 | 0.748 | 0.000 | 67.856 |
| 260 | 0.748 | 0.000 | 67.856 |
| 280 | 0.748 | 0.000 | 67.856 |

Fuente: Elaboración propia

| T=60°C | | | |
|----------------|---------------|----------------------------------|---|
| t (min) | W (gr) | X(gr agua/gr solido seco) | %humedad(gr agua/gr solidos totales) |
| 0 | 1.441 | 1.902 | 0.000 |
| 10 | 1.281 | 1.580 | 11.080 |
| 20 | 1.182 | 1.380 | 17.990 |
| 30 | 1.092 | 1.199 | 24.210 |
| 40 | 1.012 | 1.037 | 29.790 |
| 50 | 0.940 | 0.893 | 34.780 |
| 60 | 0.876 | 0.763 | 39.230 |
| 70 | 0.819 | 0.649 | 43.170 |
| 80 | 0.769 | 0.548 | 46.660 |
| 90 | 0.724 | 0.459 | 49.740 |
| 100 | 0.685 | 0.380 | 52.440 |
| 110 | 0.651 | 0.312 | 54.790 |
| 120 | 0.622 | 0.252 | 56.840 |
| 140 | 0.574 | 0.157 | 60.140 |
| 160 | 0.539 | 0.086 | 62.570 |
| 180 | 0.497 | 0.000 | 65.540 |
| 200 | 0.497 | 0.000 | 65.540 |
| 220 | 0.497 | 0.000 | 65.540 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 09

RESUMEN NORMA ISO-5167

Esta norma se refiere a la medición de flujo con instrumentos de reducción de área, para tuberías circulares con la sección totalmente llena de fluido.

Según esta norma el flujo másico de cualquier fluido se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_m = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{(1-\beta^4)}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}$$

Dónde:

C: es el coeficiente de descarga que depende del elemento primario (Venturi, tobera o placa orificio) y de las condiciones del flujo, que se determina experimentalmente.

ε : es el coeficiente de expansión, que toma en cuenta la compresibilidad del fluido.

El cálculo del flujo volumétrico se realiza con la expresión:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

ρ : Es la densidad del fluido en las condiciones en que se realiza la medición.

Adicionalmente por lo general se requiere del número de Reynolds, que se obtiene con la expresión:

- Referido al flujo en la tubería:

$$\text{Re}(D) = \frac{V_1 D}{\nu_1} = \frac{4q_m}{\pi \mu_1 D}$$

La siguiente tabla resume para cada uno de los caso de cálculo los términos que deben ser considerados para este cálculo iterativo:

| | |
|---|---|
| Valores conocidos | $\mu, \rho, D, d, \Delta p$ |
| Calcular | q_m y q_v |
| Término invariante | $A_1 = \frac{\epsilon d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}{\mu_1 D \sqrt{1 - \beta^4}}$ |
| Ecuación de iteración | $\frac{\text{Re}(D)}{C} = A_1$ |
| Variable X En algoritmo | $X_1 = \text{Re}(D) = CA_1$ |
| Criterio de precisión n lo determina el usuario | $\left \frac{A_1 - \frac{X_1}{C}}{A_1} \right < 1 \times 10^{-n}$ |
| Valor en primera iteración | $C = C_\infty$ |

Fuente: Jean-Francois Dulhoste – Escuela de Ingeniería Mecánica

ANEXO N° 10
CALCULO DEL FLUJO DE AIRE EN BASE A LA NORMA ISO-5167.

| # iteración | T=30°C | | | |
|-------------|----------|-----------|----------|----------|
| i | qv(m³/s) | qm(Kgr/s) | Re(D) | C |
| 1 | 0.0002 | 2.396 | 0.05950 | 1912.700 |
| 2 | 0.3938 | 0.4584 | 11.6220 | 7.2425 |
| 3 | 2.8522 | 3.3200 | 84.1729 | 1.5282 |
| 4 | 4.3587 | 5.0735 | 128.6312 | 1.2272 |
| 5 | 5.3489 | 6.2262 | 157.8551 | 1.1219 |
| 6 | 6.0009 | 6.9850 | 177.0900 | 1.0715 |
| 7 | 6.4299 | 7.4844 | 189.7557 | 1.0439 |
| 8 | 6.7121 | 7.8129 | 198.0840 | 1.0276 |
| 9 | 6.8973 | 8.0285 | 203.5480 | 1.0177 |
| 10 | 7.0193 | 8.1705 | 207.1501 | 1.0114 |
| 11 | 7.0993 | 8.2636 | 209.5092 | 1.0074 |
| 12 | 7.1518 | 8.3240 | 211.0589 | 1.0049 |
| 13 | 7.1868 | 8.3654 | 212.0921 | 1.0032 |
| 14 | 7.2097 | 8.3922 | 212.7695 | 1.0021 |
| 15 | 7.2248 | 8.4097 | 213.2134 | 1.0013 |
| 16 | 7.2341 | 8.4206 | 213.489 | 1.0009 |
| 17 | 7.2406 | 8.4280 | 213.6788 | 1.0006 |
| 18 | 7.2449 | 8.4331 | 213.8067 | 1.0004 |
| 19 | 7.2477 | 8.4364 | 213.8909 | 1.0003 |
| 20 | 7.2498 | 8.4388 | 213.9522 | 1.0002 |
| 21 | 7.2512 | 8.4404 | 213.9928 | 1.0001 |
| 22 | 7.2519 | 8.4412 | 214.0127 | 1.0000 |

Fuente: Elaboración propia

| # iteración | T=50°C | | | |
|-------------|----------|-----------|----------|----------|
| i | qv(m³/s) | qm(Kgr/s) | Re(D) | C |
| 1 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0056 | 25382.41 |
| 2 | 5.3970 | 5.8936 | 142.5252 | 1.1717 |
| 3 | 6.3236 | 6.9054 | 166.9949 | 1.0965 |
| 4 | 6.9338 | 7.5717 | 183.1080 | 1.0579 |
| 5 | 7.3352 | 8.0101 | 193.7092 | 1.0360 |
| 6 | 7.5993 | 8.2984 | 200.6825 | 1.0228 |
| 7 | 7.7731 | 8.4883 | 205.2733 | 1.0147 |
| 8 | 7.8873 | 8.6130 | 208.2889 | 1.0095 |
| 9 | 7.9622 | 8.6947 | 210.2660 | 1.0062 |
| 10 | 8.0115 | 8.7486 | 211.5688 | 1.0040 |
| 11 | 8.0435 | 8.7835 | 212.4134 | 1.0026 |
| 12 | 8.0644 | 8.8063 | 212.9644 | 1.0017 |
| 13 | 8.0781 | 8.8212 | 213.3261 | 1.0012 |
| 14 | 8.0877 | 8.8318 | 213.5819 | 1.0007 |
| 15 | 8.0933 | 8.8379 | 213.7289 | 1.0005 |
| 16 | 8.0973 | 8.8423 | 213.8341 | 1.0000 |

Fuente: Elaboración propia

| # iteración | T=60°C | | | |
|-------------|----------|-----------|----------|-----------|
| i | qv(m3/s) | qm(Kgr/s) | Re(D) | C |
| 1 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0054 | 26526.367 |
| 2 | 5.7249 | 6.0684 | 143.0836 | 1.1697 |
| 3 | 6.6964 | 7.0982 | 167.3649 | 1.0955 |
| 4 | 7.3359 | 7.7760 | 183.3464 | 1.0574 |
| 5 | 7.7569 | 8.2224 | 193.8719 | 1.0357 |
| 6 | 8.0338 | 8.5158 | 200.7898 | 1.0226 |
| 7 | 8.2153 | 8.7082 | 205.3263 | 1.0146 |
| 8 | 8.3352 | 8.8353 | 208.3232 | 1.0094 |
| 9 | 8.4135 | 8.9183 | 210.2802 | 1.0061 |
| 10 | 8.4648 | 8.9727 | 211.5628 | 1.0040 |
| 11 | 8.4986 | 9.0085 | 212.4070 | 1.0026 |
| 12 | 8.5206 | 9.0319 | 212.9587 | 1.0017 |
| 13 | 8.5350 | 9.0471 | 213.3171 | 1.0012 |
| 14 | 8.5452 | 9.0579 | 213.5717 | 1.0008 |
| 15 | 8.5520 | 9.0651 | 213.7415 | 1.0005 |
| 16 | 8.5562 | 9.0696 | 213.8476 | 1.0003 |
| 17 | 8.5587 | 9.0722 | 213.9089 | 1.0000 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO N° 11

PROPIEDADES DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

TABLA 3. Propiedades del aire a presión atmosférica

Unidades SI

| Temperatura (°C) | Densidad ρ (kg/m ³) | Viscosidad μ (N · s/m ²) | Viscosidad cinemática ν (m ² /s) | Velocidad del sonido c (m/s) |
|---------------------|--|--|--|---|
| -50 | 1.582 | 1.46×10^{-5} | 0.921×10^{-5} | 299 |
| -30 | 1.452 | 1.56 | 1.08×10^{-4} | 312 |
| -20 | 1.394 | 1.61 | 1.16 | 319 |
| -10 | 1.342 | 1.67 | 1.24 | 325 |
| 0 | 1.292 | 1.72 | 1.33 | 331 |
| 10 | 1.247 | 1.76 | 1.42 | 337 |
| 20 | 1.204 | 1.81 | 1.51 | 343 |
| 30 | 1.164 | 1.86 | 1.60 | 349 |
| 40 | 1.127 | 1.91 | 1.69 | 355 |
| 50 | 1.092 | 1.95 | 1.79 | 360 |
| 60 | 1.060 | 2.00 | 1.89 | 366 |
| 70 | 1.030 | 2.05 | 1.99 | 371 |
| 80 | 1.000 | 2.09 | 2.09 | 377 |
| 90 | 0.973 | 2.13 | 2.19 | 382 |
| 100 | 0.946 | 2.17 | 2.30 | 387 |
| 200 | 0.746 | 2.57 | 3.45 | 436 |
| 300 | 0.616 | 2.93×10^{-3} | 4.75×10^{-3} | 480 |

Unidades Inglesas

| Temperatura (°F) | Densidad (slug/ft ³) | Viscosidad (lb · s/ft ²) | Viscosidad cinemática (ft ² /s) | Velocidad del sonido (ft/s) |
|---------------------|-------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| -20 | 0.00280 | 3.34×10^{-7} | 11.9×10^{-7} | 1028 |
| 0 | 0.00268 | 3.38 | 12.6 | 1051 |
| 20 | 0.00257 | 3.50 | 13.6 | 1074 |
| 40 | 0.00247 | 3.62 | 14.6 | 1096 |
| 60 | 0.00237 | 3.74 | 15.8 | 1117 |
| 68 | 0.00233 | 3.81 | 16.0 | 1125 |
| 80 | 0.00228 | 3.85 | 16.9 | 1138 |
| 100 | 0.00220 | 3.96 | 18.0 | 1159 |
| 120 | 0.00213 | 4.07 | 18.9 | 1180 |
| 160 | 0.00199 | 4.23 | 21.3 | 1220 |
| 200 | 0.00187 | 4.50 | 24.1 | 1258 |
| 300 | 0.00162 | 4.98 | 30.7 | 1348 |
| 400 | 0.00144 | 5.26 | 36.7 | 1431 |
| 1000 | 0.000844 | 7.87×10^{-4} | 93.2×10^{-4} | 1839 |

Fuente: Jean-Francois Dulhoste – Escuela de Ingeniería Mecánica