



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DE FRESA
CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS

JHERSSON DULVIER CASTAÑO RODRÍGUEZ
FRANCISCO JAVIER LONDOÑO QUINTERO

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2017

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DE FRESA
CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS

JHERSSON DULVIER CASTAÑO RODRÍGUEZ
FRANCISCO JAVIER LONDOÑO QUINTERO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero en mecatrónica

TUTOR:

IE. DARÍO AMAYA HURTADO Ph.D

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

2017

Bogotá D.C (14-02-2017)

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

DEDICATORIA

Dedicada especialmente a mis padres, por su apoyo, consejos, amor, comprensión, y ayuda en los momentos más difíciles. Sera difícil encontrar la forma de agradecerles, pues sin estimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para educarme y guiarme hasta la realización de una de mis metas más importantes, la culminación de mi carrera profesional. Gracias por ayudarme a cruzar con firmeza el camino de superación haciendo de este triunfo más suyo que mío. Para ustedes esta línea de dedicatoria con amor y respeto infinito.

Francisco Javier Londoño Quintero

Dedico este trabajo a mis padres que con sus amor y esfuerzo me ayudaron a lograr esta importante meta, a mi hermano que fue la inspiración y motivación para dar un esfuerzo adicional en cada momento difícil y a todas aquellas personas que me acompañaron en el desarrollo de mi carrera profesional.

Jhersson Dulvier Castaño Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Militar Nueva Granada y a todos los docentes del programa de ingeniería mecatrónica por su labor como educadores con dedicación y formación integral.

A Darío Amaya Ph.D por ser el apoyo y guía en la ejecución de este proyecto y por todo su tiempo invertido en nuestro proceso de formación profesional integral.

A nuestras familias por ser el soporte de nuestros sueños y por ser parte de nuestra formación profesional y en valores.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Planteamiento del problema	14
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. General:.....	15
1.3.2. Específicos	15
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Energía.....	17
2.2. Energía Fósil	17
2.3. Energías alternativas	17
2.3.1. Energía Solar.....	18
2.3.1.1. Energía Fotovoltaica.....	18
2.3.1.2. Energía Termo-Solar.....	21
2.3.2. Energía Eólica	23
2.3.2.1. Aerogenerador	24
2.3.3. Energía Geotérmica.....	25
2.4. Métodos de conservación de alimentos.	27
2.5. Métodos de deshidratación de alimentos.	27
2.5.1. Secado por aire caliente	28
2.5.2. Secado al sol:.....	28
2.5.3. Secado por osmosis.....	30
2.5.4. Liofilización.....	30
3. MARCO REFERENCIAL.....	32
4. INGENIERÍA DEL PROYECTO	34
4.1. Capacidad energética alternativa Cundinamarca.	34
4.1.1. Energía solar en Cundinamarca.....	34
4.1.2. Energía eólica en Cundinamarca.	35
4.1.3. Energía geotérmica en Cundinamarca.	36
4.2. Elección del método de generación de energía.....	36
4.3. Elección del método de deshidratación	37
4.4. Diseño del proceso de deshidratación	37
4.4.1. Propiedades físicas de la fresa	38

4.4.2.	Diseño proceso de congelación IQF	38
4.4.3.	Diseño proceso de sublimación.....	49
4.5.	Diseño Estructural	53
4.5.1.	Diseño y selección del sistema de transporte de fresa	57
4.5.1.1.	Banda transportadora	57
4.5.1.2.	Piezas que conforman la banda transportadora	58
4.5.2.	Calculo banda transportadora.....	60
4.5.2.1.	Determinación velocidad banda transportadora	62
4.5.2.2.	Determinación capacidad de carga	62
4.5.2.3.	Selección de banda transportadora	63
4.5.2.4.	Características principales banda transportadora	63
4.5.2.5.	Calculo potencia motor banda transportadora.....	64
4.5.2.6.	Calculo del peso de la carga que se ejerce en la banda transportadora.....	65
4.5.2.7.	Calculo del peso de la banda transportadora	65
4.5.2.8.	Selección motor banda transportadora	66
4.5.2.9.	Calculo de relación de transmisión	68
4.5.2.10.	Calculo longitud de la cadena	70
4.5.3.	Calculo velocidad angular motores de las aspas.....	71
4.5.4.	Calculo bomba tanque nitrógeno liquido.....	73
4.5.5.	Diseño estructural liofilizador	73
4.5.5.1.	Estructura	74
4.5.5.2.	Cámara de trabajo.....	75
4.5.5.3.	Cálculo del torque tornillos de potencia	77
4.5.5.4.	Selección de motores	81
4.6.	Diseño de controladores	82
4.6.1.	Túnel IQF	82
4.6.1.1.	Diseño del control para la banda transportadora	82
4.6.1.1.1.	Actuador.....	83
4.6.1.1.2.	Motor	84
4.6.1.1.3.	Perturbación.....	85
4.6.1.1.4.	Sensor.....	85
4.6.1.2.	Modelo matemático banda transportadora	86
4.6.2.	Diseño del control para el motor de las aspas	88

4.6.2.1.	Actuador	89
4.6.2.2.	Motor	90
4.6.2.3.	Perturbación.....	91
4.6.2.4.	Sensor.....	91
4.6.2.5.	Modelo matemático del motor de las aspas.....	91
4.6.3.	Diseño de control para el Liofilizador.....	94
4.6.3.1.	Driver.....	95
4.6.4.	Diseño de la fuente de alimentación	96
5.	Análisis de Resultados.....	98
5.1.	Sistema de congelamiento.....	98
5.1.1.	Simulación Zona de aspersion.....	98
5.1.2.	Simulación zona Gas.....	100
5.2.	Simulación procesos de sublimación	102
5.3.	Simulación sistemas mecánicos	102
5.3.1.	Simulación banda transportadora.....	102
5.3.2.	Simulación Motor de las aspas.....	106
5.4.	Simulación del sistema de potencia.....	110
6.	Conclusiones y perspectivas futuras	113
7.	Bibliografía	114

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1 Esquema simplificado del efecto fotoeléctrico	18
Figura 2.2 Ilustración de una célula fotovoltaica y su respectivo panel.....	19
Figura 2.3 Curvas de funcionamiento de un panel fotovoltaico a 50°C de operación para varios niveles de radiación.....	20
Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de un sistema fotovoltaico	21
Figura 2.5 Planta PS10 ubicada en Sanlúcar, Sevilla.....	22
Figura 2.6 Planta solar Valle 1 ubicada en Cádiz, España. [27]	23
Figura 2.7 Central Termo-Solar de Discos Parabólicos con motor Stirling [28].	23
Figura 2.8. Parque eólico de Thorntonbank, Bélgica	24
Figura 2.9 Aerogenerador vertical, Antártida.	25
Figura 2.10 , Descripción general de la geología terrestre.....	26
Figura 2.11 Esquema general de una planta de generación geotérmica.....	27
Figura 2.12 Esquema general de un sistema de secado por aire caliente.	28
Figura 2.13. a) sistema de secado directo, b) sistema de secado indirecto.....	29
Figura 4.1 Esquema de funcionamiento de un túnel de congelación IQF.....	39
Figura 4.2 Ventilador de All Points 26-3116	43
Figura 4.3 Diseño tunel IQF.....	49
Figura 4.4 Esquema general de la camara de sublimación.....	49
Figura 4.5 Esquema del proceso de liofilizacion	51
Figura 4.6 Vista frontal túnel de enfriamiento IQF.....	54
Figura 4.7 Vista lateral túnel de enfriamiento IQF	54
Figura 4.8 Estructura principal del túnel.....	55
Figura 4.9 Túnel de congelación IQF.....	56
Figura 4.10 Puertas cámara de congelación	57
Figura 4.11 Bastidor túnel IQF	58
Figura 4.12 Tambor túnel IQF	59
Figura 4.13 CAD Rodamientos.....	59
Figura 4.14 Tambor motriz túnel IQF.....	60
Figura 4.15 Organización por kilogramo de fresa en túnel IQF.....	61
Figura 4.16 Tipo de banda transportadora seleccionada	63
Figura 4.17 Pesos específicos banda transportadora	64
Figura 4.18. Motor de corriente continua monofásico seleccionado.....	67
Figura 4.19 Especificaciones técnicas motor monofásico.....	67
Figura 4.20 Diámetro tambor motriz.....	68
Figura 4.21 Especificaciones piñones seleccionados para cadena No.40	70
Figura 4.22 Transmisión banda transportadora.....	70
Figura 4.23 Motorreductor con Encoder	72
Figura 4.24 Especificaciones técnicas motorreductor	72
Figura 4.25 Ubicación aspas en túnel IQF	73
Figura 4.26 Camara de sublimacion vistas lateral y frontal	74
Figura 4.27 Camara de sublimacion.....	75
Figura 4.28 Camara de Trabajo.....	76

Figura 4.29 Puerta del liofilizador.....	77
Figura 4.30.Propiedades físicas capsula de liofilización.....	77
Figura 4.31 Varilla roscada de 5/8 in cuadrada.....	79
Figura 4.32.Tornillo de potencia.....	79
Figura 4.33. Coeficientes de rozamiento.....	80
Figura 4.34 Motor paso a paso NEMA 34.....	81
Figura 4.35 Propiedades principales NEMA 34.....	82
Figura 4.36 Diagrama del sistema de control.....	83
Figura 4.37 Características principales variador de velocidad monofásico.....	84
Figura 4.38 Imagen variador de velocidad ATV12H037F1.....	84
Figura 4.39 Motor de corriente continua monofásico seleccionado.....	85
Figura 4.40 Encoder óptico TCST1103.....	85
Figura 4.41. Diagrama de modelo matemático banda transportadora.....	86
Figura 4.42. Diagrama de bloques banda transportadora.....	87
Figura 4.43 Diagrama de bloques banda transportadora en lazo abierto.....	88
Figura 4.44 Especificaciones driver de control motor DC.....	89
Figura 4.45. Driver puente H.....	90
Figura 4.46 Motorreductor pololu.....	90
Figura 4.47 Encoder óptico TCST1103.....	91
Figura 4.48 Diagrama de modelo matemático de motor de aspas.....	92
Figura 4.49. Diagrama de bloques del motor de aspas.....	93
Figura 4.50 Diagrama de bloques motor de aspa en lazo abierto.....	94
Figura 4.51 Diagrama de control motor paso a paso NEMA 34.....	95
Figura 4.52.Driver microstep CW-5045.....	95
Figura 5.1 Geometría simplificada del proceso de aspersión.....	98
Figura 5.2 Contorno de temperatura en la zona de aspersión.....	99
Figura 5.3 Grafica de temperatura contra tiempo en la zona de aspersión.....	99
Figura 5.4 Geometrías de simulación en la zona de gas.....	100
Figura 5.5 Grafica de temperatura contra tiempo en a la zona de gas.....	100
Figura 5.6 Contorno de temperaturas en la zona de gas.....	101
Figura 5.7 Contorno de velocidades en al zona de gas.....	101
Figura 5.8 Grafica de frente de sublimación contra tiempo.....	102
Figura 5.9 Diagrama de bloques implementación control.....	103
Figura 5.10 Modelo simplificado túnel IQF.....	103
Figura 5.11 Esquema Simulink.....	104
Figura 5.12 Implementación bloques de control.....	104
Figura 5.13 Constante proporcional.....	105
Figura 5.14 Implementación controlador PI.....	105
Figura 5.15 Configuración módulo PID simulink.....	106
Figura 5.16 Diagrama de bloques implementación control.....	107
Figura 5.17 Modelo simplificado túnel IQF.....	107
Figura 5.18 Esquema Simulink.....	108
Figura 5.19 Implementación bloques de control.....	108
Figura 5.20. Constante proporcional.....	109

Figura 5.21 Implementación controlador PI.....	109
Figura 5.22. Configuración módulo PID Simulink	110
Figura 5.23 Resultados de la simulación del sistema fotovoltaico en el programa PV*SOL	111
Figura 5.24 Resultados de la simulación en relación con la temperatura del sistema fotovoltaico en el programa PV*SOL.....	112

RESUMEN

La deshidratación de alimentos es un mecanismo de manipulación creado con el propósito de aumentar la vida útil y evitar el deterioro temprano de las características nutricionales de los alimentos. En este trabajo se planteó el desarrollo de un deshidratador de fruta enfocado a las condiciones del agro colombiano, en particular para el secado de fresa de la región de Cundinamarca. Basado en lo anterior, en este trabajo se presentan los resultados del diseño y simulación, de un sistema de deshidratación de fruta, utilizando el método de liofilización de alimentos. Éste, por sus características de funcionamiento otorga la mejor calidad en el producto final y un porcentaje de humedad cercano al 95%. El modelo utilizado para diseñar este sistema fue el modelo de liofilización por una sola cara y calefacción por capa seca. Adicionalmente, el deshidratador por medio de liofilización requiere un pre-proceso de congelación del alimento, por tanto, fue necesario diseñar un sistema IQF (Individual Quick Freezing) el cual garantiza un congelamiento uniforme y rápido del alimento. Para este, se implementó el modelo de congelación de Pham modificando aproximando la geometría de la fruta a una forma esférica. Conociendo la problemática en infraestructura que posee el agro colombiano, se optó por diseñar este sistema con base en alguna fuente de energía renovable, dadas las características geográficas a las cuales está dirigido este proyecto, se encontró que, el uso de energía fotovoltaica sería la mejor forma de alimentar nuestro sistema.

ABSTRAC

The food dehydration is a mechanism of manipulation created with the intention of increasing the useful life and avoiding the early deterioration of the nutritional characteristics of the food. In this work there appeared the development of a deshidratador of fruit focused on the conditions of the Colombian agro, especially for the dried one of strawberry of Cundinamarca's region. In general, one proposed a system of dehydration of fruit using the method of lyophilization of food, which, for his characteristics of functioning it grants the best quality in the final product and a percentage of dampness near to 95 %. The model used to design this system was the model of lyophilization for an alone face and heating for caps dries. Additional, the deshidratador by means of lyophilization needs a pre-process of freezing of the food, therefore, it was necessary to design a system IQF (Individual Quick Freezing) which guarantees a uniform and rapid freezing of the food. For this one, there was implemented the model of freezing of modified Pham bringing the geometry of the fruit near to a sphere. Knowing the problematics in infrastructure that the Colombian agro possesses, one chose to design this system with base in some renewable source of energy, given the geographical characteristics which this project is directed, one thought that the use of photovoltaic power would be the best way of feeding our system.

1. INTRODUCCIÓN

El avance continuo de la tecnología ha brindado las herramientas necesarias para mejorar las distintas maneras de almacenar y distribuir los alimentos. En la antigüedad esto generó una disponibilidad tal, que facilitó el agrupamiento en grandes poblaciones y la creación de nuevas profesiones. Con el tiempo de caza disponible, se crearon disciplinas artísticas y vocaciones investigativas que potenciaron aún más el desarrollo de la humanidad [1]. En nuestros días la expansión de la población humana en el mundo, al momento en que se escribe este documento, llega a más de siete mil millones de habitantes. Con la demanda de alimento cada vez mayor y debido a que las poblaciones se concentran en ciudades alejadas unas de otras, se ha convertido en un reto de alta dificultad poder llevarles el alimento necesario para su subsistencia.

Los distintos fenómenos naturales complican de manera significativa el proceso productivo de la agricultura, pues se generan sequías e inundaciones que afecta la evolución de los cultivos. Incluso en los procesos de pos-cosecha pueden afectarse los tránsitos hacia el consumidor, imponiendo nuevos tiempos en los cuales el producto sufre un deterioro. Si el agricultor no posee medidas de acción para este tipo de fenómenos puede ver se afectada su economía o incluso perder por completo la cosecha. En Cundinamarca este problema se ve potenciado puesto que muchas de las familias productoras no posee una conexión a la red eléctrica estable, lo cual impide que implementen procesos adicionales de conservación de alimento [2]. Con esto en mente, surge este proyecto de investigación el cual pretende desarrollar el conocimiento necesario para aportar la tecnología desde nuestro alcance a la realidad del agro colombiano.

Este documento estará dividido en tres principales temáticas: (1) la elección de los métodos a implementar (deshidratación y fuente de generación de energía), (2) el desarrollo de los diseños y (3) la validación de los mismos por métodos de simulación. Para la primera parte se tendrán en cuenta las principales fuentes de energía alternativa que dispone la región de Cundinamarca. Es necesario aclarar que el método de generación de energía eléctrica por biomasa no se tendrá en cuenta, ya que, es un proceso emite gases de efecto invernadero y además desplaza el fin de la agricultura de la alimentación a la producción de energía. De igual forma para el método de deshidratación se evaluarán distintos procesos y se elegirá el que otorgue mejor calidad en el producto final. En la segunda parte, se ejecutará el diseño de los procesos elegidos, se iniciará con los esquemas de funcionamiento, se pasará a la implementación mecánica y el diseño estructural y por último, se dimensionará la fuente de energía según el método elegido. Cada diseño implementado debe funcionar en conjunto según los requerimientos de los diseños anteriores. Para finalizar, se evaluarán los diseños, según la implementación de una simulación. En esta simulación se buscará validar que se cumplen los parámetros y los requerimientos del diseño planteados.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, los problemas de cambio climático y efecto invernadero se presenta como un claro riesgo para el sostenimiento de vida. Debido a que este efecto es en mayor medida producto de la energía a base de combustibles fósiles, es inminente desarrollar sistemas que mejoren o eviten el impacto ambiental de la producción de energía [3]. Dada la posición del petróleo como un combustible indispensable, es necesario crea el cambio en sectores primarios de producción libres de esta restricción. Uno de esto sectores puede estar en la conservación de alimentos, ya que requiere de grandes cantidades de energía, pero no está estrictamente relacionado con los derivados del petróleo como fuente de funcionamiento [4].

La fresa es uno de los productos más populares al rededor del mundo, países como estados unidos produjeron 1.366.850 toneladas para el año 2012. Pero también es un alimento con una vida pos cosecha muy corta, cerca de 5 días [5]. Es un producto de consumo directo en la mayoría de los casos, donde su color y sabor son sus mayores atractivos. En Colombia se producen en diferentes partes del país y son un postre muy popular en las regiones templadas. Son tan populares que la venta de “Fresas con crema” constituye una forma de empleo informal en Cundinamarca. Según la FAO [6] en el mundo se pierden cerca del 10% de la producción de alimento en la pos cosecha, si esto se traduce a cifras colombianas y a la fresa, se está hablando de 4.245 toneladas. Además, y según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) [7] en el año 2010 se perdieron 1.426.932 toneladas de frutas y verduras en la pos cosecha, siendo 1.154.923 toneladas pertenecientes a únicamente las frutas, con un 32% de participación en el desperdicio en ese año.

Según lo anterior en este trabajo se pretende resolver la siguiente pregunta de investigación, ¿Cómo el uso de energías alternativas permite la implementación de un sistema de deshidratación de fresa para la región de Cundinamarca, accesible al mediano agricultor?

1.2. Justificación

En Colombia la agricultura y similares representan cerca de un 6% del PIB, aunque no es un número muy grande, si aporta el 11% del empleo formal. Siendo un país que se sitúa geográficamente en una posición privilegiada, parece que el agro como profesión no es tan atractivo para la población, esto puede deberse a muchas circunstancias, pero una de las más evidentes es la desigualdad urbana-rural. Según la Dirección de Desarrollo Rural Sostenible (DDRS) Subdirección de Producción y Desarrollo Rural (SPDR) [8], en el año 2014 se presentaba un índice Gini de desigualdad de 0.514 para las zonas urbanas y un 0.463 para las rurales y donde en general a nivel nacional se presentaba poco menos de 0.54. Esto quiere decir que, si se estudian a dos personas al azar probablemente, siendo 100 un número de unidades de ingreso total, la diferencia absoluta entre estos dos sería de 46.3 a nivel rural, 51.4 a nivel urbano y 54 a nivel nacional. Además de esto, se puede observar como para el periodo de años 2010- 2014 el sueldo per cápita en la región rural paso de \$179.812 a \$215.597 mientras que en la urbana pasó de \$534.056 a \$614.512 lo cual en números absolutos es un aumento de \$35.784 para la ruralidad frente a un \$80.456 de la zona urbana, cifras que dejan a la vista la brecha económica que existe entre estas dos caras del país.

Una explicación para esta brecha rural-urbana es al precario desarrollo rural a nivel productivo. La poca inversión en tecnología agrícola disminuye la eficiencia y aumenta el número de terceros, entre el productor y el consumidor, esto hace que las ganancias del productor se vean restringidas y reguladas por los intermediarios [9]. Esto se evidencia, si se compara el desempeño productivo que ha tenido el país con el de países como Brasil o Perú, que comparten situaciones geográficas similares y sin embargo tienen mejores resultados [10].

La fresa es producida y comercializada en grandes cantidades alrededor del mundo. Siendo un producto con una vida pos-cosecha bastante corta, necesita de procesos adicionales que le faciliten recorrer grandes distancias y conservar sus propiedades por largos periodos de tiempo [11]. En Colombia, Cundinamarca es una de las regiones que más produce este alimento. Sin embargo, la exportación de este producto no está al alcance del productor medio, ya que carece de la tecnología necesaria para ofrecerlo sin ayuda de intermediarios [12]. Esto dificulta el desarrollo del sector agrícola y favorece la desigualdad entre agricultores y productores multinacionales.

La radiación solar en la región de Cundinamarca, según datos de la NASA, es de 4.82 kWh/m²/día. Este dato hace referencia a la cantidad de luz que incide sobre una superficie horizontal, además de su baja nubosidad y temperatura media, hace de la energía solar una opción viable para el reemplazo de la fuente de energía tradicional. Por otra parte, la velocidad del viento, cerca de 1,7 m/s y con una densidad de 1,2 kg/m³, favorece la implementación de un generador eólico que con pérdida del 40%, se estima, puede generar hasta 10W por día [13].

Por estas razones es importante desarrollar una tecnología que mejore la pos-cosecha, que permita reducir el desperdicio, que justifique una inversión a largo plazo y que sea accesible al agricultor medio. Esto justifica la investigación en el uso de energía alternativa para el proceso de deshidratación de alimentos y en especial enfocado en la fresa.

1.3. Objetivos

1.3.1. General:

Diseñar y simular un deshidratador de fresa que garantice los parámetros de secado haciendo uso de energías alternativas.

1.3.2. Específicos

- Analizar el funcionamiento de los procesos de deshidratación de alimentos y escoger un método según su viabilidad para implementarse con energías renovables.
- Profundizar en las características físicas del método escogido y obtener de esta manera el modelo matemático.
- A partir del desarrollo del modelo matemático del deshidratador de fresa, plantear y diseñar un sistema de control que permita su funcionamiento.

- Desarrollar un sistema de alimentación con energías alternativas que permita el funcionamiento del proceso de deshidratación.
- Realizar una simulación que permita verificar el funcionamiento del sistema de deshidratación, utilizando energías alternativas como fuente de alimentación.

2. MARCO TEÓRICO

En esta parte del documento se presenta algunos conceptos teóricos necesarios para el desarrollo del mismo. Se tratarán temas relacionados con, energías renovables (aplicaciones y desarrollo) y métodos de deshidratación de alimentos.

2.1. Energía

Desde que el ser humano descubrió el fuego, lo ha utilizado para agregar comodidad a su vida. Siendo este una de las formas más primitivas de uso de energía, formó parte del pilar fundamental que ha desencadenado en el ser humano moderno. Es de esta manera como vemos el papel de la energía en el universo, está en todas sus formas y permite el avance del mismo [14].

La energía, es esa característica del objeto que lo distingue por ser capaz de efectuar un cambio en si mismo. Durante años se ha estudiado el “que es” y “que significa” esta característica, llegando a conclusiones trascendentales como que es constante en todas regiones del universo y que esta puede transformarse, pero jamás crearse o destruirse. Algunas de estas transformaciones las podemos encontrar en acciones tan cotidianas como encender una bombilla, donde la energía mecánica potencial que posee una cortina de agua es transformada en energía eléctrica a través de turbinas, transportada a tu hogar por medio de conductores, llevada al filamento de la bombilla y transformada en energía lumínica y térmica. Este ejemplo es una aproximación somera de lo que ocurre, dado que realmente en todas las fases descritas pueden ocurrir transformaciones adicionales de todo tipo [15].

2.2. Energía Fósil

Se puede definir como energía fósil a aquella que surge de la transformación química de los combustibles fósiles en calor y que a sus veces es aprovechado para generar electricidad o movimiento. Esta transformación ocurre generalmente en la quema de materiales a base de carbono produciendo calor, pero también una serie de gases perjudiciales para el medio ambiente. Estos materiales son, en la mayoría de los casos, provenientes de animales y plantas prehistóricas de allí su nombre, fósil [16]. En la actualidad estamos inmersos en una dualidad de intereses, puesto que los efectos nocivos de los gases residuos del uso de estos combustibles sobre el ambiente, no compensan la utilidad que se extrae de esta energía a largo plazo. Además, se plantea un escenario catastrófico para las futuras generaciones, dado que el efecto sobre el medio ambiente puede ser irreversible [17].

2.3. Energías alternativas

De cierta manera compatible con la definición de energías renovables, pues se procura el uso de combustibles renovables, o también llamadas energías verdes, por el enfoque ambientalista de sus promotores, no presenta todavía una definición exacta. Particularmente se puede definir como todas aquellas formas de producción de energía cuyas fuentes sean no convencionales, como, por ejemplo, que no requieran ningún combustible fósil para su

funcionamiento. Generalmente, poseen un impacto menor en el medio ambiente y son consideradas libres de emisiones de efecto invernadero. Algunas de estas son: la energía geotérmica, la energía nuclear, la energía solar, la energía eólica y la energía mareomotriz [18].

2.3.1. Energía Solar

En general se define como el uso del sol como fuente de energía. Posee un impacto ambiental directo casi nulo y es uno de los métodos que más se han estudiado como sustituto para las fuentes de energía convencional. La comprenden dos grupos, energía solar fotovoltaica y energía termo solar [19].

2.3.1.1. Energía Fotovoltaica

Hace uso del efecto fotoeléctrico para crear una corriente eléctrica. Este efecto fue explicado por el científico Albert Einstein y le hizo merecedor de un premio nobel de física. La luz actúa como una partícula de interacción llamada fotón, este, al contacto con un material conductor desplaza sus electrones, agregándoles momento [20]. Si en vez de un conductor usamos un material semiconductor como el silicio con un dopaje específico, podemos lograr que este desplazamiento cree lugares o zonas electrón-hueco y posteriormente una corriente eléctrica [21]. Un esquema simplificado de este fenómeno se presenta en la Figura 2.1

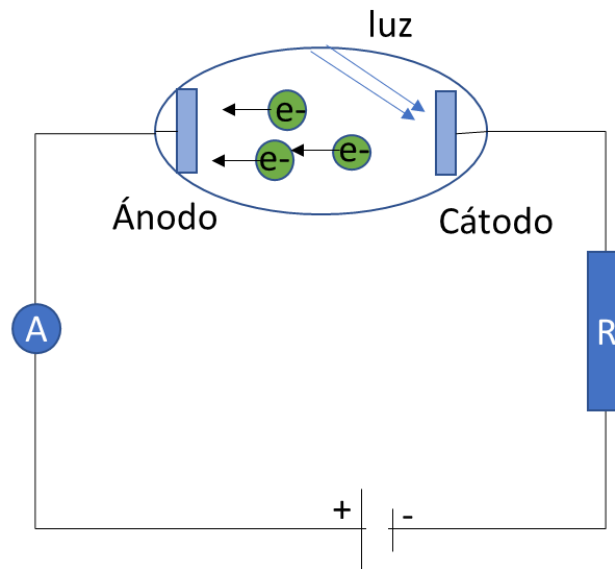


Figura 2.1 Esquema simplificado del efecto fotoeléctrico

Fuente: Autores

Los dispositivos semiconductores utilizados para la generación de energía fotovoltaica generalmente vienen fabricados en células o celdas, la cuales deben ser interconectadas en

diferentes composiciones seriales y paralelas, a lo que llamamos paneles, y conectados a una unidad de almacenamiento de energía. Ver Figura 2.2

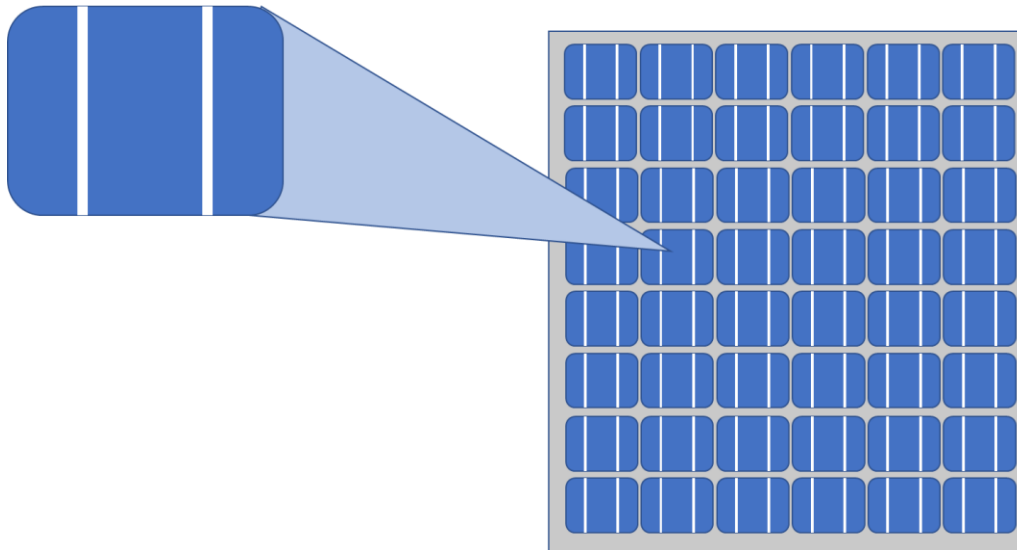


Figura 2.2 Ilustración de una célula fotovoltaica y su respectivo panel

Fuente: Autores

El sistema de generación de energía eléctrica a partir de celdas fotovoltaicas depende

Para el diseño de estos sistemas es fundamental conocer: la radiación solar, potencias requeridas y la naturaleza de esta potencia (AC o DC), además de, si se requiere un sistema unido a la red tradicional o completamente autónomo. El diseño comienza encontrando el número de paneles necesario, para esto es útil calcular el valor de radiación incidente sobre una superficie inclinada [22], esta viene de la forma:

$$H(\beta) = RH \quad (2.1)$$

Donde (H) es la radiación solar diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal, β es el ángulo de inclinación de la superficie y R es la relación de transmitancia de la atmosfera. Esta última se puede calcular de la siguiente manera:

$$R = [(H - Hd)/H]Rb + ((Hd)/H)(1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2 \quad (2.2)$$

Donde (Hd) es la radiación solar difusa, r es la constante de reflectancia de la superficie y Rb es la razón obtenida del promedio diario mensual de la radiación sobre una superficie inclinada y el promedio diario mensual de la radiación sobre la superficie horizontal [23],

Con estos datos es posible calcular el HSP (Horas Solares Pico) que posteriormente se utiliza para calcular la potencia pico necesario y el número de paneles.

$$HSP = H(\beta)/Wp \quad (2.3)$$

Siendo W_p la potencia nominal del panel, con un valor de 1000 w/m^2 en la mayoría de los casos.

Para calcular el número de paneles, primero se debe encontrar la potencia que debe ser generada, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_p = \frac{Ecd}{\eta \cdot HSP} \quad (2.4)$$

Donde Ecd es la energía diaria consumida y η es la eficiencia del sistema.

Por último, es necesario conocer el valor de la potencia nominal de los paneles para que divida la potencia generada y encontrar el número de paneles.

$$N_p \geq \frac{P_{np}}{P_p} \quad (2.5)$$

Con el número de paneles definido, es necesario encontrar un regulador eficiente para el control de carga en las baterías o la distribución de energía a la aplicación. En el mercado existen varias alternativas para estos sistemas siendo el regulador con MPPT el más utilizada.

Los reguladores MPPT (Maximum Power Point Tracker) suelen ser convertidores DC DC o PWM que incorpora módulos de control para seguir al máximo pico de poder. La gráfica de I -V de un panel fotovoltaico, de la Figura 2.3, muestra que en existe cierto punto para el que la corriente y el voltaje otorgan el máximo poder, con estos datos el controlador buscara regular la carga para sostener el desempeño el controlador en este punto. [24]

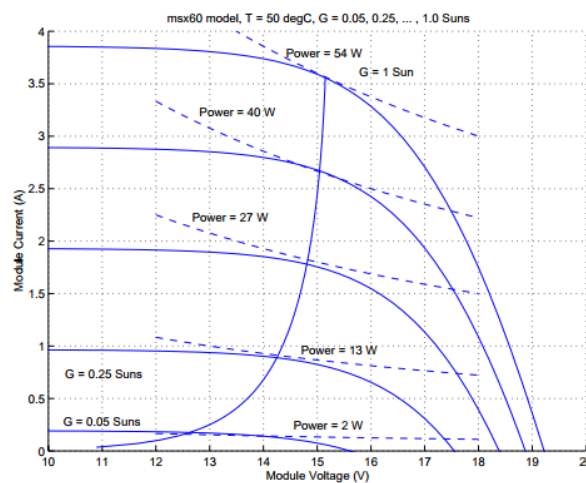


Figura 2.3 Curvas de funcionamiento de un panel fotovoltaico a 50°C de operación para varios niveles de radiación

Fuente: Walker, Geoff, EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL,

Para elegir el regulador MPPT es necesario conocer características de funcionamiento del panel como la corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto V_{oc} .

Para que el sistema cumpla el objetivo de aportar energía incluso en condiciones de poca luz, es necesario acoplar un banco de almacenamiento o banco de baterías. El tipo de baterías usadas en la producción de energía fotovoltaica requieren que su funcionamiento facilite la descargar continúa y posean un factor de auto descarga bajo [25].

Si se desea utilizar dispositivos de corriente alterna es necesario adicionar un sistema inversor. Este convertirá la corriente continua, saliente de las baterías, en corriente alterna para alimentar los dispositivos necesarios, en este sentido, la potencia del inversor dependerá de la corriente a utilizar.

En la Figura 2.4 podemos observar un esquema de funcionamiento para un sistema fotovoltaico.

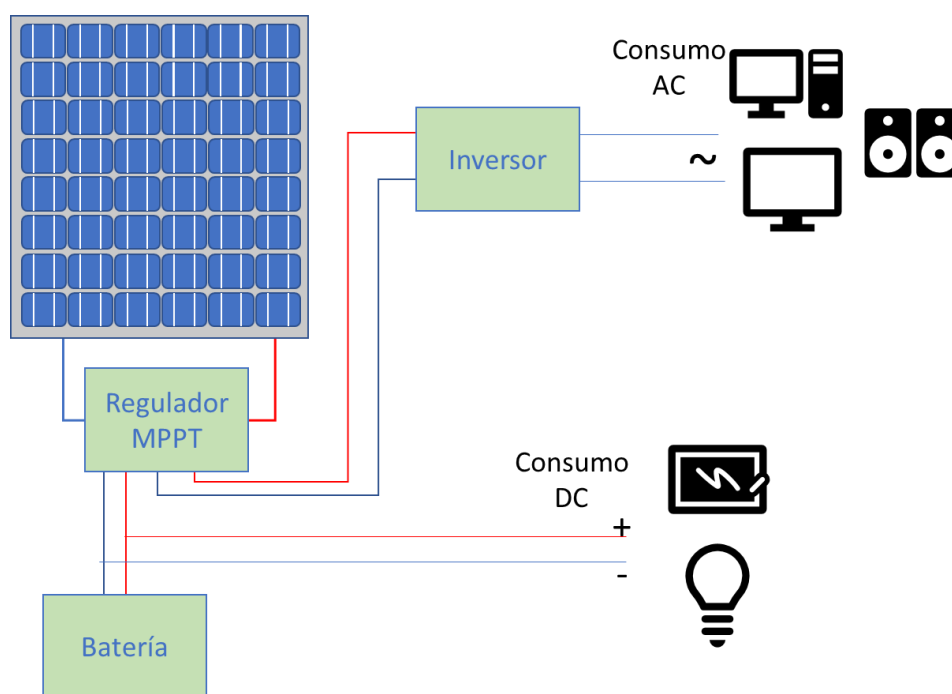


Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de un sistema fotovoltaico

Fuente: Autores

2.3.1.2. Energía Termo-Solar

El sol, durante siglos, a bañado a nuestro planeta con invaluable rallo de energía en forma de luz y calor. Buscando aprovechar dicha energía se han creado diversos métodos para transformarla en electricidad, es de esta manera como surge la energía termo-solar. A diferencia de su contraparte fotovoltaica, la termo-solar aprovecha la radiación más cercana

al infrarrojo para generar calor, este a sus ves será usado para evaporar un fluido y mover una turbina acoplada a un generador [26].

En la actualidad podemos encontrar diferentes formas de producir electricidad partir de la energía del sol en forma de calor. En general, se pretende concentrar una importante cantidad de calor sobre un fluido y que a través de las leyes de la termodinámica éste sea capaz de mover un generador de electricidad.

Se pueden distinguir 2 tipos de tecnologías, los que usan varios espejos dirigidos hacia un solo punto o línea y los que usan un espejo apuntando a un generador individual (Concentrador solar Stirling). Los primeros, conocidos como campos solares, pueden concentrar los rayos en un punto en lo alto de una torre como se muestra en la Figura 2.5, pero también pueden concentrarlos en una línea de fluido como se observa en la Figura 2.6 a los cuales se les llama concentradores parabólicos, estos a su vez pueden cambiar espejos parabólicos por espejos planos para crea un sistema Fresnel el cual es más económico de implementar. Los concentradores de Stirling usan un Motor de aire caliente inventado por el fraile escocés Sir Robert Stirling en 1816 [27]. Este motor requiere de una fuente de calor para funcionamiento, por cual, se usa un espejo en forma de disco parabólico para concentrar los rалos en un punto del generador y de esta manera propiciar su movimiento generando energía. Un ejemplo de este tipo de tecnología se puede observar en la Figura 2.7.



Figura 2.5 Planta PS10 ubicada en Sanlúcar, Sevilla

Fuente: McKenna, Phil, Nova next,2013



Figura 2.6 Planta solar Valle 1 ubicada en Cádiz, España. [28]

Fuente: Torresol Energy Investments, S.A



Figura 2.7 Central Termo-Solar de Discos Parabólicos con motor Stirling [29].

Fuente: Solar-energia.net , 2015

Para el diseño de un generador de energía Termo-Solar es necesario conocer: el tipo de sistema a implementar, el fluido absorbedor a utilizar y el potencial energético solar de la zona. Generalmente, su aplicación requiere de una inversión a gran escala.

2.3.2. Energía Eólica

El viento es una fuente renovable de energía limpia y amigable con el entorno natural, fue usada durante muchos años como medio de locomoción para la navegación y es actualmente

un referente para la generación de energía [30]. Los cambios en la presión atmosférica producidos por la forma irregular como el sol calienta diferentes zonas de la tierra, genera el movimiento del aire de puntos de mayor presión a menor presión. Estas corrientes pueden ser utilizadas para mover distintos dispositivos y así generar electricidad [31].

Los primeros dispositivos eólicos que se conocen datan de la época del rey Hammurabi, rey de babilonia en el siglo XVII AC los cuales se utilizaban para regar las llanuras de Mesopotamia [32]. Esta idea fue evolucionando hasta convertirse en los aerogeneradores que poseemos en la actualidad.

2.3.2.1. Aerogenerador

La forma más común de aprovechar los movimientos del aire es usando aerogeneradores ya sean soluciones individuales o grandes granjas eólicas, estos se componen de un sistema de hélices que al ser desplazadas con el viento imprimen el movimiento suficiente para que funcione un generador de energía [33]. Se pueden clasificar por la disposición de las hélices en Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical. Los primeros poseen ventajas al momento de comparar la potencia generada, pues son sistemas que funcionan al nivel de vientos con mayor velocidad. Sin embargo, sufren pérdidas debidas a los cambios de dirección en el viento. Los de eje vertical por el contrario trabajan a alturas más cercanas al suelo y no poseen problemas con la dirección del viento, son mejores si se requieren potencias menores, gracias a que el costo de sostenimiento es menor [34].

En la Figura 2.8 podemos observar una granja eólica en el mar de Bélgica, este tipo de disposición suele llamarse extraterritorial u offshore. Este es un ejemplo de aerogeneradores horizontales. Otro ejemplo de aerogeneradores, pero de disposición vertical es el mostrado en la Figura 2.9 el cual es un sistema tipo Darrieus situado en la Antártida.



Figura 2.8. Parque eólico de Thorntonbank, Bélgica

Fuente: Energy News , “Tower Power” podría ahorrar hasta 37 M€ en la producción de energía eólica



Figura 2.9 Aerogenerador vertical, Antártida.

Fuente: Grobe, Hannes, Windgenerator, 2007

Para utilizar un sistema eólico es necesario identificar la potencia disponible en el lugar, para esto se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$Pv = 1/2 \rho AU^3 \quad (2.6)$$

Donde Pv es la potencia del viento, ρ es la densidad, A es el área en movimiento y U es la velocidad del viento.

Dado que por un efector aerodinámico la velocidad que incide sobre el generador se ve modificada en necesario identificar un coeficiente de rendimiento, este coeficiente tiene un valor máximo de 0.5926 el cual es denominado límite de Betz [35].

$$Pv = 1/2 \rho AU^3 Cp \quad (2.7)$$

2.3.3. Energía Geotérmica

De forma simplificada, podemos definir la estructura geológica de la tierra en tres partes corteza, manto y núcleo, siendo este último ubicado a una profundidad de 6357.78 km de la superficie, ver Figura 2.10. Esta disposición propicia un gradiente de temperatura desde núcleo (más caliente) a la superficie terrestre (más fría) que, en conjunto con las corrientes de agua subterráneas debidas a la filtración de aguas lluvias, provoca formaciones como géiseres, fuentes de agua termal o fumarolas [36].

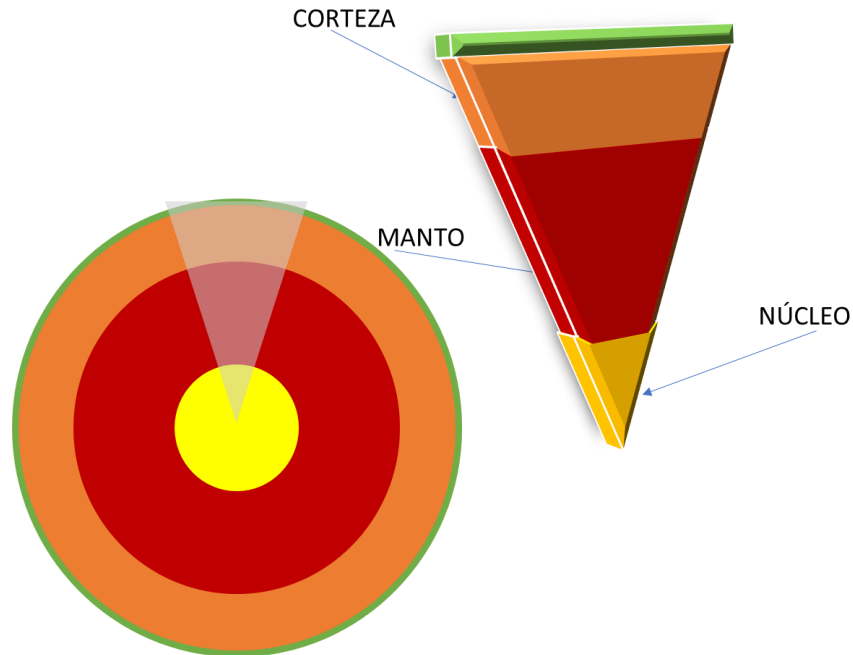


Figura 2.10 , Descripción general de la geología terrestre.

Fuente: Autores

Para aprovechar la energía geotérmica es necesario identificar dicha actividad a profundidades razonables, cerca de la superficie, para esto son de gran ayuda las formaciones geológicas anteriormente mencionadas. Adicionalmente, las formaciones como el cinturón de fuego, producido por el roce entre placas tectónicas en el pacífico nos brindan un mapa de la actividad volcánica que se traduce en una posible fuente de energía geotérmica [37].

Una vez identificada la posible fuente de funcionamiento, es necesario perforar el suelo hasta encontrar el lugar de producción de vapor de alta presión. Generalmente, se buscan reservorios de agua lluvia a distancias desde 100m a 3km que gracias a la actividad volcánica cercana generan vapor. Durante la extracción del vapor, este pasa por diferentes filtros de humedad e impurezas que mejoran la calidad del mismo y evita las pérdidas de potencia en la turbina. En la Figura 2.11 se muestra un esquema del sistema de funcionamiento para una planta geotérmica.

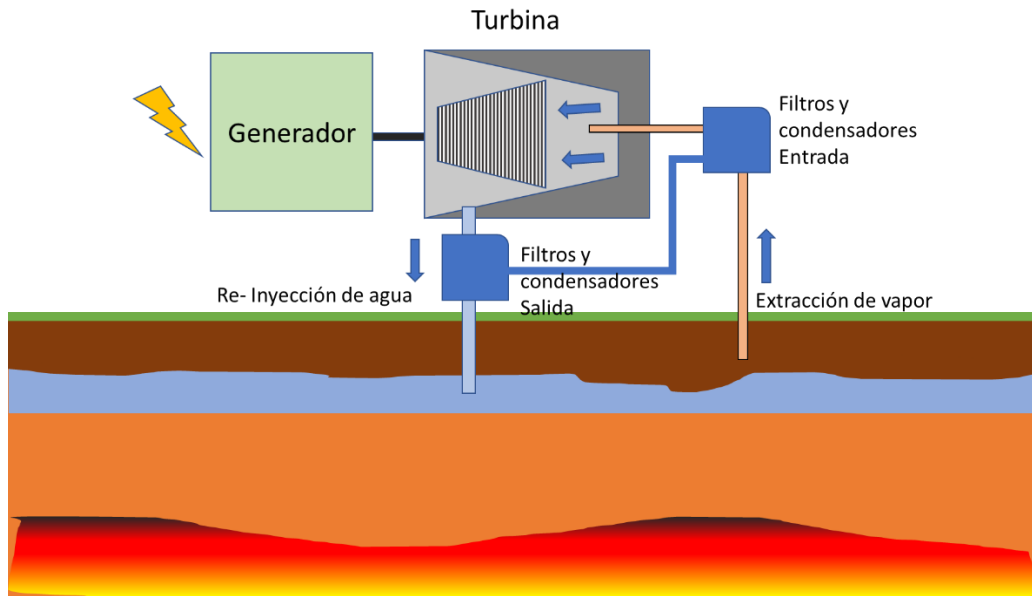


Figura 2.11 Esquema general de una planta de generación geotérmica

Fuente: Autores

2.4. Métodos de conservación de alimentos.

En el instante en que los alimentos son recolectados de sus fuentes de producción, comienza una carrera entre la calidad del producto y los agentes de descomposición. Aunque el marcador siempre está a favor de este último, la humanidad le ha logrado arrebatarse tiempo implementando diferentes métodos de conservación. Tal como dice Clayton K. et al [38] el contenido de agua y el pH son los dos indicadores que nos muestran que alimentos son los más perecederos y cuáles pueden ser transportados sin mayor riesgo hasta el consumidor final. Además, son las características se deben atacar para lograr que un producto alargue su vida útil.

Actualmente podemos clasificar los métodos de conservación de alimentos por los principios que utiliza, siendo estos físicos o químicos. De los métodos físicos la deshidratación es uno de los métodos que más se utiliza, por el papel que posee el agua en los procesos de descomposición.

2.5. Métodos de deshidratación de alimentos.

Los métodos de deshidratación son, en la mayoría de los casos, procesos físicos que modifica el porcentaje de agua en los alimentos. Podemos encontrar métodos como los de prensado, centrifugación, osmosis, evaporación, liofilización o congelación, entre otros, de los cuales la evaporación, los procesos de osmosis y la liofilización son los más utilizados [39].

Dentro de la gran cantidad de métodos que utiliza la evaporación como principio para la deshidratación, se destacan los sistemas de aire caliente y los que usan métodos radiantes como la luz solar o las microondas.

2.5.1. Secado por aire caliente

Con la disponibilidad de un flujo de aire caliente suficiente es posible llegar a valores de humedad cercanos a la mitad del valor inicial, esto mejora las condiciones del producto frente a los microorganismos y aumenta su vida útil [40]. Variantes de este tipo de secado modifican la forma en la que el aire es dirigido hacia el alimento o incluyen más etapas con temperaturas y velocidades diferentes. No obstante, el principio de arrastre es el mismo, se pretende usar una corriente de aire a 50 °C o más para extraer la capa de humedad superficial del producto por difusión y al mismo tiempo calentar las zonas más interiores, favoreciendo que la humedad llegue a la superficie y el ciclo continúe [41]. En la Figura 2.12 podemos observar un esquema general para un sistema de secado por aire caliente.

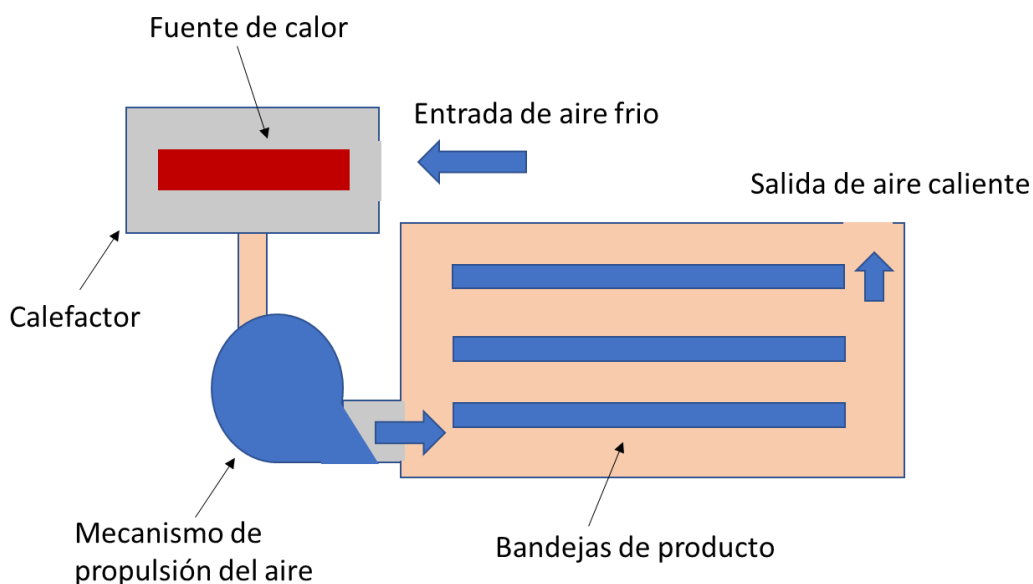


Figura 2.12 Esquema general de un sistema de secado por aire caliente.

Fuente: Autores

Estos procesos de secado poseen la desventaja de modificar de manera importante el aspecto y las características de olor y sabor del producto, dado que las temperaturas generan una etapa de cocción. Para implementar un sistema por aire caliente se debe evaluar esta desventaja según el alimento sea sensible a las altas temperaturas.

2.5.2. Secado al sol:

El uso del sol como fuente de energía para la conservación de alimentos fue uno de los primeros métodos de deshidratación. Este consistía en dejar el producto por un periodo prolongado de tiempo bajo la acción de los rayos del sol y el viento, los cuales calentaban e iban secando lentamente el alimento [42]. Actualmente, se sigue implementando este sistema

como proceso de secado pues es amigable al ambiente dado que el uso de combustibles fósiles es casi nulo.

Existen diferentes formas de implementar un sistema de secado solar, las cuales se pueden agrupar según cómo inciden los rayos del sol sobre el producto (directo o indirecto) y cómo es producida la corriente de aire dentro del deshidratador (forzado y no forzado) [43], En la Figura 2.13 podemos observar las diferentes composiciones. Como su nombre lo indica, los sistemas directos son aquellos en los cuales los rayos inciden sobre el producto de forma directa calentándolo y favoreciendo la creación de un corriente de aire que extrae la humedad. Su mayor ventaja es la de requerir menor espacio. Por el contrario, los sistemas indirectos utilizan colectores solares para calentar el aire exterior e introducirlo en una cámara donde se encuentra el producto. Ambos sistemas pueden utilizar un componente adicional para forzar el movimiento del aire dentro de las cámaras, lo cual lo convierte en un sistema forzado.

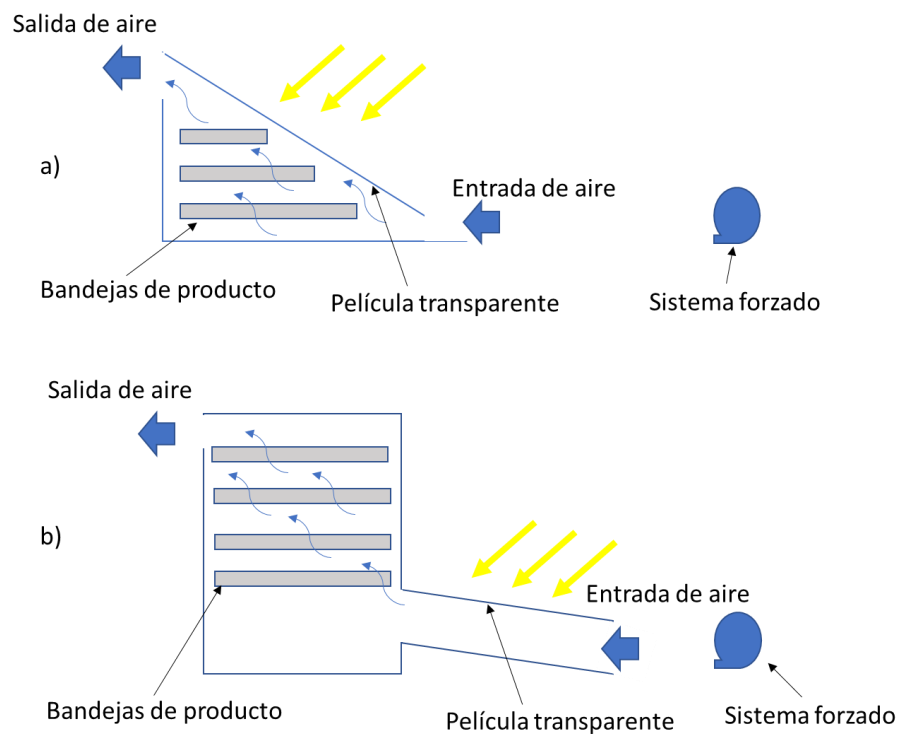


Figura 2.13. a) sistema de secado directo, b) sistema de secado indirecto

Fuente: Autores

En general, los sistemas solares poseen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Bajo costo de implementación y sostenimiento.
- No requiere mayor conocimiento técnico.
- Bajo impacto ambiental

Desventajas:

- Dependencia de las horas de sol, no funciona bajo condiciones nubladas o mal clima.
- Posible contaminación de insectos o bacterias.
- Secado heterogéneo.
- Posible secado incompleto

2.5.3. **Secado por osmosis**

Un proceso de osmosis es un fenómeno biológico que involucra el transporte de una sustancia parte de una mezcla con baja concentración de solutos a una con alta concentración, pasando por una membrana semipermeable hasta alcanzar el equilibrio, generalmente asociada a procesos celulares, es también un método muy usado en la deshidratación de alimentos [44]. Las características de algunos productos alimenticios propician el transporte de soluciones por osmosis, donde sus tejidos funcionan como membrana porosa que separa las dos mezclas. De esta manera se busca utilizar una solución hipertónica que permita el desplazamiento de agua en un producto hacia la solución [45].

Este proceso, generalmente llega a disminuir la humedad del producto en hasta un 80% de su concentración original por lo cual mejora la vida útil del alimento. Sin embargo, el proceso no detiene efectivamente la actividad del agua por lo que existe la posibilidad de deterioro por microorganismos. Por ende, es un proceso que se utiliza como preparativo para otros métodos de deshidratación, como el secado por aire caliente o liofilización [46].

2.5.4. **Liofilización**

La física ha permitido estudiar el comportamiento del agua para diferentes configuraciones y gracias a esto se ha podido identificar ciertos comportamientos especiales, uno de estos es el que ocurre cerca del punto triple (punto donde la presión y la temperatura impiden distinguir una fase clara del agua) donde se puede generar un proceso de cambio de fase llamado sublimación, el cual consiste en la transformación de agua sólida en gaseosa sin pasar por el medio líquido [47]. Este proceso es útil en el desarrollo de métodos de deshidratación de alimentos dado que permite la evaporación y extracción de humedad sin calentar demasiado el producto.

La liofilización es uno de los pocos procesos de deshidratación que afectan mínimamente las características del producto, dando como resultado un alimento casi idéntico al original en su sabor, aroma y características nutricionales.

Como podemos intuir la liofilización es un proceso segmentado por las fases a las cuales se debe llevar al producto, de esta manera debemos obtener con anterioridad un alimento congelado y posteriormente se debe efectuar la sublimación. La forma en la que el producto es congelado es fundamental para garantizar las características de un producto liofilizado ya que es en este proceso en el que el producto sufre los mayores cambios [48].

La liofilización posee las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas [49] [50] :

- Porcentajes de humedad final menores al 5%
- Conservación de las características nutricionales
- El producto final no requiere refrigeración para su conservación
- El producto no sufre cambios físicos (encogimiento, cambio de color, etc)
- Gran rehidratación.

Desventajas [51]:

- Costo de implementación alto
- Proceso lento

3. MARCO REFERENCIAL

La conservación de alimentos es una de las prioridades de la humanidad desde que el sedentarismo fue acogido por los primeros humanos como forma de vida. Alrededor del mundo se pueden encontrar indicios de métodos de conservación de alimentos tan distintos como zonas geográficas existen. La salazón, el ahumado, el secado al sol y la conservación en aceite fueron algunos de los métodos utilizados por nuestros ancestros para mantener los alimentos en óptimas condiciones para su ingesta. Con el avance del tiempo, la necesidad de alimentar en buenas condiciones a ejércitos y ciudades hizo que reyes y emperadores ofrecieran grandes incentivos económicos a quienes hallaran la forma de preservar las reservas de comida en tiempos de escasez o guerra [52].

Es así como hoy nos encontramos con una gran cantidad de métodos de conservación. Estos difieren dadas las necesidades específicas de cada alimento, pues sus características físicas y químicas lo requieren. En general, los métodos se encargan de disminuir cualquier factor que atente a la estabilidad del alimento, como las actividades enzimáticas o microbianas. La reducción en el porcentaje de agua forma parte de casi todos los métodos de conservación ya que disminuye de manera significativa el crecimiento de bacterias, evita su reproducción y según el método que se aplique también puede ejercer una disminución en la actividad enzimática. [53].

Según Aravindh et al. [54], los métodos de deshidratación se pueden clasificar en tres conjuntos diferentes, secado de baja temperatura, de alta temperatura y liofilización (Freeze-drying). De estos los métodos más utilizados son Aire caliente, Radiación infrarroja, Liofilización, Secado por microondas y sacado en presencia de vacío, algunos como el caso de la liofilización se utilizan casi exclusivamente en procesos farmacéuticos [55]. El alto consumo de energía es un inconveniente constante en estos procesos y sumado a los efectos del uso de combustibles fósiles, hace evidente la necesidad de encontrar nuevas formas de producir energía con el fin de aplicarlas a los procesos de secado actuales. por esta motivación se han planteado formas de uso de energía solar como fuente de alimentación para procesos de deshidratación.

Según M. Kumar et al. [56], los pioneros en el uso de energía solar para el proceso de secado fueron Everitt y Stanley en el año 1976. Ellos diseñaron un sistema que mejoraba el método de secado solar al aire libre, cubriendo una unidad de alojamiento con un recubrimiento transparente. Esto ayudaba al producto a protegerse de factores externos como los insectos o el mal clima. Con el tiempo este método se fue clasificando y mejorando hasta llegar a conformar 2 tipos (convección solar forzada y natural) y 3 grupos (secado indirecto, directo y sistemas híbridos).

Uno de los inconvenientes del secado solar es la dependencia a el tiempo de luz diurna y una buena jornada climática, por esto B. Bena y R. J. Fuller [57] en 2000 combinaron más de una forma de energía y diseñaron un sistema que suplía esta necesidad en las épocas de poca luz o un clima desfavorable. Este diseño consistía en un secador solar directo natural acompañado de un sistema de calentamiento por quema de biomasa (leña). Los resultados

obtenidos del sistema mostraron un contenido final de humedad por debajo del 5%, sin embargo, no fue un resultado homogéneo ya que algunas piezas mostraban humedades superiores al 10 % según la posición en el secador. Es destacable que el secado con luz solar fue más eficiente (22%) en comparación con el sistema de respaldo de biomasa (6%).

En 2004 H. Chen et al. [58] diseñaron un sistema de secado de limón usando una combinación de sistemas de energía solar. Por un lado, se aprovechaba la radiación, como se hace en los secadores solares comunes, y por el otro, se implementaba un sistema fotovoltaico para energizar un deshumidificador de aire, todo esto dentro de un sistema cerrado. De esta manera se podía resolver el problema de humedad ambiental y la posible entrada de insectos o bacterias. Este sistema hacía fluir el aire dentro de la cámara y a través de un sistema de condensación para retirar el agua extraída de las piezas de limón y del ambiente. De esta manera se obtuvieron resultados mejores que por el método de secado de aire caliente a 60°C constantes. Cabe destacar que no toda la energía necesaria para el proceso se pudo obtener del sistema fotovoltaico, por esta razón se usó el suministro local de energía.

Actualmente se espera encontrar una combinación de energías óptima que facilite la implementación de sistemas como el de secado solar en lugares donde el acceso a un sistema eléctrico es escaso.

Desde otro punto de vista, una de las técnicas más destacables de deshidratación utilizadas en la actualidad es la liofilización, la cual tiene la ventaja de evitar la cocción del alimento y mantener casi intacta su apariencia física y su estructura química. Sin embargo, no se han hecho demasiados estudios referentes al uso de energía renovables con este u otro tipo de métodos de baja temperatura.

4. INGENIERÍA DEL PROYECTO

En esta sección se mostrará el proceso de diseño del sistema de deshidratación de fresa comenzando por la interpretación de las condiciones regionales y la potencialidad energética. Acto seguido, se eligen el método de secado y la forma de generación de energía a utilizar, por último, se mostrará un diseño de cada aspecto del deshidratador (mecánico, eléctrico y de funcionamiento).

4.1. Capacidad energética alternativa Cundinamarca.

La capacidad energética en Cundinamarca puede estudiarse desde las 3 grandes fuentes principales de energía alternativa, solar, eólica y geotérmica. Entre estas, la energía solar es una de las más destacadas, puesto que la posición de Colombia en mundo es privilegiada al encontrarse cerca el ecuador, en la zona de bajas latitudes, esto propicia la recepción de luz solar uniforme durante todo el año [59]. Sin embargo, es útil estudiar las demás fuentes de energía dado que el clima cambiante de Cundinamarca puede afectar de forma negativa el desempeño de un sistema exclusivamente solar.

4.1.1. Energía solar en Cundinamarca.

Cundinamarca es una región situada en la latitud $5^{\circ}01'$ al norte y longitud $74^{\circ}01'$ al oeste a una altitud media de 2475 m.s.n.m , según la NASA [60], en estas coordenadas podemos encontrar una radiación solar para superficies horizontales promedio mensual de $5.7 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$:

Tabla 1. Tabla de radiación sobre una superficie horizontal ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
R	5.82	6.54	6.93	6.32	5.59	5.03	5.34	5.72	5.85	5.84	5.22	5.25

Además de esto, nos da una referencia de la radiación solar en superficies inclinadas 5° y 20° grados orientadas al ecuador [61].

Tabla 2. Tabla de radiación sobre una superficie inclinada ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5°	5.97	6.62	6.89	6.26	5.58	5.03	5.34	5.68	5.77	5.86	5.31	5.39
20°	6.39	6.84	6.78	6.12	5.61	5.11	5.40	5.62	5.57	5.94	5.58	5.79

Con esta información es posible determinar el potencial energético de la región de Cundinamarca. Utilizando la ecuación 3, podemos encontrar las horas solares pico y la potencia total generada en estas horas. Tomando el promedio de radiación sobre una superficie de 20° se obtiene los siguientes datos:

$$HSP = \frac{5.89 \times 10^3}{1000} \cong 6 \quad (4.1)$$

Por lo tanto, diariamente en un área de un metro cuadrado tenemos un potencial energético de:

$$P = \frac{5.89}{6} \cong 1kW \quad (4.2)$$

4.1.2. Energía eólica en Cundinamarca.

La energía eólica en Colombia no es una fuente muy utilizada debido a la geografía cambiante y a la incertidumbre en la dirección de los vientos. Uno de los proyectos eólicos en Colombia se encuentra en la región de la guajira en el Cabo de la vela, se conoce como parque eólico Jepírachi y aporta 19.5MW de electricidad a la región caribe [62].

En Cundinamarca el potencial energético de fuentes eólicas se ha medido desde el aeropuerto el dorado a través del parámetro de velocidad media del viento a una altura de 10 y 50 metros desde la superficie y se han encontrado valores de velocidad promedio por mes estipulados en la tabla 3 [63]:

Tabla 3 Tabla de velocidad promedio mensual del viento a 10 y 50 m sobre la superficie

Altura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10m	4.38	3.60	2.97	3.27	5.22	5.71	4.51	4.49	4.76	4.45	3.51	4.03
50m	5.12	4.21	3.47	3.82	6.11	6.68	5.29	5.25	5.58	5.20	4.11	4.71

Tabla 4 Tabla de valores promedio anual para la velocidad del viento a 10 y 50 m sobre la superficie.

Altura	Promedio (m/s)
10m	4.24
50m	4.96

Dado que para el proyecto la implementación del sistema eólico estaría a una altura menor a 50m utilizaremos el promedio de velocidad de 10 m para calcular el potencial energético. Como vemos en la ecuación (7) es necesario conocer la densidad del viento en la región a evaluar, para esto podemos usar la ecuación (8) que relaciona la temperatura ambiente y la altura sobre el nivel del mar con este parámetro [64].

$$\rho = 1.255 \left(\frac{288}{T+273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (4.3)$$

Definiendo a Cundinamarca a una altura media de 2475 m.s.n.m y una temperatura promedio de 22°C tenemos una densidad de:

$$\rho = 1.255 \left(\frac{288}{22+273} \right) e^{-\left(\frac{2475}{8435}\right)} = 0.9136 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (4.4)$$

Con estos datos podemos calcular el potencial eólico de la región:

$$Pv = \frac{1}{2} (0.9136) A (4.24)^3 \quad (4.5)$$

$$\frac{Pv}{A} = 35.9629 \left[\frac{W}{\text{m}^2} \right] \quad (4.6)$$

De esta manera si suponemos un rotor de 1m de radio, obtenemos una potencia de:

$$Pv = 35.9629 (1 * \pi) = 112W \quad (4.7)$$

4.1.3. Energía geotérmica en Cundinamarca.

Para identificar el potencial de generación de energía geotérmica, es necesario atravesar por una fase de exploración donde se busca una actividad volcánica importante [65]. En Cundinamarca, existe este tipo de formaciones en los municipios de Guasca, Suesca, Tabio, San Francisco, Ricaurte, Chipaque y Paratebuena donde este último tiene una de las fumarolas más calientes de la región con 75.4 grados centígrados, medidos a 2016 [66].

Como esta forma de energía es sectorizada es necesario hacer los estudios de prefactibilidad de en estas regiones para identificar el potencial energético real. Cundinamarca hasta el momento no posee una iniciativa geotérmica por lo cual no es posible identificar claramente su potencial. Mas sin embargo al encontrarse en una zona tan activa geológicamente la fase de exploración posee un riesgo menor [67].

4.2. Elección del método de generación de energía

Dado el estudio anterior se formula la siguiente tabla de potencial energético, donde se evidencia la superioridad de la energía fotovoltaica en comparación con las otras opciones.

Tabla 5 Tabla de comparación de Densidad Energética

Método	Densidad Energética [kWh/m ²]
Solar	1000
Eólico	36
Geotérmico	Desconocido

De esta manera, la fuente solar será la elegida para desarrollar la fuente de energía para el deshidratador. Entre la fotovoltaica y la termo solar es conveniente elegir a la fotovoltaica puesto que su instalación es más económica y tiene una tecnología desarrollada disponible para una instalación más eficiente y rápida:

4.3. Elección del método de deshidratación

Para elegir el método adecuado, procedemos a analizar los diferentes métodos según las características propuestas en la siguiente tabla.

Tabla 6 Tabla de comparación de las características de los métodos de deshidratación estudiados

Característica	Aire Caliente	Solar	Osmosis	Liofilización
Humedad final	30%	50%	20%	5-2%
Secado uniforme	Alto	Bajo	Medio	Alto
Encogimiento	Alto	Alto	Medio	Bajo
Conservación de las características iniciales	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Conservación, Nutrientes	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Costo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Según la anterior tabla se identificó al proceso de liofilización como el método con mejor desempeño en cuanto a las características finales, más, sin embargo, su alto costo de implementación es el obstáculo que impide su desarrollo. De forma paralela los estudios de Cohen y Yang [68] indican que el desempeño de los procesos de deshidratación depende según el producto utilizado y que uno de los sistemas que mejor se adapta al cambio en la materia prima es el proceso de liofilización lo cual da la oportunidad de implementar este mismo desarrollo otro tipo de productos.

Por lo anterior la liofilización será el método de deshidratación que se utilizará en el desarrollo de este proyecto.

4.4. Diseño del proceso de deshidratación

Elegida la liofilización como el método de deshidratación, se procede al diseño de un procedimiento enfocado en a la deshidratación de fresa. Teniendo en cuenta que este desarrollo está orientado a la mediana y pequeña producción agrícola y las limitaciones de tiempo que posee la liofilización, se elige una producción de 50KG de fresa por día como meta a procesar.

4.4.1. Propiedades físicas de la fresa

La fresa, de denominación fragaria (del latín, *fraga*), es un fruto de origen europeo que fue cultivado y expandido por todo el mundo gracias a su particular sabor y olor [69]. Las variedades de este fruto varían en el tamaño y en la mezcla acida y dulce de su sabor. A continuación, en la tabla XX, presentamos las principales propiedades físicas.

Tabla 7 Tabla de características termodinámicas de la fresa

Propiedad	Valor S. Ingles	Valor SI
Densidad (d)	$62.9566 \left[\frac{Lb}{ft^3} \right]$	$1008,46 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
Temperatura de congelación (Tc)	$30.6 [^{\circ}F]$	$-0.77 [^{\circ}C]$
Calor especifico antes de congelar (Cp)	$0.93 \left[\frac{BTU}{lb^{\circ}F} \right]$	$3.893 \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$
Calor especifico después de congelar a -40 (Cpc)	$0.27 \left[\frac{BTU}{lb^{\circ}F} \right]$	$1.130 \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$
Conductividad térmica a -40 (K)	$1.3952 \left[\frac{BTU}{h \cdot ft \cdot ^{\circ}F} \right]$	$2.41 \left[\frac{W}{mK} \right]$
Calor latente de Congelación	--	$305.94 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$

Los datos anteriores se obtuvieron aplicando las ecuaciones del manual de refrigeración Ashrae [70].

4.4.2. Diseño proceso de congelación IQF

La liofilización de alimentos requiere que el producto tenga un estado inicial a temperatura de congelación completa. Para lo cual existen diferentes métodos que varían según la velocidad de congelación y el principio utilizado. Es importante mencionar que una alta velocidad de congelación favorece la creación de micro-cristales de menor tamaño al interior de los tejidos del alimento y por ende un daño menor en los mismos [71]. Buscando esta característica, se implementará el método de congelación individual rápida (IQF) por sus siglas en inglés, el cual es un método que utiliza líquidos criogénicos para alcanzar una congelación completa en un tiempo muy corto [72]. En especial, se implementará un túnel de congelación con aspersión de nitrógeno líquido.

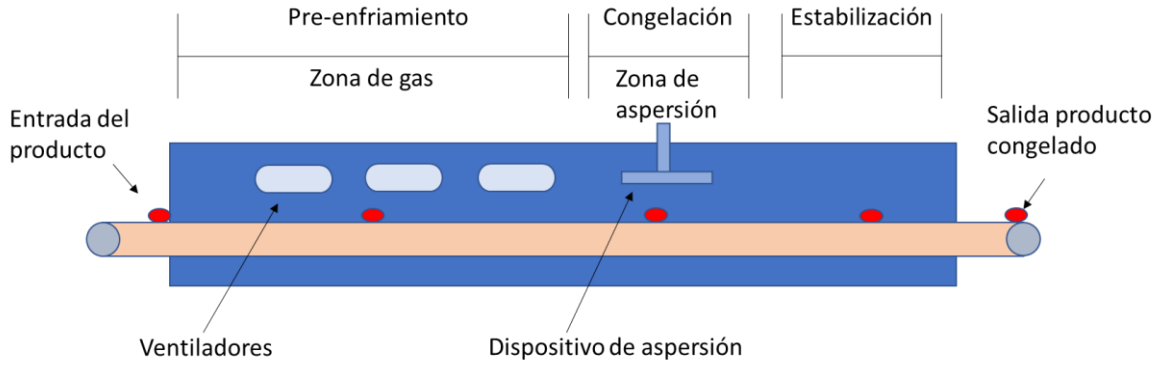


Figura 4.1 Esquema de funcionamiento de un túnel de congelación IQF

Fuente: autores.

De forma general, un túnel de congelamiento IQF está compuesto por tres zonas: (1) zona de Gas, (2) zona de aspersión y (3) zona de estabilización Ver Figura 4.1.

Cada zona contribuye a la extracción de calor siendo la zona de aspersión la etapa en la que el 65% del producto se congela [73]. Para el diseño de este proceso se inicia contemplando la longitud y el área de la banda transportadora para esto se utiliza el método propuesto por Pham que modifica la proposición de Plank y nos permite obtener el tiempo necesario para la congelación [74].

$$t = \frac{1}{E} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left(\frac{D}{h} + \frac{D^2}{2k_c} \right) \quad (4.8)$$

Donde:

t es el tiempo de congelación.

E es el factor de forma con valores entre 1-3 siendo 3 para una esfera, 2 para un cilindro infinito y 1 para una placa plana infinita.

$$\Delta H_1 = \rho c_{nc} (T_0 - T_{cm}) \quad (4.9)$$

$$\Delta H_2 = \rho \lambda + \rho c_c (T_0 - T_{cm}) \quad (4.10)$$

$$\Delta T_1 = 0.5(T_0 + T_{cm}) - T_A \quad (4.11)$$

$$\Delta T_2 = T_{cm} - T_A \quad (4.12)$$

$$T_{cm} = 1.8 + 0.263T_{fin} + 0.105T_A \quad (4.13)$$

T_A es la temperatura final del medio de congelación.

T_{fin} es la temperatura final al centro térmico del producto.

T_0 es la temperatura inicial del producto.

C_c es el calor específico del producto congelado.

C_{nc} es el calor específico del producto no congelado.

D es el semi espesor.

h es el coeficiente convectivo.

λ es el calor latente de fusión.

k_c es la conductividad térmica del alimento congelado.

Dado que es un túnel de enfriamiento dividido en dos etapas, utilizaremos la ecuación (14) para identificar el tiempo de pre congelación y congelación de forma individual. La parte de pre congelación se lleva a cabo en la zona de gas donde llevaremos el alimento 20°C a 0°C con una temperatura del gas de nitrógeno de -123°C al inicio y -60°C al evacuar la cámara. De forma similar, la fase de congelación se lleva en la zona de aspersion líquida, donde el producto pasará de 0°C a -40 °C. El coeficiente convectivo de la zona líquida será de $150 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$ y habrá que calcular el este coeficiente para la zona de gas.

Asumiendo la temperatura de -60°C en la salida de la zona de gas, la cual se usará posteriormente para mantener las bajas temperaturas en el proceso o de sublimación se obtiene lo siguiente.

De (4.9)(4.10)(4.11)(4.12),y (4.13)

$$T_{cm} = 1.8 + 0.263(-40) + 0.105(-123) = -21.63 \quad (4.14)$$

$$\Delta H_1 = (1008.46)(3.893 \times 10^3)(0 - (-21.63)) = 8.4938 \times 10^7 \quad (4.15)$$

$$\Delta H_2 = (1008.46)(305.94 \times 10^3) + (1008.46)(1.1304 \times 10^3)(0 - T_{cm}) \quad (4.16)$$

$$\Delta H_2 = 3.2946 \times 10^8 \quad (4.17)$$

$$\Delta T_1 = 0.5(0 + (-21.63)) - (-123) = 112.18 \quad (4.18)$$

$$\Delta T_2 = (-21.63) - (-123) = 101.36 \quad (4.19)$$

Lo cual efectuando la ecuación (4.8) encontramos que el tiempo en la zona líquida es de:

$$t = \frac{1}{3} \left[\frac{8.4938 \times 10^7}{112.18} + \frac{3.2946 \times 10^8}{101.36} \right] \left(\frac{0.02}{150} + \frac{0.02^2}{2(2.41)} \right) \quad (4.20)$$

$$t = 288.9620 \text{ s} = 4.8160 \text{ min} \quad (4.21)$$

Sabiendo que este es el tiempo que demora en congelar 0 a -40 °C un kilogramo de fresa podemos calcular el gasto de nitrógeno líquido si comparamos el cambio entálpico en este tiempo.

Cambio entálpico de la mora:

$$\frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{\rho} = \frac{8.4938 \times 10^7 + 3.2946 \times 10^8}{1008,46} = 410.9249 \left[\frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \right] \quad (4.22)$$

Cambio entálpico del nitrógeno: $276.4 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$ datos de la tabla 9.5 de entalpia nitrógeno líquido en [76].

Entalpía inicial $29.4 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$ a -195.8 °C

Entalpía final $305.8 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$ a -123 °C

Diferencia = $276.4 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$

Ahora haciendo la razón entre el cambio entálpico de la mora y el del nitrógeno obtenemos:

$$\frac{410.9249}{276.4} = 1.4867 \frac{\text{kg de N}_2}{\text{kg de fresa}} \quad (4.23)$$

Como el diseño está enfocado en un flujo de $50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ se puede definir un flujo másico de nitrógeno de $74.33 \frac{\text{kg de N}_2}{\text{h}}$, lo cual nos dice que 74.33 Kg de nitrógenos se evaporarían por lote de proceso. Este dato es importante ya que ahora sabemos que en la zona de gas

tendremos una disponibilidad de esta misma cantidad en forma de gas de nitrógeno a -123°C . Este dato se usará para el cálculo del coeficiente convectivo en la zona de gas.

Continuando con el diseño, procedemos a encontrar el tiempo de congelación en la zona gaseosa.

Para el coeficiente convectivo en la zona de gas es necesario calcularlo usando la correlación del número de Nusselt para flujo forzado en esferas.

$$Nu = \frac{0.37Re^{0.6}}{Pr^{\frac{2}{3}}} \quad ; \quad 17 < Re < 70000 \quad (4.24)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4.25)$$

Donde:

D es el diámetro de la esfera

h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor

k es el coeficiente de conductividad térmica

Re es el número de Reynolds

Pr es el número de Prandtl

Este coeficiente debe calcularse a la temperatura de película:

$$T_p = \frac{T_{pared} + T_{medio}}{2} \quad (4.26)$$

Donde:

T_{pared} es la temperatura superficial del producto

T_{medio} es la temperatura del medio de congelación

Para este caso la T_{pared} será la temperatura inicial del producto y la temperatura del medio será la temperatura a la cual el nitrógeno sale de la zona de aspersión -123°C .

De (33) obtenemos:

$$T_p = \frac{20 + (-123)}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (4.27)$$

$$T_p = -51.5^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

Según Yutopian [75], para esta temperatura podemos identificar un número de Prandtl de 0.69, una viscosidad dinámica de $\mu = 140.6 \times 10^{-7}$ (por interpolación), un valor para la conductividad térmica $Kn = 217.97 \times 10^{-4}$ (por interpolación) y una densidad de $1.6141 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (por interpolación). Con estos datos solo resta calcular el número de Reynolds para lo cual es necesario definir una velocidad de fluido acorde a las condiciones de salida del nitrógeno de la zona líquida.

Siendo el flujo másico de salida de la cámara de aspersión 74.33 kg de N₂ por hora, se puede decir que el flujo volumétrico de nitrógeno a temperatura de película es de:

$$Q = \frac{74.33}{1.6141} = 46.05 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (4.29)$$

En este punto es importante proponer el ancho de la banda transportadora para poder calcular el área por donde deberá fluir el nitrógeno gaseoso, en sentido si se define a la fresa como una esfera de 4cm, una fila de 5 fresas distribuida de forma uniforme supondría un ancho de 20 cm por lo cual se escoge este como el ancho de la banda. De igual forma para evitar sobrepasar la cantidad de nitrógeno disponible se propone establecer un flujo de trabajo menor dividiendo este por un factor de 1.2. De esta manera obtenemos que:

$$Qu = \frac{Q}{1.2} = \frac{46.05}{1.2} = 38.375 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (4.30)$$

Teniendo en cuenta que el radio máximo del ventilador no debe sobrepasar de 10cm se elige un ventilador comercial con diámetro de aspa de 3 pulgadas como el que se muestra en la Figura 4.2



Figura 4.2 Ventilador de All Points 26-3116

Fuente: Supplies, All Points Foodservices & Parts

Este tipo de ventiladores posee una porción del ventilador ocupada por el rotor por lo tanto es necesario restar esta porción para encontrar el radio útil. Dado que este dato no está disponible suponemos que el rotor ocupa un radio de 2.5cm, con esto obtenemos un radio útil de 5.12cm lo cual nos deja un Área de:

$$Ar = 0.0512^2 * \pi = 0.00823m^3 \quad (4.31)$$

Con este valor procedemos a calcular la velocidad necesaria para mover el flujo de nitrógeno deseado.

$$Q = AV \quad (4.32)$$

$$V = \frac{38.375}{0.00823} = 4659.710 \frac{m}{h} = 1.29 \frac{m}{s} \quad (4.33)$$

De esta manera se define el Re como:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (4.34)$$

$$Re = \frac{1.6141 * 1.29 * 0.0512}{140.6 \times 10^{-7}} = 7535.39 \quad (4.35)$$

Usando la ecuación (4.24) encontramos el Nu

$$Nu = \frac{0.37(7535.39^{0.6})}{0.69^{\frac{2}{3}}} \quad (4.36)$$

$$Nu = 100.44 \quad (4.37)$$

E igualando con la ecuación (4.25) podemos encontrar el coeficiente convectivo para la zona gaseosa.

$$h = \frac{Nu k}{D} \quad (4.38)$$

$$h = \frac{100.44 * 217.97 \times 10^{-4}}{0.04} = 54.73 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.39)$$

Habiendo calculado el nuevo coeficiente convectivo se procede a calcular el tiempo en la zona de gas de manera similar a calculado para la zona de aspersión. Esto no da un tiempo de:

$$t = 212.1470 \text{ s} = 3.53 \text{ min} \quad (4.40)$$

Con el tiempo en cada sección definido es posible encontrar la longitud final de la banda.

El cambio entálpico en esta zona es de:

$$\frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{\rho} = \frac{9.6161 \times 10^7}{1008,46} = 95.3547 \frac{Kj}{kg} \quad (4.41)$$

Longitud de la banda en la sección de gas:

$$L_g = \frac{50kg}{h} * \frac{0.28m}{kg} * \frac{h}{60min} * 3.53min = 0.823m. \quad (4.42)$$

Longitud de la banda en la sección de líquida:

$$L_l = \frac{50kg}{h} * \frac{0.28m}{kg} * \frac{h}{60min} * 4.8160min = 1.124m \quad (4.43)$$

Dada la longitud que tendrá la zona de gas, se hace evidente la necesidad de implementar más de un ventilador en este trayecto. De esta manera, podemos garantizar una velocidad de gas uniforme durante el paso del producto por esta fase. Según las proporciones del ventilador elegido será suficiente con disponer de 2 de estos. Para la zona de aspersión se propone usar una boquilla de aspersión cónica con un Angulo de salida de 70 ° la cual a una distancia de 14 centímetros logra abarcar la longitud completa de la banda dando como resultado una aspersión uniforme. De esta manera para cubrir la longitud total de la zona de aspersión se necesitan 6 boquillas separadas 20 centímetros entre si. Por consiguiente, la altura del túnel queda supeditada a la altura que necesita las boquillas siendo esta de 14cm.

Para finalizar el diseño es necesario evaluar las pérdidas debidas a las filtraciones de aire y a la conducción del calor desde el ambiente. Para minimizar estas pérdidas se utilizará una capa de polipropileno (aislante térmico) entre las dos láminas de acero inoxidable que conformaran la pared que recubre el túnel. El aislante tendrá una un grosor de 2 cm y la

lámina 2 mm. La carga por conducción en las paredes de túnel se puede calcular a través de la siguiente ecuación [76].

$$\dot{Q}_c = A_{ext} \frac{U(T_e - T_i)}{E} \quad (4.44)$$

Como vemos es necesario encontrar una constante de conductividad térmica equivalente a la disposición de las placas y el aislante. Para esto usamos la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{acero}}\right) + \left(\frac{E}{k_{poliuretano}}\right) + \left(\frac{1}{k_{acero}}\right)} \quad (4.45)$$

Donde:

k_{acero} es la constante de conductividad del acero con valor de $16,3 \frac{W}{mK}$.

$k_{poliuretano}$ es la constante de conductividad del poliuretano con valor de $0,023 \frac{W}{mK}$.

E es el espesor de la capa de aislante de poliuretano en este caso 10cm.

Con estos datos la constante equivalente es:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{16,3}\right) + \left(\frac{0,10}{0,023}\right) + \left(\frac{1}{16,3}\right)} \quad (4.46)$$

$$U = 0,2237 \frac{W}{mK} \quad (4.47)$$

Para calcular el Área exterior se suman las diferentes áreas que conforman las paredes del túnel, quedando de la siguiente manera:

$$A_{ext} = 2A_s + 2A_l \quad (4.48)$$

$$A_{sup} = L_t * A_{nc} \quad (4.49)$$

$$A_{lat} = L_t * A_{lt} \quad (4.50)$$

Resolviendo para los parámetros del túnel se tiene que:

$$A_{sup} = 2m * 0,2m = 0,4m^2 \quad (4.51)$$

$$A_{lat} = 2m * 0.14 = 0.28m^2 \quad (4.52)$$

Por lo tanto:

$$A_{ext} = 2(0.4) + 2(0.28) = 1.36m^2 \quad (4.53)$$

Resolviendo para la carga de calor se obtendría lo siguiente:

$$\dot{Q}_c = (1.36) \frac{(0.537)((20) - (-40))}{0.04} \quad (4.54)$$

$$\dot{Q}_c = 182.52W \quad (4.55)$$

Para la carga producto de la filtración de aire a temperatura ambiente se requiere mencionar que es posible mitigar su efecto utilizando una cortina de protección para rechazar la entrada del aire en un 90 %. Para este cálculo usaremos la ecuación la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_a = \rho V A C_p(T_{ext} - T_{int}) \quad (4.56)$$

Donde:

ρ es la densidad del aire con un valor de $1.243 \frac{kg}{m^3}$.

V es la velocidad permitida en ambientes de congelación con valor de $0.75 \frac{m}{s}$

A es el área de entrada del aire.

C_p es el calor específico del aire con valor de $1.0048 \frac{kJ}{kg K}$.

Como se utilizará una cortina para retener el aire que intenta entrar al túnel, el área se reducirá en un 90 % por lo tanto el área efectiva será de:

$$A_{ef} = 0.1(0.14 * 0.20) = 0.0028m^2 \quad (4.57)$$

Y evaluando la ecuación (63) obtenemos el flujo de calor.

$$\dot{Q}_a = (1.243)(0.75)(0.0028)(1.0048)(20 - (-40)) \quad (4.58)$$

$$\dot{Q}_a = 0.15W \quad (4.59)$$

Anteriormente se había calculado un cambio entálpico de $410.9249 \left[\frac{Kj}{kg} \right]$ y $95.382.67 \left[\frac{Kj}{kg} \right]$ para la zona líquida y gas respectivamente.

Para calcular la carga por calor sensible de la fresa se utilizan los datos de los cambios entálpicos multiplicados por el flujo másico del alimento.

$$\dot{Q}_s = 50 * \frac{1}{3600} * (410.9249 + 95.354) = 7.0317kW \quad (4.60)$$

La carga por calor latente se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_l = 0.924 \dot{m} \lambda \quad (4.61)$$

$$\dot{Q}_l = 0.924 \frac{50}{3600} * (305.94) = 3.9517kW \quad (4.62)$$

La carga total será la suma de cada carga parcial.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_c + \dot{Q}_a + \dot{Q}_s + \dot{Q}_l = 11.16kW \quad (4.63)$$

$$\%P = \frac{11.16 - (7.0317 + 3.9517)}{11.16} * 100 = 1.6\% \quad (4.64)$$

Se puede observar que solo un 1.6% de la energía necesaria para efectuar el proceso equivale a las pérdidas totales de operación.

En resumen, el diseño final para el sistema de congelación consiste en un túnel con medidas interiores de 20 cm de ancho por 14 cm de alto por 2 metros de largo el cual está recubierto por una pared formada por acero inoxidable y poliuretano de 10cm. En el interior de túnel podemos encontrar una andadora transportadora de 20 cm de ancho que moverá la fruta a razón de 50 Kg por hora a través de 3 fases de congelación. En la primera fase se efectuará el proceso de pre-congelación el cual disminuirá la temperatura de la fruta de 20 a 0 °C y tendrá una duración de 3.53min y equivale a los primeros 82.3 cm de recorrido. En esta etapa se encuentran 2 ventiladores de 3 pulgadas de diámetro de aspa los cuales moverán el gas de nitrógeno a 1.29m/s de forma cruzada sobre la fresa. Esta operación calentará el nitrógeno de -123 a -60°C. Posteriormente, en la segunda fase, se da lugar a la congelación completa del alimento la cual tiene una duración de 4.816 min y recorrerá una distancia de 1.12m. En

esta etapa se dispone de 6 boquillas de aspersión cónicas con ángulo de salida de 70° a una distancia de la banda de 14 cm. El flujo de salida total de nitrógeno será de 74Kg/ por hora. La *Figura 4.3 Diseño tunel IQF* muestra el esquema final del proceso de congelación.

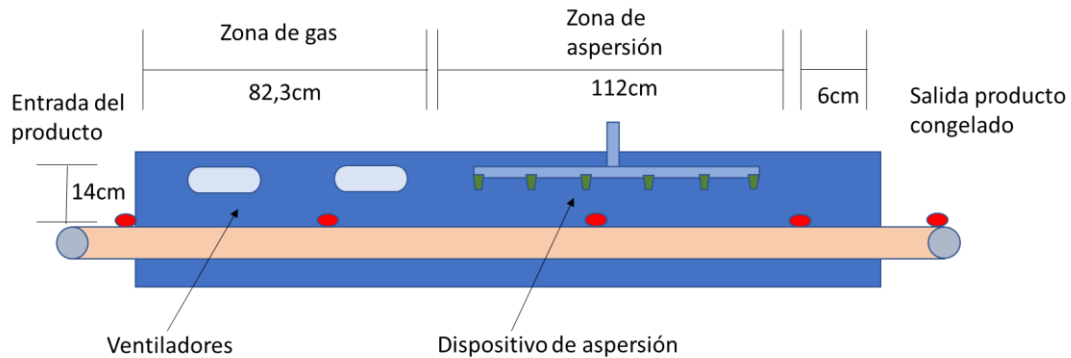


Figura 4.3 Diseño tunel IQF

Fuente: autores

4.4.3. Diseño proceso de sublimación

El proceso general de sublimación consiste en enfrentar el alimento a una presión de vacío mientras se calienta de forma progresiva. Por lo tanto, el diseño de un espacio de sublimación se centra en encontrar la cámara donde se aplicará el vacío, el sistema de condensación y el método de calentamiento del producto. Un esquema general del sistema se muestre en la Figura 4.4

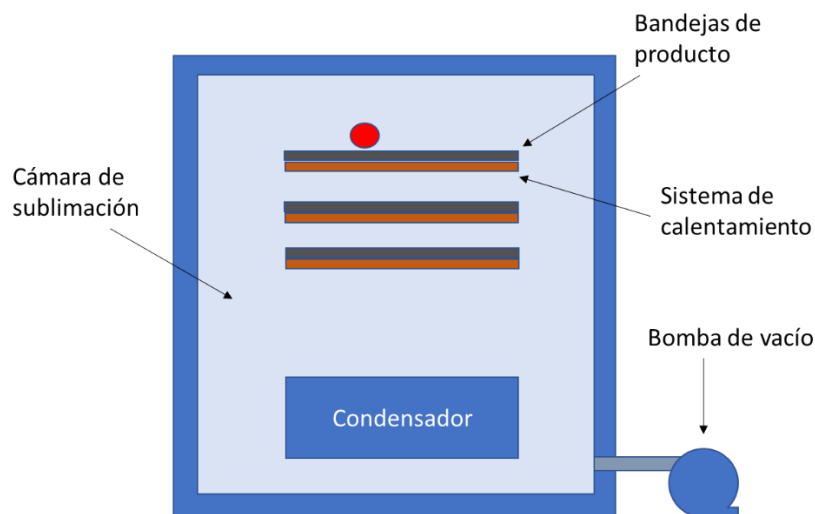


Figura 4.4 Esquema general de la cámara de sublimación

Fuente: autores

La presión y temperatura en este proceso corresponden a valores inferiores al punto triple ($P=4.5$ Torr y $T=0^\circ$). Como nuestro producto se encuentra a una temperatura de -40° una presión de 0.45 Torr o 60 Pa será suficiente para lograr la sublimación.

Para el proceso de sublimación es necesario generar un espacio adecuado para almacenar la fruta mientras se genera el proceso de sublimación. Uno de los parámetros fundamentales que definen las dimensiones de esta cámara son las bandejas donde se posicionan las fresas. Dado que la banda transportadora tiene un ancho de 20 cm las bandejas no pueden tener un ancho inferior a este. Proponiendo 6 como el número de bandejas de la cámara de sublimación se tendría una carga individual de 8.33 kg por bandeja. Si se sabe que un 1 kg de fresa ocupa un área de $0.056m^2$ para sostener la carga de cada bandeja será necesario un área de $0.466m^2$ lo cual se puede conseguir si definimos el ancho de la bandeja como 55 cm y el largo 90 cm.

Con el tamaño de las bandejas definido se puede encontrar un volumen aproximado de la cámara. Para esto, teniendo en cuenta una separación vertical entre bandejas de 10 cm, se propone una altura de 60 cm, lo cual genera un volumen de $0.297m^3$. Cada bandeja y su respectivo sistema de calentamiento ocupa un espacio dentro de la cámara de sublimación, por lo tanto, el volumen de aire a extraer será significativamente inferior al volumen de la cámara. Con una altura en conjunto entre el sistema de calentamiento y la bandeja de 5 cm (incluyendo a la fruta) cada bandeja ocuparía un volumen de $0.0247m^3$ que representa un volumen total de $0.1485m^3$ de esta manera el volumen de aire a extraer sería de la mitad.

La temperatura en el condensador es una de las variables que se deben controlar para mantener la fuerza que propicia la transferencia de masa, esto es debido al gradiente de presión de hielo vapor que se genera. Para este caso se utiliza un condensador a $-45^\circ C$ dado que según la relación hielo vapor la presión se genera una presión 4.54 Pa.

Como el condensador requiere que el vapor sublimado lo atraviese, es posible dejar la entrada al condensador justo debajo de la bandeja, de esta manera existirá un flujo grande de vapor que se desublimará favoreciendo al proceso. Esto puede incrementar el volumen de extracción de aire necesario, por lo tanto, se propone que el condensador posea un volumen igual al de la cámara de sublimación. En total el volumen de aire que se requiere extraer sería de $0.445m^3$. El propósito del liofilizador es obtener fresa con una humedad final de cerca del 2% , teniendo cuenta que en el proceso de sublimación se extrae cerca del 95% el tiempo de este proceso dominará la duración total de la deshidratación.

Para calcular el tiempo de deshidratación se puede hacer uso de método de modelación simétrica por calentamiento de una sola cara [77].

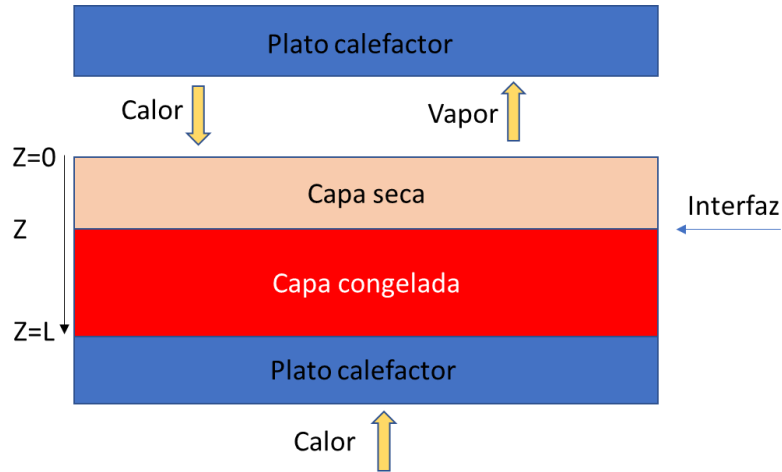


Figura 4.5 Esquema del proceso de liofilización

Fuente: autores

En la Figura 4.5 podemos observar el comportamiento del producto mientras se liofiliza. Se puede apreciar como la transferencia de masa ocurre desde la superficie hacia el interior, creando a su paso una separación llamada interfaz. El sistema de modelación de calentamiento simétrico por una sola capa contempla la transferencia de calor convectivo desde la placa superior a la superficie del producto, esto posibilita obtener un modelo matemático de la siguiente manera.

$$G(t) = -\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (4.65)$$

Siendo m la masa y A el área de sublimación.

La masa con respecto al tiempo se puede modelar de la siguiente manera:

$$M(t) = A Z \rho_s + A(L - Z)\rho_c \quad (4.66)$$

$$\frac{dM}{dt} = A (\rho_s - \rho_c) \frac{dZ}{dt} \quad (4.67)$$

Por lo tanto:

$$G(t) = (\rho_c - \rho_s) \frac{dZ}{dt} \quad (4.68)$$

Donde:

L es el espesor de la placa.

ρ_c es la densidad de la capa congelada.

ρ_s es la densidad de la capa seca.

Z es la posición de la interfaz de sublimación.

De forma análoga el calor necesario para la se puede calcular de la siguiente manera:

$$q = G(t)H_s \quad (4.69)$$

Que puede expresarse como el calor transferido desde la superficie hacia la interfaz de sublimación.

$$q = h(T_a - T_0) = \frac{k_s}{Z} (T_0 - T_s) \quad (4.70)$$

Igualando e integrando se puede obtener el tiempo de sublimación en términos de porcentajes de soluto.

$$t = \frac{\rho_c(X_c - X_s)H_sL^2}{2(1 - X_c)k_s(T_0 - T_s)} \quad (4.71)$$

Siendo:

ρ_c la densidad de la capa congelada

k_s la constante de conductividad térmica en la capa seca

H_s la entalpia de sublimación

T_s la temperatura del frente de sublimación

T_0 la temperatura de la superficie seca

X_c relación de solidos húmedos en la capa congelada

X_s relación de solidos húmedos en la capa seca

Para el caso de la fresa la constante de conductividad en la capa seca tiene un valor de $k_s = 0.024 \frac{W}{mK}$.

Se espera obtener un producto liofilizado con una temperatura de 10 °C, por lo tanto, esta será la temperatura de superficie seca T_0 . La temperatura de frente de sublimación será la temperatura de equilibrio hielo vapor a una presión de 60Pa, $T_s = 247.67K$. Con estos datos se procede a determinar el tiempo de liofilización para la fresa con una humedad inicial 93% hasta una humedad final 2% .

Por lo tanto

$$X_c = \frac{0.93}{0.07} = 13.28 \quad (4.72)$$

$$X_s = \frac{0.02}{0.98} = 0.020 \quad (4.73)$$

Tomando $2840 \frac{kJ}{kg}$ como la entalpia de sublimación se calcula el tiempo de liofilización.

$$X_s = \frac{0.02}{0.98} = 0.020 \quad (4.74)$$

$$t = \frac{(1008.46)(13.28 - 0.020)2840(4^2)}{2(1 + 13.28) (0.024)(10 - (-25.48))} \quad (4.75)$$

$$t = 2498.5466 = 41.64min \quad (4.76)$$

En resumen, la fase de sublimación será un proceso con una duración de 41.64min por carga, con un tiempo adicional mientras se acondiciona la presión para iniciar o finalizar el proceso. Se utilizará una presión de 60Pa y una temperatura igual a la temperatura congelación de la fresa (-40°C). la cámara de sublimación tiene un volumen de $0.445m^3$ y en su interior se dispondrán las bandejas con dimensiones de 55cm de ancho por 90 cm de largo. En la base de la cámara se posicionará el condensador que tendrá una temperatura de -45°C.

4.5. Diseño Estructural

Para comenzar la etapa de diseño mecánico del liofilizador se tomaron en cuenta cada una de las alternativas definidas de diseño, tomando los aspectos físicos y requerimientos relacionados con el proceso, con todo esto se busca obtener una estructura que cumpla a cabalidad con su objetivo. En el diseño estructural se tuvo en cuenta el tiempo de pre-enfriamiento y congelación de la fresa. Estos requerimientos son de vital importancia para lograr un adecuado enfriamiento y posterior congelamiento del producto. De acuerdo con todo esto y basados en el proceso de congelación IQF previamente observado y consultado para el estudio del proceso, se puede decir que se comparten muchas características comunes, algunas de ellas son los materiales, los elementos que hacen parte del sistema de refrigeración, entre otros.

Basado en esta investigación, se definió 50kg de fresa como la carga máxima del túnel IQF, con esta información se determinó el tiempo de pre-enfriamiento y congelación del proceso, para poder saber las dimensiones globales del diseño.

Tomando en cuenta los anteriores criterios, el dimensionamiento queda de la siguiente manera:

- Alto 79 cm
- Ancho 240 cm
- Profundidad 40 cm

La estructura del túnel está conformada por un esqueleto de perfil estructural cuadrado Coll roll, láminas de acero inoxidable, las cuales cubren tanto el exterior como el interior de la estructura. Para el aislamiento térmico se utilizó láminas de polipropileno de 4 cm de espesor, estas se ubican entre la lámina de acero inoxidable exterior e interior. Ver Figura 4.6 y Figura 4.7

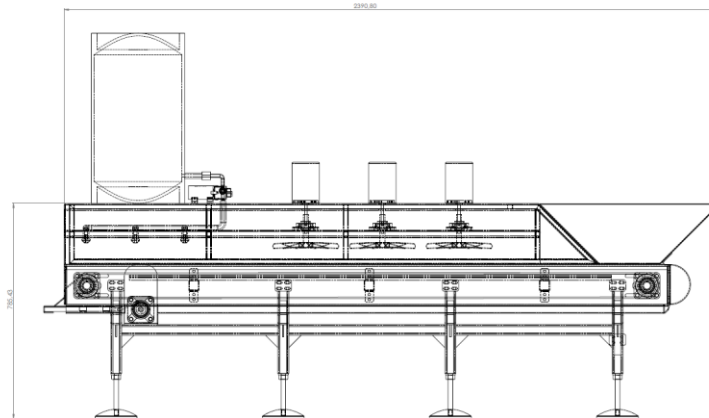


Figura 4.6 Vista frontal túnel de enfriamiento IQF

Fuente: autores

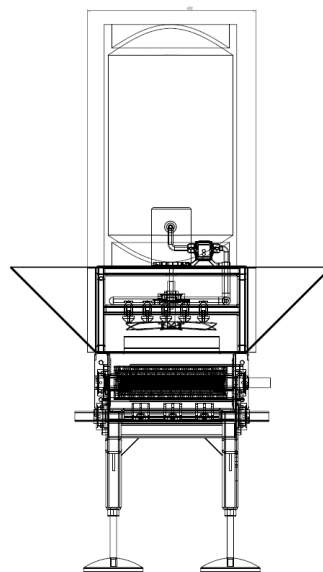


Figura 4.7 Vista lateral túnel de enfriamiento IQF

Fuente: autores

La estructura cuenta con tres zonas bien identificadas, en la parte superior se encuentra el área de congelación de la fresa con sus respectivos componentes, en la parte central se encuentra el área de transporte de la fruta, es decir la banda transportadora, con sus distintos rodamientos, y el área de alimentación de producto a la estructura, en este caso una tolva.

Por último, en la parte inferior una estructura que soporta todo el túnel y elementos adicionales, como depósitos de nitrógeno líquido y motores. Ver Figura 4.9.

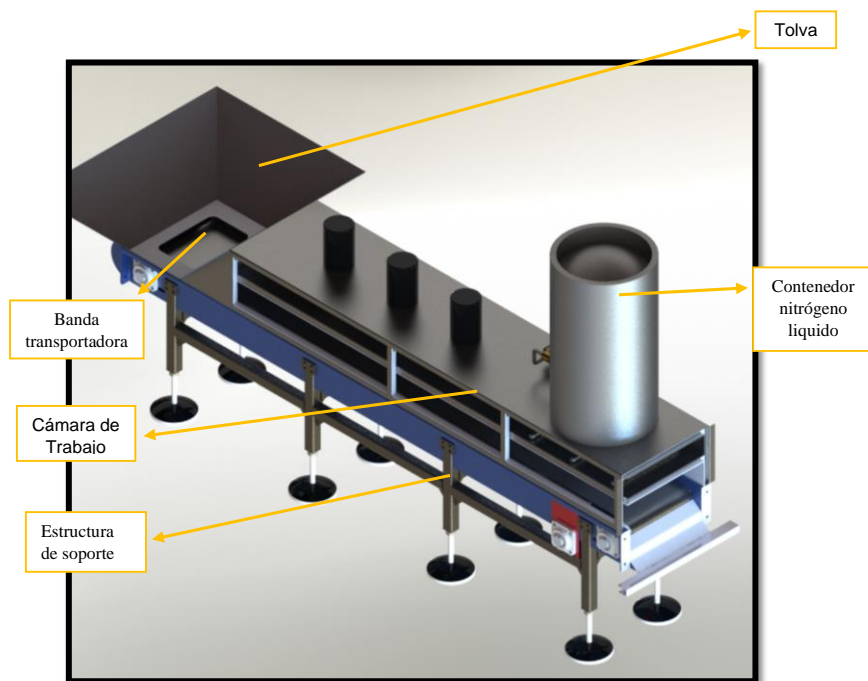


Figura 4.8 Estructura principal del túnel

Fuente: autores

En la cámara de congelación es donde se lleva a cabo el proceso de pre-enfriamiento y congelación de las fresas, en esta se encuentran ubicadas las aspas, la banda transportadora y el sistema de refrigeración, conformado por las tuberías, válvulas y aspas, ver Figura 4.9. Sus dimensiones son:

- Alto 13 cm
- Ancho 180 cm
- Profundidad 34 cm

Las paredes internas del túnel son de acero inoxidable con un espesor de 2mm, cuenta con una capa intermedia de poliuretano de 40mm, el cual sirve como aislamiento para evitar al máximo la transferencia de calor del túnel y el exterior.

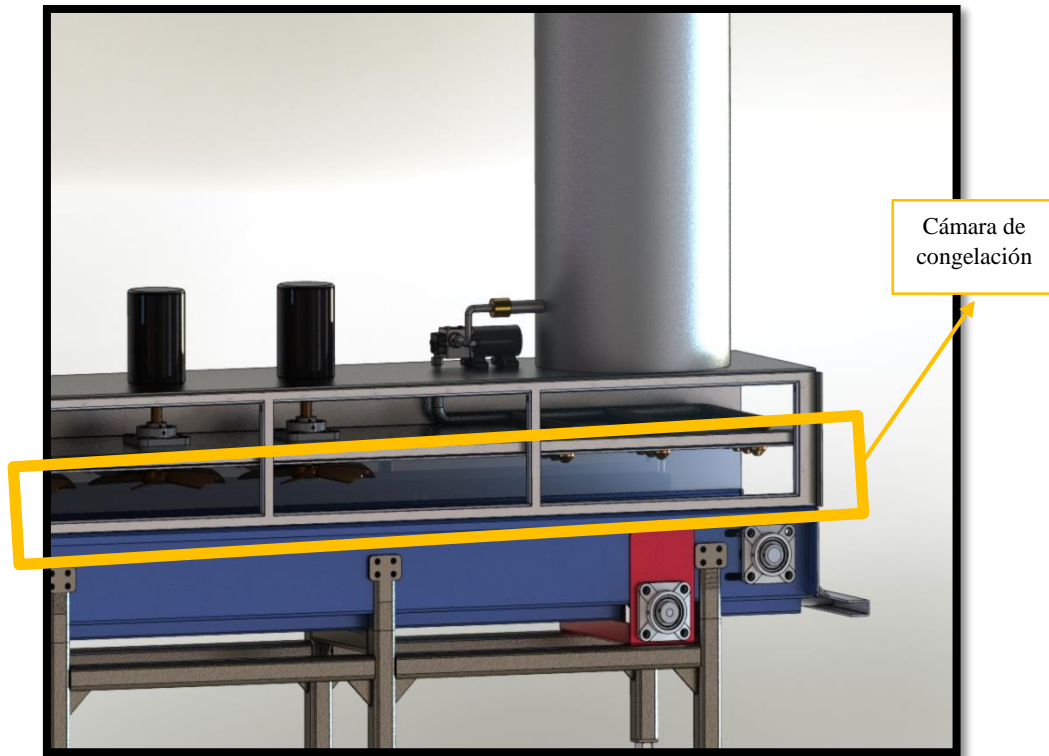


Figura 4.9 Túnel de congelación IQF

Fuente: autores

El túnel de congelamiento cuenta con tres puertas de acceso, esto para permitir su limpieza y mantenimiento. El material de las puertas es acero inoxidable con una capa de aislamiento térmico de poliuretano de 4 cm.

Para mantener la hermeticidad dentro del túnel, se colocaron empaques de caucho en el marco de la puerta y cerraduras para aplicar una mayor presión, para no generar pérdidas térmicas en el sistema. Ver Figura 4.10.

Las dimensiones de las puertas son:

- Alto 18 cm
- Ancho 58 cm
- Profundidad 6 cm

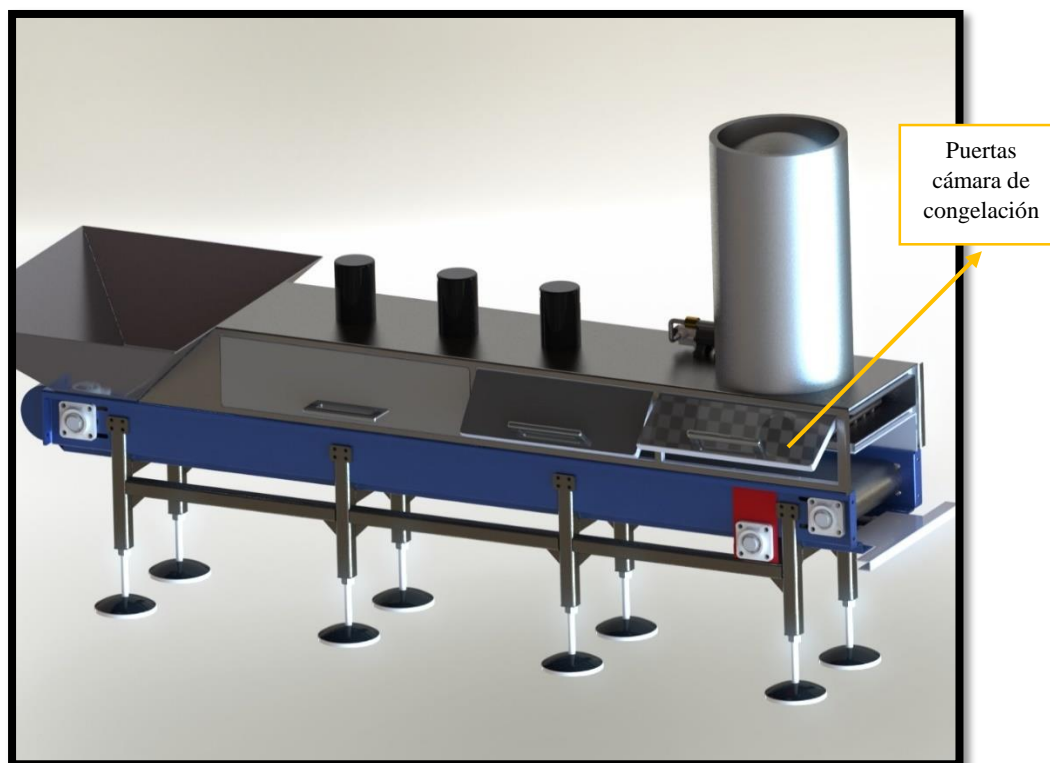


Figura 4.10 Puertas cámara de congelación

Fuente: autores

4.5.1. Diseño y selección del sistema de transporte de fresa

Para el diseño de la banda se tuvo en cuenta el material, para nuestro caso al ser utilizada para desplazar fresas, es necesario la utilización de acero inoxidable. Lo cual a diferencia del aluminio nos genera la ventaja de manejar cargas más grandes de producto.

Las dimensiones fueron determinadas teniendo en cuenta una serie de requerimientos como la estatura promedio de una persona, la cantidad de fresa que se requiere mover por minuto en la banda, el volumen o cantidad promedio del producto que se transportara. El total de peso que manejará la banda transportadora será de 50 kg. Que es el requisito inicial para el diseño del liofilizador.

4.5.1.1. Banda transportadora

El sistema de banda transportadora es de vital importancia dentro del proceso de congelación, ya que es el encargado de realizar la primera etapa del proceso, que consisten en llevar el producto hasta la ubicación deseada, para su posterior congelamiento.

En general las bandas y rodillos transportadores cumplen la función de recibir el producto de una forma continua, con el objetivo de llevarlo a otro punto a una velocidad e intervalos determinados.

Se han generado distintas formas que permitan el transporte de materiales, pero específicamente, la forma más eficiente y económica es la utilización de bandas transportadoras, puesto que la fabricación, instalación y posterior mantenimiento de rodillos y bandas es mucho más sencillo.

4.5.1.2. **Piezas que conforman la banda transportadora**

- Bastidor

El bastidor es aquella estructura que se encarga de soportar la banda transportadora, permitiendo con su diseño alcanzar grandes longitudes. Este se puede clasificar en diferentes tipos, los cuales se detallarán a continuación:

- Bastidor de dos largueros metálicos: son perfiles de acero laminado, que se apoyan en soportes que son del mismo material de los largueros, generando una unión lo bastante rígida. Esta es la configuración más común.
- Bastidor colgante: está formado por una serie de cables de acero que se tensan entre dos placas o largueros.
- Bastidor tubular: está formado por varios tubos, que se apoyan en soportes laterales de acero.

Se tomo de referencia el primer tipo de bastidor, por su estructura simple, teniendo en cuenta el ancho de la cinta transportadora y las velocidades. Cumple con las especificaciones previamente definidas. Ver Figura 4.11.

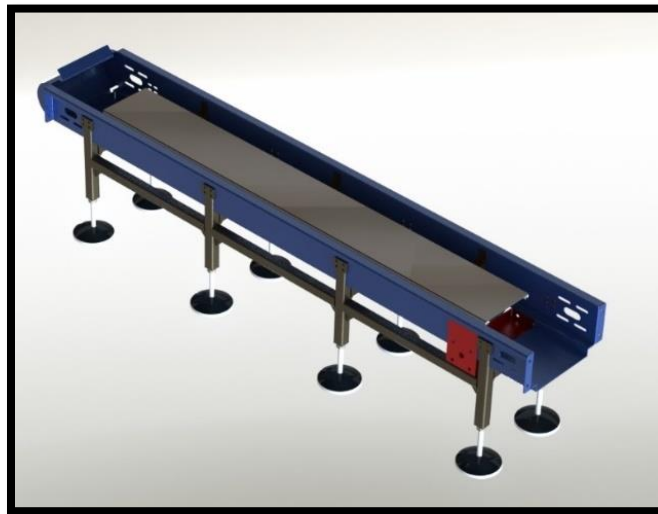


Figura 4.11 Bastidor túnel IQF

Fuente: autores

- Polea o tambor

La polea está conformada por un tubo de hierro, con un eje de acero, ver Figura 4.12 . Estos se ubican a cada extremo de la cama donde descansa la banda transportadora. La función principal es permitir la transmisión de movimiento.

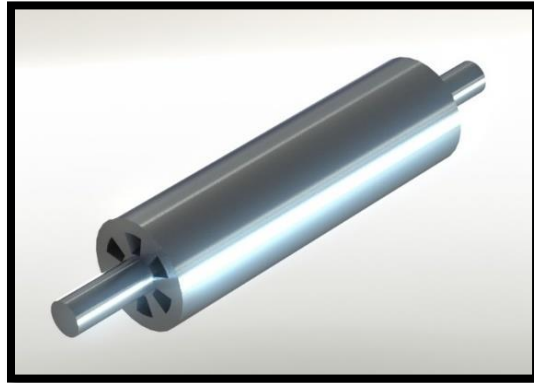


Figura 4.12 Tambor túnel IQF

Fuente: autores

- Rodamientos

Los rodamientos son utilizados para disminuir la fricción que se puede originar entre la polea y el bastidor. Ver Figura 4.13 . En este caso en el diseño se incluyeron en cada articulación rotacional de la banda transportadora.

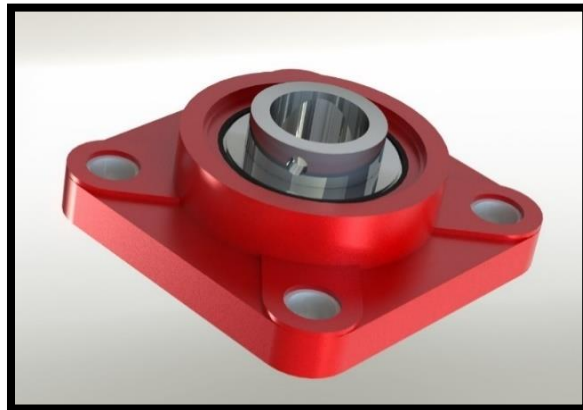


Figura 4.13 CAD Rodamientos.

Fuente: autores

- Tambor motriz

En esta polea es donde se realiza el trabajo, cuenta con un eje más largo para realizar la transmisión desde el motor, ya sea con cadenas o correas. Ver Figura 4.14



Figura 4.14 Tambor motriz túnel IQF.

Fuente: autores

4.5.2. Calculo banda transportadora

Teniendo en cuenta que la banda transportadora será utilizada principalmente para el transporte de alimentos y que será enfocada en su mayoría a bajas cargas. Esta banda estará encargada solamente de llevar la fresa a una velocidad constante, con el fin de generar un pre-enfriamiento y posterior congelación adecuada del producto.

Partiendo del requisito que el peso de producto promedio debe ser de 50kg por proceso completo, y teniendo en cuenta que el peso promedio de una fresa es de 25 g podemos calcular la cantidad total de fresas involucradas.

$$n = \frac{W_t}{W_i} \quad (4.77)$$

$$D_p \quad (4.78)$$

Donde:

n es el número total de fresas

W_t es el peso total por congelar,

W_i es el peso individual

D_p es el diámetro promedio de cada fresa.

$$n = \frac{50000 \text{ g}}{28 \text{ g}} \approx 1786 \text{ fresas} \quad (4.79)$$

$$D_p = 4 \text{ cm} \quad (4.80)$$

Calculamos la cantidad de fresas en el proceso y la distancia que ocupan estas en la banda transportadora.

$$1 \text{ kg fresa} \rightarrow \frac{1786 \text{ fresas}}{50 \text{ kg fresa}} \rightarrow 35 \text{ fresas} \quad (4.81)$$

Teniendo en cuenta la organización de las fresas está en filas y columnas (ver Figura 4.15), obtenemos la distancia total que ocupa 1 kg de la misma. Tomamos el diámetro promedio de cada fresa y el número de filas.

$$D_t = nD_p \quad (4.82)$$

D_t es la distancia total que ocupa 1kg de fresa, n es el número de filas y D_p el diámetro promedio de cada fresa

$$D_t = 7 \times 4 \text{ cm} = \frac{28 \text{ cm}}{\text{kg}} = \frac{0.28 \text{ m}}{\text{kg}} \quad (4.83)$$

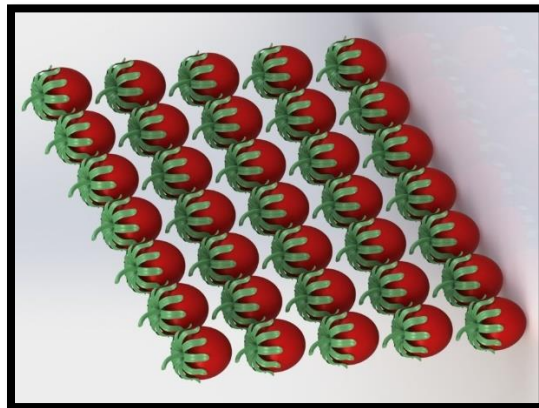


Figura 4.15 Organización por kilogramo de fresa en túnel IQF

Fuente: autores

4.5.2.1. Determinación velocidad banda transportadora

Para determinar la velocidad de la banda, tomamos la cantidad de fresa como punto de partida. En este caso 50 kg de fresa por hora de funcionamiento. También se calculó el espacio necesario por cada kilogramo de fresa, el cual fue de 0.28 m/kg. La velocidad se calculó con la siguiente ecuación.

$$V = C_f D_t \quad (4.84)$$

V es la velocidad de la banda transportadora necesaria, C_f es la capacidad de fresa por hora y D_t la distancia que ocupa un kilogramo de fresa.

$$V = 50 \text{ kg/h} * 0.28 \text{ m/kg} = 14 \text{ m/h} = 3.88 \text{ m/s} \quad (4.85)$$

La velocidad de la banda requerida para el proceso es de 3.88 m/s, es necesario adicionar un 30% más de velocidad, para garantizar la eficiencia de la banda transportadora, y seleccionar el motor adecuado para el proceso.

$$V + 0.3V = 3.88 \text{ m/s} + 1.164 \text{ m/s} = 5.044 \text{ m/s} \quad (4.86)$$

$$5.044 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{3.28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 992.91 \text{ PFM} \quad (4.87)$$

la velocidad final de la banda para los cálculos del motor es de 5.044 m/s.

4.5.2.2. Determinación capacidad de carga

Para la determinación de la capacidad de carga de la banda transportadora, es necesario conocer el peso total de las fresas por metro ocupado en la misma. Partimos de que el peso promedio de cada fresa es de 28 g y que esta ocupa un espacio promedio de 4cm en la banda. A partir de la siguiente ecuación podemos calcular la capacidad de carga.

$$C_c = \frac{n_f n_c W_f}{D_b} \quad (4.88)$$

C_c es la capacidad de carga, n_f es el número de filas de fresa, n_c es el número de columnas totales de fresa que ocupan toda la banda y D_b es la distancia total ocupada por la fresa.

$$n_f = 5 \text{ fresas/fila} \quad (4.89)$$

$$D_b = 56 \text{ columnas} \quad (4.90)$$

$$W_f = 0.028 \text{ Kg/fresa} \quad (4.91)$$

$$D_b = 205 \text{ cm} \quad (4.92)$$

$$C_c = \frac{5 * 56 * 0.028 \text{ kg}}{2.05 \text{ m}} = 3.824 \text{ kg/m} \quad (4.93)$$

$$3.824 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * \frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ ft}} * \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 2.5648 \text{ lb/ft} \quad (4.94)$$

4.5.2.3. Selección de banda transportadora

La selección de la banda transportadora se realizó partiendo de una serie de requisitos que son de vital importancia en el proceso de congelación del producto. Estas características que debe poseer la banda, es que sirva para el transporte de alimentos y que soporte bajas temperaturas. Por esto se escogió una banda transportadora plástica modular. Ver Figura 4.16.

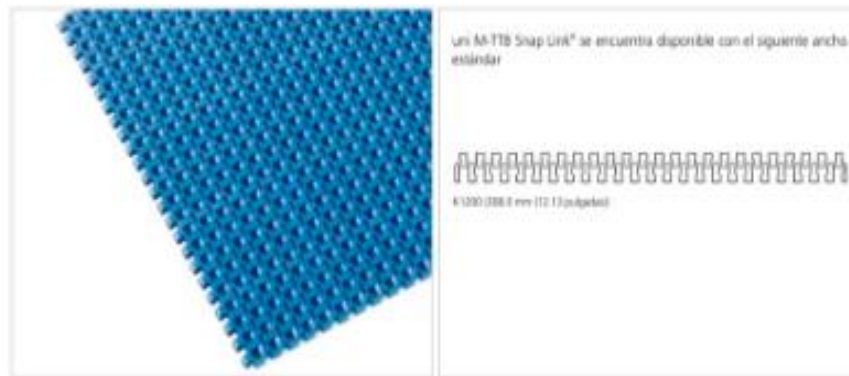


Figura 4.16 Tipo de banda transportadora seleccionada

Fuente: Ammeraal belthec “Plasticas modulares Bandas catálogo”, pág. 18

4.5.2.4. Características principales banda transportadora

Este tipo de banda transportadora seleccionada se caracteriza por tener una superficie fácil de limpiar. Gracias a esto resulta una solución perfecta para el tratamiento de alimentos. Su

resistencia a bajas temperaturas puede ser utilizada en aplicaciones de enfriamiento, congelación y desecado.

Entre las principales características y ventajas de funcionamiento se encuentran:

- Posee una mayor resistencia en comparación a las bandas transportadoras convencionales, lo cual permite tramos más largos.
- Al estar fabricada en material POM-D estándar que contiene un componente autolubrificante y mejores características antiadherentes, permite reducir el coeficiente de fricción entre el bastidor y la banda transportadora.
- Al poseer una menor área de contacto con el producto es ideal para su utilización en procesos de congelación IQF, generando un enfriamiento gradual uniforme.

4.5.2.5. Cálculo potencia motor banda transportadora

Para determinar la potencia del motor de la banda transportadora es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{(W + w) * f * s}{33000} \quad (4.95)$$

W es el peso que la carga ejerce sobre la banda, w es el peso de la banda, f es el coeficiente de fricción y s es la velocidad de trabajo.

Pesos de banda

Material de la banda	POM-D		PP	
	kg/m ²	lb/ft ²	kg/m ²	lb/ft ²
Material del pasador	PP		PP	
uni M-TTB uni M-TTB CS	5.8	1.19	4.2	0.86

Esfuerzo de tracción admisible

Material de la banda	POM-D		PP	
	N/m	lbf/ft	N/m	lbf/ft
Material del pasador	PP		PP	
uni M-TTB uni M-TTB CS	22500	1541	13000	891

Figura 4.17 Pesos específicos banda transportadora

Fuente: Fuente: Ammeraal belthec “Plasticas modulares Bandas catálogo”, pág. 18

Mediante los datos de la Figura 4.17 se obtienen las características necesarias para el cálculo de potencia mecánica del motor. En este caso se escogió una banda transportadora

plastico modular uni M-TTB Snap Link®, la cual cuenta con un ancho de 30 cm, un peso de de $1.19 \text{ lb}/\text{ft}^2$ y un coeficiente de friccion de 0.4.

4.5.2.6. **Calculo del peso de la carga que se ejerce en la banda transportadora**

El peso de la carga a la que se va a enfrentar la banda transportadora, se calcula con la capacidad de carga y la distancia total que ocupa la misma.

$$W = C_c * D_b \quad (4.96)$$

$$W = 2.5648 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} * 6.725 \text{ ft} \quad (4.97)$$

$$W = 17.24 \text{ lb} \quad (4.98)$$

4.5.2.7. **Calculo del peso de la banda transportadora**

Para poder saber el peso de la banda transportadora, es necesario saber el tamaño total de la banda transportadora y el peso por pie cuadrado del material de la misma.

$$w = w_m * A_t \quad (4.99)$$

w_m es el peso por pie cuadrado tomado de la anterior figura y A_t es el área total de la banda extendida.

$$w = 1.19 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} * 6.725 \text{ ft} * 0,984252 \text{ ft} \quad (4.100)$$

$$w = 7.876 \text{ lb} \quad (4.101)$$

Al tener el peso de la carga y el peso de la banda transportadora, se puede calcular la potencia del motor.

$$HP = \frac{(W + w) * f * s}{33000} \quad (4.102)$$

$$W = 17.24 \text{ lb} \quad (4.103)$$

$$w = 7.876 \text{ lb} \quad (4.104)$$

$$s = 992.91 \text{ PFM} \quad (4.105)$$

$$f = 0.4 \quad (4.106)$$

$$HP = \frac{(17.24 \text{ lb} + 7.876 \text{ lb}) * 0.4 * 992.91 \text{ PFM}}{33000} \quad (4.107)$$

$$HP = 0.3022 \text{ HP} \quad (4.108)$$

$$HP_{ideal} = (0.3022 \text{ HP}) * (1.5 \text{ "factor de servicio"}) \quad (4.109)$$

$$HP_{ideal} = 0.4533 \text{ HP} \approx 0.5 \text{ HP} \quad (4.110)$$

4.5.2.8. Selección motor banda transportadora

Para la selección del motor eléctrico se tuvo en cuenta la potencia mecánica necesaria para generar el movimiento en la banda transportadora, otro de los requerimientos principales fue el tipo de motor, el cual puede ser de corriente alterna o corriente continua. En este caso fue seleccionado un motor de corriente continua monofásico, que cumple con los requerimientos eléctricos y mecánicos necesarios. Ver Figura 4.18.



Figura 4.18. Motor de corriente continua monofásico seleccionado

Fuente: siemens “Motores eléctricos catálogo”, pág. 40

Este motor se caracteriza por tener un alto par de arranque y baja corriente de arranque. Por lo tanto, es ideal para su utilización en la banda transportadora ya que esta principalmente enfocado a aplicaciones que requieran arranque con carga.

Potencia CP	Tipo	Catálogo Spiridon	Velocidad nominal r.p.m.	Tensión nominal Volt	Corriente nominal A	Factor de servicio	Corriente a F.S. A	Peso neto kg	Long. L mm
Arranque por capacitor, base rígida, con balero (uso general)									
0.25	1RF30522YC41	A7B10000009460	3540/5230	127/220	7.6/3.0	2.0	8.3/3.9	8.3	254
0.33	1RF30532YC41	A7B10000009461	3535/3515	127/220	8.5/3.5	2.0	9.7/4.5	8.4	254
0.50	1RF30542YC41	A7B10000009462	3535/3515	127/220	9.9/4.1	1.8	12.4/6.2	9.7	271
0.75	1RF30552YC41	A7B10000009463	3530/3500	127/220	12.4/5.3	1.6	14.6/7.1	10.5	271
1.0	1RF30562YC41	A7B10000009464	3535/3510	127/220	15.5/6.6	1.6	18.6/9.4	11.9	291
1.5	1RF30572YC41	1RF30572YC41	3505/3470	127/220	18.5/9.4	1.2	20.4/10.2	12.8	291
2	1RF30582YC41	1RF30582YC41	3480/3460	127/220	21.6/11.0	1.15	24/12	15.5	313

Figura 4.19 Especificaciones técnicas motor monofásico

Fuente: siemens “Motores eléctricos catálogo”, pág. 42

Fijándose en la Figura 4.19 de especificaciones del motor y basándose en la potencia que se calculó, que es de 0.5 HP, sus características principales son:

Velocidad nominal	3535 rpm
Tensión nominal	127 V
Corriente nominal	9.9 A
Factor de servicio	1.5

4.5.2.9. Cálculo de relación de transmisión

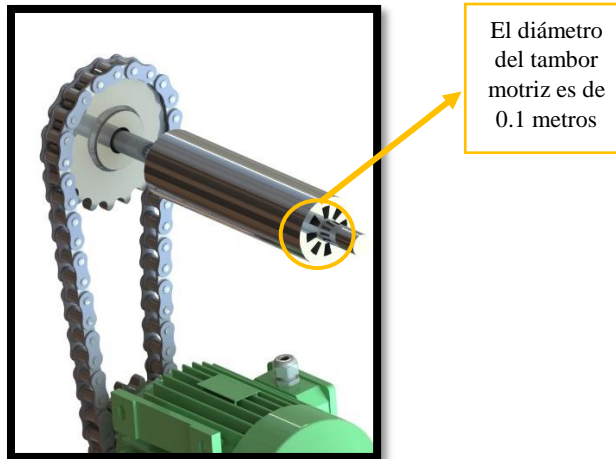


Figura 4.20 Diámetro tambor motriz

Fuente: autores

Partiendo de que la velocidad lineal requerida en nuestra banda transportadora es de 3.88 m/s y que el radio del tambor motriz es de 0.05 m (ver Figura 4.20) procedemos a calcular las revoluciones por minuto necesarias para el proceso en cuestión.

$$V = \omega * r \quad (4.111)$$

V es la velocidad lineal que debe tener la banda transportadora, ω es la velocidad angular y r el radio del tambor motriz.

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (4.112)$$

$$\omega = \frac{3.88 \text{ m/s}}{0.05 \text{ m}} = 77.6 \text{ rad/s} \quad (4.113)$$

$$77.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{60}{1 \text{ min}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = 741.02 \text{ rpm} \quad (4.114)$$

Las revoluciones necesarias para realizar el proceso de enfriamiento de la fresa y manteniendo la velocidad constante es de 741.02 rpm. Es necesario calcular la relación de transmisión, tomando como entrada la velocidad nominal del motor, esta es de 3535 rpm. La salida son las revoluciones requeridas para el movimiento de la banda transportadora.

$$\omega_{in} = 3535 \text{ rpm} \quad (4.115)$$

$$\omega_{out} = 741.02 \text{ rpm} \quad (4.116)$$

$$i = \frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} = \frac{Z_{in}}{Z_{out}} \quad (4.117)$$

i es la relación de transmisión, ω es la velocidad angular, D es el diámetro de cada piñón y Z es el número de dientes.

$$i = \frac{741}{3535} \approx \frac{750}{3500} \rightarrow \frac{3}{14} = 3:14 \approx 0.2114 \quad (4.118)$$

La relación de transmisión es de 3:14, lo que significa que, por cada 14 vueltas en el engranaje motriz, el engranaje conducido da 3 vueltas.

Para calcular el número de dientes de los piñones es necesario despejar la anterior ecuación, que relaciona las velocidades angulares con el número de dientes.

$$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{Z_{in}}{Z_{out}} \quad (4.119)$$

$$\omega_{out} Z_{out} = Z_{in} \omega_{in} \quad (4.120)$$

$$Z_{out} = \frac{Z_{in} \omega_{in}}{\omega_{out}} \quad (4.121)$$

Definiremos al piñón conductor o de entrada con 12 dientes. Por lo tanto, sabiendo que ω_{in} es de 3535 rpm y ω_{out} es de 741.02 rpm procedemos a calcular el número de dientes del piñón conducido.

$$Z_{out} = \frac{3535 \text{ rpm} * 12 \text{ dientes}}{741.02 \text{ rpm}} \quad (4.122)$$

$$Z_{out} = 57.24 \text{ dientes} \approx 57 \text{ dientes} \quad (4.123)$$

PIÑONES
1/2 (40)

**TABLA DE DIMENSIONES
DE LOS PIÑONES INTERMEC PASO 1/2" (12.7 mm)**
para Cadena ANSI No. 40 Tipo B Sencillos, Dobles y Triples

Ref.	D	SENCILLOS			Ref.	DOBLES			Ref.	TRIPLES		
		Dm	L	d		Dm	L	d		Dm	L	d
40B9 R	42.4	27	22	12.70	40-2B9 R	23	38	12.70	40-3B9 R	23	54	12.70
40B10 R	46.7	32	22	12.70	40-2B10 R	27	38	12.70	40-3B10 R	27	54	12.70
40B11 R	50.8	35	22	12.70	40-2B11 R	37	38	12.70	40-3B11 R	37	54	12.70
40B12 R	55.1	40	22	12.70	40-2B12 R	40	38	12.70	40-3B12 R	40	54	12.70
40B13	59.2	40	22	12.70	40-2B13	38	38	12.70	40-3B13	38	54	12.70
40B50	233.7	89	28	19.05	40-2B50	95	44	25.40	40-3B50	82	60	25.40
40B57	237.7	89	28	19.05	40-2B57	95	44	25.40	40-3B57	82	60	25.40
40B58	241.8	89	28	19.05	40-2B58	95	44	25.40	40-3B58	82	60	25.40
40B59	245.9	89	28	19.05	40-2B59	95	44	25.40	40-3B59	82	60	25.40
40B60	249.9	89	28	19.05	40-2B60	95	44	25.40	40-3B60	82	60	25.40
40B61	252.7	89	28	19.05	40-2B61	95	44	25.40	40-3B61	82	67	25.40
40B62	256.7	89	28	19.05	40-2B62	95	44	25.40	40-3B62	82	67	25.40

Figura 4.21 Especificaciones piñones seleccionados para cadena No.40

Fuente: Intermecc “piñones y cadenas catalogo”, pág.22

Podemos concluir que en el diseño se utilizó cadena No 40. Los dientes del piñón conductor son 12 y los del piñón conducido son de 57 dientes. Ver Figura 4.21

4.5.2.10. **Calculo longitud de la cadena**

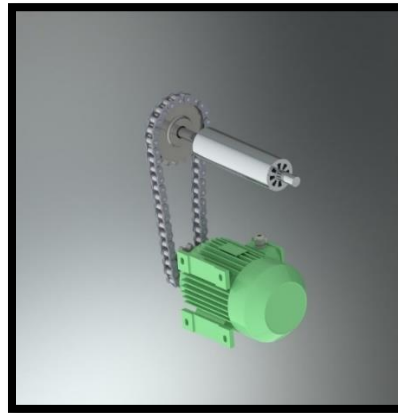


Figura 4.22 Transmisión banda transportadora

Fuente: autores

En la Figura 4.22 se muestra el esquema de transmisión para la banda transportadora. Para el cálculo de la longitud de la cadena debe tomarse en cuenta la distancia entre centros, en los engranajes que hacen parte de la transmisión. Partimos de que el conductor tiene 12 dientes y que el conducido 57 dientes. Tenemos una distancia de centros de 40 cm. Con esta información podemos calcular su longitud total con la siguiente expresión.

$$L = 2c + \frac{N + n}{2} + \frac{\left(\frac{N - n}{2\pi}\right)^2}{c} \quad (4.124)$$

c es la distancia entre centros de los ejes en pasos de la cadena, N es el número de dientes del engranaje conductor y n es el número de dientes del engranaje conducido.

El paso de nuestra cadena es de $\frac{1}{2}$ in = 12.7 mm, procedemos a calcular la longitud de nuestra cadena sabiendo:

$$c = 40 \text{ cm} \quad (4.125)$$

$$N = 12c = 40 \text{ cm} \quad (4.126)$$

$$n = 57 \quad (4.127)$$

$$L = 2(40\text{cm}) + \frac{12 + 57}{2} + \frac{\left(\frac{12 - 57}{2\pi}\right)^2}{40\text{cm}} \quad (4.128)$$

$$L = 115.78 \text{ cm} \quad (4.129)$$

La distancia total de la cadena debe ser de 115.78 cm.

4.5.3. Calculo velocidad angular motores de las aspas

Conociendo el valor de la velocidad tangencial de las aspas, podremos calcular la velocidad angular necesaria para el proceso, y de esta forma escoger el motor más adecuado. La velocidad angular de las aspas debe ser de 1.29 m/s y el radio de 0.0381 m. A continuación, utilizaremos la siguiente expresión para conocer la velocidad angular requerida.

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (4.130)$$

$$\omega = \frac{1.29 \text{ m/s}}{0.0381 \text{ m}} \quad (4.131)$$

$$33.85 \frac{rad}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{1 rev}{2\pi rad} = 323.32 rpm \quad (4.132)$$

Podemos observar que la velocidad angular requerida por las aspas debe ser de 323.32 rpm. Con este dato se buscará el motor adecuado para la aplicación. Ver Figura 4.23.



Figura 4.23 Motorreductor con Encoder

Fuente: Pololu “Motorreductores DC”, pág.9



Gear Ratio	No-Load Speed 12 V	Stall Torque 12 V	Stall Current 12 V	 With Encoder	 Without Encoder
1:1	11,000 RPM	5 oz-in	5 A	motor without gearbox	
19:1	500 RPM	84 oz-in	5 A	37Dx52L mm	37Dx52L mm
30:1	350 RPM	110 oz-in	5 A	37Dx52L mm	37Dx52L mm
50:1	200 RPM	170 oz-in	5 A	37Dx54L mm	37Dx54L mm
70:1	150 RPM	200 oz-in	5 A	37Dx54L mm	37Dx54L mm
100:1	100 RPM	220 oz-in	5 A	37Dx57L mm	37Dx57L mm
131:1	80 RPM	250 oz-in	5 A	37Dx57L mm	37Dx57L mm

Figura 4.24 Especificaciones técnicas motorreductor

Fuente: Pololu “Motorreductores DC”, pág.11

El motor que escogimos fue un motor de relación 30:1, el cual nos permite obtener gracias a su caja reductora una velocidad angular máxima de 350 rpm. Ver Figura 4.24 . En la Figura 4.25 podemos observar la ubicación de los motores y aspas en el túnel IQF.

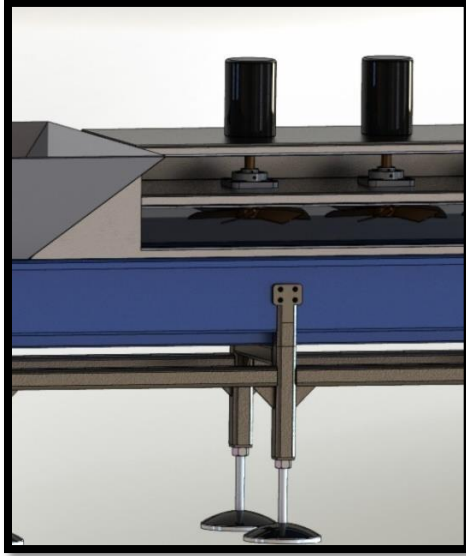


Figura 4.25 Ubicación aspas en túnel IQF

Fuente: autores

4.5.4. Calculo bomba tanque nitrógeno liquido

Según los cálculos para el congelamiento de la fresa, los cuales nos arrojan un caudal de 74 L/h, procedemos a escoger una bomba para el tanque de nitrógeno liquido es estas caracterisitcas.

4.5.5. Diseño estructural liofilizador

El liofilizador está compuesto de una estructura principal, la cual se encuentra dividida en tres subsistemas importantes. El primero conformado por una cámara de vacío, con su unidad de porta bandejas. El segundo con el sistema de elevación y la estructura que cubre la cámara de vacío. Por último, la parte de calentamiento de la fresa, la cual está conformada por resistencias.

En el diseño estructural se tuvo en cuenta los tiempos de generación de vacío y calentamiento de la fresa, estos requerimientos son de vital importancia para lograr una adecuada deshidratación del producto. De acuerdo con todo esto y basados en el proceso de liofilización previamente investigados, se puede decir que se comparten muchas características comunes, algunas de ellas son los materiales de fabricación, el sistema de vacío empleado y el proceso de calentamiento.

Basado en esta investigación, se definió 50 kg de fresa como la carga máxima del liofilizador, con esta información se determinó el tiempo de generación de vacío y calentamiento en el proceso, para poder saber las dimensiones globales de su diseño.

4.5.5.1. Estructura

Tomando en cuenta los anteriores criterios, el dimensionamiento queda de la siguiente manera:

Alto 134 cm

Ancho 96 cm

Profundidad 100 cm

La estructura del liofilizador está conformada por un esqueleto de perfil estructural cuadrado Coll roll, recubierto tanto internamente, como externamente con láminas de acero inoxidable. Para el aislamiento térmico se utilizaron láminas de poliuretano de 4cm de espesor, están se ubican entre la lámina de acero inoxidable exterior e interior. Ver Figura 4.26.

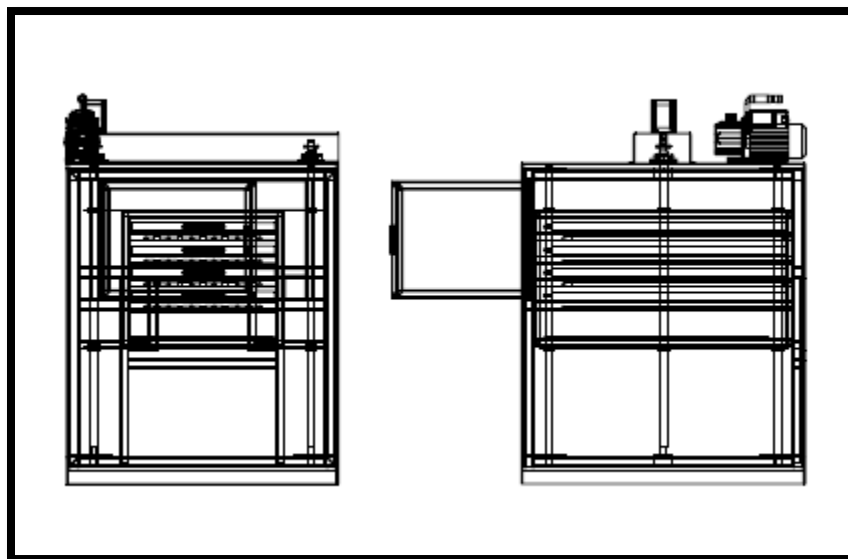


Figura 4.26 Camara de sublimaciun vistas lateral y frontal

Fuente: autores

La estructura cuenta con tres zonas bien identificadas, en la parte superior se encuentra el sistema de generación de vacío, en la parte interior del liofilizador encontramos la cámara de vacío, está conformada por un área de bandejas, resistencias y un condensador. La cámara se desplaza por medio de un sistema de tornillos de potencias, estos elevan o bajan la cámara de vacío. Ver Figura 4.27.

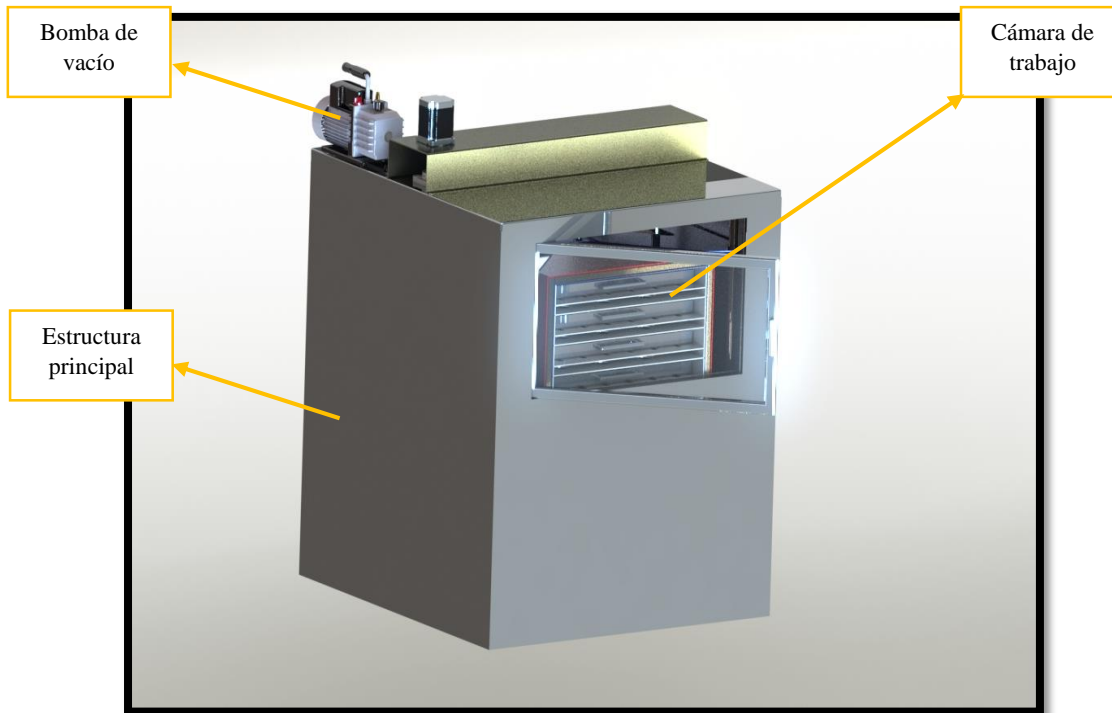


Figura 4.27 Camara de sublimacion

Fuente: autores

4.5.5.2. Cámara de trabajo

En la cámara de trabajo es donde se lleva a cabo el proceso de vacío y calentamiento de las fresas, esta conformada por el área de bandejas y de resistencias, que son muy necesarias para el proceso de deshidratación. Ver Figura 4.28 . Sus dimensiones son:

Alto	48 cm
Ancho	57 cm
Profundidad	90 cm

Las paredes internas del liofilizador son de acero inoxidable con un espesor de 3mm, cuenta con una capa intermedia de poliuretano de 40mm, el cual sirve como aislamiento para evitar al máximo la transferencia de calor.

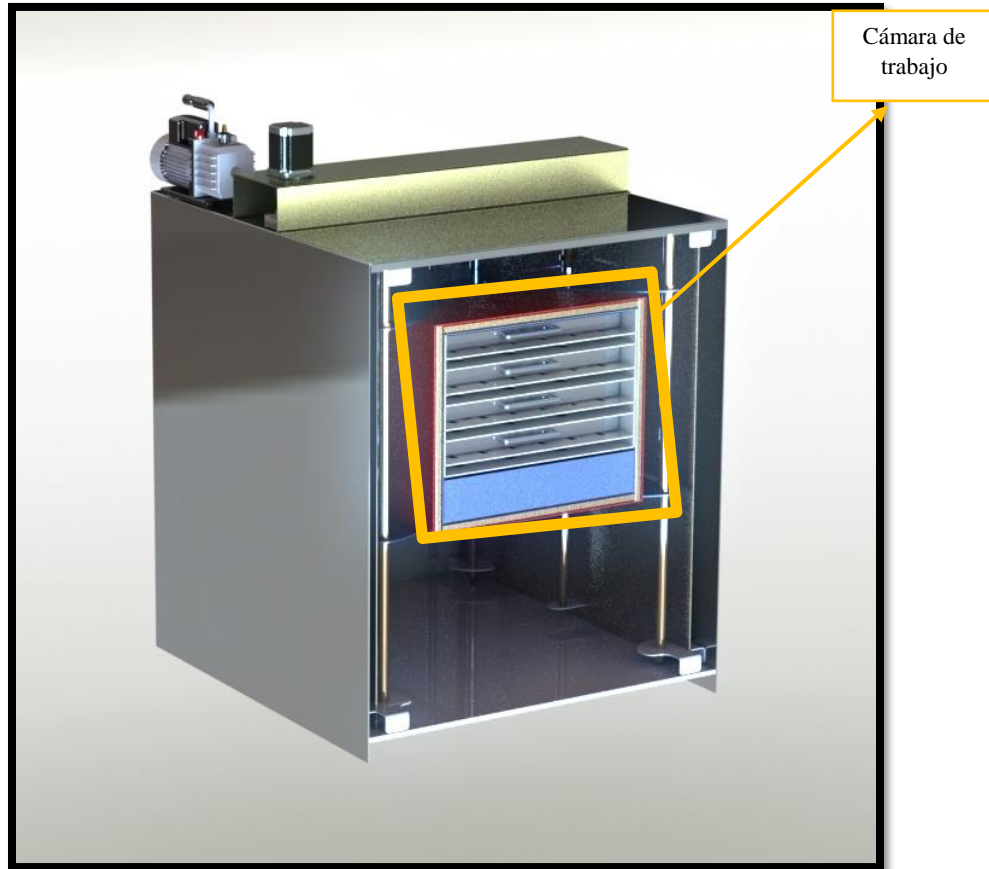


Figura 4.28 Camara de Trabajo

Fuente: autores

El liofilizador cuenta con una puerta de acceso, esto para permitir la limpieza y mantenimiento del dispositivo, como la extracción del producto ya deshidratado. El material de las puertas es acero inoxidable con una capa de aislamiento térmico de poliuretano de 4 cm.

Para mantener la hermeticidad en el liofilizador, se colocaron empaques de caucho en el marco de la puerta y cerraduras que permiten aplicar una mayor presión, todo esto para evitar pérdidas térmicas en el sistema. Ver Figura 4.29 .

Las dimensiones de las puertas son:

Alto	18 cm
Ancho	58 cm
Profundidad	6 cm

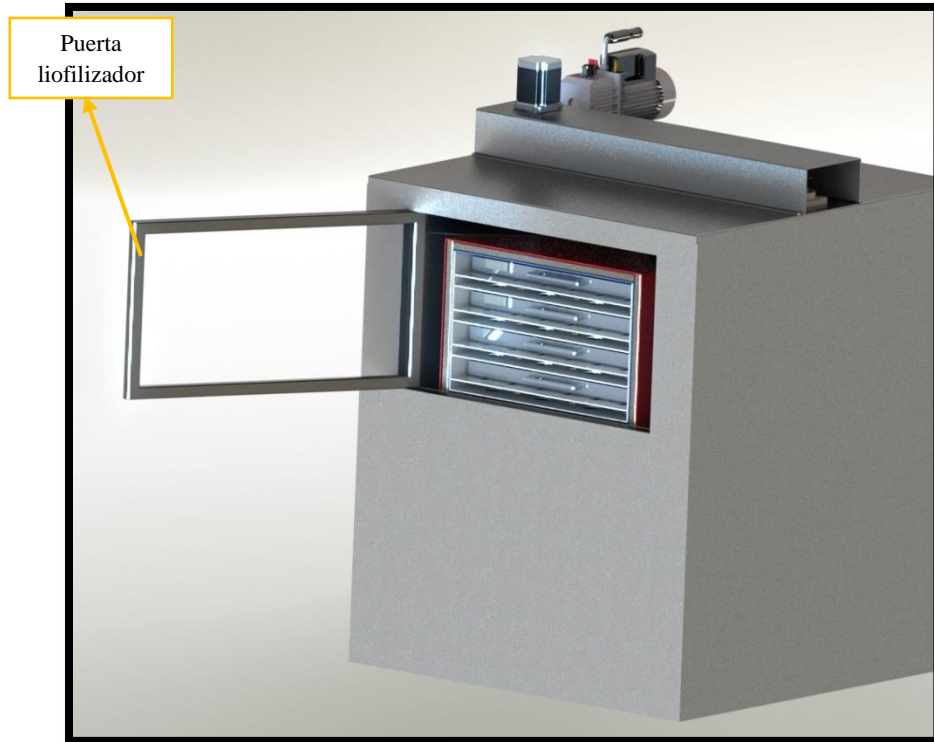


Figura 4.29 Puerta del liofilizador

Fuente: autores

4.5.5.3. Cálculo del torque tornillos de potencia

Para el cálculo del torque del tornillo de potencia, se debe saber el peso total de la capsula de trabajo, la carga completa de la fresa y el peso de cada una de las bandejas. El material del liofilizador es acero inoxidable, sabiendo que su densidad media es de 7850 kg/m^3 , procedemos a calcular el peso total sabiendo el volumen ocupado por el diseño CAD.

Utilizando las propiedades físicas de SolidWorks (ver Figura 4.30) obtuvimos el peso total de la capsula con las bandejas y el condensador.

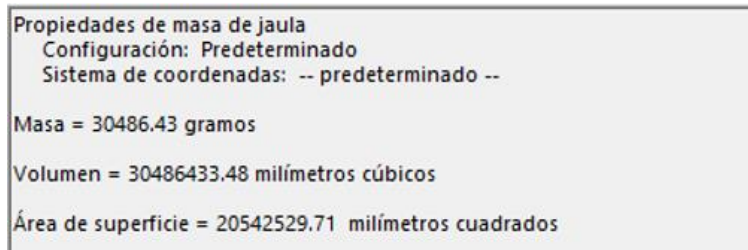


Figura 4.30. Propiedades físicas capsula de liofilización

Fuente: autores

La masa total de la cámara de trabajo es de 30486.43 gramos, a este resultado toca sumarle la masa total de producto a liofilizar, para este diseño ese peso es de 50000 gramos. Así podremos calcular el torque necesario para poder desplazar esta carga.

$$M_{ct} \rightarrow \text{Masa de la camara de trabajo} \rightarrow 30,5 \text{ Kg} \quad (4.133)$$

$$M_{fresa} \rightarrow \text{Masa carga total fresa} \rightarrow 50 \text{ Kg} \quad (4.134)$$

$$M_{total} = M_{ct} + M_{fresa} = 30,5 \text{ Kg} + 50 \text{ Kg} \quad (4.135)$$

$$M_{total} = 80,5 \text{ Kg} \quad (4.136)$$

La masa total que debe soportar el tornillo de potencia es de 80,5 Kg. A continuación, se debe calcular la carga total que debe soportar.

$$F_{total} = M_{total} * g \quad (4.137)$$

$$F_{total} = 80.5 \text{ Kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (4.138)$$

$$F_{total} = 788.9 \text{ N} \quad (4.139)$$

El diseño de la cámara de liofilización cuenta con dos tornillos de potencia. Ver Figura 4.31. La carga que resistirá cada uno será la mitad del total de la misma.

$$F_{real} = \frac{788.9 \text{ N}}{2} \quad (4.140)$$

$$F_{real} = 394.45 \text{ N} \quad (4.141)$$

La carga real que soportará cada tornillo de potencia será de 394.45 N, se utilizará un tornillo de potencia de rosca rectangular. Se escogieron varillas roscadas de 5/8 in.



Figura 4.31 Varilla roscada de 5/8 in cuadrada

Fuente: Robert L. Mott “Diseño de Elementos de maquinas”, Pag. 114

Este tornillo de potencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{Fdm(1 + \pi u dm)}{2(\pi dm - u L)} \quad (4.142)$$

$$dm = de - p \quad (4.143)$$

Donde:

T → Par de torsion requerido para levanytar la carga

F → Carga total que soportara en tornillo de poencia

dm → Diametro medio de la rosca

de → diametro externo de la rosca

u → Coeficiente de rozamiento

p → Paso de la rosca

L → distancia total tornillo de potencia

La Figura 4.32 no da un esquema de estos valores.

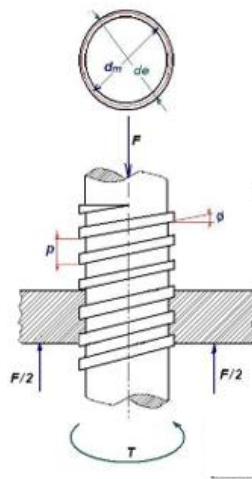


Figura 4.32.Tornillo de potencia

Fuente: Robert L. Mott “Diseño de Elementos de maquinas”, Pag. 114

Se escogió un tornillo de potencia de rosca trapezoidal de $5/8$ in de diámetro, y de 4 hilos por pulgada.

VALORES DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO "u"		
superficie de contacto	"u" estatico	"u" cinético
metal sobre metal (secos)	0,2	0,1
metal sobre metal (engrasada)	0,1	0,05

Figura 4.33. Coeficientes de rozamiento

Fuente: Robert L. Mott "Diseño de Elementos de maquinas", Pag. 115

El coeficiente de rozamiento mostrado en la Figura 4.33 depende de la superficie de contacto, en el diseño de la cámara de trabajo, se especifica el material, en este caso acero inoxidable. Al ser una superficie de metal sobre metal (secos). El coeficiente de contacto es 0.2.

$$F = 394.45N \quad (4.144)$$

$$de = 0.015875 m \quad (4.145)$$

$$L = 1.2 m \quad (4.146)$$

$$u = 0.2 \quad (4.147)$$

$$p = \frac{1 \text{ in}}{4} = 0.25 \text{ in} = 0.00635m \quad (4.148)$$

El paso del tornillo de potencia es de 0.635 m, dividimos una pulgada en 4 hilos y nos dio la distancia entre cada uno. Para el cálculo del diámetro medio de la rosca, es necesario tener el diámetro exterior y restarle el paso.

$$dm = de - p \quad (4.149)$$

$$dm = 0.015875 m - 0.00635 m \quad (4.150)$$

$$dm = 0.00952m \quad (4.151)$$

$$T = \frac{Fdm(1 + \pi u dm)}{2(\pi dm - u L)} \quad (4.152)$$

$$T = \frac{(394.45 \text{ N})(0.00952 \text{ m})(1 + \pi (0.2) (0.00952 \text{ m}))}{2(\pi (0.00952 \text{ m}) - (0.2)(1.2 \text{ m}))} \quad (4.153)$$

$$T = \frac{(394.45 \text{ N})(0.00952 \text{ m})(1.0059)}{(0.42)} \quad (4.154)$$

$$T = 8.9936 \text{ Nm} \quad (4.155)$$

4.5.5.4. Selección de motores

El torque necesario es de 8.9936 Nm, Con este resultado seleccionamos los motores más adecuados para los dos tornillos de potencia. Se decidió optar por motores paso a paso, ya que nos permite controles de posición más exactos.

El motor seleccionado es un paso a paso NEMA 34 de marca Schneider Electric de longitud triple a 24 voltios DC. En la Figura 4.34 lo podemos observar y en la Figura 4.35 sus respectivas características.



Figura 4.34 Motor paso a paso NEMA 34

Fuente: Schneider Electric, "NEMA size 34 1.8", pág. 1

6.3 Amp motors		Single length	Double length	Triple length
Part number		M-3424-6.3 * (1)	M-3431-6.3 * (1)	M-3447-6.3 * (1)
Holding torque	oz-in	419	637	1203
	N-cm	296	450	920
Detent torque	oz-in	10.9	14.2	19.8
	N-cm	7.7	10.0	14.0
Rotor inertia	oz-in-sec ²	0.01416	0.02266	0.04815
	kg-cm ²	1.0	1.6	3.4
Weight	oz	60.0	84.7	141.1
	grams	1700	2400	4000
Phase current	amps	6.3	6.3	6.3
Phase resistance	ohms	0.25	0.35	0.50
Phase inductance	mH	1.6	3.3	6.6

Figura 4.35 Propiedades principales NEMA 34

Fuente: Schneider Electric, "NEMA size 34 1.8", pág. 1

Según la Figura 4.35 los dos motores seleccionados son de longitud triple, que nos entregan un torque 920 N-cm y de 6.3 amperios.

4.6. Diseño de controladores

En el siguiente capítulo procedemos a realizar los cálculos y simulaciones de los controladores que deben implementarse. Se utilizarán lazos cerrados de control en el túnel de enfriamiento IQF principalmente. En la parte del proceso del liofilizador se optó por la utilización de motores paso a paso como método de control, puesto que debemos seleccionar la posición exacta de cada bandeja de fresas.

4.6.1. Túnel IQF

En el túnel IQF es necesario implementar un control de velocidad de una banda transportadora y uno de control de velocidad angular para las aspas que permitirán el pre-enfriamiento de las fresas. Como se utilizarán controles de lazo cerrado, se debe tener el modelo matemático del proceso a controlar, en este caso se optó por su simulación en Simscape de Matlab.

4.6.1.1. Diseño del control para la banda transportadora

Como pudimos observar en el diseño mecánico de la banda transportadora, se definió el tipo de motor. Para el movimiento de la banda se especificó un motor de corriente continua monofásico Siemens 1RF30542YC41. En general se describirán las características y conexiones que se deberán implementar en el lazo cerrado de control.

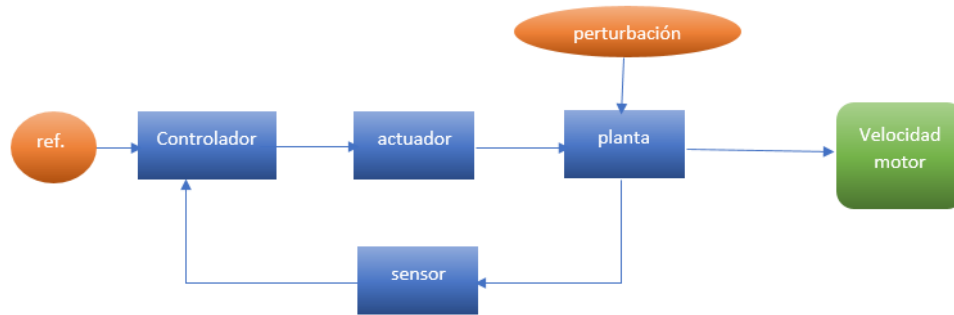


Figura 4.36 Diagrama del sistema de control

Fuente: autores

En la Figura 4.36 se ilustra los diferentes subsistemas o etapas que componen el diagrama de bloques para el control. A continuación, procedemos a definir cada una de las etapas involucradas en el diagrama.

- Actuador: el actuador es el dispositivo encargado de realizar la conversión entre la señal de control y los niveles de tensión entregados al motor.
- Motor o planta: es el dispositivo encargado de transformar una señal eléctrica a un movimiento mecánico y por lo tanto es al que se le aplica todo el lazo de control.
- Perturbación: son todas aquellas cargas generadas tanto por la banda como por la carga de fresa que debe soportar el motor. Generando pérdidas de velocidad.
- Sensor: es el dispositivo encargado de realizar la conversión de la velocidad angular del motor a señales eléctricas que puedan ser leídas por el controlador.
- Controlador: es el encargado de regular la velocidad del motor cuando esté sometido a perturbaciones.

4.6.1.1.1. Actuador

El dispositivo seleccionado para que cumpla la función de actuador, es un variador de velocidad marca Schneider electric y referencia ATV12H037F1, especialmente diseñado para el control de motores monofásicos (ver Figura 4.38). Este variador cuenta con alimentación monofásica con una tensión de 100 a 120 v. Está protegido contra sobrecargas y sobre tensiones.

La principal función de este dispositivo es variar la velocidad del motor de acuerdo a la señal de control recibida. La variación de velocidad se produce al cambiar la frecuencia, es decir cuando el actuador recibe 0 v en los bornes de control, este genera 0 Hz, cuando recibe 10 v, genera 60 Hz. En la Figura 4.37 se especifican las propiedades principales del variador. Se escogió teniendo en cuenta los caballos de fuerza del motor y su voltaje nominal.

Motor	Alimentación de red (entrada)					Variador (salida)			Referencia (2)	Tamaño (3)	
	Potencia indicada en la placa (1)		Corriente de línea máxima		Potencia aparente	Disipación de alimentación en corriente nominal (1)	Corriente nominal In	Corriente transitoria máxima para			
	kW	HP	a 100 V	a 120 V	kVA			W			60 s
0,18	0,25	6	5	1	18	1,4	2,1	2,3	ATV12H018F1	1C1	
0,37	0,5	11,4	9,3	1,9	29	2,4	3,6	4	ATV12H037F1	1C1	
0,75	1	18,9	15,7	3,3	48	4,2	6,3	6,9	ATV12H075F1	2C1	

Figura 4.37 Características principales variador de velocidad monofásico.

Fuente: Schneider electric, “variadores de velocidad para motores asíncronos”, pag.10



Figura 4.38 Imagen variador de velocidad ATV12H037F1.

Fuente: Schneider electric, “variadores de velocidad para motores asíncronos”, pag.8

4.6.1.1.2. Motor

El motor es el elemento en el cual se efectuará el control, previamente se seleccionó un motor siemens 1RF30542YC41, es de 0.5 hp, con una velocidad nominal de 3535 rpm operando a una tensión de 127 VAC. Ver Figura 4.39.



Figura 4.39 Motor de corriente continua monofásico seleccionado

Fuente: siemens “Motores eléctricos catálogo”, pág. 40

4.6.1.1.3. **Perturbación**

Las perturbaciones serán generadas principalmente por la banda transportadora, ya sea por fricciones o el peso de la misma carga. Teniendo en cuenta que la carga es la fresa, es muy probable que estas perturbaciones sean mínimas y no generen demasiados cambios en el control.

4.6.1.1.4. **Sensor**

El elemento que se eligió para observar y generar señales de la velocidad angular es un encoder óptico de tipo incremental acoplado al eje de rotación del motor. Se escogió un encoder óptico porque son más comunes, tal vez lo más problemático es que le afecta la contaminación del ambiente de trabajo, como el polvo que puede acumularse en el diodo emisor de luz. Ver Figura 4.40.



Figura 4.40 Encoder óptico TCST1103.

Fuente: VISHAY, “vishay Semiconductors”, pág. 1

En la figura anterior podemos ver el modelo de encoder seleccionado, está compuesto por un emisor y receptor de infrarrojos, enfrentados a corta distancia. También posee 4 aspas equidistantes que permite obtener una velocidad máxima de 1800 rpm.

4.6.1.2. Modelo matemático banda transportadora

Para la obtención del modelo matemático debe tener en cuenta un gran sin número de variables que pueden afectar el comportamiento final de la banda transportadora, en la Figura 4.41, observamos el diagrama del modelo.

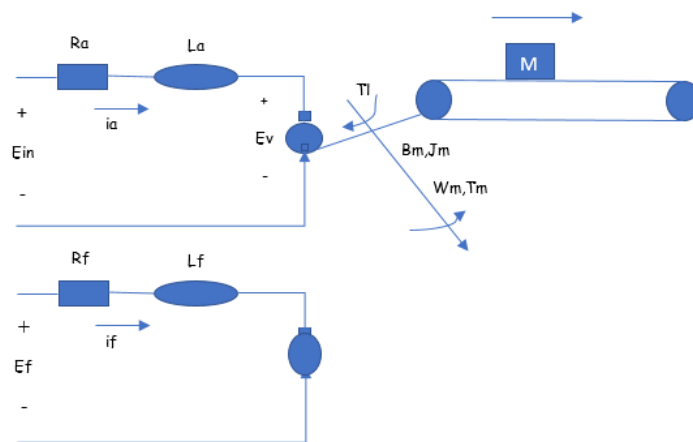


Figura 4.41. Diagrama de modelo matemático banda transportadora

Fuente: autores

Se acuerdo al anterior esquema, las variables representan lo siguiente:

R_a	Resistencia de armadura
i_a	Corriente de armadura
L_a	Inductancia de armadura
E_{in}	Voltaje de entrada o de armadura
E_v	Voltaje inducido por el motor
R_f	Resistencia de campo
L_f	Inductancia de campo
I_f	Corriente de campo
E_f	Voltaje de campo
W_s	Velocidad angular
B_m	fricción

J_m	Momento de inercia
T_m	Torque del motor
K_f	Constante de par
K_v	Constante de voltaje inducido
ϕ_s	Posición angular

Al suponer que todas las condiciones iniciales son cero, y modelando a través de la transformada de Laplace obtenemos las siguientes tres ecuaciones, que representan el sistema.

$$(L_a S + R_a) I_a(S) + E_v(s) = E_{in}(S) \quad (4.156)$$

$$(J_m S^2 + B_m S) \phi_s(S) = T_m(S) \quad (4.157)$$

$$T_m(S) = K_f I_a(S) \quad (4.158)$$

$$K_v S \phi(S) = E_v(S) \quad (4.159)$$

En este modelo matemático la entrada corresponde a el voltaje de entrada $E_{in}(S)$ y la salida es la velocidad angular $W(S)$, en la Figura 4.42, se observa el diagrama de bloques del modelo.

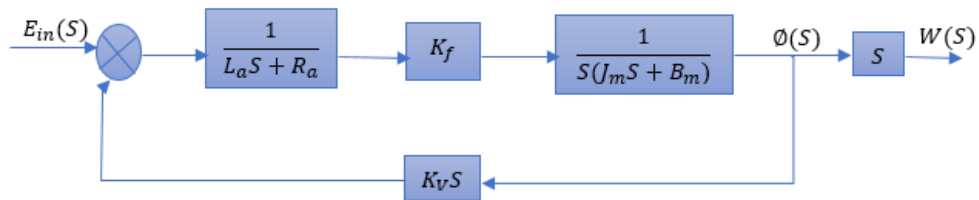


Figura 4.42. Diagrama de bloques banda transportadora

Fuente: autores

la función de transferencia entre el voltaje de entrada y la velocidad angular de salida es la siguiente.

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{K_f}{(J_m L_a S^2 + (L_a B_m + R_a J_m)S + (R_a B_m + K_f K_v))} \quad (4.160)$$

El comportamiento de la inductancia L_a en el circuito de armadura es por lo general de valores despreciables. Por lo tanto, la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{K_f}{((R_a J_m)S + (R_a B_m + K_f K_v))} \quad (4.161)$$

Remplazando los valores tomados de las características físicas del motor siemens 1RF30542YC41, la función de transferencia es la siguiente:

$$K_f \rightarrow 0.5625 \text{ Nm/A}$$

$$K_v \rightarrow 0.5625 \frac{V}{\text{rad s}^{-1}}$$

$$R_a \rightarrow 6\Omega$$

$$J_m \rightarrow 0.1 \text{ kg m}^2$$

$$B_m \rightarrow 0.28 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}/\text{s}$$

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{0.5625}{(0.6 S + 1.9964)} \quad (4.162)$$

En la Figura 4.43 se muestra el diagrama de bloques en lazo abierto para la banda transportadora

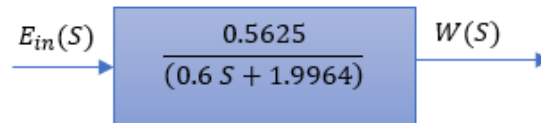


Figura 4.43 Diagrama de bloques banda transportadora en lazo abierto

Fuente: autores

4.6.2. Diseño del control para el motor de las aspas

Como pudimos observar en el diseño mecánico de las aspas de aspersión, se definió el tipo de motor. Para el movimiento de un aspa se especificó un motor de Corriente directa que

cumpliera con una velocidad máxima de 350 rpm. En general se describirán las características y conexiones que se deberán implementar en el lazo cerrado de control.

4.6.2.1. Actuador

El dispositivo seleccionado para que cumpla la función de actuador, es un driver puente H, de referencia L298 (ver Figura 4.45), especialmente diseñado para el control de motores de corriente directa. Este driver cuenta con alimentación de voltaje dc con una tensión de 12 v.

La principal función de este dispositivo es variar la velocidad del motor de acuerdo a la señal de control recibida. La variación de velocidad se produce al cambiar el voltaje, es decir cuando el actuador recibe una señal pwm con un ciclo útil del 0% en los bornes de control, este genera 0 v, cuando recibe 100 %, genera el voltaje máximo de operación, en este caso 12v. En la Figura 4.44 se especifican las propiedades principales del puente H. Se escogió teniendo en cuenta el consumo del motor.

Nombre	Modulo controlador de motores DC y Doble Puente H	Modo de Trabajo	Configuración doble puente H
Circuito de control	L298N de ST		
Voltaje de control	5V	Voltaje de salida	5V-35V
Corriente de control	0mA-36mA	Corriente Max Salida	2A (MAX puente simple)
Temperatura	-20C° hasta +135C°	Potencia Máxima	25W
Peso	30g	Dimensión externa	43*43*27mm

Figura 4.44 Especificaciones driver de control motor DC

Fuente: Pololu , “l298 para motores DC”, pag.5



Figura 4.45. Driver puente H

Fuente: Pololu, “1298 para motores DC”, pag.2

4.6.2.2. **Motor**

El motor es el elemento en el cual se efectuará el control, previamente se seleccionó un motor P pololu 37DX52L es de 350 rpm (ver Figura 4.46), con un voltaje nominal de 5-35 V, operando a una corriente de 3A.



Figura 4.46 Motorreductor pololu.

Fuente: Pololu, “1298 para motores DC”, pag.8

4.6.2.3. **Perturbación**

Las perturbaciones serán generadas principalmente por las aspas, ya sea por fricciones, es muy probable que estas perturbaciones sean mínimas y no generen demasiados cambios en el control.

4.6.2.4. **Sensor**

El elemento que se eligió para observar y generar señales de la velocidad angular es un encoder óptico el cual se encuentra ya integrado con el motorreductor. Se escogió este motor con encoder integrado, por la facilidad de su implementación a la hora del control. En la Figura 4.47 se observa el enconder mencionado.



Figura 4.47 Encoder óptico TCST1103

Fuente: pololu, “1298 para motores DC”, pág. 3

4.6.2.5. **Modelo matemático del motor de las aspas**

Para la obtención del modelo matemático se debe tener en cuenta un gran sin número de variables que pueden afectar el comportamiento de las aspas, en la Figura 4.48, observamos el diagrama del modelo.

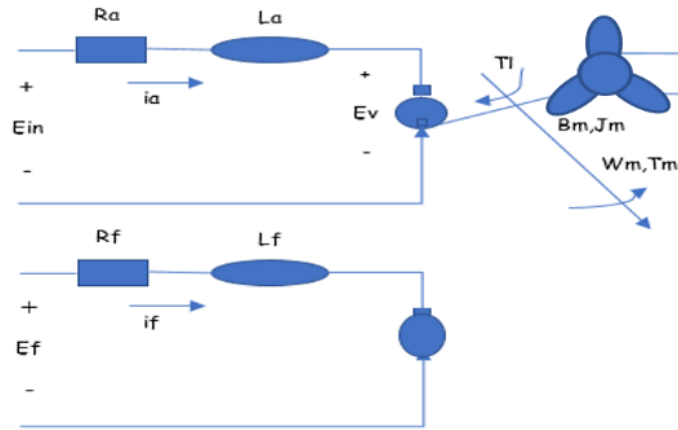


Figura 4.48 Diagrama de modelo matemático de motor de aspas

Fuente: autores

Se acuerdo al anterior esquema, las variables representan lo siguiente:

R_a	Resistencia de armadura
i_a	Corriente de armadura
L_a	Inductancia de armadura
E_{in}	Voltaje de entrada o de armadura
E_v	Voltaje inducido por el motor
R_f	Resistencia de campo
L_f	Inductancia de campo
I_f	Corriente de campo
E_f	Voltaje de campo
ω_s	Velocidad angular
B_m	fricción
J_m	Momento de inercia
T_m	Torque del motor
K_f	Constante de par
K_v	Constante de voltaje inducido
θ_s	Posición angular

Al suponer que todas las condiciones iniciales son cero, y modelando a través de la transformada de Laplace obtenemos las siguientes tres ecuaciones, que representan el sistema.

$$(L_a S + R_a) I_a(S) + E_v(s) = E_{in}(S) \quad (4.163)$$

$$(J_m S^2 + B_m S) \phi_s(S) = T_m(S) \quad (4.164)$$

$$T_m(S) = K_f I_a(S) \quad (4.165)$$

$$K_v S \phi(S) = E_v(S) \quad (4.166)$$

En este modelo matemático la entrada corresponde a el voltaje de entrada $E_{in}(S)$ y la salida es la velocidad angular $W(S)$, en la Figura 4.49, se observa el diagrama de bloques del modelo.

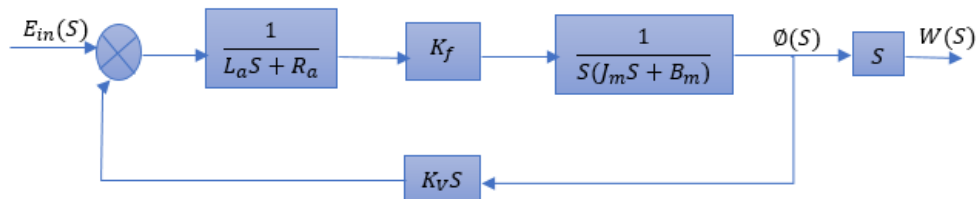


Figura 4.49. Diagrama de bloques del motor de aspas

Fuente: autores

la función de transferencia entre el voltaje de entrada y la velocidad angular de salida es la siguiente.

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{K_f}{(J_m L_a S^2 + (L_a B_m + R_a J_m) S + (R_a B_m + K_f K_v))} \quad (4.167)$$

El comportamiento de la inductancia L_a en el circuito de armadura es por lo general de valores despreciables. Por lo tanto, la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{K_f}{((R_a J_m)S + (R_a B_m + K_f K_v))} \quad (4.168)$$

Remplazando los valores tomados de las características físicas del motor popolu 37DX52L, la función de transferencia es la siguiente:

$$K_f \rightarrow 0.4525 \text{ Nm/A}$$

$$K_v \rightarrow 0.4525 \frac{V}{\text{rad s}^{-1}}$$

$$R_a \rightarrow 3\Omega$$

$$J_m \rightarrow 0.05 \text{ kg m}^2$$

$$B_m \rightarrow 0.14 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}/\text{s}$$

$$\frac{W(S)}{E_{in}(S)} = \frac{0.4525}{(0.15S + 0.6247)} \quad (4.169)$$

En la Figura 4.50 se muestra el diagrama de bloques en lazo abierto para el motor del aspa

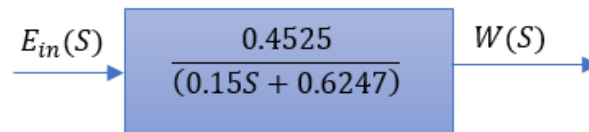


Figura 4.50 Diagrama de bloques motor de aspa en lazo abierto

Fuente: autores

4.6.3. Diseño de control para el Liofilizador

En el liofilizador tenemos un control de posición para la cámara de trabajo. Este se diseñó con motores paso a paso NEMA 34, puesto que estos nos entregan una mejor precisión de movimiento angular. En la Figura 4.51 se muestra el esquema de control en lazo abierto.

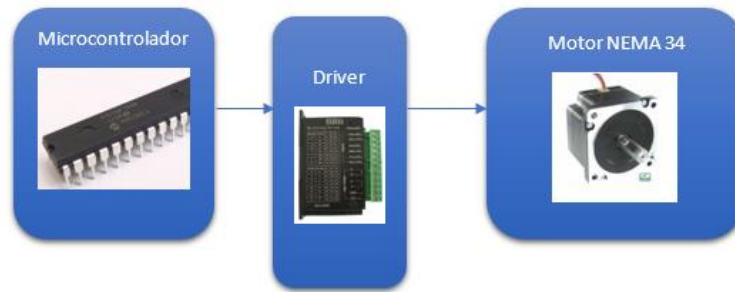


Figura 4.51 Diagrama de control motor paso a paso NEMA 34

Fuente: autores

4.6.3.1. Driver

El dispositivo seleccionado para que cumpla la función de actuador, es un microstep driver (ver Figura 4.52), especialmente diseñado para el control de motores paso a paso. Este driver cuenta con alimentación de voltaje dc con una tensión de 1,9 v – 42 v.

La principal función de este dispositivo es variar la velocidad del motor de acuerdo con la señal de control recibida. La variación de velocidad se produce al cambiar la variación de pulsos digitales, es decir que cada vez que el actuador recibe una señal digital alta, el motor da un paso de 1.8 grados.



Figura 4.52.Driver microstep CW-5045

Fuente: microstep, "microstep Driver CW-5045", pag.1

4.6.4. Diseño de la fuente de alimentación

Definida la energía fotovoltaica como fuente de alimentación para el deshidratador, se procede a dimensionar este sistema.

Tabla 8 Tabla de gastos de energía.

Equipo	Potencia	Tiempo de usos	Energía
Motor banda	372.82W	1h	372.82Wh
Dispositivos de posicionamiento	60W	1h	60Wh
Bomba para el nitrógeno	72W	1h	72Wh
Motores de elevaciones bandejas	72W	1h	72Wh
Ventiladores	72W	1h	72Wh
Circuitos y control	20W	2h	40Wh
Bomba de vacío	186.42W	1h	186.42Wh
Motor del condensador	124.28W	1h	124.28Wh
Resistencias de calentamientos	600W	1h	600WH
Total			1599,5Wh

En la tabla 8 se observa la cantidad de instrumentos que se desean energizar y la potencia consumida, se observa una potencia total necesaria de 972.52Wh. Dado que en el proceso no todos los instrumentos funcionales al mismo tiempo, este valor de potencia funciona como el factor de seguridad.

Según (8) las horas pico de luz en Cundinamarca son 6, con este valor, suponiendo una eficiencia de 0.5 y aplicando la ecuación (4) se consigue la potencia pico que se requiere en cada panel.

$$P_p = (1599.55/6)/0.5 \quad (4.170)$$

$$P_p = 533.16W_p \quad (4.171)$$

Si se emplean paneles fotovoltaicos de 250W_p como el panel SW250 de la compañía Solar World y aplicando la ecuación (5) se obtiene que:

$$N_p = \frac{533.16}{250} = 2.13 \quad (4.172)$$

Por lo tanto, serán necesarios 3 paneles fotovoltaicos.

Para controlar la carga que llega a las baterías es necesario un implementar un regulador para este caso buscando alcanzar la máxima potencia se propone un regulador MPPT que pueda manejar una potencia de entrada supero a 10 A puesto que cada módulo fotovoltaico posee una corriente máxima de cerca de 8.05 A para un voltaje máximo de 31V.

Para dimensionar el sistema de baterías, se definen baterías de 24V y 115Ah con estos datos se calcula la Energía disponible con una descarga del 100.

$$Ed = 24V * 115Ah = 2760 Wh \quad (4.173)$$

Como las baterías pierden horas de vida al descargarse al 100% se define la máxima descarga al 60% , con esto la energía necesaria sería .

$$En = \frac{1599.55}{0.6} = 2665 Wh \quad (4.174)$$

Con esta potencia se calcula la cantidad de baterías necesaria.

$$En = \frac{2665}{2769} = 0.96 \quad (4.175)$$

Por lo tanto, con una sola batería será suficiente.

La carga AC en el proceso es tiene un valor de 972.82W por lo tanto se implementará un inversor de voltaje de 1000W de potencia.

5. Análisis de Resultados

Para validar cada diseño se implementó una simulación diferente según la naturaleza de la misma. En esta sección se expondrán los resultados obtenidos.

5.1. Sistema de congelamiento.

Para el sistema de congelamiento se utilizó la herramienta Ansys 18.1, de la cual se usó el método de análisis de elementos finitos para fluidos CFD. Como principal, se diseñó la simulación buscando validar el cumplimiento del tiempo de congelación en cada sección del túnel.

5.1.1. Simulación Zona de aspersión

En esta zona se usó un modelo básico del sistema como se puede observar en la Figura 5.1. en él se incluyen la boquilla, el dominio de fluido y la una esfera de radio 4cm que representa a la fresa.

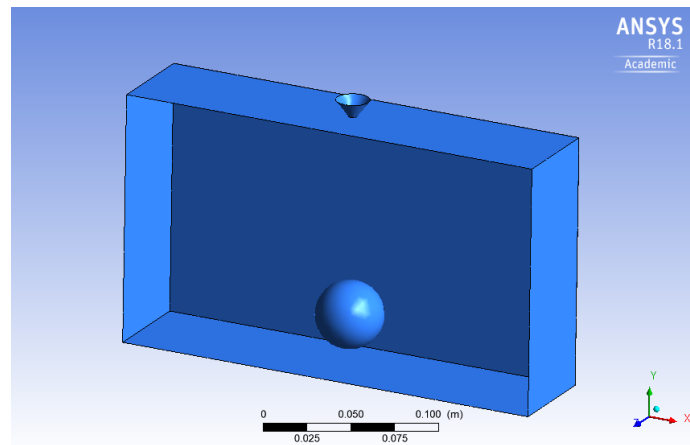


Figura 5.1 Geometría simplificada del proceso de aspersión

Fuente: autores

Haciendo una simulación de transiente con los parámetros establecidos en el diseño, se obtuvo que a cavo de 300 s segundo la temperatura interna de la esfera llega a un valor de 228 K o -45.15°C . En la Figura 5.2 se puede ver el contorno de temperatura para el tiempo 300 s.

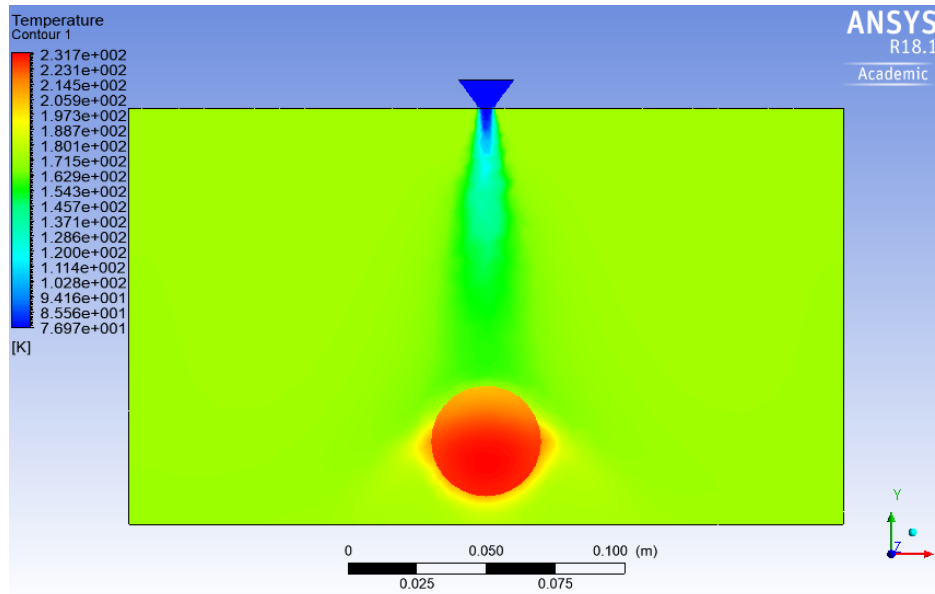


Figura 5.2 Contorno de temperatura en la zona de aspersión

Fuente: autores

El comportamiento del sistema con respecto de la temperatura en el centro térmico de la esfera durante los 300 segundos se puede observar en la Figura 5.3.

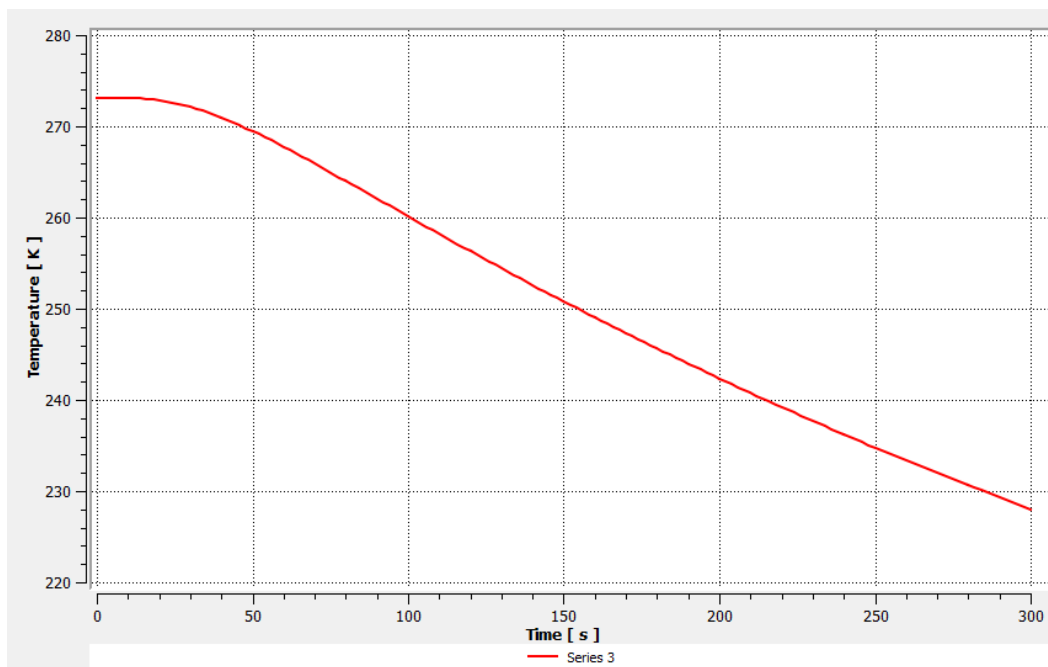


Figura 5.3 Grafica de temperatura contra tiempo en la zona de aspersión

Fuente: autores

5.1.2. Simulación zona Gas

Para el caso de la zona de gas se utilizó una figura simplificada como del ventilador además del uso de 5 esferas de 4 cm de radio para las fresas y el dominio de fluido (ver Figura 5.4). Al simular se utilizaron los parámetros de diseño durante un periodo de 162s.

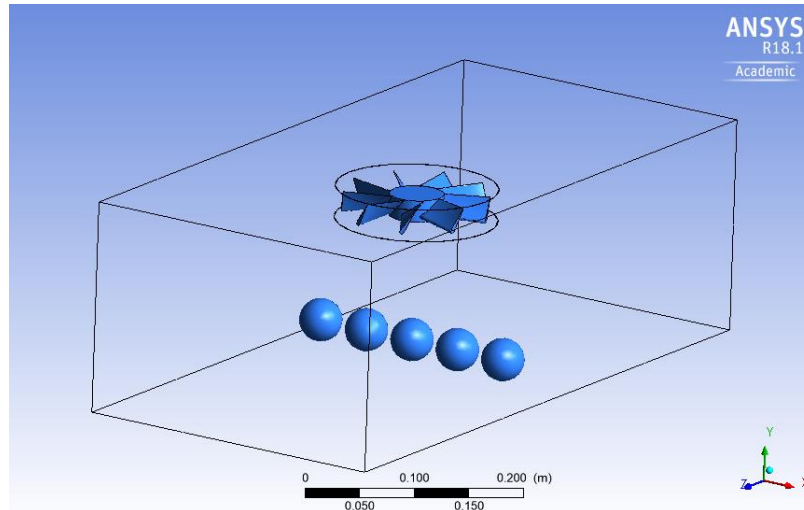


Figura 5.4 Geometrías de simulación en la zona de gas

Fuente: autores

Como resultado podemos observar que la temperatura al segundo 162 es de 280.94 al interior del centro térmico de la esfera y sigue un comportamiento como el mostrado en la Figura 5.5.

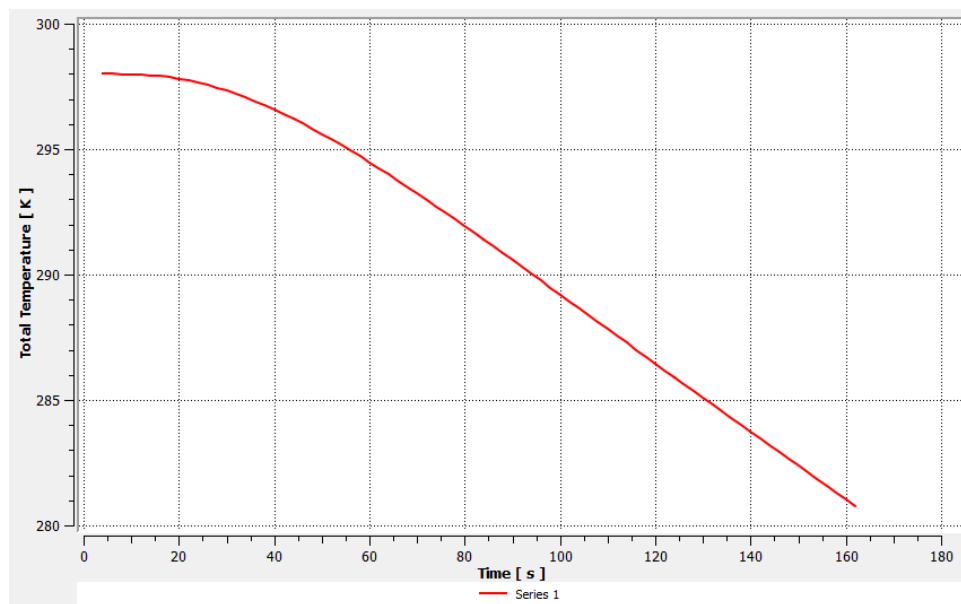


Figura 5.5 Grafica de temperatura contra tiempo en a la zona de gas

Fuente: autores

En la Figura 5.6 se puede observar el contorno de temperaturas al segundo 162.

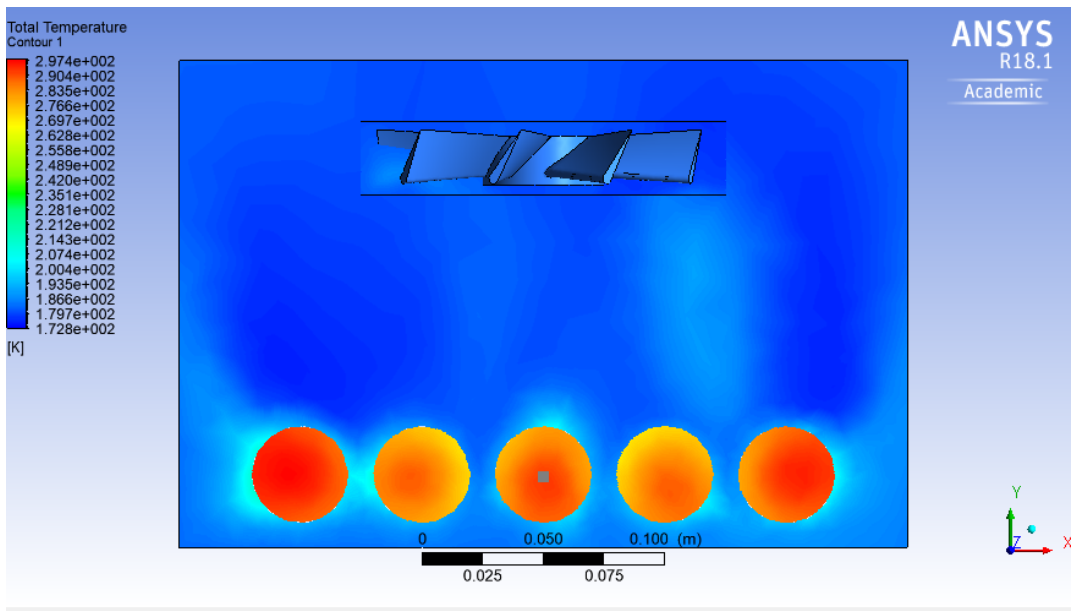


Figura 5.6 Contorno de temperaturas en la zona de gas

Fuente: autores

Con respecto a la velocidad del gas de nitrógeno sobre la fresa se observa que justo antes de entrar en contacto con la fresa existen zonas con velocidades de 3.22m/s. En la Figura 5.7 se puede observar el contorno de velocidades en el plano YX.

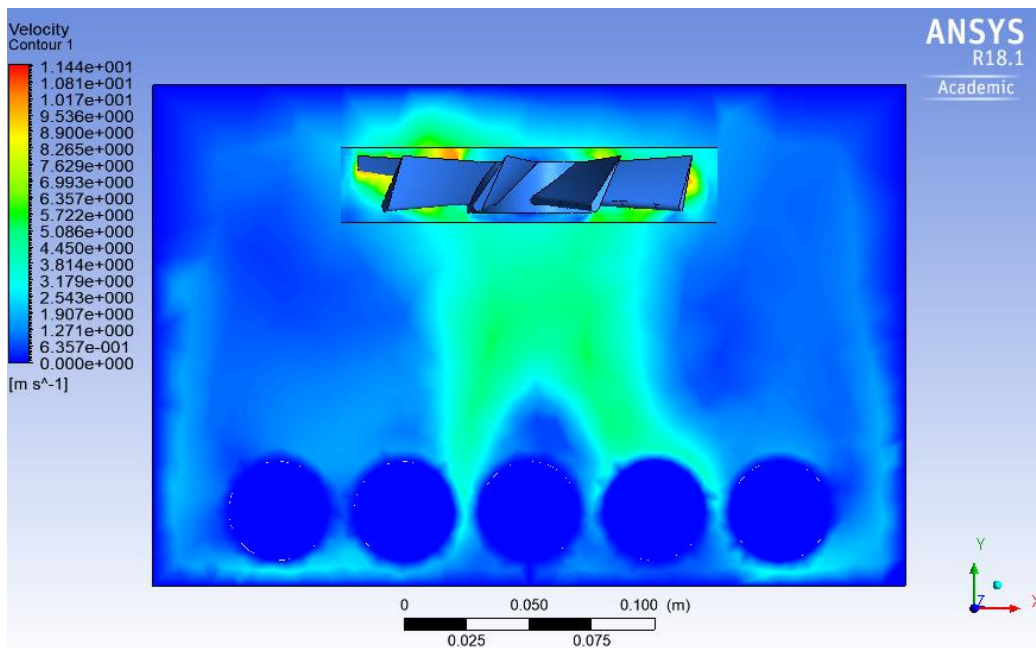


Figura 5.7 Contorno de velocidades en al zona de gas

Fuente: autores

Se observa también que existen zonas donde la acción del ventilador se focaliza a la máxima velocidad, sin embargo, para el resto de la cámara se mantiene una distribución semi uniforme a una velocidad de 1.2m/s.

5.2. Simulación procesos de sublimación

Para el proceso de sublimación se implementó la herramienta de Matlab, para verificar el proceso de secado. En la Figura 5.8 se ve el avance del frente de sublimación.

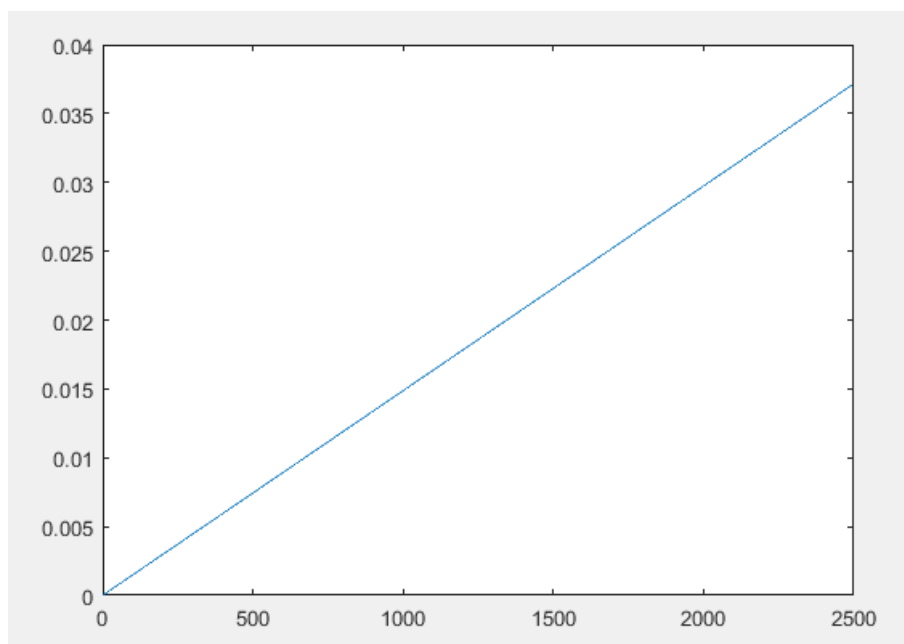


Figura 5.8 Grafica de frente de sublimación contra tiempo.

Fuente: autores

Se observa que el proceso es casi línea l con respecto al tiempo. Además, es notable como al alcanzar el tiempo total de sublimación se detiene cerca del 8% de la distancia total a recorrer, esto nos genera un error de diseño de 6%. Cabe resaltar que este comportamiento sucede siempre y cuando la presión de la interfaz este de acuerdo con la presión de equilibrio Hielo-Vapor.

5.3. Simulación sistemas mecánicos

Para las simulaciones mecánicas fue necesario la utilización del programa de Matlab y su complemento de Simulink y Simscape. Con estas herramientas es posible simular el control en el movimiento de cada una de las etapas

5.3.1. Simulación banda transportadora

Para realizar el control de la planta, tuvimos en cuenta el tipo y orden del sistema, basados en eso y sabiendo que el modelo matemático de la banda transportadora es de orden uno y de

tipo cero, debemos implementar un controlador PI. Un controlador PI se caracteriza por contar con una parte proporcional y una integral, la parte proporcional genera un acercamiento a la referencia sin llegar nunca a ella, mientras que la parte integral al tener una planta tipo cero genera un polo en cero, estabilizando en este caso la velocidad angular para el proceso de transporte de fresa.

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_P + \frac{K_i}{S} \quad (5.1)$$

El diagrama de bloques de la implementación del control se muestra en la Figura 5.9.

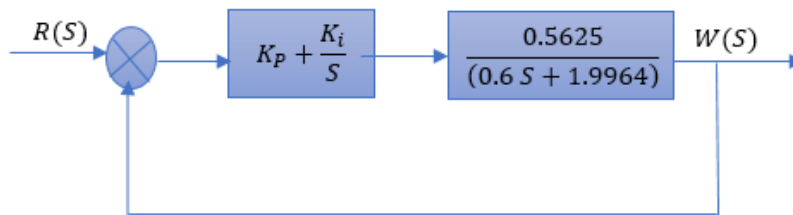


Figura 5.9 Diagrama de bloques implementación control

Fuente: autores

Continuando con la simulación, comenzamos por generar un CAD simplificado en SolidWorks, para disminuir los tiempos de simulación y el gasto computacional. En la Figura 5.10 se muestra el modelo simplificado del túnel IQF utilizado en la simulación de Simscape de Matlab.

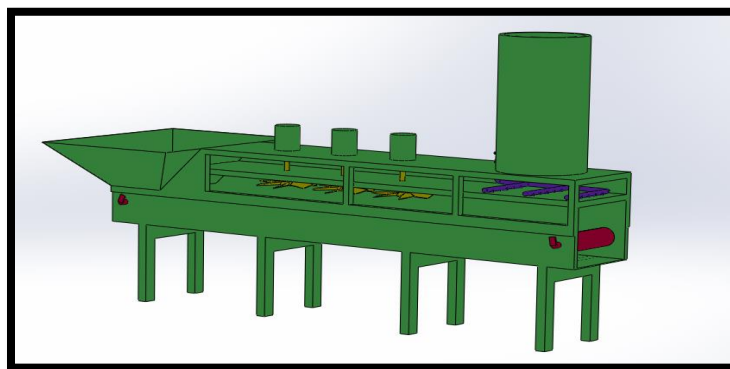


Figura 5.10 Modelo simplificado túnel IQF

Fuente: autores

Cuando se realiza la simulación en Simscape, se genera un archivo Simulink donde podemos variar las características de la planta. El esquema generado en Simulink se muestra en la Figura 5.11.

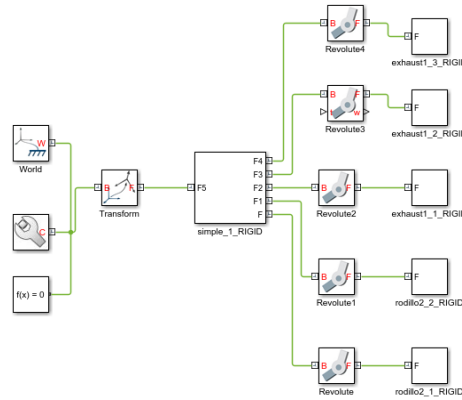


Figura 5.11 Esquema Simulink

Fuente: autores

Podemos observar en la figura anterior, que Simscape nos genera un diagrama de bloques del ensamblaje de SolidWorks. En la imagen podemos observar que contamos con cinco articulaciones móviles, las cuales son del tipo rotacional. Existen dos que hacen parte del sistema de la banda transportadora y otros tres para las aspas que esparcen el nitrógeno gaseoso para el pre-enfriamiento.

Para poder implementar el control PI, fue necesario cambiar las propiedades de la articulación a controlar, colocándole perturbaciones y características propias de la planta. En la Figura 5.12 observamos la implementación de los bloques de control en la simulación.

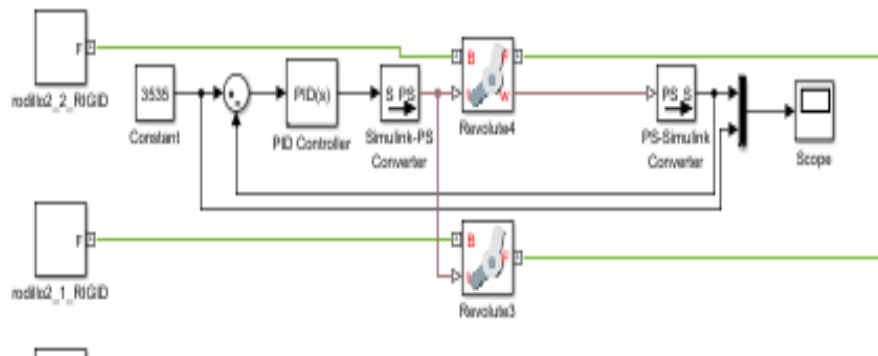


Figura 5.12 Implementación bloques de control

Fuente: autores

Se utilizó el bloque PID con el fin de poner las constantes tanto integral como proporcional. Para que se pudiera estabilizar la planta fue necesario variar la constante proporcional e integral. Empezamos variando la constante proporcional, se observó que la velocidad angular intenta llegar a la referencia, pero nunca lo logra. Se puede decir que se aleja cada vez más de la referencia (ver Figura 5.13).

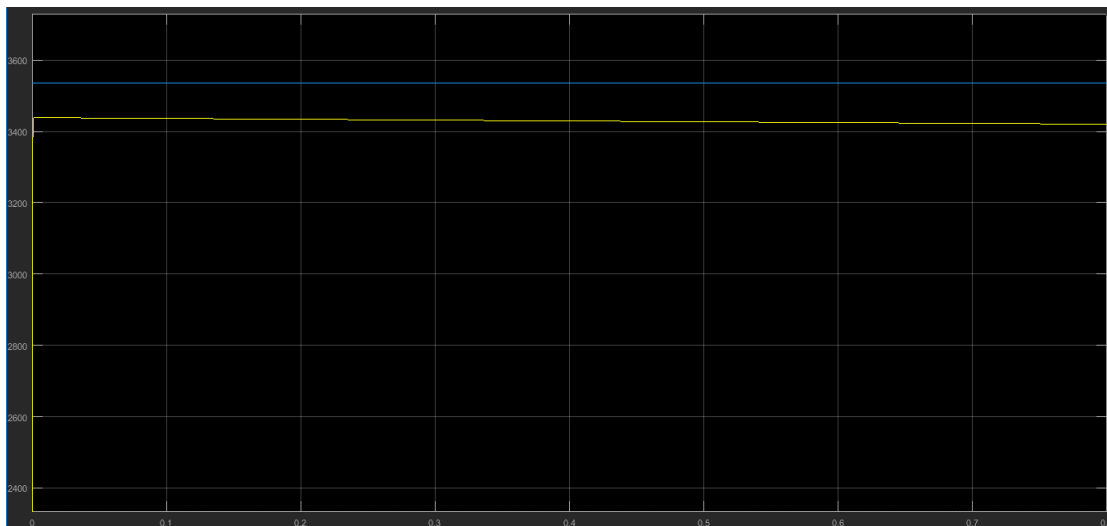


Figura 5.13 Constante proporcional

Fuente: autores

Cuando se implementó la constante integral, se logró el control total de la velocidad angular de la banda transportadora. En seguida observamos como esta constante ayuda a que la velocidad se acerque más rápido a la referencia. En la Figura 5.14 se puede admirar con más detalle la respuesta de la planta a un control PI.

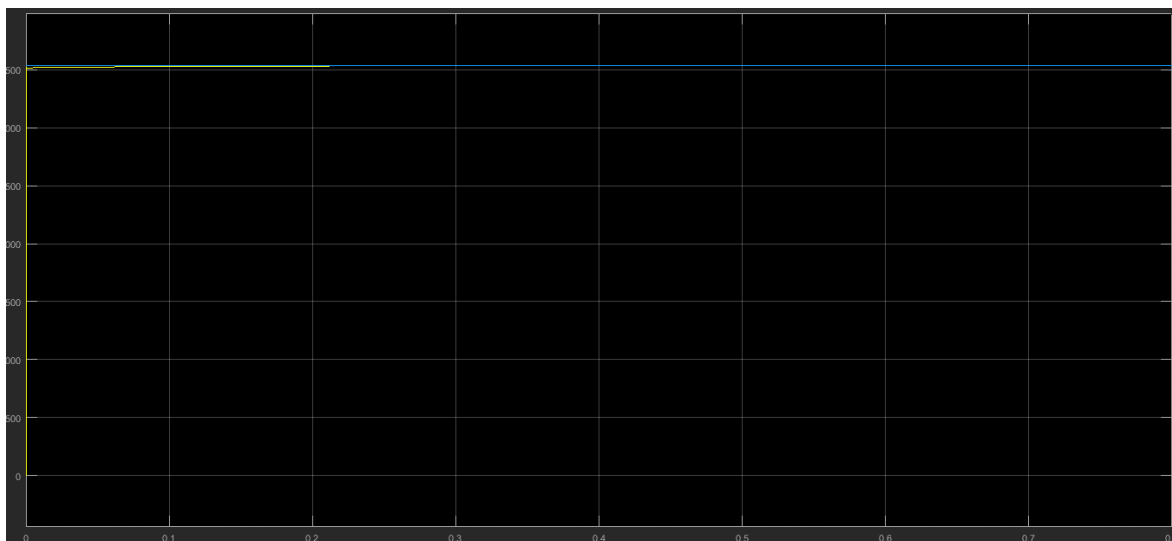


Figura 5.14 Implementación controlador PI

Fuente: autores

Adicionándole una entrada integral, se observa que hay una mejora muy significativa. Ya que la velocidad angular llega hasta la referencia, con un tiempo de establecimiento de menos de un segundo.

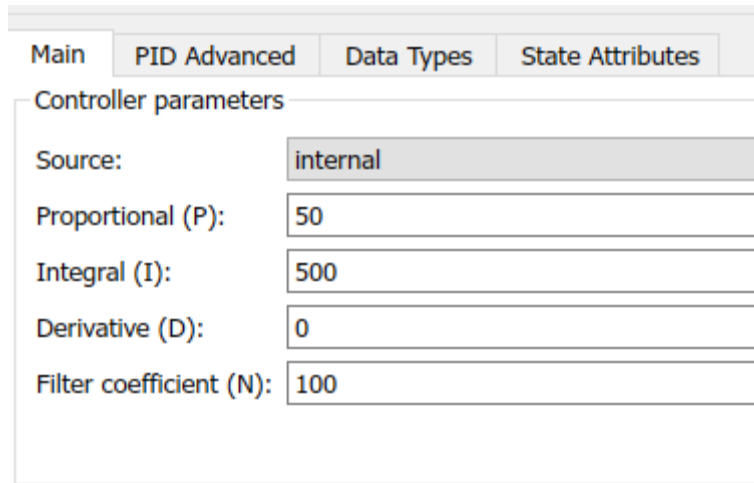


Figura 5.15 Configuración módulo PID simulink

Fuente: autores

Las constantes utilizadas en el control PI como lo muestra la imagen anterior fueron de $K_p = 50$ y $K_i = 500$ (ver Figura 5.15).

5.3.2. Simulación Motor de las aspas

Para realizar el control de la planta, tuvimos en cuenta el tipo y orden del sistema, basados en eso y sabiendo que el modelo matemático del motor con aspas es de orden uno y de tipo cero, debemos implementar un controlador PI.

Un controlador PI se caracteriza por contar con una parte proporcional y una integral, la parte proporcional genera un acercamiento a la referencia sin llegar nunca a ella, mientras que la parte integral al tener una planta tipo cero genera un polo en cero, estabilizando en este caso la velocidad angular para el proceso de aspersión de gas de nitrógeno.

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (5.2)$$

El diagrama de bloques de la implementación del control se muestra en la Figura 5.16.

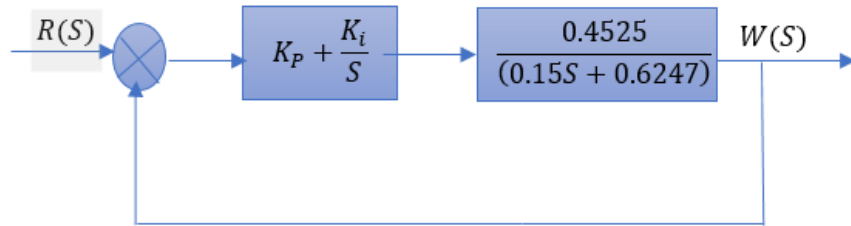


Figura 5.16 Diagrama de bloques implementación control

Fuente: autores

Igual que en la simulación de la banda, para la simulación del movimiento de los motores de aspas fue necesario la utilización del programa de Matlab y su complemento de Simulink y Simscape. Comenzamos por generar un CAD simplificado en SolidWorks, para disminuir los tiempos de simulación y el gasto computacional.

En la Figura 5.17 se muestra el modelo simplificado del túnel IQF utilizado en la simulación de Simscape de Matlab.

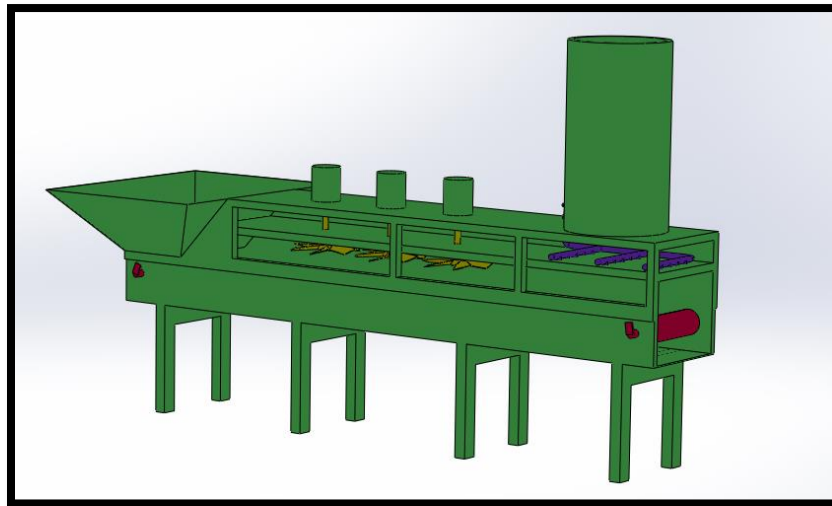


Figura 5.17 Modelo simplificado túnel IQF

Fuente: autores

Cuando se realiza la simulación en Simscape, se genera un archivo Simulink donde podemos variar las características de la planta. El esquema generado en Simulink se muestra en la Figura 5.18.

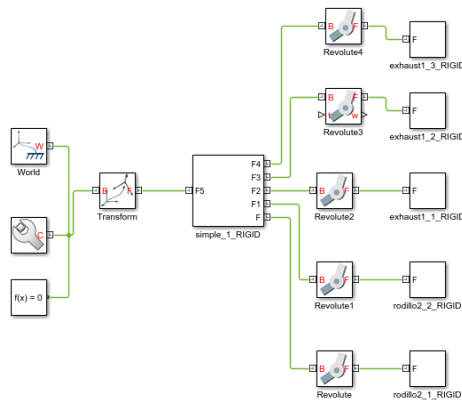


Figura 5.18 Esquema Simulink

Fuente: autores

En la imagen podemos observar que contamos con cinco articulaciones móviles, las cuales son del tipo rotacional. Existen dos que hacen parte del sistema de la banda transportadora y otros tres para las aspas que esparcen el nitrógeno gaseoso para el pre-enfriamiento.

Para poder implementar el control PI, fue necesario cambiar las propiedades de la articulación a controlar, colocándole perturbaciones y características propias de la planta. En la Figura 5.19 observamos la implementación de los bloques de control en la simulación.

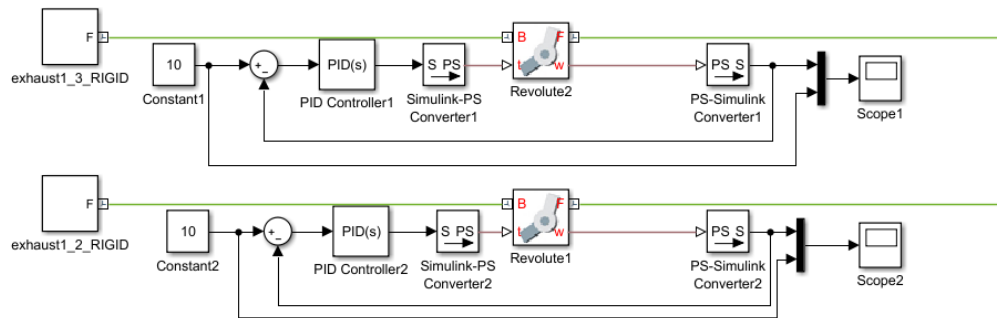


Figura 5.19 Implementación bloques de control

Fuente: autores

Se utilizó el bloque PID con el fin de poner las constantes tanto integral como proporcional. Para que se pudiera estabilizar la planta fue necesario variar la constante proporcional e integral. Empezamos variando la constante proporcional, se observó que la velocidad angular intenta llegar a la referencia, pero nunca lo logra. Se puede decir que se aleja cada vez más de la referencia (ver Figura 5.20).

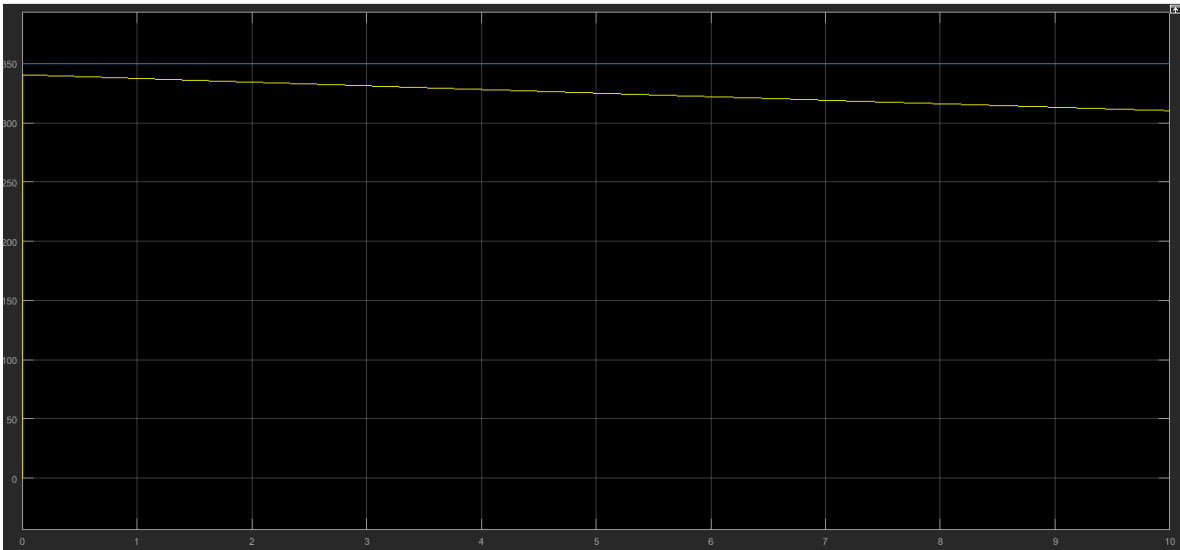


Figura 5.20. Constante proporcional

Fuente: autores

Cuando se implementó la constante integral, se logró el control total de la velocidad angular de los motores con aspas. En seguida observamos como esta constante ayuda a que la velocidad se acerque más rápido a la referencia. En la Figura 5.21 se puede admirar con más detalle la respuesta de la planta a un control PI.



Figura 5.21 Implementación controlador PI

Fuente: autores

Adicionándole una entrada integral, se observa que hay una mejora significativa. Ya que la velocidad angular llega hasta la referencia, con un tiempo de establecimiento de menos de un segundo.

The image shows a Simulink configuration window for a PID controller. The tabs at the top are 'Main', 'PID Advanced', 'Data Types', and 'State Attributes'. The 'PID Advanced' tab is selected. Under 'Controller parameters', there are five input fields: 'Source' (a dropdown menu set to 'internal'), 'Proportional (P):' (text box with '50'), 'Integral (I):' (text box with '100'), 'Derivative (D):' (text box with '0'), and 'Filter coefficient (N):' (text box with '100'). A 'Tune...' button is located at the bottom right of the configuration area.

Figura 5.22. Configuración módulo PID Simulink

Fuente: autores

Las constantes utilizadas en el control PI como lo muestra la imagen anterior fueron de $K_p = 50$ y $K_i = 100$ (ver Figura 5.22).

5.4. Simulación del sistema de potencia

Usando el software PV*SOL 2017 se diseñó una simulación para el sistema fotovoltaico. En la tabla se muestran los parámetros utilizados.

Tabla 9 Tabla de parámetros de simulación para el sistema fotovoltaico.

Parámetros	Valor
Datos de radiación	Bogotá D.C – Colombia A. El Dorado
Carga	1599kWh
Módulo FV	Sunmodule Plus SW 260 poly
Potencia pico del M. FV	260Wp
Numero de M. FV	3
Potencia pico generada	0.78Wp
Inclinación	15°
Inversor	SUNNY BOY 1.5
I max del Inversor (Entrada)	10A
Vmax del Inversor (Entrada)	600V
Potencia max CA	1.5kW
Potencia max DC	1.6kW
Regulador MPPT	Incluido en el inversor
Batería	Senec Home G2 plus
N° de Baterías	1

V nominal	48V
Carga c10 h	326 Ah
Inversor de batería	Sunny Island 4548
I max (Entrada)	38A
V max (Entrada)	63V
V min (Entrada)	48V

Estos parámetros se ajustan a los de diseño con la excepción de la batería, puesto que el programa no poseía una librería de baterías a 24V. Por lo tanto, el sistema queda sobredimensionado.

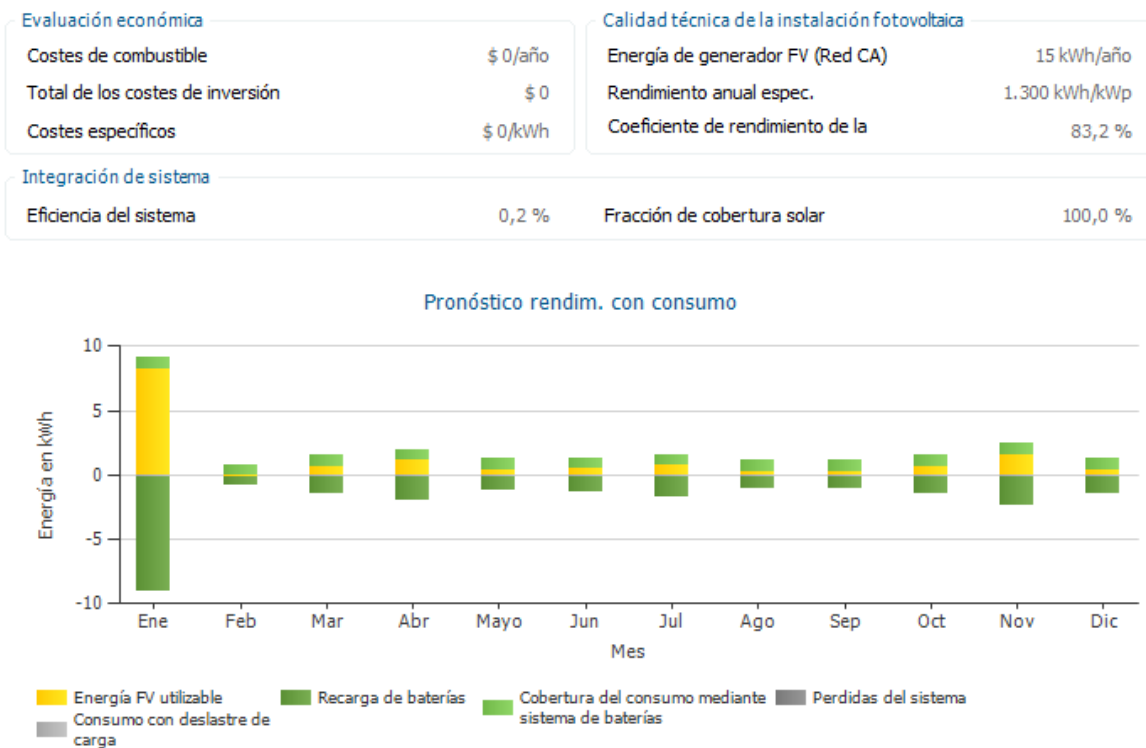


Figura 5.23 Resultados de la simulación del sistema fotovoltaico en el programa PV*SOL

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 5.23 los resultados de la simulación arrojan que el sistema cumple con la demanda propuesta en un 100%. EL valor de la eficiencia ratifica que el sistema está sobre dimensionado.

La simulación también nos muestra el desarrollo de la temperatura sobre el módulo la cual es un parámetro importante para verificar el rendimiento.

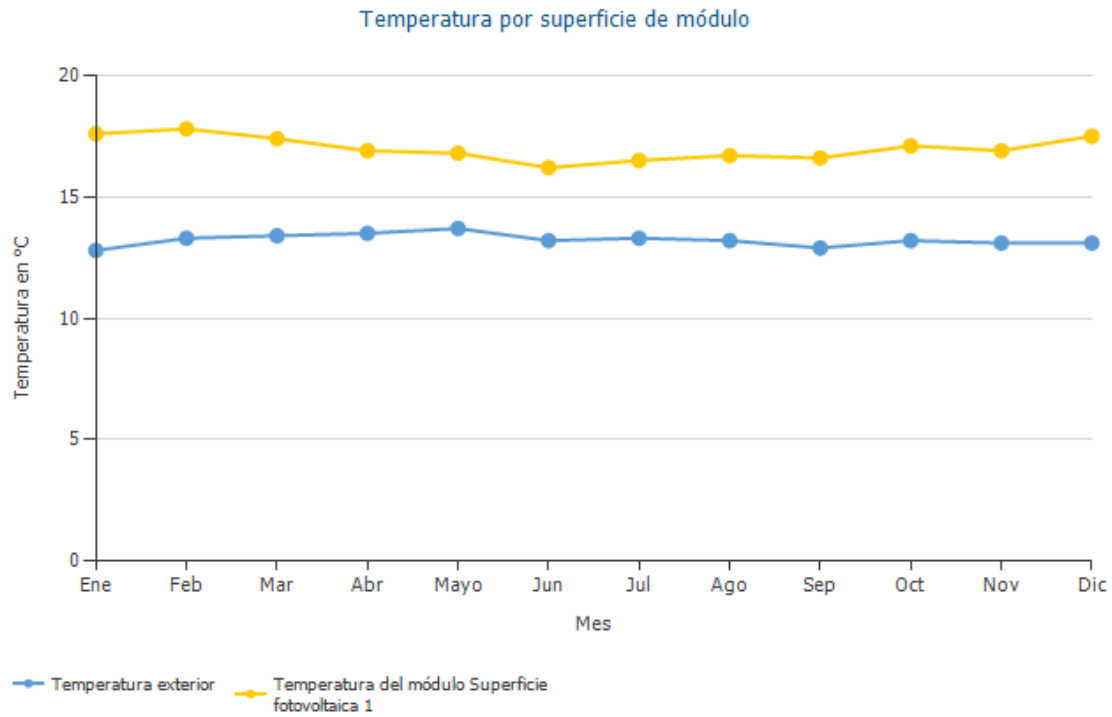


Figura 5.24 Resultados de la simulación en relación con la temperatura del sistema fotovoltaico en el programa PV*SOL

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 5.24 la temperatura no excede el valor de 20° con lo cual se está trabajando a una temperatura óptima.

6. Conclusiones y perspectivas futuras

Según los resultados obtenidos en el proyecto, la energía fotovoltaica es el método indicado para alimentar el sistema propuesto, dado que en Cundinamarca posee valores de densidad energética mayores a la de las demás fuentes de energía alternativa. Esto se evidencia al comparar los 1000 Wh/m^2 que posee la energía solar contra los 36 Wh/m^2 que posee la energía eólica. También, para nuestro desarrollo no es conveniente utilizar un sistema geotérmico, dado que su implementación requiere una inversión en investigación preliminar alta sin un resultado garantizado.

Gracias a que el proceso de liofilización diseñado tiene un consumo energético bajo (1599 Wh) es posible implementar el sistema bajo un modelo fotovoltaico con funcionamiento aislado de la red eléctrica. Esto sin requerir una inversión alta, lo cual favorece la implementación en las regiones de Cundinamarca que poseen una red eléctrica deficiente.

Al implementar un sistema como el IQF se está reduciendo de forma significativa la energía necesaria para cumplir con el sistema de liofilización, pues más de 11 kWh de energía son los necesarios para congelar el producto antes de la sublimación. Además, se puede reutilizar cierta cantidad de gas de nitrógeno para mantener la temperatura de liofilización en la zona de sublimación, reduciendo aún más el consumo.

El sistema de congelación puede generar un patrón no uniforme de temperatura en los alimentos en la zona de gas, lo que puede dificultar el congelamiento del producto en la zona de aspersión. Para esto se hace necesario controlar la velocidad de las aspas y de la banda transportadora.

El uso de un aislante como la espuma de poliestireno, reduce las pérdidas por transferencia de calor, desde el ambiente hacia el interior del túnel de congelación, a valores menores al 2%. Esto mejora el desempeño del sistema de liofilización con respecto a la energía que debe producir el sistema fotovoltaico.

Según los resultados obtenidos en el proyecto, el sistema propuesto cumple el objetivo de deshidratar fresa hasta valores de humedad final menores al 5% , esto sin un calentamiento mayor a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ en la capa seca. Estos valores cumplen los parámetros de liofilización para garantizar la menor pérdida de las propiedades de la fresa.

7. Bibliografía

- [1 R. W. J. Dingwall, «Las profesiones y el orden social,» *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, vol. 6, nº 1, pp. 1-18, 2004.
- [2 Plan de energización rural sostenible (PERS), «Plan de Energización rural del departamento de Cundinamarca PERS, Diagnóstico Energético del Departamento de Cundinamarca,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.
- [3 M. Mediavilla, C. De castro, I. Capellán, L. Miguel, I. Arto y F. Frechoso, «La transición hacia energías renovables: límites físicos y temporales,» *Energy Policy*, vol. 52, 2013.
- [4 Greenpeace, Ley de Cambio Climático y Transición Energética Propuestas de Greenpeace, España: Greenpeace España, 2017.
- [5 Núcleo Ambiental S.A.S, Manual: FRESA, Cámara de Comercio de Bogotá, 2015.
- [6 FAO, Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención, Roma, 2012.
- [7 Departamento Nacional de Planeación (DNP), «Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia,» Departamento Nacional de Planeación, Bogotá D.C., 2016.
- [8 Dirección de Desarrollo Rural Sostenible DDRS Subdirección de Producción y Desarrollo Rural SPDR, «DIAGNÓSTICO DE LA POBREZA RURAL. COLOMBIA 2010-2014,» Departamento Nacional de Planeación, Bogotá D.C., 2015.
- [9 J. F. Caicedo, «La intermediación como un impedimento al desarrollo del pequeño productor de Medellín,» *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 1, nº 14, pp. 27-32, 2013.
- [1 Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), «Revisión de la OCDE de las Políticas Agrícolas: Colombia 2015. Evaluación y Recomendaciones de Política,» Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), 2015.
- [1 Ministerio de Agricultura y Ganadería Dirección Regional Central Occidental Grecia, Alajuela, 1] Agrocadena de Fresa, Alajuela, 2007.
- [1 W. DELGADO, «CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA Y ADOPCIÓN TECNOLÓGICA DE PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES DE CEBOLLA (*Allium cepa* L.) EN EL MUNICIPIO DE PASCA (CUNDINAMARCA),» PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá, 2009.
- [1 NASA, «NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data,» ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER, [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi->

bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=4.7815836&lon=-75.0922244&submit=Submit. [Último acceso: 02 Agosto 2017].

- [1 D. Gomez y F. Diez, «LA DOMESTICACIÓN DEL FUEGO DURANTE EL PLEISTOCENO INFERIOR Y 4] MEDIO. ESTADO DE LA CUESTIÓN,» *VELEIA*, nº 26, pp. 189-216, 2009.
- [1 E. ALOMÁ y M. MALAVER, «LOS CONCEPTOS DE CALOR, TRABAJO, ENERGÍA Y TEOREMA DE 5] CARNOT EN TEXTOS UNIVERSITARIOS DE TERMODINÁMICA,» *EDUCERE Artículos arbitrados*, vol. 11, nº 38, pp. 477-487, 2007.
- [1 C. A. S. Hall, "Fossil Fuels," in *Energy Return on Investment. Lecture Notes in Energy*, Cham, 6] Springer, 2017.
- [1 V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokke, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. 7] L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White, «Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability - Part B: regional aspects - Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
- [1 D. E. Flores T, M. F. González y A. B. López, «ENERGÍA SOLAR, UNA ENERGÍA ALTERNATIVA 8] ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO,» *Kuxulkab' REVISTA DE DIVULGACIÓN DIVISIÓN ACADÉMIA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS*, vol. XVII, nº 33, pp. 77-79, 2011.
- [1 Coordinación de Energías Renovables Dirección Nacional de Promoción Subsecretaría de 9] Energía Eléctrica, «Energías Renovables 2008 - Energía Solar,» Tecnología de la Información Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera Secretaría de Energía, Buenos Aires, 2008.
- [2 I. M. Bragado, «El efecto fotoeléctrico,» de *Física General*, 2003, pp. 123-124. 0]
- [2 J. Ignacio, A. Fernández, C. Jiménez, A. Lecuona, F. Mellado, J. Plaza, V. Ramos y G. Sala, 1] «Energía Solar Fotovoltaica,» *Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación*, pp. 1-124, 2008.
- [2 J. C. Romero, «Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las 2] regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró,» UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Barcelona, 2015.
- [2 UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME) y INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, 3] METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTALES (IDEAM), «APÉNDICE C Medición de la radiación solar,» de *Atlas de Radiación Solar de Colombia*, Bogotá DC, 2005, pp. 139-155.
- [2 G. Walker, «EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL,» 4] *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, nº 21, 2001.

- [2 A. Raboso, «DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ALIMENTAR UNA POTABILIZADORA 5] DESALINIZADORA AUTÓNOMA,» Universidad internacional de Andalucía, 2013.
- [2 C. Espejo M, «Los nuevos paisajes de la energía solar: las centrales termosolares,» *Nimbus: revista de climatología, meteorología y paisaje*, nº 25-26, pp. 65-91, 2012.
- [2 J. Gaviria, J. Mora y J. Agudelo, «Historia de los motores de combustión interna,» *Facultad de 7] Ingeniería, Universidad de Antioquia* , nº 26, pp. 68-78, 2002.
- [2 Torresol Energy Investments, S.A, «www.torresolenergy.com,» www.torresolenergy.com, [En 8] línea]. Available: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/plantas-valle1-valle2/es>. [Último acceso: 9 Agosto 2017].
- [2 solar-energia.net, «solar-energia.net,» 21 Mayo 2015. [En línea]. Available: [https://solar-9\] energia.net/media/termica/central-energia-solar-disco-parabolico.jpg](https://solar-9] energia.net/media/termica/central-energia-solar-disco-parabolico.jpg). [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [3 J. Moragues y A. Rapallini, «ENERGIA EOLICA,» INSTITUTO ARGENTINO DE LA ENERGIA 0] "GENERAL MOSCONI", 2003.
- [3 R. Iannini, J. Gonzalez y S. Mastrángelo, «Energía Eólica Teoría y Características de 1] Instalaciones,» *Boletín Energético*, nº 13, pp. 3-56, 2004.
- [3 P. F. Díez, «ANTECEDENTES HISTÓRICOS,» de *ENERGÍA EÓLICA*, Departamento de Ingeniería 2] Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2006, pp. 1-4.
- [3 C. ESPITIA y L. J. PUERTO, «DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MINI AEROGENERADOR DE EJE 3] VERTICAL,» UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, Bogotá D.C., 2014.
- [3 J. C. Antezana, «Diséno y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical.,» 4] UNIVERSIDAD DE CHILE,FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMATICAS, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, SANTIAGO DE CHILE, 2004.
- [3 A. Graterol y G. Mayoral, «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL DE 1 KW DE 5] POTENCIA,» UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR , Caracas, 2006.
- [3 É. Santoyo y R. M. Barragán, «Energía geotérmica,» *Revista de la Academia Mexicana de 6] Ciencias*, vol. 61, nº 2, pp. 40-51, 2010.
- [3 S. Bruni, «Una nueva serie sobre la innovación de energía, La Energía Geotérmica,» Banco 7] Interamericano de Desarrollo, Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6601/El%20calor%20de%20la%20Tierra%3A%20fuente%20inagotable%20de%20energ%C3%ADa%20sostenible.pdf?sequence=4>. [Último acceso: 15 Agosto 2017].

- [3 K. Clayton, K. Keener y D. Bush, «Purdue Extension,» Purdue Extension, 10 Octubre 2012. [En 8] línea]. Available: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/fs/fs-15-s-w.pdf>. [Último acceso: 15 Agosto 2017].
- [3 P. F. Maupoey, A. M. Andrés G, J. M. Barat y A. M. Albors, Introducción al secado de alientos 9] por aire caliente, Valencia : Universitat Politècnica de València, 2001.
- [4 E. M. Ceballos-Ortiz y M. T. Jiménez-Munguía, «Cambios en las propiedades de frutas y 0] verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano,» *Temas selectos de ingeniería de alimentos* , vol. 6, nº 1, pp. 98-110, 2012.
- [4 A. R. CHIQUILLO y A. F. DÍAZ PRADA, «DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA DE 1] SECADO PARA FRUTAS TROPICALES,» UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, BUCARAMANGA, 2010.
- [4 M. Almada, M. S. Cáceres, M. Machaín-Singer y J. C. Pulfer, GUIA DE USO de secaderos solares 2] para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes., Asunción : Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005.
- [4 Agro Waste, «<http://www.agrowaste.eu>,» 2013. [En línea]. Available: 3] <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/SECADO-SOLAR.pdf>. [Último acceso: 22 Agosto 2017].
- [4 R. Vázquez, «Capitulo 9, Procesos de transporte,» de *Termodinámica Biológica*, AGT Editor, 4] 2002, pp. 157-184.
- [4 P. Della Rocca, «Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y 5] secado por microondas y aire caliente,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES , Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2010.
- [4 M. Parzanese, «Alimentos Argentinos,» [En línea]. Available: 6] [http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_06_Osmotica.p](http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_06_Osmotica.pdf) df. [Último acceso: 22 Agosto 2017].
- [4 L. Domínguez y M. Parzanese, «Tecnologías para la Industria Alimentaria Fluidos 7] supercríticos,» Alimentos Argentinos, [En línea]. Available: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_01_Fluidos.pdf. [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [4 L. M. Grajales-Agudelo, W. A. Cardona-Perdomo y C. E. Orrego-Alzate, «Liofilización de 8] carambola (Averrhoa carambola L.) osmodeshidratada,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 7, nº 2, pp. 19-26, 2005.
- [4 A. Clementz y J. Delmoro, «SNACKS FRUTALES,» *INVENIO*, vol. 14, nº 27, pp. 153-163, 2011. 9]

- [5 L. E. Mayer, S. M. Bertoluzzo y M. G. Bertoluzzo, «CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS DISEÑO Y 0] CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR,» *Invenio*, vol. 9, nº 17, pp. 147-157, 2006.
- [5 F. J. Parra R., H. E. Gómez H., O. González R. y J. M. de Santos A., «LA IMPORTANCIA DE MEDIR 1] LA TEMPERATURA DE SUBLIMACIÓN PARA ESTIMAR PARÁMETROS EFECTIVOS DE TRANSPORTE EN EL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN.,» *e-Gnosis*, nº 5, pp. 1-23, 2007.
- [5 S. Michanie, «Erase una vez....la conservación de los alimentos,» *Énfasis Alimentación*, pp. 2] N°4:28-34., 2000.
- [5 M. F. Aubrey y N. N. Potter, «Food preservation,» 2016. 3]
- [5 M. A. Aravindh y A. Sreekumar, *Energy Sustainability Through Green Energy*, Pondicherry: 4] Springer India, 2015.
- [5 DEStech Publications, Inc., *FOOD DRYING Science and tecnology. Microbiology, Chemistry,* 5] *Applicacions*, Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2008.
- [5 M. Kumar, S. K. Sansaniwal y P. Khatak, «Progress in solar dryers for drying various 6] commodities,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, p. 346–360, 2016.
- [5 B. Bena y R. Fuller, «Natural convection solar dryer with biomass back-up heater,» *Solar 7] Energy*, vol. 72, nº 1, p. 75–83, 2002.
- [5 H.-H. Chen, C. E. Hernandez y Tzou-Ch, «A study of the drying effect on lemon slices using a 8] closed-type solar dryer,» *Solar Energy*, vol. 78, nº 1, p. 97–103, 2005.
- [5 L. V. PINZÓN A, «ALTERNATIVA EN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR ANTE CRISIS 9] ENERGÉTICA EN COLOMBIA,» UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, Bogotá, 2016.
- [6 NASA, «NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables,» NASA, Julio 2005. [En 0] línea]. Available: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=255096&lat=5&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=&p=grid_id&p=swvdowncook&step=2&lon=74. [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [6 NASA, «NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables,» NASA, Julio 2005 . [En 1] línea]. Available: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=255096&lat=5&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=-999&email=&p=grid_id&p=ret_tlt0&step=2&lon=74. [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [6 C. Ochoa, J. D. Betancur y Ó. M. Múnera, «La valoración de proyectos de energía eólica en 2] Colombia bajo el enfoque de opciones reales,» *Cuadernos de Administración*, vol. 25, nº 44, pp. 193-231, 2012.
- [6 NASA, «NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables,» NASA, Julio 2005. [En 3] línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi->

bin/sse/grid.cgi?&num=255096&lat=5&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=-999&email=&p=grid_id&p=wspd50m&p=wspd10arpt&step=2&lon=74. [Último acceso: 22 Agosto 2017].

[6 M. P. Gutiérrez, S. Ávila y D. J. Patarroyo, «Análisis del recurso energético eólico para la ciudad 4] de Bogotá DC para los meses de diciembre y enero, Colombia,» *AVANCES Investigación en Ingeniería*, vol. 12, 2015.

[6 Energía Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, FORMULACIÓN DE UN PLAN DE 5] DESARROLLO PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA (PDFNCE), Bogotá: Ministerio de Minas y Energía Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2010.

[6 Servicio Geológico Colombiano , «INVENTARIO NACIONAL DE MANIFESTACIONES 6] HIDROTERMALES,» Servicio Geológico Colombiano , [En línea]. Available: <http://hidrotermales.sgc.gov.co/invtermales/>. [Último acceso: 30 Agosto 2017].

[6 N. C. Marzolf, Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia, Banco Interamericano 7] de Desarrollo, 2014.

[6 J. S. Cohen y T. C. Yang, «Progress in food dehydration,» *Trends in Food Science & Technology* , 8] vol. 6, pp. 20-25, 1995.

[6 K. E. Hummer, N. Bassil y W. Njuguna, «Fragaria,» de *Wild Crop Relatives: Genomic and 9] Breeding Resources: Temperate Fruits* , Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 17-44.

[7 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, «THERMAL 0] PROPERTIES OF FOODS,» de *1998 ASHRAE handbook : refrigeration*, Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1998.

[7 L. Otero, B. Guignon y S. M. P. D. Sanz Martínez, «ÚLTIMOS AVANCES EN TECNOLOGÍAS DE 1] CONGELACIÓN DE ALIMENTOS,» *Revista de tecnología e higiene de los alimentos*, vol. 2, pp. 82-90, 2013.

[7 R.-. M. V, T. C. Carrillo y M. Vázquez-Aguilar, «Descripción y aplicaciones de equipos de 2] congelación para la industria de alimentos,» *Temas selectos de ingeniería de alimentos* , vol. 1, pp. 97-107, 2007.

[7 A. Datye, K. Narayankhedkar y O. Sharma, «DESIGN OPTIMIZATION OF LIQUID NITROGEN 3] BASED IQF TUNNEL,» *CP823, Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC*, vol. 51, pp. 171-177, 2006.

[7 C. E. ORREGO ALZATE, «CONGELACIÓN,» de *PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS, MANIZALES, 4] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES*, 2003, pp. 245-270.

[7 Yutopian online, «Thermal Properties of Nitrogen, N2 (Gaseous),» 2000. [En línea]. Available: 5] <http://www.yutopian.com/Yuan/prop/N2.html>. [Último acceso: 28 Agosto 2017].

- [7 G. E. Ramos G, «Diseño de un Congelador continuo individual IQF con una Capacidad de 200 6] Kg/hr de Espárragos,» Pontificia Universidad Católica del Perú FACULTAD DE CIENCIAS E Ingeniería , Lima, 2013.
- [7 C. E. ORREGO A, «CRIOCONCENTRACIÓN Y LIOFILIZACIÓN,» de *PROCESAMIENTO DE 7] ALIMENTOS*, MANIZALES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES, 2003, pp. 291-315.
- [7 P. McKenna, «Nova next,» pbs.org, 10 Septiembre 2013. [En línea]. Available: 8] <http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/tech/melting-to-keep-cool/>. [Último acceso: 9 Agosto 2017].
- [7 Energy News, «“Tower Power” podría ahorrar hasta 37 M€ en la producción de energía 9] eólica,» 04 Abril 2016. [En línea]. Available: http://www.energynews.es/wp-content/uploads/2014/09/dudgeon-offshore-wind-86571_325x200.jpg. [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [8 H. Grobe, Artist, *Windgenerator*. [Art]. 2007. 0]
- [8 A. Nicola Haro, Implementación de un sistema de pesaje para trigo en un proceso de 1] producción de harina en la empresa Molino Electro Moderno S.A., QUITO: Escuela Politecnica nacional, 2009.
- [8 A. P. F. & P. Supplies, Artist, *All Points 26-3116 Clockwise Fan Blade 3" Diameter x 3/16" Bore*. 2] [Art].