

DISEÑO DE UN HORNO SECADOR PARA ARENA QUE MEJORE EL
PROCESO Y LOS TIEMPOS DE SECADO EN LA FABRICACIÓN DE
HORMIGÓN

SANTIAGO ANAYA MARTÍNEZ
ANDRES FELIPE ARAMBUL RIVERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIRIA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2021

DISEÑO DE UN HORNO SECADOR PARA ARENA QUE MEJORE EL
PROCESO Y LOS TIEMPOS DE SECADO EN LA FABRICACIÓN DE
HORMIGÓN

SANTIAGO ANAYA MARTÍNEZ
ANDRES FELIPE ARAMBUL RIVERA

MSc. SERGIO ANDRES GÓMEZ SUAREZ
Director de proyecto

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIRIA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado calificador

Jurado calificador

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. ANTECEDENTES	12
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 General:	16
4.2 Específicos:	16
5. ALCANCE	17
6. MARCO TEORICO	18
6.1 Definición del hormigón	18
6.1.1 Ventajas del hormigón.....	18
6.1.2 Clasificación del hormigón.....	18
6.1.3 Arena, elemento esencial en la fabricación de hormigón	19
6.2 Principios del secado	19
6.3 Humedad	20
6.3.1 Tipos de humedad.....	21
6.3.2 Medición de la humedad	21
6.3.3 Empleo de temperaturas para el secado de la arena	22
6.4 Clasificación de los hornos secadores de arena según el proceso de transferencia de calor	22
6.4.1 Secadores directos.....	23
6.4.2 Secadores indirectos	27
6.5 Transferencia de calor	30
6.5.1 Conducción	30
6.5.2 Convección.....	31
6.5.3 Radiación	33
6.6 Sistemas de transmisión de potencia usados en hornos	33
6.6.1 Cadena y piñones.....	33
6.6.2 Banda con poleas.....	34

6.6.3 Sistema directo o rueda de fricción	34
6.6.4 Engranés	35
6.7 Árbol de objetivos	37
7. METODOLOGÍA	39
7.1 Objetivo 1. Analizar estudios relacionados con hornos secadores para identificar los parámetros claves que se deben tener en cuenta para el diseño de la máquina.	39
7.1.1 Nivel de investigación.....	39
7.2 Objetivo 2. Realizar el diseño conceptual del horno secador de arena definiendo posibles soluciones.	39
7.3.1 Desarrollo.....	39
7.3 Objetivo 3. Realizar el diseño detallado de los diferentes componentes mecánicos, estructurales y térmicos del horno secador de arena a través de cálculos teóricos y software de diseño e ingeniería	39
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
8.1 Objetivo 1. Analizar estudios relacionados con hornos secadores para identificar los parámetros claves que se deben tener en cuenta para el diseño de la máquina.	41
8.2 Objetivo 2. Realizar el diseño conceptual del horno secador de arena definiendo posibles soluciones.	44
8.2.1 Lista de requerimientos	45
8.2.2 Diseño conceptual del horno secador para arena	45
8.2.3 Selección de diseño	51
8.3 Objetivo 3. Realizar el diseño detallado de los diferentes componentes mecánicos, estructurales y térmicos del horno secador de arena a través de cálculos teóricos y software de diseño e ingeniería.	52
8.3.1 Diseño del horno secador.....	52
8.3.2 Potencia del motor.....	58
8.3.3 Fuente térmica.....	68
8.3.4 Potencia del lanzallamas.....	71
8.3.5 Análisis de temperatura del horno secador	75
8.3.6 Proceso de manufactura del horno secador para arena.....	77
9. CONCLUSIONES	80
10. RECOMENDACIONES.....	81

11. BIBLIOGRAFÍA82
12. ANEXOS.....84
12.1 Planos componentes horno secador para arena84

ÍNDICE DE ILUSTACIONES

<i>Ilustración 1. Secador de bandeja.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 2. Secador de túnel.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 3. Secador de torre.....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 4. Secador rotatorio.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 5. Diagrama secador de espray.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 6. Secador de lecho fluidizado.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 7. Secador de tambor.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 8. Secador de bandejas al vacío.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 9. Secador por sublimación.....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 10. Tasa de conducción térmica.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 11. Convección forzada y convección natural.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 12. Sistema de cadena y piñones.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 13. Sistema de banda con poleas.....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 14. Rueda de fricción.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 15. Sistema de engrane.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 16. Árbol de objetivos del horno secador para arena.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 17. Esquema de la metodología.....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 18. Parámetros más influyentes en el diseño del horno secador.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 19. Análisis de funciones del horno secador para arena.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 20. Admisión directa-Transmisión de potencia por ruedas de fricción-Lanzallamas.....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 21. Admisión por tolva-Sistema de cadenas-Quemador.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 22. Admisión por bandas transportadoras-Sistema de transmisión por engranajes-Generador de aire caliente.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 23. Vista lateral y frontal del horno secador.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 24. Medidas importantes presentes en el tambor.....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 25. ángulo de reposo de la arena dentro del horno.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 26. Motor eléctrico TECHTOP MS160M2-8.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 27. Variador de frecuencia Rexroth EFC 3610.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 28. Diagrama de cuerpo libre horno.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 29. Diagrama rodillos.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 30. Diagrama cuerpo libre rodillos.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 31. Diagrama rodillo y concentradores de esfuerzo.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 32. Rodamiento y chumacera RMS 16.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 33. Lanzallamas de un horno secador de arena.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 34. Quemador ecoflam max gas 120.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 35. Análisis de temperatura del acero A36 en software SolidWorks.....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 36. Diseño final horno secador para arena.....</i>	<i>77</i>

<i>Ilustración 37. Símbolos del diagrama de operaciones.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 38. Diagrama de operaciones.....</i>	<i>78</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Peso de la arena en distintos estados.	19
Tabla 2. Comparativa entre sistemas de transmisión de potencia.....	36
<i>Tabla 3.Comparativa entre los parámetros usados por los antecedentes.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4.Posibles soluciones para diseño.</i>	<i>46</i>
Tabla 5. Costos de las piezas principales en los diseños	50
Tabla 6. Vida útil componentes principales.....	50
<i>Tabla 7.Tabla de evaluación de diseños según sus factores.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 8.Dimensiones del equipo.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 9.Parámetros de diseño.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10.Condiciones operativas del horno.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 11.Características del material a secar.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 12. Parámetros del aire.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 13. Características del Acero.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 14. Pistas de rodadura.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 15. Cargas sobre la estructura.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 16.Cálculo de potencia requerida.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 17.Características del gas licuado</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 18.Composición del gas natural.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 19.Poderes caloríficos de combustibles.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 20.Tabla comparativa-tipos de combustibles.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 21.Especificaciones del quemador.....</i>	<i>74</i>

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO DE UN HORNO SECADOR PARA ARENA QUE MEJORE EL PROCESO Y LOS TIEMPOS DE SECADO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN

AUTOR(ES): ANDRES FELIPE ARAMBUL RIVERA
SANTIAGO ANAYA MARTINEZ

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería mecánica

DIRECTOR(A): Msc. SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

RESUMEN

La construcción es uno de los sectores de la economía colombiana con más movimiento, los diferentes proyectos de industria, vivienda, centros empresariales y comerciales hacen parte del crecimiento del país. Por consiguiente, se necesita hacer uso de un material resistente, durable y versátil como lo es el hormigón. El hormigón se fabrica a partir de la mezcla entre cemento, grava, agua y arena, siendo esta última nuestra materia a estudio, debido a que debe tener unas características específicas para la mezcla como lo son un porcentaje de humedad bajo. Es así como surge la idea de diseñar un horno secador para arena que mejore el proceso y tiempos en el secado del material. En este proyecto se mostrarán diseños conceptuales y el diseño a detalle del horno secador para arena, teniendo presente lista de requerimientos, análisis de los parámetros claves usados en proyectos a fines, análisis de alternativas en su configuración y cálculos. Se evidencia investigación sobre las características de la arena, transferencia de calor y sistemas de transmisión de potencia, todo para poder obtener un diseño óptimo que cumplan los objetivos transados en el proyecto.

PALABRAS CLAVE:

Arena, diseño, secado, humedad, horno

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN OF A SAND DRYING MACHINE TO IMPROVE THE DRYING PROCESS AND DRYING TIMES IN CONCRETE PRODUCTION

AUTHOR(S): ANDRES FELIPE ARAMBUL RIVERA
SANTIAGO ANAYA MARTINEZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Msc. SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

ABSTRACT

Construction is one of the sectors of the Colombian economy with more movement, the different projects of industry, housing, business and commercial centers are part of the growth of the country. Therefore, it is necessary to make use of a resistant, durable and versatile material such as concrete. Concrete is manufactured from a mixture of cement, gravel, water and sand, the latter being our material of study, because it must have specific characteristics for the mixture, such as a low percentage of humidity. This is how the idea of designing a drying kiln for sand that improves the process and drying times of the material arises. This project will show conceptual designs and the detailed design of the sand dryer oven, taking into account the list of requirements, analysis of the key parameters used in similar projects, analysis of alternatives in its configuration and calculations. Research on the characteristics of the sand, heat transfer and power transmission systems is evidenced, all in order to obtain an optimal design to meet the objectives of the project.

KEYWORDS:

Sand, design, drying, moisture, furnace

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La construcción es uno de los sectores de la economía más importante del país dando paso a la generación de empleo y cubrimiento de hogares a la población. Se ubica como uno de los propulsores de la actividad nacional. Uno de los elementos más usados para las edificaciones es el hormigón. Este material es usado alrededor del mundo por excelencia, debido a su relación precio-calidad, sus propiedades de resistencia y durabilidad, se forma de la mezcla de cemento, grava, agua y arena.

La función de la arena es proporcionar homogeneidad en la mezcla, otorga resistencia y flexibilidad en el hormigón. La arena usada debe ser llevada a tratamientos de calor para eliminar la humedad, a este proceso se le conoce como secado.

El secado natural o al aire, es proceso tradicional que pequeñas y medianas empresas siguen usando, la cual consiste en exponer la arena a condiciones ambientales de aire y temperatura lo que conlleva a algunos problemas como: dependencia al clima, los tiempos de secado son demorados, los trabajadores deben exponerse al polvo y los rayos del sol.

Es por esta razón que se debe realizar el diseño de un secador para arena capaz de optimizar la calidad del producto, reducir esfuerzo a los trabajadores, minimizar riesgos laborales, incrementar la seguridad personal y mejorar la productividad, se hace de vital importancia para el crecimiento de cualquier empresa que se desempeñe en esta área del comercio.

1. ANTECEDENTES

Este capítulo pretende explicar de manera clara las razones que motivaron a la realización de este trabajo de grado y a su vez los objetivos que se realizaron en el desarrollo del proyecto. Se darán a conocer los antecedentes del hormigón, su uso e importancia.

Al pasar de los años se han llevado a cabo varias investigaciones sobre hornos secadores cada uno con su especialidad, a continuación, se mencionan algunas de ellas:

Andrés Castro (2018) en su trabajo de grado titulado “Diseño y construcción de una secadora de arena para la producción de morteros en la hormiguera Hormicen” [1], realizó el diseño de un horno para grandes cantidades de arena, fácil mantenimiento y que dé lugar a la automatización de procesos rudimentarios para el crecimiento de la compañía. En **2009** los ingenieros **Yesid Rueda y Diego Andrés Rueda** en su tesis titulada “Diseño y construcción de un secador directo cilíndrico rotativo para pollinaza” [2] trabajo realizado en la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, llevaron a cabo el proceso de secar pollinaza mediante el uso de hornos secadores, obteniendo un nivel de humedad de 15% y una capacidad para procesar 250kg de este material. El ingeniero **Ernesto Figueroa (2014)**, en su tesis “Balance térmico y de masa para el secado de arena sílice en cilíndricos rotativos horizontales” [3], desarrollada en el INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO, dirigió su estudio en las pérdidas de calor que existen en los secadores cilíndricos rotatorios, estableciendo las características fundamentales del método de balance térmico y masa. Del mismo modo **Adriana Abarca y Marlon Aldaz (2014)**, en su tesis “Diseño y construcción de un secador para la obtención de escamas PET” [4] plantean el proyecto para otro fin de la ingeniería, que es reutilizar el plástico, convirtiéndolo en escamas PET que se utilizara después para la fabricación de botellas. Así mismo **José Rodríguez. (2019)**, en su tesis “Diseño de un secador rotativo para 30 Ton/h de arena, para la empresa ECOMONESA S.A” [5]. Desarrollada en FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA, Bogotá-Colombia, realizó el estudio para un horno secador de carácter industrial, debido a la capacidad de producción que debe manejar, para esto el autor establece los requerimientos funcionales, realiza simulación mediante MEF para la estructura de apoyo, evalúa el impacto ambiental en la fabricación de la máquina y finalmente el monto financiero para determinar la rentabilidad de dicho proyecto. Del mismo modo **Jean Rodríguez. (2014)**, en su proyecto de grado titulado “Fundamento de procesos unitarios” [6]. Desarrollado en la UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANDANDER, el autor realiza un estudio del secado de sólidos, identifica los conceptos básicos y explica las variables que influyen, de igual manera aplica y desarrolla ejercicios de carácter real para la industria. Con el fin de

optimizar los tiempos de secado de quinua Eloy **Gálvez (2016)**, en su tesis “Diseño de una secadora de quinua en el departamento de La Paz – Bolivia” [7]. Realizada en la UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES, realizó el diseño de una secadora de quinua para optimizar el tiempo de secado en la producción de quinua del departamento de La Paz – Bolivia. Por otra parte, José **Sper e Iván Torres. (2009)**, en su proyecto de grado titulado “Diseño de una planta deshidratadora de banano usando secador rotatorio” [8]. Hecho en la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL, realizaron el diseño de una planta deshidratadora de banano para la producción de harina la cual usa un secador rotatorio donde consideran la descripción de los procesos, su infraestructura y el diseño además de la gran mayoría de equipos que lo conforman.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El secado natural o al aire, es un proceso tradicional que se llevó a cabo durante mucho tiempo. Consiste en exponer la arena a las condiciones ambientales de circulación de aire, temperatura y humedad. Este procedimiento puede llevar largas horas laborales debido a que depende de las condiciones climáticas consumiendo así una gran cantidad de tiempo en solo el secado de este material [9].

El secado de la arena puede generar repercusiones de salud para los trabajadores que inhalen sus partículas, enfermedades como las EPOC, bronquitis crónica y la silicosis son habituales. Además de la constante exposición al sol que produce deshidratación, hacen que el secado de esta forma sea un trabajo arduo y tedioso.

Por tales razones, es necesario el diseño de un horno secador para la fabricación de hormigón. El equipo pretende facilitar y mejorar las tareas anteriormente mencionadas, garantizando así una arena seca y de alta calidad para su uso.

3. JUSTIFICACIÓN

El secado de manera natural es arduo para el trabajador debido a que debe esparcir una gran cantidad de material por el piso, moverlo para tratar de darle homogeneidad al secado y nuevamente recogerlo, en todo este tiempo la persona abra respirado polvo, se deshidratará debido a los rayos solares y al final estará agotado sin poder realizar otra función dentro de la empresa.

Los elevados tiempos de secado y el arduo trabajo que se tiene que realizar tradicionalmente para el secado de la arena solo representan pérdidas para una empresa, en cuanto a productividad, eficiencia y calidad en el producto. El diseño de un horno secador para arena supondría una gran oportunidad para el desarrollo y alza de una compañía.

El mecanismo pretende funcionar en el área de la construcción aportando en la producción de hormigón, generando un proceso sencillo y seguro para los trabajadores, aumentando el volumen, la calidad y la eficiencia de producción.

Las personas que trabajan día a día con productos químicos y polvos disponen de unos riesgos mayores de enfermedades respiratorias. Poder realizar la construcción del sistema del horno, implicaría que los trabajadores ya no tuvieran que realizar el doble trabajo previamente mencionado, el clima ya no sería un factor a tener en cuenta además del tiempo que se ahorra. Las empresas que necesitan del secado de la arena fácilmente podrían secar en horas, lo que secaban en todo el día.

La automatización de cualquier proceso industrial se ha convertido en un pilar importante en el crecimiento de cualquier empresa y para el sector arenero no es la excepción.

4. OBJETIVOS

4.1 General:

- Diseñar un horno secador para arena, apoyándose en cálculos teóricos y software CAD para mejorar la calidad y tiempos del secado en la fabricación de hormigón.

4.2 Específicos:

- Analizar estudios relacionados con hornos secadores para identificar los parámetros claves que se deben tener en cuenta para el diseño de la máquina.

Resultado: Identificación de al menos tres principales parámetros que más influyen en el diseño del horno secador.

Indicador: Parámetros priorizados utilizando fuentes bibliográficas confiables como lo son las bases de datos, repositorios institucionales y páginas web.

- Realizar el diseño conceptual del horno secador de arena definiendo posibles soluciones.

Resultado: Bosquejos generales de los posibles diseños, representando la máquina como un conjunto organizado de piezas, componentes y acoplamientos.

Indicador: Diseño conceptual con tres posibles soluciones para el diseño de la máquina.

- Realizar el diseño detallado de los diferentes componentes mecánicos, estructurales y térmicos del horno secador de arena a través de cálculos teóricos y software de diseño e ingeniería.

Resultado: Planos de detalle y determinación de las etapas de fabricación de los componentes de la máquina

Indicador: Planos en SolidWorks, definición detallada de las etapas para la fabricación.

5. ALCANCE

Se obtuvo el diseño de un horno capaz de disminuir el porcentaje de humedad presente en la arena y que mejora la velocidad de secado. Se entrega un prototipo en software CAD junto a planos, etapas de fabricación y componentes a detalle. Cabe aclarar que en este proyecto no se realizará la fabricación física del horno ni de ningún modelo a escala.

6. MARCO TEORICO

En este capítulo se presentan conceptos teóricos relacionados con los hornos secadores y el hormigón. Se explican términos usados en la ingeniería con el fin de otorgar un criterio sólido sobre el tema.

6.1 Definición del hormigón

El hormigón es un material compuesto usado en construcción, formado por una mezcla de cemento, grava, agua y arena. Ha sido usado por más de 3 siglos como principal material de grandes obras de la construcción, esto debido a su relación precio-calidad, son cuatro las propiedades principales: trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad [10].

6.1.1 Ventajas del hormigón

- Hoy día es uno de los materiales más duraderos que se pueden encontrar.
- Posee una gran resistencia a la compresión, esto quiere decir que aguanta una gran cantidad de peso. Al introducir barras de hierro en el interior del hormigón adquiere gran resistencia a la flexión, por lo cual no podrá quebrarse tan fácilmente.
- Es un material denso y consistente, por este motivo se usa en las bases para construcción.
- El hormigón tiene un precio relativamente bajo frente a otros materiales, esto debido a que los materiales para su fabricación son asequibles, lo que conlleva a que su uso sea generalizado.
- Es posible adaptarlo según la necesidad de cada construcción.
- Su principal uso radica en las estructuras y cimientos de las viviendas debido a que es un material que reduce y previene las consecuencias de los movimientos sísmicos [10].

6.1.2 Clasificación del hormigón

Dependiendo del tipo de trabajo que se necesite realizar, existen diferentes formas de conglomerar sus componentes, esto con el fin de ampliar uso, los tipos de hormigón más utilizados son [11]:

- Hormigón en masa
- Hormigón ordinario
- Hormigón armado
- Hormigón pretensado
- Hormigón ciclópeo
- Hormigón autocompactante

6.1.3 Arena, elemento esencial en la fabricación de hormigón

Uno de los materiales que se usan en la fabricación del hormigón es la arena, esto debido a que mejora la homogeneidad de la mezcla, permitiendo aumentar la resistencia y flexibilidad, evitando fisuras cuando el hormigón se endurece. El grado de humedad y su composición en la mezcla determinan el acabado y resistencia de la obra, por lo tanto, no se puede usar cualquier tipo de arena y no se puede permitir un porcentaje de humedad alto.

En la tabla 1 se puede identificar el peso de la arena en distintos estados, lo que convalida que la humedad aumenta en grandes proporciones el peso del material [12].

Tabla 1 Peso de la arena en distintos estados.

TIPO DE ARENA	UNIDADES	
	Lb/ft ³	Kg/m ³
Arena (seca)	110	1762
Arena (fina)	125	2002
Arena (de fundición)	100	1602
Arena (húmeda)	130	2083
Arena (Moldeo)	78	1250

Adaptado de: ANVAL-Bulk Density Chart.

6.2 Principios del secado

El secado se podría definir como un proceso en el cual se busca separar agua u otro líquido de un material sólido, esto con el fin de reducir el porcentaje de humedad llevándolo a un nivel permisible para su uso en la industria. Los requisitos que se deben llevar a cabo para el secado de sólidos dependen de la naturaleza del disolvente que se quiere eliminar, la cantidad que se desee secar y la sensibilidad del productor al calor.

El secado se puede realizar de dos formas, mecánica o secado térmico. Al existir un exceso de humedad puede eliminarse por métodos mecánicos como lo son: sedimentación, filtración, prensado, centrifugado etc. Sin embargo, para disminuir la humedad de manera más completa se usa el secado térmico, empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor [13].

La humedad contenida ejerce una presión de vapor dependiendo de la naturaleza del sólido, por tanto, el secado detalla el proceso térmico para retirar sustancias volátiles. Cuando un sólido húmedo es sometido a un secado térmico, dos procesos se llevan a cabo al mismo tiempo:

1. Transferencia de energía de la humedad interna hacia la superficie del sólido.
2. Transferencia de energía (en forma de calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.

En el proceso de secado ocurre transferencia de masa de contacto gas-sólido, en donde la humedad que yace en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, esto debido a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido humedad y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Al igualarse estas dos presiones, es en donde el sólido y gas están en equilibrio y el proceso llega a su fin.

6.3 Humedad

La humedad se puede definir como el agua contenida o impregnada en un cuerpo, esta se puede expresar de dos maneras: base húmeda o base seca [14].

Humedad en base seca: Es el resultado entre la masa de agua presente en un material y su masa seca, en resumidas palabras es el valor de material seco en una masa húmeda. Se expresa mediante la siguiente formula:

$$\%Hbs = \frac{mH2O}{ms} * 100$$

Donde:

Hbs = Humedad en base seca

ma = masa de agua

m_s = masa de arena seca

Humedad en base húmeda: Es el resultado entre la masa de agua del material y su masa total, en resumidas cuentas, el contenido de humedad representa el porcentaje de masa de agua presente en la masa total. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\%Hbh = \frac{m_{H_2O}}{m_h} * 100$$

Donde:

Hbh = Humedad en base húmeda

m_a = masa de agua

m_h = masa de arena húmeda

6.3.1 Tipos de humedad

El agua que contiene la arena puede presentarse de las siguientes maneras:

- Agua absorbida: Agua presente en la superficie del material
- Libre: Agua presente en la superficie de la arena
- Agua capilar: Agua que se sitúa en los huecos de la arena

6.3.2 Medición de la humedad

Para conocer el grado higrométrico de la arena de manera exacta se usan sondas, el fundamento es el siguiente: se genera una pequeña corriente eléctrica la cual atraviesa la arena y varía su resistencia dependiendo de la humedad presente.

Otra forma de conocer la humedad es una técnica usada en la agricultura por años, en la cual se toma una muestra del material y se aplica la siguiente fórmula [15]:

$$Hw (\%) = ((psh - pss) \div pss) \times 100$$

En donde:

Hw = humedad gravimétrica en porcentaje

Psh = peso o suelo húmedo (g)

Pss = peso suelo seco (g)

6.3.3 Empleo de temperaturas para el secado de la arena

Para el secado de arena en horno secadores, se busca idealmente mantener una temperatura de 160 C° - 180°C para que las moléculas de agua posean la energía cinética suficiente para convertirse en vapor y no alterar la composición de la arena. Un exceso de temperatura podría llevar a la arena a perder sus propiedades físicas, llevándola por ejemplo a un estado de vitrificación [1].

Se ha clasificado un rango de lo que ocurre dentro de las temperaturas que involucran al estudio y estas son entre 100°C y 800°C:

- Con 130°C se elimina el agua superficial del sólido.
- Con 300°C se elimina el agua contenida en los poros del sólido.
- Con 400°C comienza la descomposición de la dolomía (roca sedimentaria compuesta de dolomía)
- Con 573°C comienza una transformación polimórfica del cuarzo
- Con 600°C la sosa y caliza minerales de la arena se combinan para formar el carbonato doble de sodio y calcio, que se funde a 813°C

6.4 Clasificación de los hornos secadores de arena según el proceso de transferencia de calor

El horno es uno de los más empleados en los procesos a nivel industrial para el secado de diferentes tipos de materiales. Existen diversos criterios a tener en cuenta a la hora de clasificar los hornos; como lo son según su modo de operación, el estado del material en el secador, la presión de operación, la temperatura de secado, el número de etapas y el movimiento relativo entre el medio secador y los sólidos a secar, sin embargo, este proyecto solo se enfocará en la clasificación de los secadores según el proceso de transferencia de calor en la cual se destacan dos grandes grupos [16]. Los secadores directos y los secadores indirectos.

6.4.1 Secadores directos

Son también llamados secadores por convección; para llevar a cabo el proceso de secado el material húmedo requiere estar en contacto directo con el gas caliente. Entre sus características están:

- La eficiencia para productos sensibles al calor pues la temperatura del material se reduce por enfriamiento evaporativo.
- Las temperaturas de secado varían casi hasta los 1000 K, la temperatura limitante de la mayoría de los metales de uso común.
- La cantidad de gas a secar depende de la temperatura de entrada, la temperatura de secado y la cantidad de material a secar.
- La eficiencia del secado mejora si se aumenta la temperatura del gas de entrada a una temperatura de salida constante.
- Para secado a temperaturas bajas y humedad atmosférica elevada es necesario deshumidificar el aire de secado.
- Cuando las partículas del material son pequeñas se requiere de un equipo más grande [16].

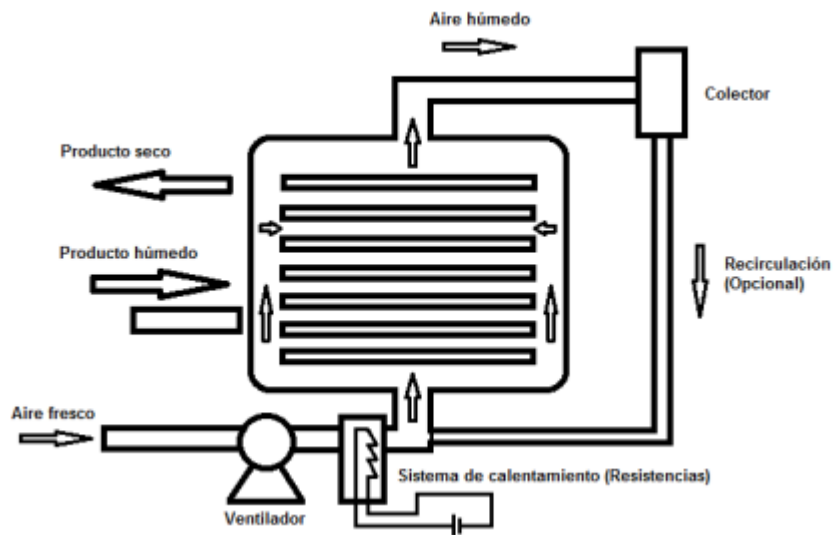
Dentro de los secadores directos se encuentran diversos tipos de secadores, a continuación, algunos de ellos, su funcionamiento y características principales.

6.4.1.1 Secador de bandejas

Llamado también secador de armario o gabinete; el material se extiende a lo largo de una bandeja metálica con una profundidad de 10 mm a 100 mm. Consta de un ventilador que circula constantemente el aire caliente a través de la superficie de cada bandeja, esto quiere decir que solo del 10-20% del aire es nuevo. Cuenta con diversas pantallas, conductos y deflectores para asegurar que el secado sea homogéneo. Una vez terminado el secado la bandeja es reemplazada por otra con más material, una de las modificaciones más comunes es instalar las bandejas sobre carretillas rodantes que permiten la fácil carga y descarga del material esto con el fin de ahorrar tiempo [17].

Para el caso de materiales granulares el fondo de las bandejas puede ser un tamiz donde el aire circula a través del material por un lecho permeable dando como resultado tiempos de secado más cortos debido a un área superficial más amplia.

Ilustración 1. Secador de bandeja.

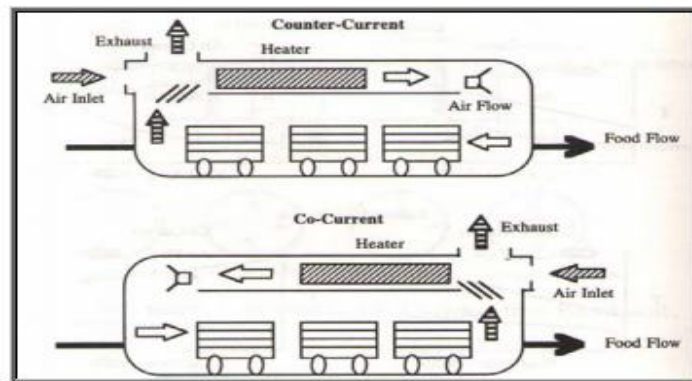


Fuente: (G.Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 2000)

6.4.1.2 Secador de túnel

El material a secar es puesto sobre un carro que se desplaza sobre diferentes rieles a lo largo del túnel. Se puede configurar tanto en paralelo como a contracorriente dependiendo del tipo de muestra final que se requiera, un acabado suave o un endurecimiento en la superficie, respectivamente. Es utilizado generalmente para la deshidratación de alimentos y pueden alcanzar hasta 24 metros de longitud [17].

Ilustración 2. Secador de túnel.

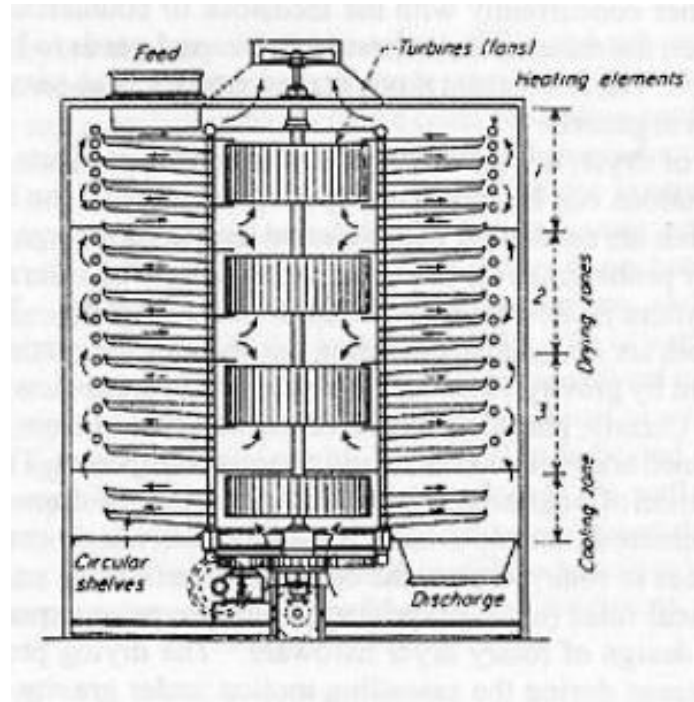


Fuente: G.Barbosa-Canovas, Dehydration of food, 1996.

6.4.1.3 Secador de torre o bandeja giratoria

Consiste en una serie de bandejas en forma de anillo puestas unas sobre otras en un eje giratorio. Los sólidos ingresan en una bandeja por la parte superior donde una columna de aire o gas caliente circula sobre la superficie del material [17].

Ilustración 3. Secador de torre.



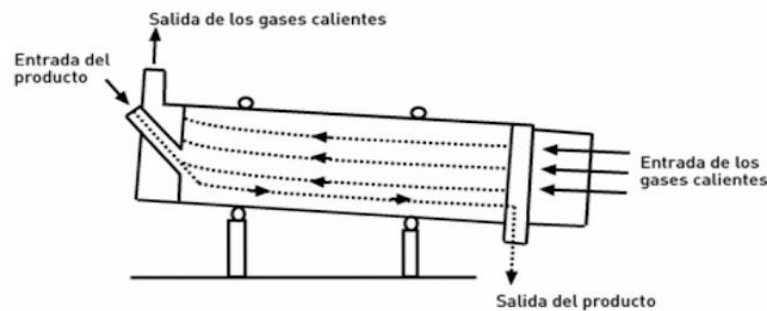
Fuente: G.Barbosa-Canovas, Dehydration of food, 1996.

6.4.1.4 Secador rotatorio

Es el horno más adecuado para productos granulares debido a su acción de volcado y constante movimiento, generando una pared expuesta del material que entra en contacto con una columna de aire caliente de manera perpendicular, lo cual facilita la salida de humedad de su interior.

El tambor posee un pequeño desnivel que ayuda a transportar el material de un extremo a otro gracias a la gravedad, mientras que unas aletas interiores levantan y dejan caer el material a medida que este avanza. La acción de secado es producida por aire o gas caliente el cual puede ser en contracorriente o en el sentido de avance del material, esto para ayudarlo a desplazarse a lo largo del secador [16].

Ilustración 4. Secador rotatorio.

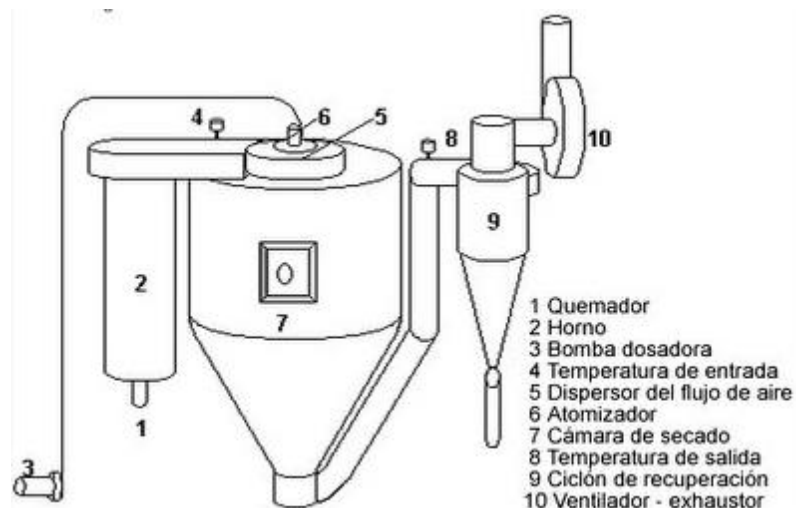


Fuente: Gálvez Condori, Eloy. Diseño de una secadora de quinua en el departamento de La Paz – Bolivia

6.4.1.5 Secador de aspersión o espray

El agua en una suspensión puede ser evaporada creando una nebulización, que permanece en una cámara donde circulan gases calientes. La velocidad de evaporación es alta, por lo que es adecuado para el secado de materiales que tienen baja estabilidad térmica. Las condiciones para un secado correcto deben ser controladas adecuadamente y es por eso que las propiedades de flujo de los materiales a secar son importantes para el diseño y configuración del atomizador que va desde diseños de tipo boquilla y rotación hasta diseños de impacto y a presión [18].

Ilustración 5. Diagrama secador de espray.

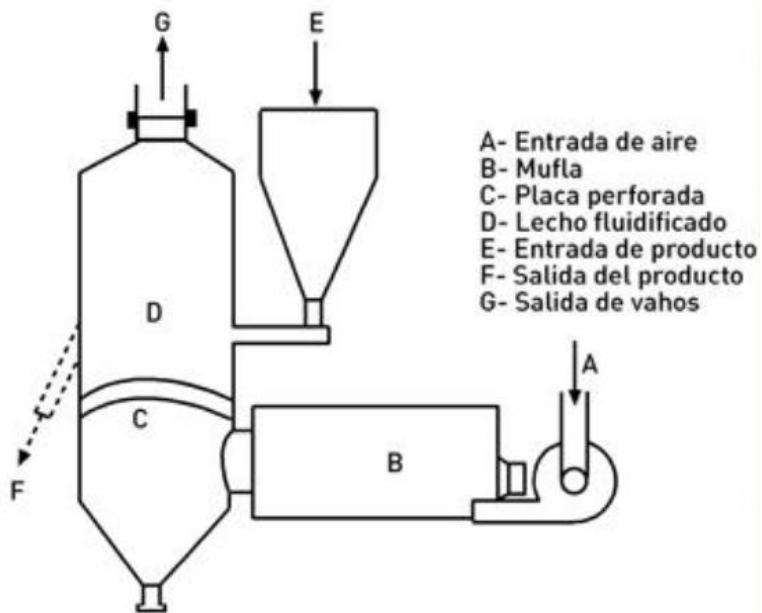


Fuente: Llabrés Casace, Adrián. AKRIBIS ingeniería

6.4.1.6 Secador de lecho fluidizado

El estado de fluidización se produce cuando una corriente de aire cruzado expande el sólido disgregado y lo hace burbujear produciendo que sus partículas queden en suspensión. La fuerza de empuje del aire produce que el sólido se comporte como un líquido, este fenómeno produce el mayor intercambio térmico posible pues el producto permanece suspendido sobre la corriente de aire [16].

Ilustración 6. Secador de lecho fluidizado.



Fuente: Llabrés Casace, Adrián. AKRIBIS ingeniería

6.4.2 Secadores indirectos

Son también llamados secadores por conducción o de contacto. El calor que se requiere para el secado es transferido al material húmedo a través de una pared o placa de retención. La velocidad de secado depende del área de contacto que se establezca entre el material húmedo y las superficies de la pared calientes. Entre sus características están [19]:

- Las temperaturas en la superficie de las paredes poseen un gran rango de acción; estas pueden variar desde temperaturas inferiores al punto de congelación hasta temperaturas mayores de 800 °K.
- Los secadores indirectos son ideales para el secado a presiones bajas.
- Los secadores que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento resultan económicos pues no consumen mucho.

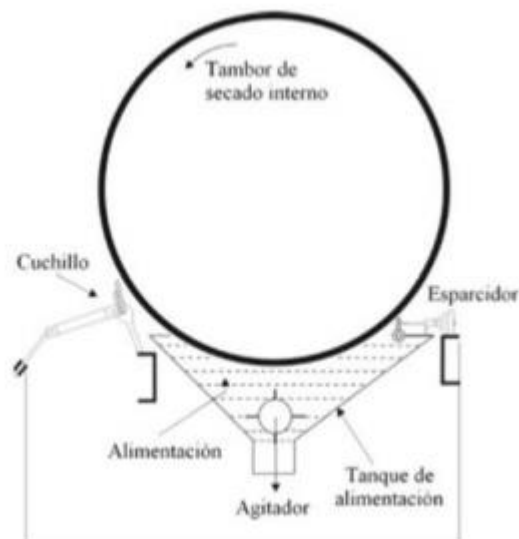
Dentro de la clasificación de los secadores indirectos se destacan tres tipos a continuación, se habla de cada uno de ellos y sus características.

6.4.2.1 Secador de tambor

Un tambor metálico giratorio es calentado internamente con vapor y es sumergido dentro de un tanque contenedor de la mezcla del material a secar que pueden ser fluidos, semifluidos y suspensiones como lodos, leches y alimentos infantiles como compotas.

El espesor de la película que se retiene sobre el tambor se regula mediante una cuchilla, mientras el tambor rota, la humedad de la mezcla se evapora gracias al calor transferido hacia las paredes del tambor. A su vez un cuchillo repartidor separa la mezcla de la superficie del tambor para que continúe su proceso una vez seco [16].

Ilustración 7. Secador de tambor

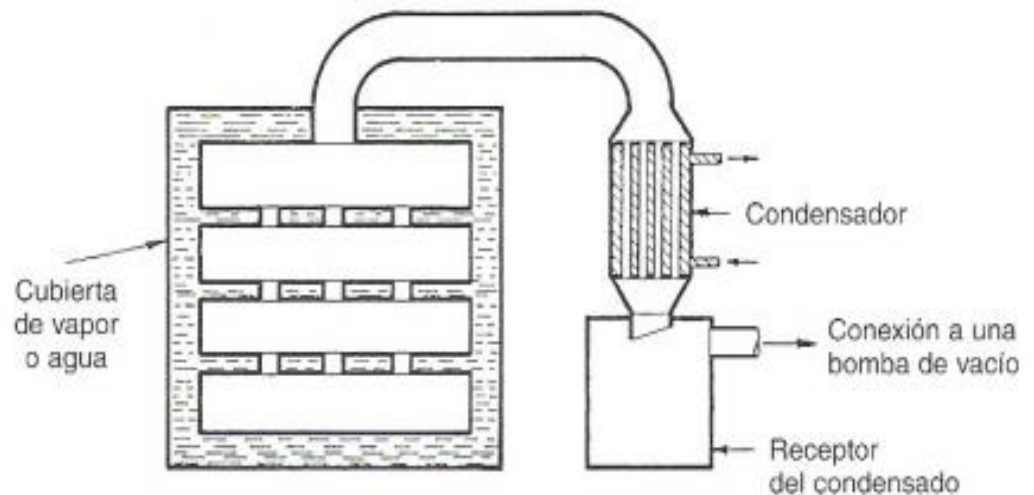


. Fuente: Galvez Condori, Eloy. Diseño de una secadora de quinua en el departamento de La Paz – Bolivia.

6.4.2.2 Secador de bandejas al vacío

Es una cámara cerrada que consta de diferentes bandejas y opera al vacío, el calor se conduce a través de las paredes metálicas de la cámara y a través de las bandejas por radiación. Estos secadores permiten secar el material a muy bajas temperaturas y con ausencia de oxígeno. Los secadores de bandejas al vacío son adecuados para diversas industrias, desde industrias químicas, farmacéuticas y cosméticas, hasta industrias agroalimentarias y granulad de plásticos [20].

Ilustración 8. Secador de bandejas al vacío.

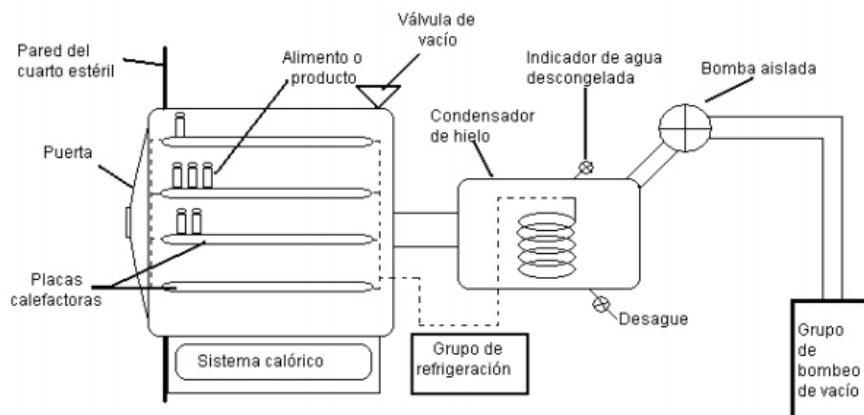


Fuente: Masters, K. 1991. Spray drying handbook, 5th edn. Longman, Harlo.

6.4.2.3 Secador por sublimación

Llamado también liofilización o criodesecación, consiste en sublimar el hielo de un material congelado, es decir el agua pasa directamente de estado sólido a estado gaseoso sin pasar por el estado líquido por lo cual se debe trabajar por debajo del punto triple del agua. Sus aplicaciones son para productos de alto valor añadido, alimentos de uso militar, té, productos farmacéuticos, flores y frutas blandas [21].

Ilustración 9. Secador por sublimación.



Fuente: Universidad del valle de México. Sistemas de desecación granulados, 2001.

6.5 Transferencia de calor

En termodinámica se puede definir el calor como una forma de energía, la cual se puede transferir de un sistema a otro debido a un gradiente de temperatura. Por lo tanto, cuando hablamos de transferencia de calor, hablamos de transferir energía, que va de una zona con mayor temperatura hacia la de menor.

Los mecanismos de transferencia de calor son simplemente formas mediante las cuales la energía térmica se puede transferir de un objeto a otro, y todo se basa en el principio básico de que la energía cinética o el calor quieren estar en equilibrio o en estados de energía iguales. Existen tres formas diferentes de que ocurra la transferencia de calor: conducción, convección y radiación [22].

6.5.1 Conducción

Es la transferencia de calor que se produce mediante el contacto directo de unas partículas con otras, y que va de una sustancia con mayor energía hacia la contraria menos energética. La conducción tiene lugar en sólidos, líquidos y gases.

La razón de conducción, la cual nos dice la rapidez de transferencia de calor a través de un medio depende de: geometría del objeto, espesor y material del cual está hecho.

La conducción es determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo (que tiene la

propiedad de transmitir igualmente en todas direcciones cualquier acción) es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección [23]. De forma vectorial:

$$q = -k \nabla T$$

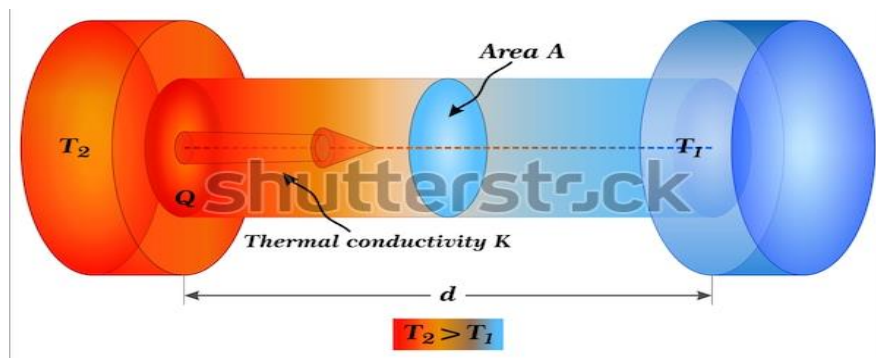
Donde:

q : vector de flujo de calor por unidad de superficie ($W m^{-2}$).

k : constante de proporcionalidad, llamada conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$).

∇T : gradiente del campo de temperatura en el interior del material (K).

Ilustración 10. Tasa de conducción térmica



. Tomado de: Fouad A. Saad. Shutterstock. [En línea].

6.5.2 Convección

Es un mecanismo de transferencia de calor que se presenta cuando existe una superficie sólida en contacto con un fluido en movimiento a diferentes temperaturas. Ocurre una transferencia de calor por conducción entre la superficie y las moléculas del fluido que están pegadas a ellas, luego que esas moléculas hayan adherido energía, debido al movimiento del fluido se retiran, dando paso a un nuevo ciclo del proceso. Entre más rápido es el movimiento del fluido, mayor será la tasa de transferencia de calor [22].

Este mecanismo se rige por la Ley de enfriamiento de Newton:

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A (T_s - T_{\infty})$$

En donde:

Q_{conv} : Calor transferido por unidad de tiempo [W]

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

A : Área superficial de transferencia de calor [m^2]

T_s : Temperatura de la superficie [$^{\circ}\text{C}$]

T_{∞} : Temperatura del fluido lejos de la superficie [$^{\circ}\text{C}$]

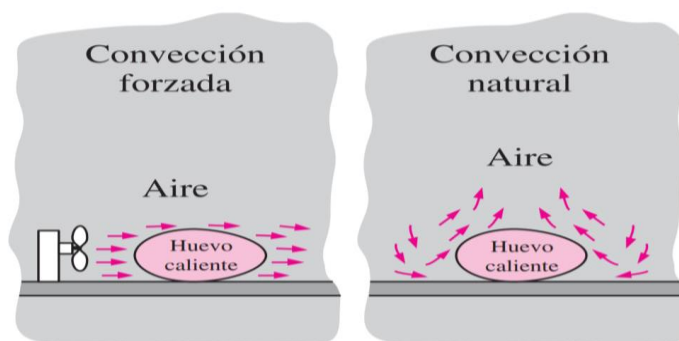
6.5.2.1 Convección Natural

La convección natural ocurre cuando el fluido no es forzado por un medio externo, el movimiento se genera por la diferencia de densidad debido a la variación de la temperatura en el fluido.

6.5.2.2 Convección Forzada

Cuando existe movimiento del fluido por medios externos como una bomba, ventilador entre otros, se le conoce como convección forzada, aquí la transferencia de calor será mayor debido al movimiento acelerado.

Ilustración 11. Convección forzada y convección natural.



Fuente: Yunus A. Cengel. Transferencia de calor 5ta edición

6.5.3 Radiación

Es la energía emitida en forma de ondas electromagnéticas (fotones) debido a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. No necesita de algún medio interventor. Todos los cuerpos con temperatura superior a cero absolutos emiten radiación [23].

6.6 Sistemas de transmisión de potencia usados en hornos

Los sistemas de transmisión mecánica tienen como objetivo llevar hacia los diferentes componentes de una máquina la potencia y movimiento producidos por un árbol o elemento motriz (encargado de transmitir el movimiento) para así lograr que cumpla la función para la cual fue diseñada.

En la industria existen variedad de sistemas de transmisión dependiendo de la finalidad que se le quiera dar a la máquina, en hornos secadores son 4 los principales sistemas que se usan: Cadena con piñones, banda con poleas, sistema directo y engranajes.

6.6.1 Cadena y piñones

Las cadenas son órganos de transmisión de potencia que abrazan dos o más ruedas dentadas, una de las ruedas es conocida como piñón o rueda motora y la otra se conoce como rueda conducida o corona. La ventaja que tiene este tipo de transmisión es que el acoplamiento se lleva a cabo sin deslizamiento [24].

Ilustración 12. Sistema de cadena y piñones

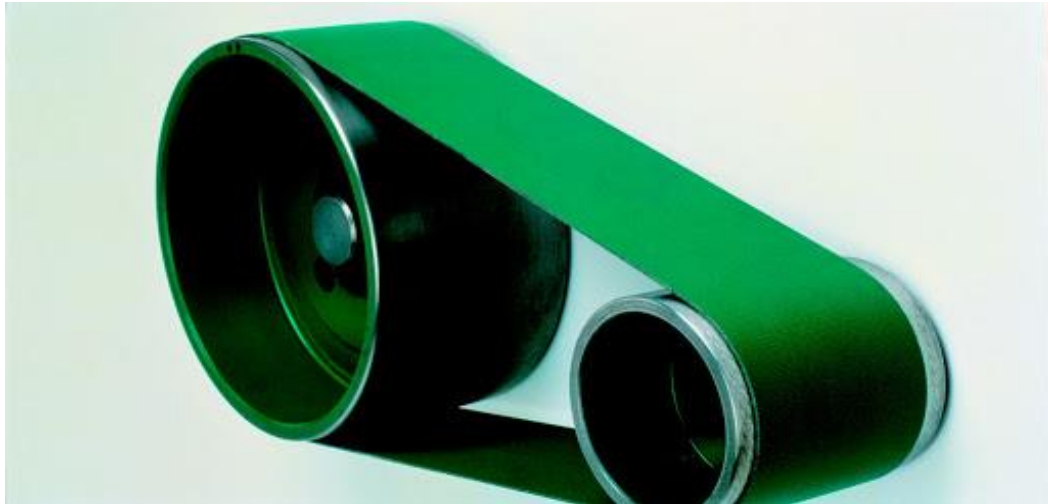


Fuente: MAQUINARIA INDUSTRIAL MAQUINAL SAS.

6.6.2 Banda con poleas

Este sistema de transmisión consiste en una correa sin fin hecha de un material flexible la cual se acopla a dos o más poleas (con ejes normalmente paralelos) que giran transmitiendo movimiento y potencia desde el eje de entrada hasta el eje de salida. Su principal ventaja radica en su rendimiento y precio módico [25].

Ilustración 13. Sistema de banda con poleas.



Fuente: Kanadian Blue Side, S.A. [en línea].

6.6.3 Sistema directo o rueda de fricción

Este sistema consta de una transmisión directa por parte del elemento motriz en donde el movimiento de giro se realiza debido a la fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto [24].

Ilustración 14. Rueda de fricción.



Fuente: Alibaba [en línea]

6.6.4 Engranés

Este sistema de transmisión se realiza desde un motor acoplado a un engrane que a su vez está conectado a un engrane mayor, situado alrededor del tambor dando paso así al movimiento. La condición para que este sistema funcione de manera correcta es que las dimensiones entre los dientes tengan los mismos parámetros [26].

Ilustración 15. Sistema de engrane.



Fuente: Henan Zhengzhou Mining Machinery Co. <Catalogo en linea>

A continuación se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de transferencia de potencia:

Tabla 2. Comparativa entre sistemas de transmisión de potencia.

Sistema de transmisión	Ventaja	Desventaja
Cadena y piñones	<ul style="list-style-type: none"> • No existe el deslizamiento en estos sistemas. • Su relación de transmisiones constante por tanto posee una mayor eficiencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un sistema ruidoso y costoso • Este sistema requiere de lubricaciones progresivas.
Banda con poleas	<ul style="list-style-type: none"> • No requieren lubricación. • No producen tanto ruido • Se pueden usar con elevada distancia entre ejes. • Demandan menos exactitud en la alineación de los ejes. • Es más sencillo y económico que otros mecanismos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estos sistemas poseen deslizamientos lo que traduce a una menor eficiencia en su transmisión. • Este sistema se usa en equipos poco robustos.
Directo	<ul style="list-style-type: none"> • No es ruidoso. • Requiere de poco mantenimiento. • Este sistema es de fácil instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las ruedas de fricción no permiten transmitir elevadas potencias. • Se usan en hornos que pretenden secar un gran volumen de área.
Engranajes	<ul style="list-style-type: none"> • No presentan deslizamiento. • Poseen una gran capacidad de transmisión de potencia. • Son de elevado rendimiento y bajo mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Son un sistema costoso • Este sistema de transmisión es bastante ruidoso. • Debido a que los engranes son de diseño específico, conseguir estas piezas para su cambio es difícil.

Fuente: Autores

6.7 Árbol de objetivos

Es un instrumento que permite diferenciar los objetivos principales que se obtienen del diseño a objetivos secundarios que se desglosan del primero. Al obtener esta idea clarificada, el siguiente paso es idear las posibles exigencias que debe cumplir la máquina.

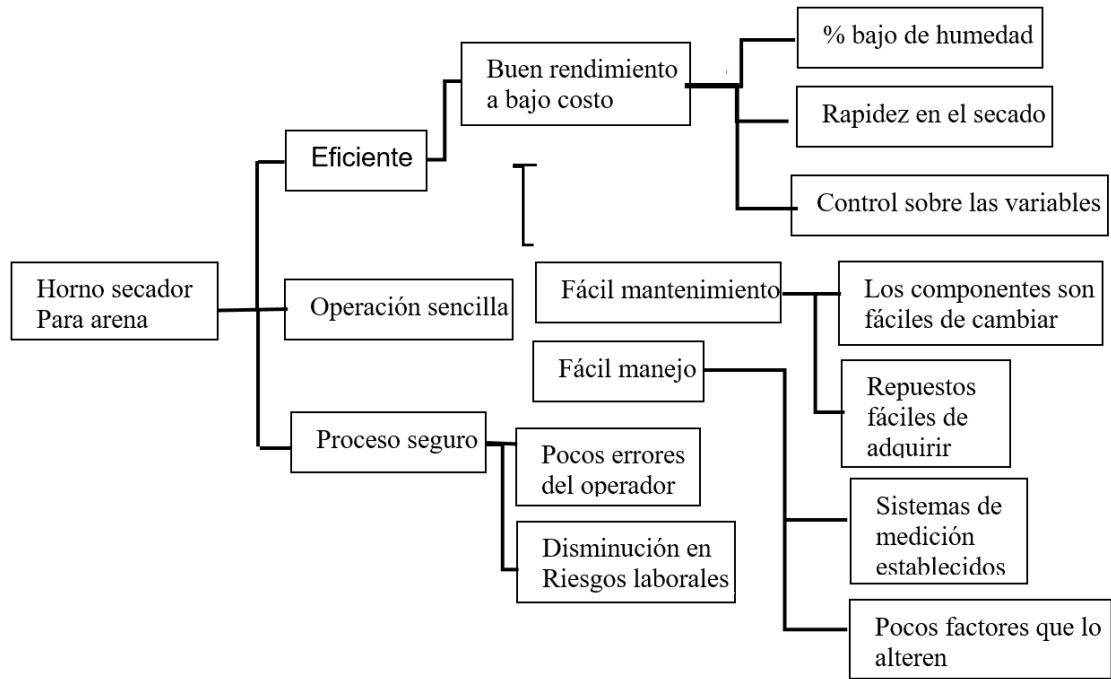
Las exigencias que se obtienen para el prototipo son las siguientes:

- Fácil mantenimiento
- Buen rendimiento a bajo costo
- Fácil manejo
- Rapidez en el secado
- Seguridad para el operador
- Sus repuestos deben ser sencillos se conseguir

Los puntos más fuertes u objetivos principales son:

- Eficiente
- Operación sencilla
- Proceso seguro

Ilustración 16. Árbol de objetivos del horno secador para arena



Fuente: Autores

En diseño del horno se identifican tres objetivos principales:

1. Eficiente: El horno debe cumplir a cabalidad su objetivo principal de secado, dando como resultado una rapidez en el proceso, porcentaje de humedad bajo y manteniendo siempre el control de sus variables.
2. Operación sencilla: El horno no debe presentar mayor complejidad en su manejo ni en su mantenimiento. Se busca que sus componentes sean fáciles de adquirir, cambiar y sean pocos los factores que alteren el sistema.
3. Proceso seguro: El proceso de secado debe ser seguro, salvaguardando la integridad física del operador disminuyendo así riesgos laborales.

7. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para cumplir con los objetivos estipulados en el proyecto se divide en 2 partes: Investigación y diseño.

7.1 Objetivo 1. Analizar estudios relacionados con hornos secadores para identificar los parámetros claves que se deben tener en cuenta para el diseño de la máquina.

7.1.1 Nivel de investigación

La primera etapa del proyecto es llevar a cabo una investigación profunda en libros, proyectos anteriormente realizados sobre hornos secadores, para poder obtener conceptos claros y comprender el funcionamiento de cada uno de sus partes.

7.2 Objetivo 2. Realizar el diseño conceptual del horno secador de arena definiendo posibles soluciones.

7.3.1 Desarrollo

Para obtener el diseño final del horno secador, se toma como base los resultados de análisis del objetivo 1 en donde la potencia, diámetro, longitud y poder calorífico son los parámetros que más influyen en el diseño. Esta fase consta de tres (3) alternativas diferentes para el diseño del horno, las cuales serán evaluadas para obtener el prototipo óptimo para el proyecto.

7.3 Objetivo 3. Realizar el diseño detallado de los diferentes componentes mecánicos, estructurales y térmicos del horno secador de arena a través de cálculos teóricos y software de diseño e ingeniería.

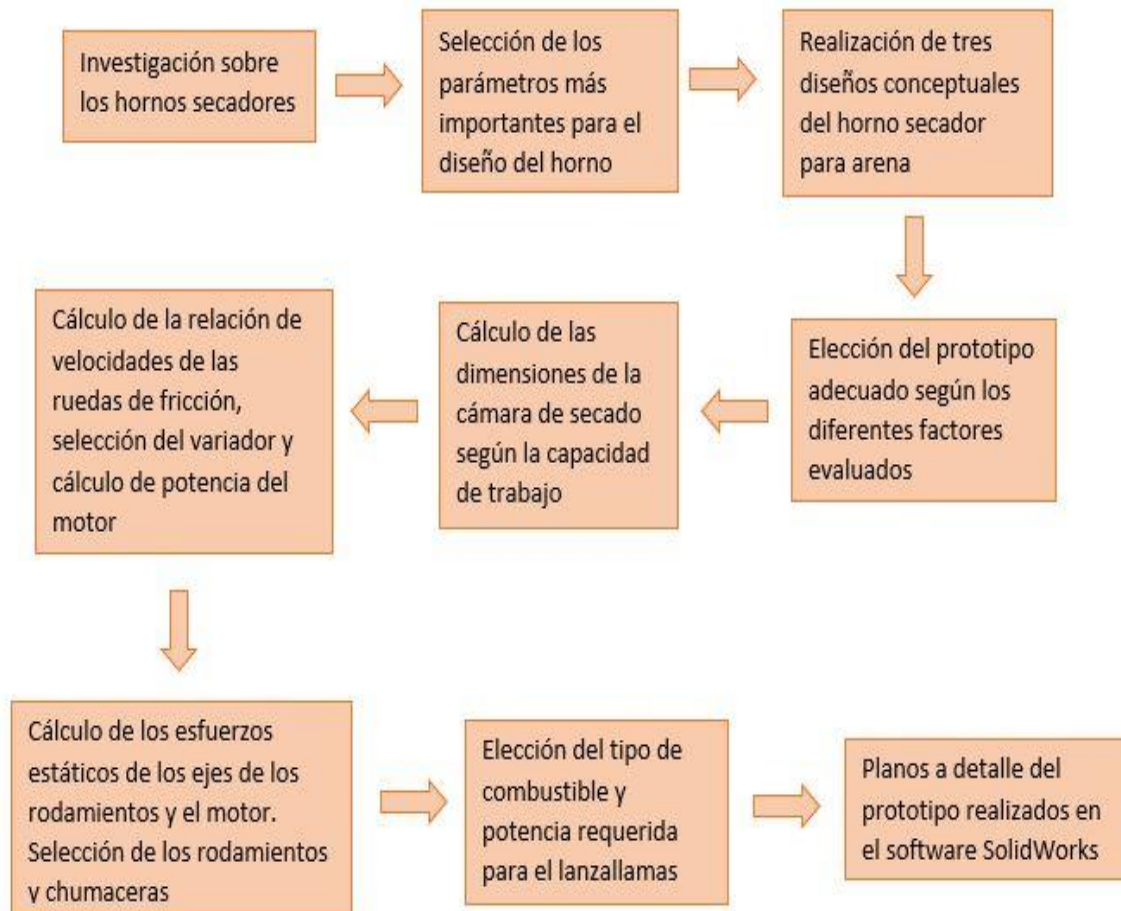
7.3.1 Desarrollo

Una vez seleccionado el prototipo se lleva a cabo el diseño a detalle de las partes involucradas en el horno, para esto se hace uso del software SolidWorks en donde

se realiza el modelamiento de sus partes a detalle y finalmente se realiza el análisis térmico de la máquina.

Por último, se realiza un diagrama de flujo con el fin de clarificar el desarrollo del proyecto y la metodología y dar cumplimiento con los objetivos planteados:

Ilustración 17. Esquema de la metodología



8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 Objetivo 1. Analizar estudios relacionados con hornos secadores para identificar los parámetros claves que se deben tener en cuenta para el diseño de la máquina.

Investigaciones relacionadas

Para llevar a cabo el diseño del horno secador para arena se necesita indagar en diferentes fuentes bibliográficas las condiciones o parámetros de funcionamiento, en la siguiente tabla se identifican los diferentes parámetros que manejan los autores para sus proyectos:

Tabla 3. Comparativa entre los parámetros usados por los antecedentes.

Nombre del proyecto	Autores	Universidad	Parámetros
Diseño y construcción de un secador directo cilíndrico rotativo para pollinaza	Yesid Rueda y Diego Rueda	Universidad Industrial de Santander	*Capacidad de procesar 250 Kg. de pollinaza por hora *Humedad de 15% * Mecanismo de accionamiento por medio de un motor Eléctrico y un reductor de velocidad. *Velocidad de rotación máxima de 15 r.p.m. *Angulo de inclinación máximo de 10° * Temperatura máxima de secado de 150°C * Mecanismo de regulación de temperatura de

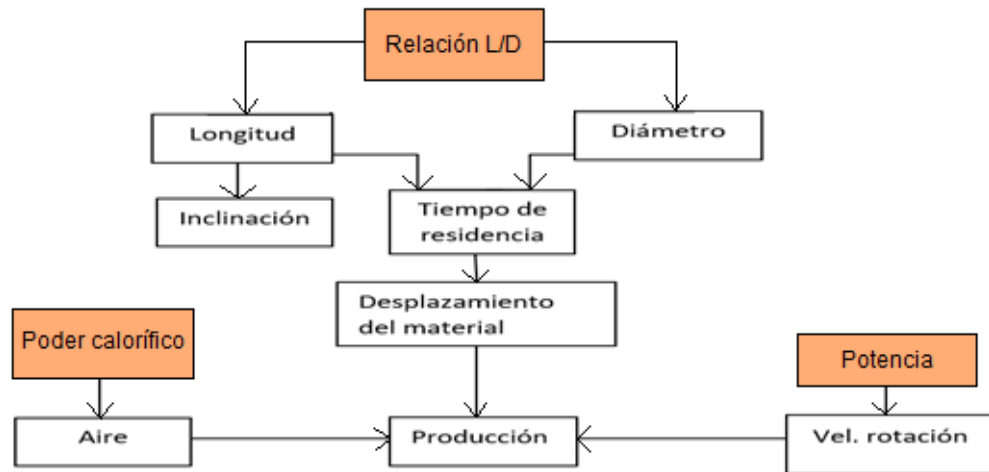
			los gases de combustión por medio de aire externo controlado por válvula de compuerta
Diseño y construcción de secador de arena para la producción de mortero	Juan Romero y Enzo Zarate	Universidad de las fuerzas armadas ESPE	<ul style="list-style-type: none"> * Volumen de aproximadamente 10m³ al día * Gas LP. * Temperatura superior a 300°C. *Fácil extracción y montaje de sus componentes. * Fácil operación y mantenimiento. *Dimensiones: Largo: 5000mm. Ancho: 1000mm. Altura: 1500mm. Peso: El peso final de la maquinaria va a ser aproximadamente: Peso: 800 Kg. *Voltaje: bifásico alterno 220V – 240V. *Humedad final: inferior al 5%
Diseño de un secador rotativo para 30 Ton/h de arena, para la empresa ECOMONESA S.A	José Rodríguez	Fundación universidad de América	<ul style="list-style-type: none"> *Capacidad máxima de 30 Ton/h. *Al finalizar el proceso de secado realizado en la maquina se obtendrá un

			<p>contenido de humedad entre un rango del 2-3%</p> <p>*El sistema de alimentación debe poseer sensores de peso para poder controlar la capacidad de llenado del 15%.</p>
<p>Diseño de una planta deshidratadora de banano usando secador rotatorio</p>	<p>José Sper e Iván Torres</p>	<p>Escuela superior politécnica del litoral</p>	<p>* Capacidad de harina de banano de 217 Kg/h.</p> <p>*Se debe usar Gas licuado de petróleo debido a su menor impacto al medio ambiente.</p> <p>*Para la optimización en el proceso de secado, la permanencia del banano en el horno debe ser menor a 1 hora</p> <p>* El diámetro del cilindro no debe ser mayor de 1 metro y su longitud no debe superar los 7 metros.</p>

Fuentes: Autores

Al analizar los antecedentes y tomando como referencia el libro “*Cemento manual tecnológico, 1972*” del ingeniero Walter H. Duda, se plantean tres parámetros claves para el diseño del horno secador, los cuales se pueden resumir en la tabla 6.

Ilustración 18. Parámetros más influyentes en el diseño del horno secador



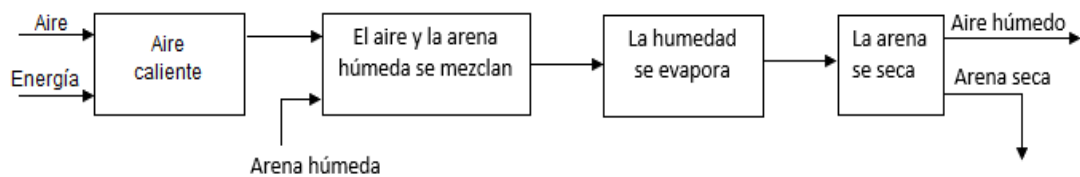
Fuente: Autores

Los parámetros subrayados hacen parte de los sistemas más grandes que componen la máquina. La relación Longitud/Diámetro parte de la cantidad de arena que el sistema debe secar, en este caso de 2 Ton/h calculando así el tiempo de residencia del material. El poder calorífico del lanzallamas se calcula en base al volumen y el tipo de material a secar. Calculando la potencia se obtiene la velocidad de rotación del sistema y así garantizar el secado homogéneo [27].

8.2 Objetivo 2. Realizar el diseño conceptual del horno secador de arena definiendo posibles soluciones.

Para establecer las funciones requeridas del horno secador para arena es necesario clarificar el paso a paso del trabajo que este va a realizar. Esto se encuentra representado en la ilustración 16.

Ilustración 19. Análisis de funciones del horno secador para arena.



Fuente: Autores

8.2.1 Lista de requerimientos

Se han enlistado un número de requerimientos para el diseño del horno secador para arena, esto para delimitar las diferentes variables que se pueden llegar a manejar, se contemplan variables como:

1. Cantidad de material a secar: El horno deberá secar 2 Ton/h de arena húmeda
2. Humedad de entrada de la arena: Se ha definido una humedad promedio de la arena en la entrada de 13.6% para el proyecto.
3. Humedad final: La arena seca debe poseer una humedad cercana a 5%
4. Área ocupada por el horno: Las dimensiones del horno no deberán superar los 6 x 2 metros
5. Voltaje a trabajar del motor: Se debe trabajar con un voltaje de 220V a 440V.
6. Tipo de combustible del lanzallamas: El combustible a usar debe ser fácil de conseguir y económico.
7. Material de la cámara de secado: El material debe soportar temperaturas entre 500 C° - 800C° y esfuerzos de hasta 60000N.

8.2.2 Diseño conceptual del horno secador para arena

Para poder satisfacer las necesidades que se tienen con el horno secador para arena, se necesita del planteamiento de varios diseños, esto con el fin de evaluar las opciones que se tienen, a medida que se vaya incursionando en los diferentes modelos, se llegara a un modelo ideal el cual pueda darle solución a la problemática.

Teniendo como base los objetivos a cumplir, se obtienen varias opciones de los diferentes mecanismos de diseño de la máquina, los cuales se evaluarán. Se proporcionarán en total tres (3) opciones de diseño del horno secador y se selecciona el más óptimo para llevar a cabo el proyecto.

Según lo indagado en el marco teórico, los hornos rotativos son la mejor opción para el secado de arena por lo cual se parte del hecho que se diseñara un horno de este tipo. A continuación, se muestran posibles soluciones de diseño del horno secador

Los mecanismos que se evaluarán serán los siguientes:

- Mecanismo de admisión de arena
- Mecanismo de transferencia de potencia
- Mecanismo de secado

A continuación, en la tabla 4 se muestran las posibles configuraciones del sistema.

Tabla 4. Posibles soluciones para diseño.

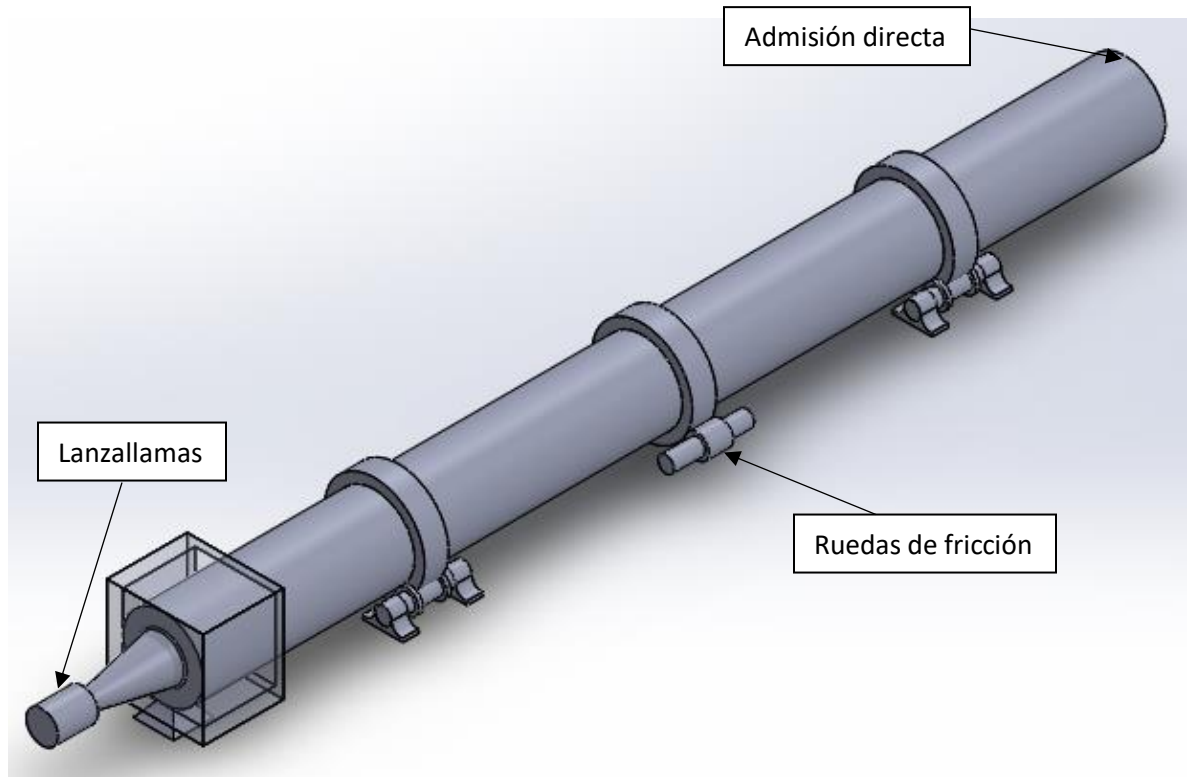
soluciones funciones	1	2	3
Admisión de arena	Admisión directa	Admisión por tolva	Admisión por bandas transportadoras
Mecanismo de transmisión de potencia	Rueda de fricción	Cadena	Engranaje
Mecanismo secador	Lanzallamas	Quemador	Generador de aire caliente

Fuente: Autores

Diseño 1

La entrada del material a la cámara de secado se realiza mediante el ejercicio de paleo por parte del operador, logrando así que la arena ingrese directo al sistema. El sistema directo resulta sencillo y permite una buena transmisión de potencia., finalmente el lanzallamas es un mecanismo que lanza a presión un chorro de líquido inflamado generando llamas de altas temperaturas siendo esta una opción viable para secar la arena, esto debido a que el volumen a secar es de 2 Ton/h.

Ilustración 20. Admisión directa-Transmisión de potencia por ruedas de fricción-Lanzallamas.

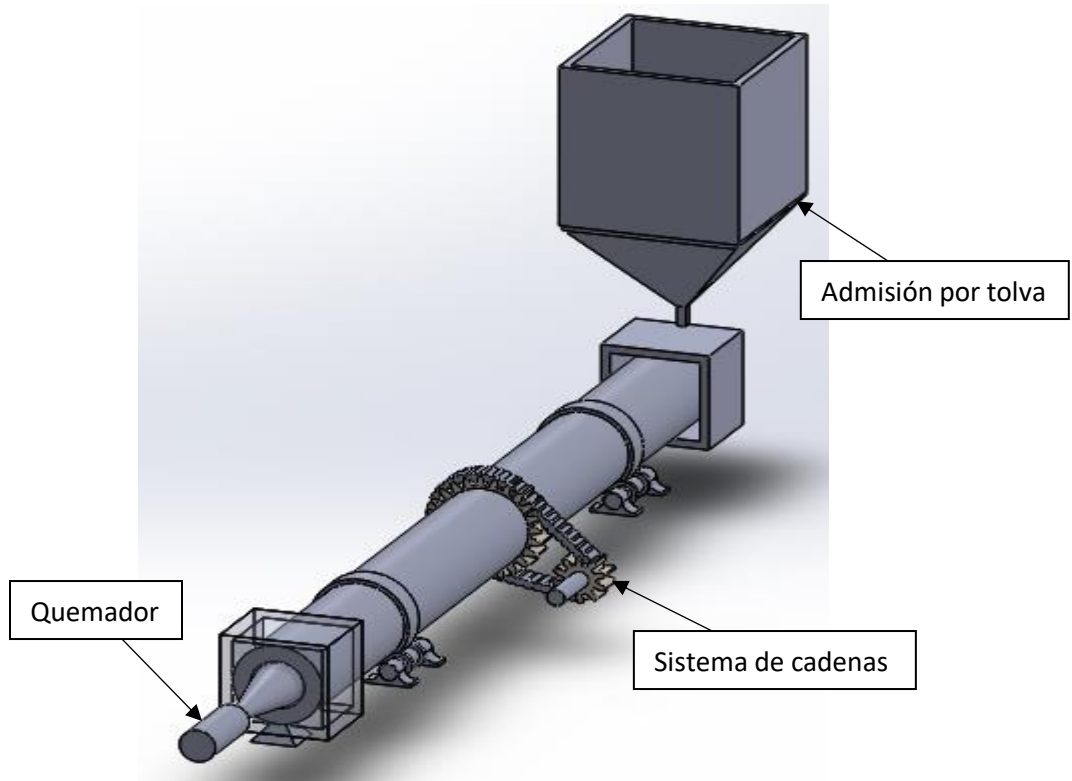


Fuente: autores

Diseño 2

El material es depositado en una tolva, este dispositivo tiene una válvula de descarga en la parte inferior el cual garantiza el flujo de la arena hacia la cámara de secado. El sistema por cadenas presenta una gran eficiencia debido a su relación de transmisión constante y el deslizamiento en estos sistemas es casi nulo. El quemador es un sistema ideal para calentamiento de aire y horneado, su llama es estable en todo rango y funciona con variedad de combustibles.

Ilustración 21. Admisión por tolva-Sistema de cadenas-Quemador.

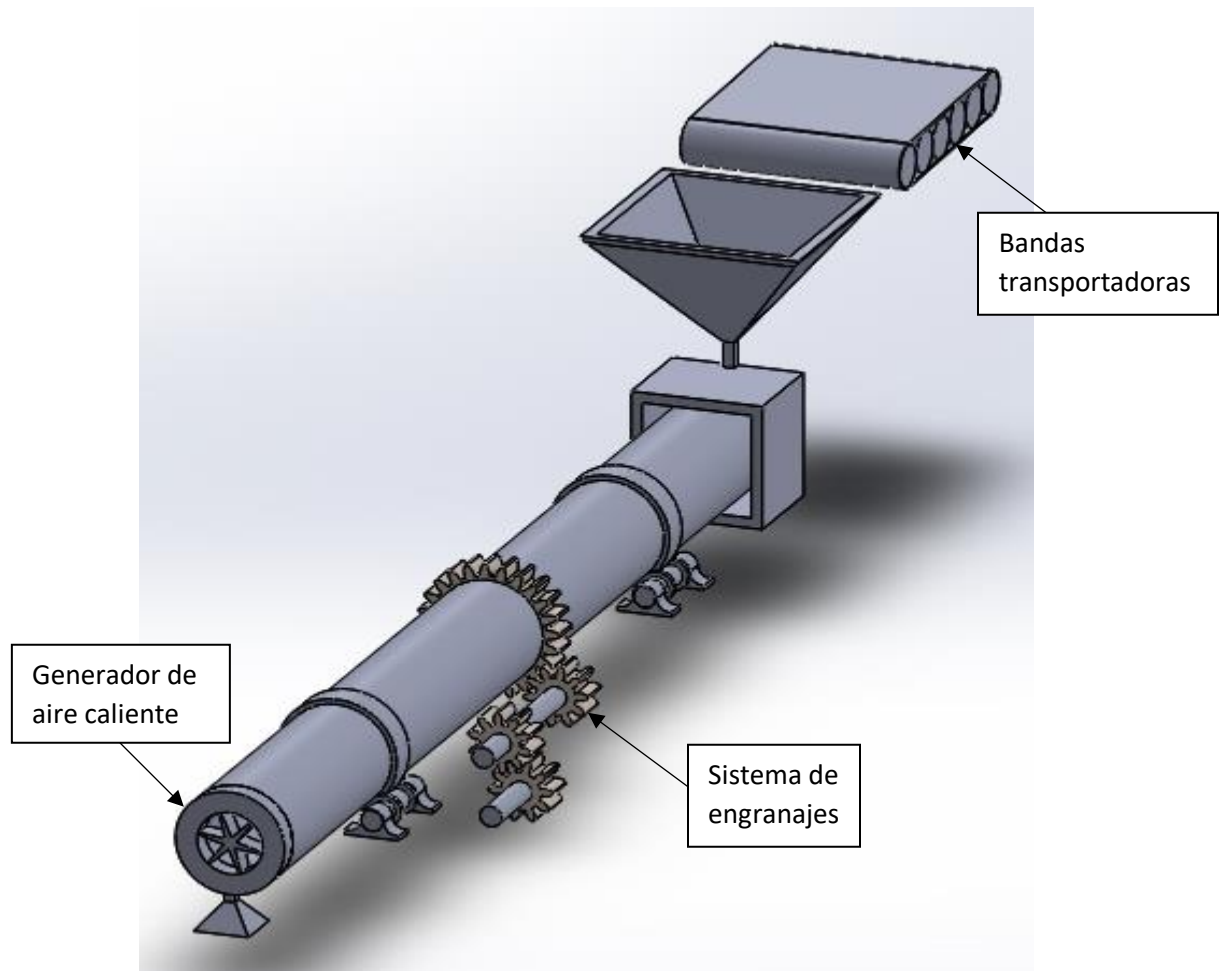


Fuente: Autores

Diseño 3

La arena será llevada a la cámara de secado haciendo uso de un sistema de transporte continuo como lo son las bandas transportadoras. La admisión por bandas transportadoras es otra de las grandes opciones debido a que automatizan el proceso de ingreso del material al horno secador. El sistema por engranajes permite poco deslizamiento y tiene gran capacidad de trasmisión de potencia, el generador de aire caliente es un sistema diseñado con un intercambiador de calor el cual con la ayuda de un ventilador genera pequeños, medianos o grandes volúmenes de aire caliente.

Ilustración 22. Admisión por bandas transportadoras-Sistema de transmisión por engranajes-Generador de aire caliente.



Fuente: Autores

Costos

En la siguiente tabla se observan los valores de las piezas principales que componen cada diseño del horno secador, los precios fueron tomados a partir de catálogos en línea y empresas fabricantes [28] [29].

Tabla 5. Costos de las piezas principales en los diseños

	Diseño 1	Diseño2	Diseño 3
Sistema de entrada	Directa	Tolva	Banda transportadora
Costo	0 \$	8.500.000	7.000.000
Mecanismo de transmisión de potencia	Rueda de fricción	Cadena	Engranaje
Costo	500.000	2.603.200	5.550.000
Mecanismo secador	Lanzallamas	Quemador	Generador de aire caliente
Costo	2.400.000	3.000.000	1.800.000
TOTAL	2.900.000	14.103.200	14.300.000

Fuente: Autores

Vida útil

Para la vida útil se tomaron en cuenta solo los mecanismos de transmisión de potencia debido a que estos son los que sufren mayor desgaste en la máquina. Estos datos fueron tomados a partir de una calculadora de vida útil de engranajes y cadenas [30].

Tabla 6. Vida útil componentes principales

	Diseño 1	Diseño2	Diseño 3
Mecanismo de transmisión de potencia	Rueda de fricción	Cadena	Engranaje
Vida útil	350.000 horas	30.000 horas	300.000 horas

Fuente: Autores

Mantenimiento

Al horno secador para arena se le realiza un mantenimiento preventivo para poder garantizar su correcto funcionamiento y así evitar cualquier tipo de accidentes.

En el diseño 1 se debe observar el nivel de desgaste de la rueda, si este llega a ser excesivo esta se deberá cambiar. En el diseño 2 se debe comprobar la alineación de las coronas y su desgaste, debe de ser lubricado de manera manual y periódica. En el diseño 3 se debe comprobar el desgaste de los dientes del engranaje ya que estos serán los primero en sufrir una rotura por contacto, de haber desgaste se deberán cambiar.

Fácil construcción e instalación

El diseño 1 al ser directo, no tendrá ningún inconveniente en su instalación ya que solo debe ser apoyado sobre la base. El diseño 2 supone un sistema de entrada por tolva, lo cual requiere de construcción y planeación a detalle sobre su puesta en marcha. El diseño 3 dispone de un sistema de bandas transportadoras las cuales funcionan por un motor y un reductor, por lo cual deben contar con unas cometidas eléctricas las cuales supondrían un trabajo extra en la instalación.

8.2.3 Selección de diseño

En la tabla 8 se evaluaron los tres prototipos para el diseño del horno secador en una escala de 1 a 5, teniendo en cuenta que cada factor tiene un valor según su importancia definida por los autores, siendo 1 el mejor puntaje, 2 un buen puntaje, 3 aceptable, 4 regular y 5 el menos viable, sumado los valores de cada diseño, el de menor puntaje será la opción más restable para el proyecto.

Cabe resaltar que a cada uno de los factores de diseño se les otorgo un peso a criterio de los autores.

Para la selección de diseño se toman ciertos factores a evaluar tales como:

- El costo es el valor económico que tomaría adquirir cada una de sus partes.
- La vida útil es el periodo de servicio de los elementos que componen la máquina.
- El mantenimiento son las actividades programadas para preservar el horno en su mejor estado y poder garantizar en todo momento la seguridad del operario.
- La construcción hace parte de la facilidad de encontrar repuestos para el mantenimiento, sencillez en su instalación y puesta en marcha.

Tabla 7. Tabla de evaluación de diseños según sus factores

Factores	Valor	Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3	
		Calificación	resultado	Calificación	resultado	Calificación	resultado
Costo	25	2	50	4	100	5	125
Vida útil	25	3	75	4	100	3	75
Mantenimiento	25	2	50	4	100	4	100
Facilidad de construcción e instalación	25	2	50	3	75	4	100
Total			225		375		400

Fuente: Autores

Llevado a cabo la evaluación de cada uno de los diseños, se da como resultado la elección de prototipo número 1, trazados los parámetros de diseño, la gran ventaja de este radica principalmente en el costo de obtención de sus partes y el mantenimiento que se le debe proporcionar.

8.3 Objetivo 3. Realizar el diseño detallado de los diferentes componentes mecánicos, estructurales y térmicos del horno secador de arena a través de cálculos teóricos y software de diseño e ingeniería.

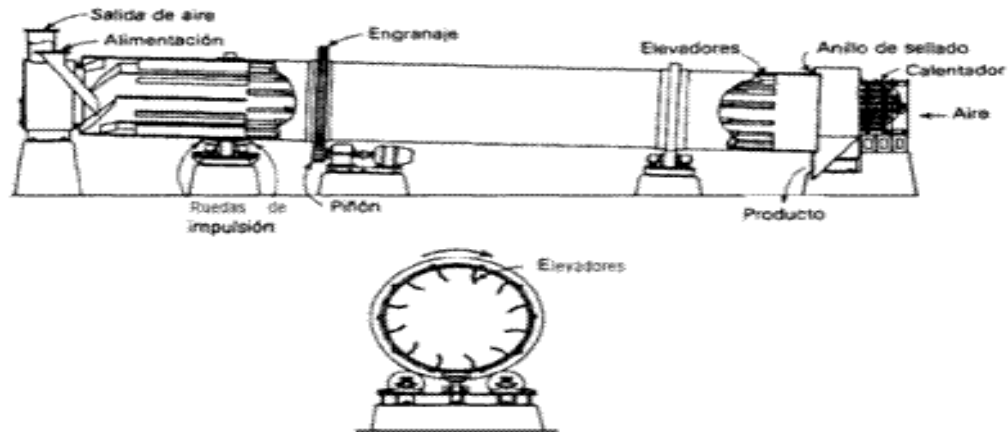
8.3.1 Diseño del horno secador

8.3.1.1 Relación L/D

Entre los parámetros de diseño de cámaras de secado para hornos rotatorios se recomienda una relación Longitud/Diámetro entre 8 y 10, esto debido a que son los más usados en el diseño de hornos de este tipo. Además de un espesor de 10 mm a 20 mm. También establece que las revoluciones deben ser entre 2 a 5 vueltas/minuto y la pendiente debe ser de 3° a 6° [31]. Estos parámetros son similares a los vistos en los hornos secadores de arena comerciales.

Para el diseño se adquirirá un tubo de acero, que por estándar viene con un diámetro de 24 pulgadas (60 cm) y tres centímetros de espesor, por lo tanto, la longitud del tubo debe ser de 6 metros para mantener una relación Longitud/Diámetro de 10.

Ilustración 23. Vista lateral y frontal del horno secador.



Tomado de: Hardinge Co, (2000)

Con el fin de facilitar el modelado del horno rotatorio se desarrolló una hoja de cálculo con los parámetros sugeridos. Así pues, estableciendo una longitud para el cilindro de 6 metros, un diámetro útil de 0,6 metros, una velocidad de rotación de 3 metros y una tasa de alimentación de 2 ton/h se obtienen las siguientes tablas: Para hallar el área útil y el volumen útil se emplean las siguientes fórmulas:

$$A_{util} = \pi \cdot \frac{D_{util}^2}{4}$$

Donde:

A_{util} = Área útil [m²]

D_{util} = Diámetro útil [m]

$$V_{util} = \pi \cdot \frac{D_{util}^2}{4} \cdot L$$

Donde:

V_{util} = Volumen útil [m³]

D_{util} = Diámetro útil [m]

L = Longitud

Tabla 8. Dimensiones del equipo.

Dimensiones – Equipo	
Diámetro útil	0,60 m
Longitud	6 m
Relación L/D	10
Área útil	0,28274 m ²
Volumen útil	1,69 m ³
Diámetro exterior	0,7 m
Espesor	0,05 m

Fuente: Autores

Tabla 9. Parámetros de diseño.

Parámetros de Diseño	
Diámetro útil	0,60 m
Longitud	6 m
Relación L/D	10
Área útil	0,28274 m ²
Volumen	1,69 m ³
Velocidad de rotación	3 RPM
Inclinación	4°
Tasa de alimentación	2 Ton/h

Fuente: Autores

8.3.1.2 Tiempo de residencia del material

Para establecer el tiempo de residencia del material dentro del tambor se hace uso de la siguiente fórmula

$$\theta = \frac{0,19 \times L}{N \times D \times S}$$

Donde:

θ = Tiempo de residencia [min]

L = Longitud del horno [m]

N = Velocidad rotacional [rpm]

S = Inclinación del horno [°]

8.3.1.3 Tasa de llenado del horno

Para determinar la tasa de llenado del horno se debe calcular primero el desplazamiento en el interior del horno dado por la fórmula:

$$v = \frac{L}{\theta}$$

Donde:

v =Desplazamiento en el interior del horno [m/min]

θ = Tiempo de residencia [min]

L = Longitud del horno [m]

Una vez hecho esto se toma como referencia la siguiente expresión:

$$f = \frac{P \cdot 2,12}{\rho \cdot v \cdot D^2}$$

Donde:

f =Tasa de llenado del horno (arena húmeda) [%]

ρ =Peso específico de la arena húmeda [Ton/m³]

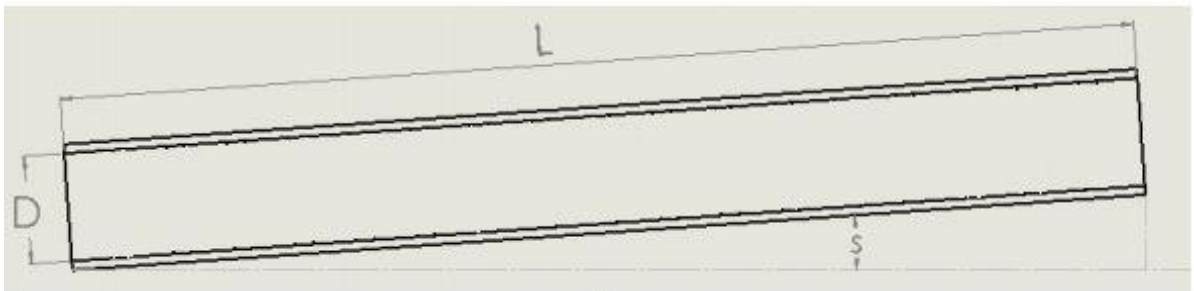
v =Desplazamiento en el interior del horno [m/min]

P =Tasa de alimentación [Ton/h]

D =Diámetro útil del horno [m]

En la siguiente ilustración se evidencia los parámetros de longitud, diámetro util e inclinación del horno secador

Ilustración 24. Medidas importantes presentes en el tambor



. Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos para una tasa de alimentación de 2 Ton/h y un peso específico de 2,05 Ton/m³ se muestran en la tabla 11

Tabla 10. Condiciones operativas del horno.

Velocidad de rotación	3 RPM
Tasa de alimentación	2 Ton/h
Tiempo de residencia del material	15,83 min
Desplazamiento	0,379 m/min
Tasa de llenado	15,15%

Fuente: Autores

El volumen ocupado por la arena húmeda dentro del tambor es igual a:

$$V_{15min} = m_{15min} / \rho$$

Donde:

V_{15min} =Volumen ocupado de arena húmeda en 15 minutos [m³]

m_{15min} =Masa ocupada de arena húmeda en 15 minutos [kg]

ρ =Densidad de la arena húmeda [kg/m³]

Tabla 11. Características del material a secar

Arena (húmeda)	
Densidad	1860 kg/m ³
Tasa de llenado	15,15%
Área ocupada	0,0428 m ²
Volumen ocupado	0,257 m ³
Masa	2000 kg

. Fuente: Autores

Para conocer la presencia del aire en el tambor se debe hacer uso de la siguiente fórmula:

$$Pre = 100\% - f$$

Donde:

Pre = Presencia del aire en el tambor

f =Tasa de llenado del horno (arena húmeda) [%]

El volumen de aire dentro del tambor se halla con la fórmula:

$$V_{aire} = V_{util} - V_{15min}$$

Donde:

V_{aire} = Volumen de aire dentro del tambor [m³]

V_{util} = Volumen útil [m³]

V_{15min} = Volumen ocupado de arena húmeda en 15 minutos [m³]

Tabla 12. Parámetros del aire.

Combustión – Aire	
Densidad	1,19 kg/m ³
Presencia	84,85%
Volumen	1,434 m ³
Masa	1,71 kg

Fuentes: Autores

Tabla 13. Características del Acero.

Acero (A-36)	
Espesor	0.05 m
Largo	6 m
Densidad	7860 kg/m ³
Volumen	0,6126 m ³
Masa	4815,12 kg

Fuente: Autores

Tabla 14. Pistas de rodadura.

Pistas de rodadura (acero A-36)	
Número de pistas	2
Ancho	0,1 m
Diámetro interno	0,7 m
Diámetro externo	0,8 m
Densidad	7860 kg/m ³
Volumen	0,0235 m ³
Masa	185,196 kg

Fuentes: Autores

Tabla 15. Cargas sobre la estructura.

Cargas sobre la estructura del equipo	
Arena	2972,43 N
Acero (A-36)	47236,327 N
Aire	16,775 N
Pistas de rodadura	1816,77 N
Corona	3922,068 N
TOTAL	55964,37 N

Fuente: Autores

8.3.1.4 Elevadores

Los elevadores son unos dispositivos ubicados en el interior del tambor hechos con el mismo material, estos permiten homogeneidad en el secado y un máximo de transferencia de calor cuando produce su efecto “cascada”. El grado de llenado con dispositivos elevadores es de un 12% a un 15% del volumen del cilindro [31].

8.3.2 Potencia del motor

Para hallar la potencia requerida por el sistema es necesario el uso y la aplicación de la siguiente ecuación

$$HP = n \cdot \frac{18,5 \cdot \gamma \cdot (\sin \beta) \cdot \omega + 0,1925 \cdot D \cdot W + 0,33 \cdot W}{10000}$$

Donde:

n = RPM horno

γ = Distancia entre el centro de gravedad del material y el punto medio del horno [ft]

β = Ángulo de reposo del material o talud natural [°]

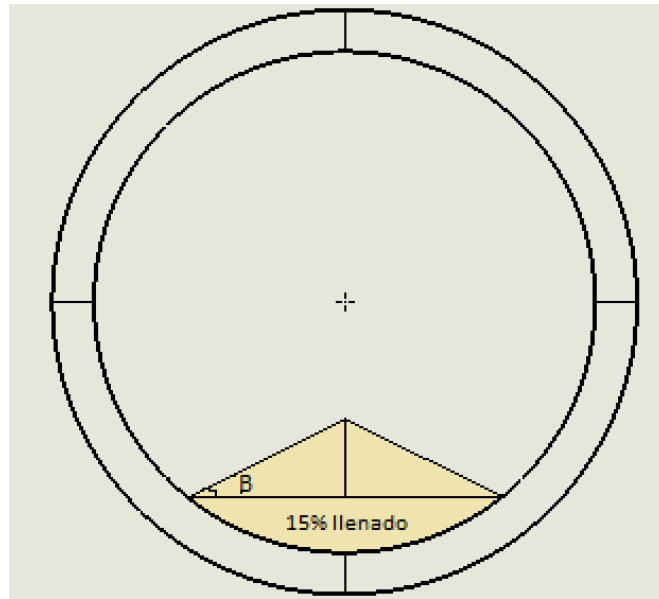
ω = Masa del material [lbf]

W = Masa total del equipo [lbf]

D = Diámetro de las pistas de rodadura [ft]

En la siguiente ilustración se evidencia en porcentaje de llenado que tendrá el horno secador y el ángulo de reposo del material, dato necesario para hallar la potencia del motor.

Ilustración 25. ángulo de reposo de la arena dentro del horno.



Fuente: Autores.

Tabla 16. Cálculo de potencia requerida.

Cálculo de potencia requerida		
Vel. Horno [RPM]	3	
Distancia C.G – O [m]	0,22366	0,7338 ft
Diámetro de pistas [m]	0,8	2,6246 ft
Ángulo reposo material [°]	25	
Peso total [N]	55964,37	12581,29 lbf
Peso material [N]	2972,43	668,23 lbf
Potencia [HP]	4,76	
Factor de arranque	1,35	
Potencia requerida [HP]	6,42	

Fuente: Autores

8.3.2.1 Selección del motor

Una vez conocido el valor más alto de la potencia, asumiendo un factor de arranque de 1,35 siendo este de los más comunes y empleados por los proveedores y una eficiencia en la transmisión del 0.8 se realizó la siguiente selección del motor:

Referencia: **TECHTOP MS160M2-8 distribuido por DIMOTOR S.A**

Ilustración 26. Motor eléctrico TECHTOP MS160M2-8.



Fuente: DIMOTOR S.A.

Características:

Motor asíncrono trifásico con carcasa de aluminio

Potencia: 7,37 hp

Peso: 69kg

Velocidad: 720rpm

Rendimiento: 83,5%

Numero de polos: 8

8.3.2.2 Selección del variador de frecuencia

Son dispositivos que permiten variar electrónicamente la velocidad de un motor en función del voltaje y frecuencia entregadas, sin modificar el torque constante.

Una vez seleccionado el motor se sabe que la relación de velocidades entre la rueda conductora y la rueda conducida es de 381,17:1

Para seleccionar el variador de frecuencia se deben tener en cuenta el tipo de carga, en este caso es de potencia constante, las características del motor nombradas previamente en el capítulo anterior y su rango de funcionamiento, velocidades máximas y mínimas.

Una vez identificados estos valores y gracias al catálogo de variadores de frecuencia Rexroth se seleccionó el variador de la ilustración 24 que cumple con las especificaciones y además es compatible con el motor.

Ilustración 27. Variador de frecuencia Rexroth EFC 3610.

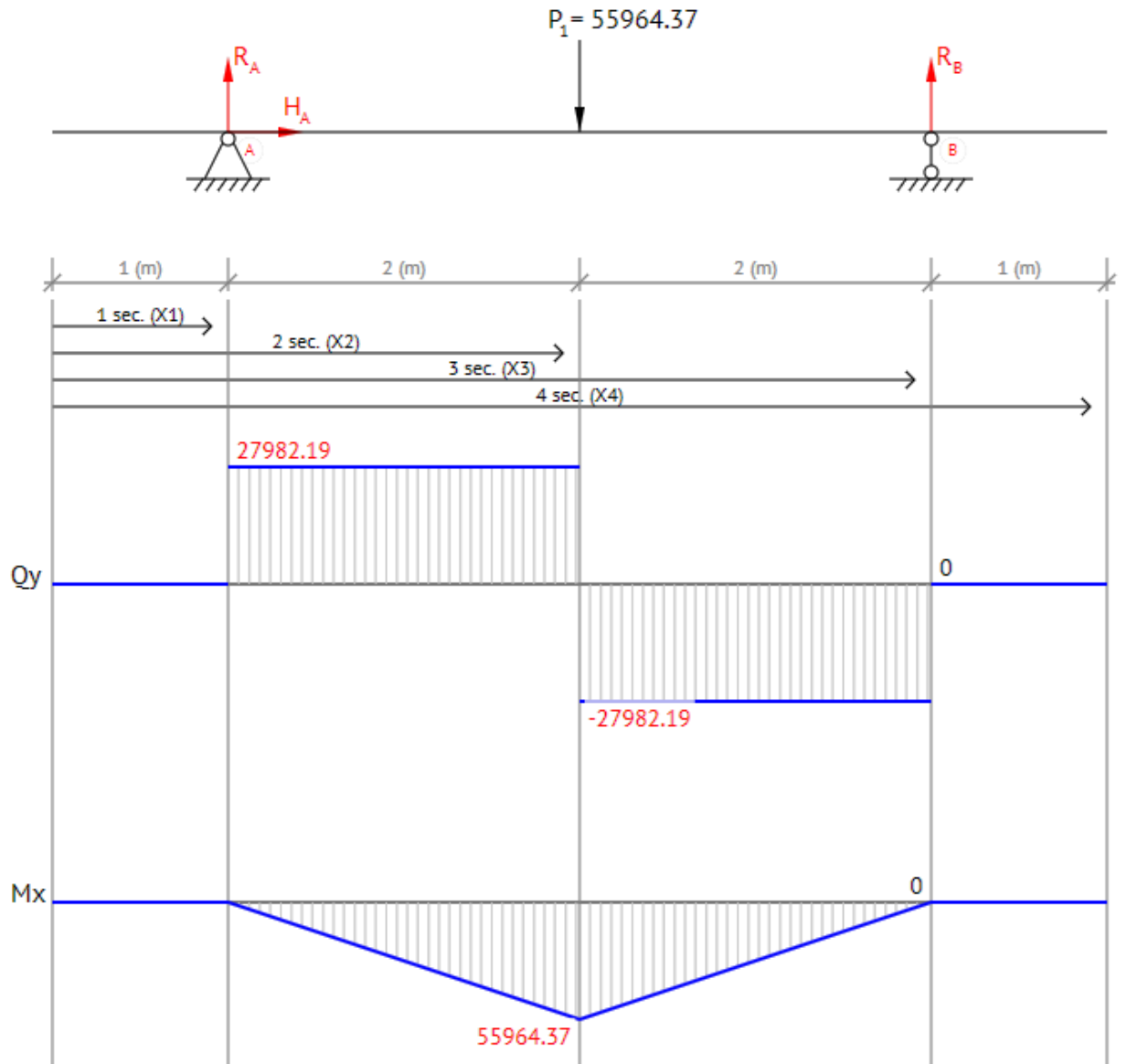


Fuente: Rexroth Bosch group Catalogo de producto variadores de frecuencia.

8.3.2.3 Transmisión

Para el diseño de rodillos, se realiza el diagrama del secador (ilustración 28), donde $P = 55964.37$ N que es el peso de todas las cargas sobre los rodillos, que estarán ubicados en el punto A y B. Se calcula las reacciones sobre los rodillos.

Ilustración 28. Diagrama de cuerpo libre horno.



Fuente: autores

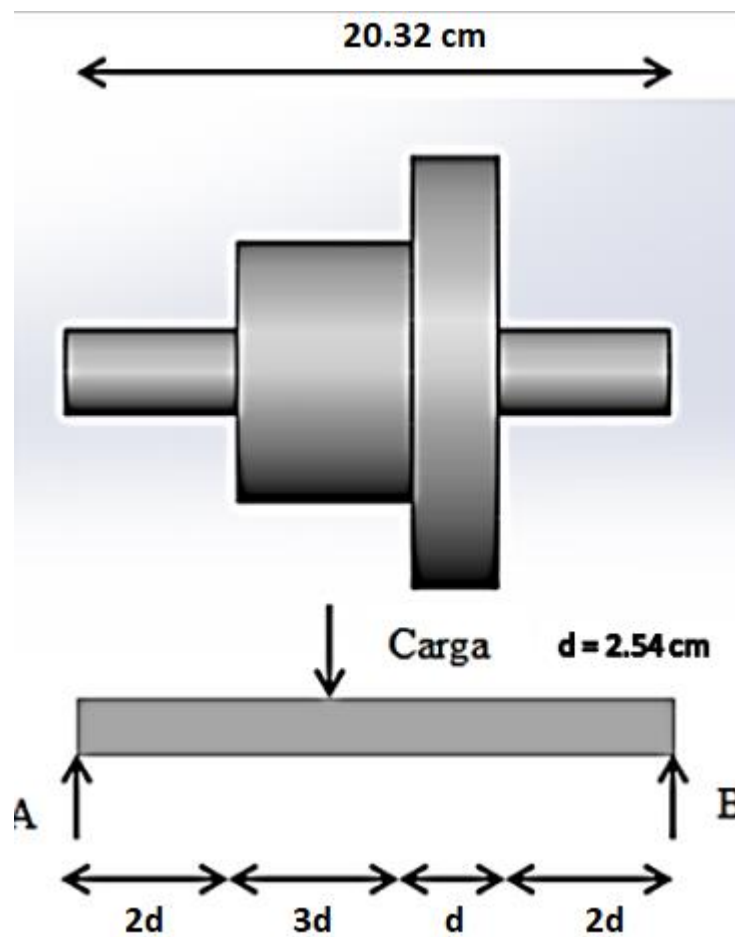
$$\Sigma F_y = R_a + R_b = 55964.37 \text{ N}$$

$$\Sigma M_0 = 0$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_0 &= R_a + 5m * (55964.37 - R_a) = 3m * 55964.37 \text{ N} \rightarrow R_a - 5 * R_a \\ &= -279821.85 + 167893.11 = R_a = -\frac{111928.74}{-4} = R_a \\ &= 27982.19 \text{ N}; R_b = 27982.19 \text{ N} \end{aligned}$$

Una vez calculados los esfuerzos sobre los rodillos, se realiza diagrama del rodillo (ver ilustración 29) para determinar las cargas sobre los rodamientos.

Ilustración 29. Diagrama rodillos.



Fuentes: Autores

Se sabe que el contacto entre el horno y los rodillos es tangente y presenta un ángulo de 45° por lo tanto, la componente que soporta el rodamiento es la componente en Y como se muestra en la siguiente ecuación, además hay que recordar que la carga se distribuye en dos rodillos:

$$\Sigma F_y = 0 = R_a + R_b = Q \rightarrow R_a + R_b = \text{sen}(45) * \frac{27982}{2}$$

$$\Sigma M_a = (8d * R_b) = -(3.5d * Q) = 20.32 \text{ cm} * R_b = 8.89 \text{ cm} * 0.71 * 13991$$

$$= \frac{883.1}{20.32 \times 10^{-2}} = R_b = 4345.95 \text{ N} ; R_b = 5587.66 \text{ N}$$

Se verifica si los rodillos se deslizan con la condición $F_r \leq \mu_s * N$, donde F_r es igual a la reacción en B.

$$5587.66 \leq 0.74 * \frac{27982}{2} * \text{sen}(45) = 5587.66 \text{ N} \leq 7320.92 \text{ N}$$

\rightarrow No hay rozamiento

8.3.2.4 Cálculo por fatiga

Se selecciona un acero ASTM A36 puesto que se utiliza para ejes o piezas sometidas a grandes esfuerzos.

$$S_{ut} = 500 \text{ MPa} ; S_y = 230 \text{ MPa}$$

Los datos de resistencia a la tracción y a la fluencia se tomaron de lo referenciado por la empresa Material Mundial [32].

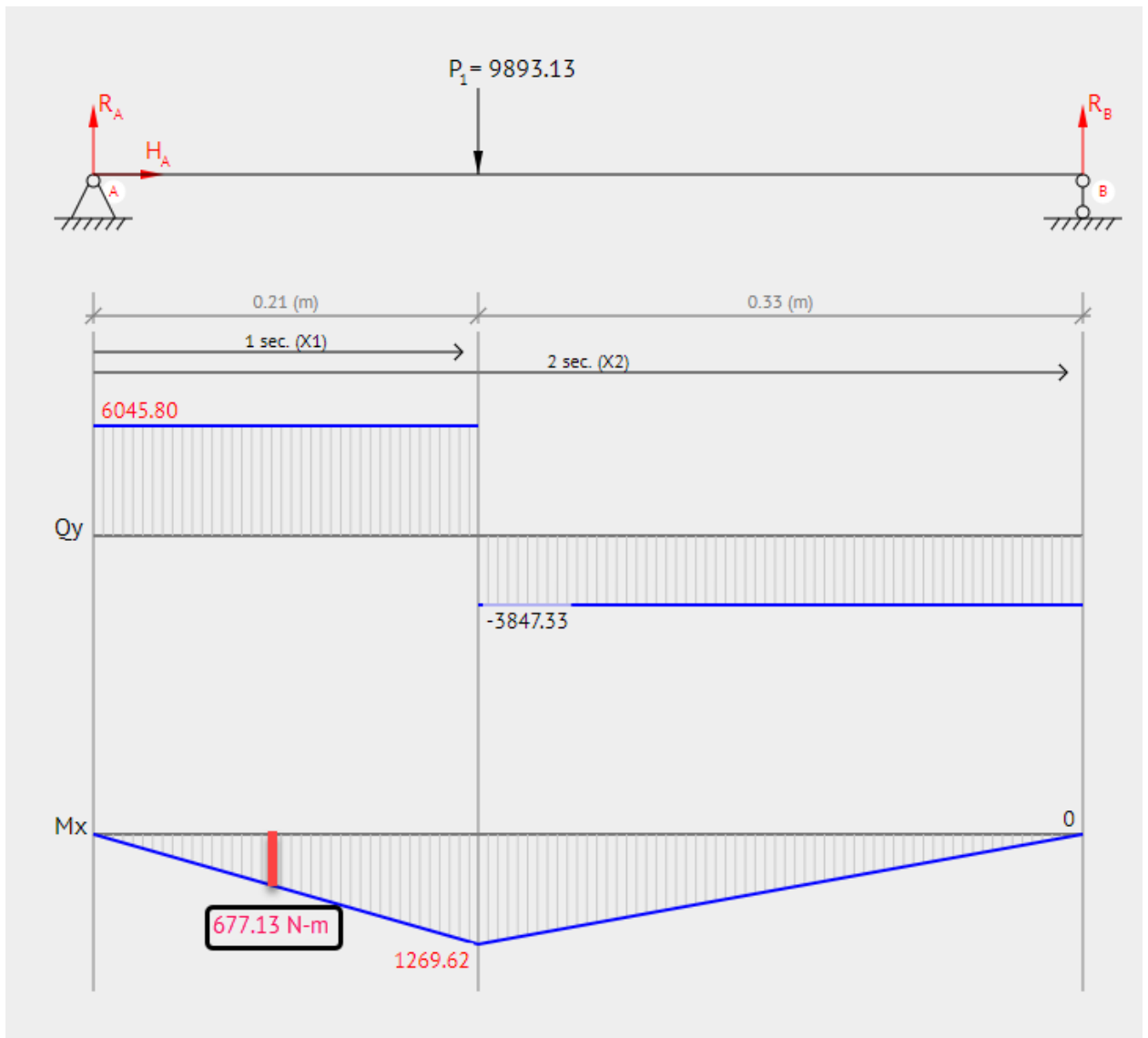
Se utiliza la fórmula de fatiga para calcular el diámetro del eje de los rodillos:

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} * \frac{1}{S_e} [4(k_t * M_a)^2]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

El análisis de los momentos en los rodillos se realiza a partir de un análisis estático utilizando un software especializado. La ilustración 30 muestra el momento alternante que se presenta en los rodillos. Como se observa, el software muestra el

momento máximo que se presenta en la zona donde la carga es aplicada, pero para el diseño, se debe analizar la zona crítica (línea roja), que es donde presenta una condición de cambio de diámetro.

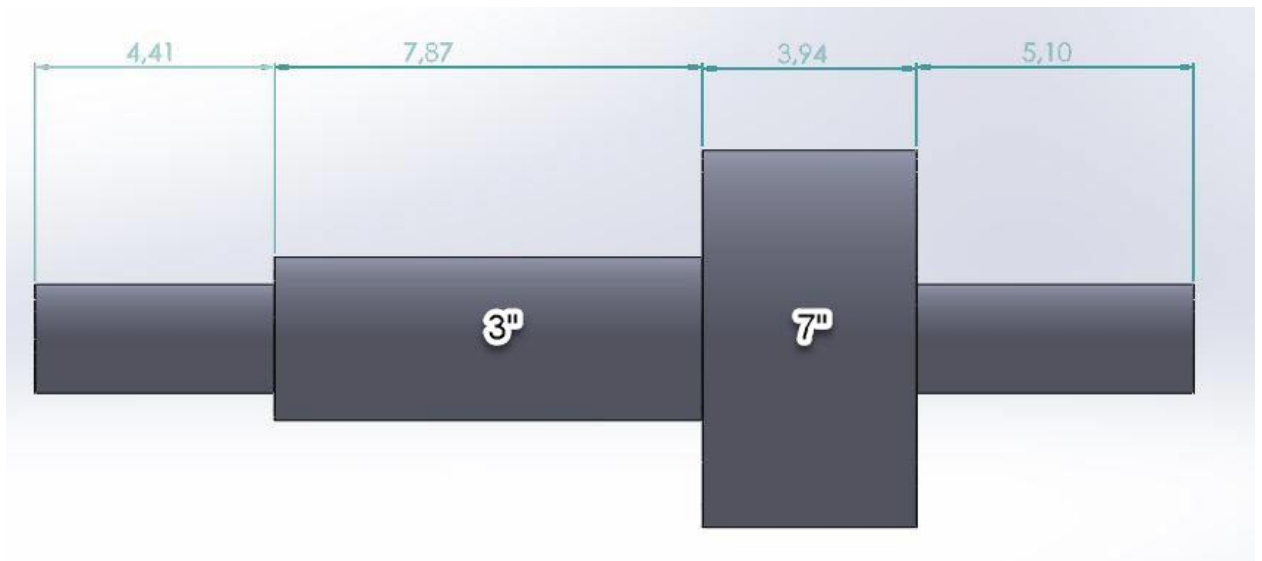
Ilustración 30. Diagrama cuerpo libre rodillos.



Fuente: Autores

Se calcula el factor de concentración de esfuerzos K_c de la gráfica de factores teóricos de concentración de esfuerzos para eje redondo con filetes en el hombro en flexión, así como también su momento flector.

Ilustración 31. Diagrama rodillo y concentradores de esfuerzo.



Fuente: Autores

$$D/d = 3; r/d = 0.16 \quad K_c = 1.6$$

Luego se calcula el límite de resistencia a la fatiga con todos los factores que lo afectan

$$S_e = k_f * k_s * k_r * k_t * k_m * S'_e$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} = 250 \text{ MPa}$$

$$k_f = 0.78; k_s = 0.869(1)^{-0.112} = 0.869; k_r = 0.814; k_t = 1.015; k_m = 1$$

k_f = factor superficial

k_s = tamaño

k_r = confiabilidad

k_t = temperatura

$k_m =$ efectos diversos

$$S_e = 140.01 \text{ MPa}$$

$$d = \left\{ \frac{16 * 2}{\pi} * \frac{1}{140.01 \text{ MPa}} [4(1.6 * 677.13 \text{ N} - m)^2]^{1/2} \right\}^{1/3} = 0.05401 \text{ m} \cong 5.4 \text{ cm}$$

A partir de esta información se obtiene que el diámetro mínimo para el diseño del rodillo es de 5.4 cm, por lo tanto, se debe escoger un diámetro nominal de 2.5 pulgadas puesto que las chumaceras se comercializan en este tamaño.

Con este nuevo diámetro se itera para determinar el nuevo factor de seguridad, volviendo a calcular los coeficientes de los factores que modifican el límite de fatiga.

$$\frac{D}{d} = \frac{7.62}{6.35} = 1.2 ; \frac{r}{d} = \frac{8}{63.5} = 0.126$$

$$k_c = 1.48$$

$$k_f = 0.78$$

$$k_s = 0.7842$$

$$k_r = 0.814$$

$$k_t = 1.015$$

$$k_m = 1$$

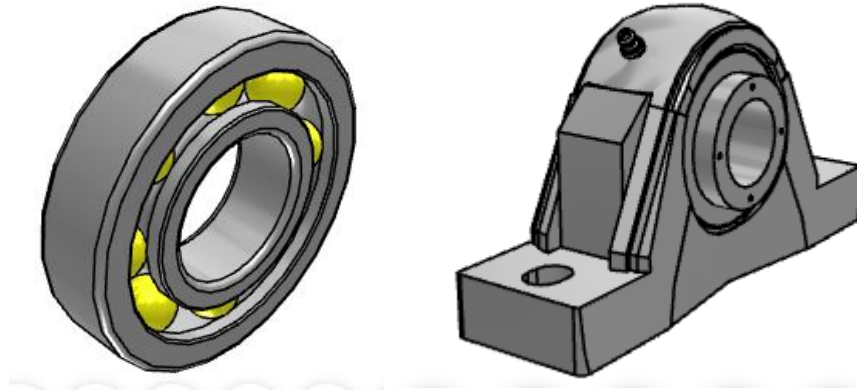
$$S_e = 110.82 \text{ MPa}$$

$$6.35 \times 10^{-2} \text{ m} = \left\{ \frac{16 * n}{\pi} * \frac{1}{110.82 \text{ MPa}} [4(1.48 * 677.13 \text{ N} - m)^2]^{1/2} \right\}^{1/3} = n = 2.57$$

≈ 2.6

A partir de estos diámetros se procede a calcular las chumaceras. Conociendo que la carga que soporta la chumacera es la mitad de la reacción sobre uno de los rodillos, es decir, 2793.83 N se calcula el rodamiento con ayuda de la herramienta SKF Bearing select, donde se determina que la mejor opción es la chumacera RMS 16.

Ilustración 32. Rodamiento y chumacera RMS 16.



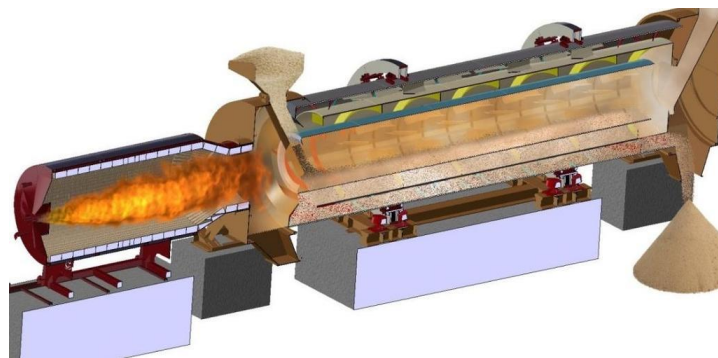
Fuente: SKF Bearing select.

8.3.3 Fuente térmica

De acuerdo con el alcance del proyecto, las cantidades de material a secar no son tan grandes, por esta razón no hay que buscar un quemador de tipo industrial, la solución, es la adquisición de un lanzallamas, el cual puede satisfacer las necesidades que se requieren.

Es necesario para seguridad del personal a cargo, que el sistema cuente con regulación en el paso de gas, por lo tanto, se debe de adquirir un lanzallamas con válvulas de seguridad integrados que garanticen la tranquilidad del usuario.

Ilustración 33. Lanzallamas de un horno secador de arena.



Fuente: (PROSOFT Industry)

8.3.3.1 Tipo de combustible

La mayoría de combustibles pueden ser usados para llevar a cabo el proceso de secado, pero se necesita hacer una evaluación previa respecto a los gastos-eficiencia de dichos combustibles para dar con la alternativa más viable. Actualmente, la mayoría de sistemas de secado usan gas natural, gas licuado de petróleo o Diésel.

Gas licuado de petróleo

Es un producto combustible comúnmente designado con las siglas GLP, está compuesto por hidrocarburos siendo gaseosos en condiciones normales de presión-temperatura y cuando se licuan (aplicación de presión) pasan a un estado líquido para su facilitación a la hora de comercializar, transportar y almacenar [33].

Es un combustible limpio, altamente inflamable, con gran capacidad de expansión y compuesto en su mayoría de propano y Butano.

Tabla 17. Características del gas licuado

	Propano Comercial	Butano Comercial
Presión de vapor en kPa (presión absoluta) a:		
20°C	1.000	220
40°C	1.570	360
45°C	1.760	385
55°C	2.170	580
Peso específico	0,504	0,582
Punto de ebullición inicial a 1,00 atm de presión, °C	- 42	- 9
Peso por metro cúbico de líquido a 15,56°C, kg	504	582
Calor específico del líquido, kilojoules por kilogramo, a 15,56°C	1,464	1,276
Metros cúbicos de vapor por litro de líquido a 15,56°C	0,271	0,235
Metros cúbicos de vapor por kilogramo de líquido a 15,56°C	0,539	0,410
Peso específico del vapor (aire = 1) a 15,56°C	1,50	2,01
Temperatura de ignición en aire, °C	493-549	482-538
Temperatura máxima de llama en aire, °C	1.980	2.008
Límites de inflamabilidad en aire, % de vapor en la mezcla aire-gas:		
Inferior	2,15	1,55
Superior	9,60	8,60
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición:		
Kilojoules por kilogramo	428	388
Kilojoules por litro	216	226
Cantidad de calor total luego de la vaporización:		
Kilojoules por metro cúbico	92.430	121.280
Kilojoules por kilogramo	49.920	49.140
Kilojoules por litro	25.140	28.100

Fuente: Código del Gas Licuado de Petróleo. NFPA 58 – Edición 2004.

Gas natural

El gas natural se halla en depósitos subterráneos, el cual se extrae mediante perforaciones en la tierra, es un tipo de energía amigable con el medio ambiente.

Sus ventajas radican en el suministro continuo en la mayoría de hogares, no necesita de almacenamiento, es el combustible más económico en el mercado actual y no produce residuos contaminantes [34].

Tabla 18. Composición del gas natural.

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH ₄	81.86
Etano	C ₂ H ₆	11.61
Propano	C ₃ H ₈	1.92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0.23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0.22
Nitrógeno	N ₂	0.90
Dióxido de carbono	CO ₂	3.18

Fuente: Vanti S.A.ESP. Gas Natural [en línea]

Diésel

Es un tipo de combustible no renovable obtenido a partir de la destilación del petróleo en altas temperaturas. Su ventaja radica en la eficiencia, debido a su producción de trabajo mecánico por litro de combustible.

Tabla 19. Poderes caloríficos de combustibles.

Combustible	Unidad	HI	Hs
Gas natural	(kWh/kg)	13,05	14,43
Propano comercial	(kWh/kg)	12,82	13,92
Butano comercial	(kWh/kg)	12,69	13,74
Gasóleo C	(kWh/kg)	11,56	12,23

Fuente: GARRIDO, Pablo. Guía básica. Calderas industriales eficientes [2018]

A continuación, se realiza una tabla comparativa entre los tipos de combustibles:

Tabla 20. Tabla comparativa-tipos de combustibles.

Tipo de combustible	Ventaja	Desventaja
GLP	<ul style="list-style-type: none"> - No es toxico - Se licua a bajas presiones, entre 60 y 120 psi. - Presenta mayor poder calorífico que los otros dos combustibles. - Su combustión es acelerada generando altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es inoloro por lo tanto se hace más complicado detectar fugaz. - Puede ocasionar irritación en la piel si se tiene contacto directo. - Su costo es menor que el Diésel pero su consumo es mayor.
Gas natural	<ul style="list-style-type: none"> -Es el combustible más económico. -Su suministro es continuo por lo tanto no abra interrupciones. -Es una energía limpia. -Su instalación no es compleja. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta un menor poder calorífico que el GLP
Diésel	<ul style="list-style-type: none"> -Su gran ventaja radica en su rendimiento y consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Presenta un mayor costo de adquisición.

Fuente: Autores

Para finalidad del proyecto se escogió el gas natural como combustible, esto debido a que es el combustible más económico y de gran poder calorífico (12800 Kcal/kg). Es de suma importancia recalcar que el tipo de combustible a usar no lo es todo, debido a que se necesita de generar las condiciones óptimas para la combustión.

8.3.4 Potencia del lanzallamas

Para calcular la masa de arena se tiene en cuenta el área ocupada por la materia prima dentro del horno y su densidad:

$$masa\ de\ arena = \rho * area\ de\ arena = 1860 \frac{kg}{m^3} * 0.0428\ m^2 = 79.61\ kg$$

$$\%H_2O = 13.6\%$$

En donde:

Masa de agua evaporada (m_e)

$$m_e = \frac{1}{L_v} (P - R(100 - T_0)(t - t_1))$$

P: Potencia del quemador

t_1 = Tiempo invertido para llegar a 100°C

T_0 = Temperatura ambiente

L_v = Calor latente de evaporización

m_e = Masa de agua evaporada

R = Coeficiente de pérdidas

t = Tiempo

Para calcular la potencia del quemador se debe saber cuánta masa de agua se piensa secar de la arena húmeda, conociendo el dato de que en la arena humedad, el 13.6% pertenece a masa de agua según las normas ASTM C 778 20-30 SAND y ASTM C 778 GRADED SAND.

$$\text{masa de agua a evaporar} = \frac{79.61 \text{ kg} * 13.6\%}{100\%} = 10.83 \text{ kg}$$

Según la norma, la cantidad de agua no puede superar el 5%, siendo así, la cantidad de masa de agua a evaporar es igual a:

$$\text{masa de agua a evaporar} = \frac{10.83 \text{ kg} * 95\%}{100\%} = 10.29 \text{ kg}$$

Teniendo el dato de la cantidad de agua que se debe evaporar, se puede calcular la energía necesaria para evaporar dicha cantidad de masa de agua.

Para elevar el agua a 100 °C se calcula Q

$$Q = c * m * \Delta T$$

$$c_{H_2O} = 4180 \frac{J}{kg * K} ; c_{arena} = 795 \frac{J}{kg * K}$$

$$Q_1 = 10.29 \text{ kg} * 4180 \frac{J}{kg * K} * (373.15 - 299.15)$$

$$Q_1 = 3182902.8 J$$

Una vez calculada la cantidad de energía para llegar a 100 °C, se necesita saber cuánta energía se necesita para evaporar esta cantidad de agua:

Para evaporar el agua:

$$Q_2 = m * L_v$$

$$L_v = 2260 \times 10^3 \frac{J}{kg} \Rightarrow \text{Calor latente de evaporación de agua}$$

$$Q_2 = 10.29 kg * 2260 \times \frac{10^3 J}{kg} = 23255400 J$$

Con estos datos se calcula la entalpía total de este proceso que sería igual a:

$$\Delta h = Q_1 + Q_2 = 26438302.8 J$$

Para finalizar, se debe determinar la cantidad de calor que es absorbida por la arena durante el proceso, ya que la arena también alcanza la temperatura de 100 °C:

Cantidad de calor absorbido por la arena

$$Q_3 = m * c_p * \Delta T = (79.61 - 10.83) kg * 795 \frac{J}{kg * K} * (373.15 - 299.15) \\ = 4046327.4 J$$

Como el flujo másico es constante, el valor de la fuente es la suma de los calores obtenidos en los procesos anteriores:

$$W_{fuente} = \Delta h_{H_2O} + Q_{arena} = 30484630.2 J$$

Durante el cálculo de tiempo de residencia del material se obtiene que la arena permanecerá durante 15.83 minutos dentro del horno, es decir, 949.8 segundos. Se convierte a Watts para determinar la potencia del quemador:

$$P = \frac{W_{fuente}}{t_{secado}} = \frac{30484630.2 J}{949.8 s} = 32095.8 W \cong 32 kW$$

8.3.4.1 Selección del lanzallamas

Como primera medida el quemador debe operar con gas natural por la razones dadas en la tabla 22, la potencia con la que va a operar es de 32kW debido a que esta potencia es la requerida para secar 79,61 kg de arena húmeda y para la seguridad de sus operadores deberá ser automático y con control de llama, por dichas razones el quemador de tipo QH-120 es la mejor opción para dicho trabajo.

Ilustración 34. Quemador ecoflam max gas 120.



Fuente: ibérica del calor [catálogo en línea]

Especificaciones técnicas:

Tabla 21. Especificaciones del quemador.

MODELO	QH-120
Potencia mínima térmica	50.000 Btu/h – 15kW/h
Potencia máxima térmica	150.000 Btu/h – 44kW/h
Entrega de gas	13mm
Voltaje de las válvulas de gas	110 V
Tipo de gas	GLP – N
Presión máxima de gas	14" C.A

Presión mínima de gas	6" C.A
Sensor de flama	Electrodo de ionización
Ventilador	Centrifugo
Voltaje de entrada	110 voltios
Diámetro del cañón	90mm
Tipo de montaje	Flache

Fuente: gas&gas S.A.S [catalogo en línea]

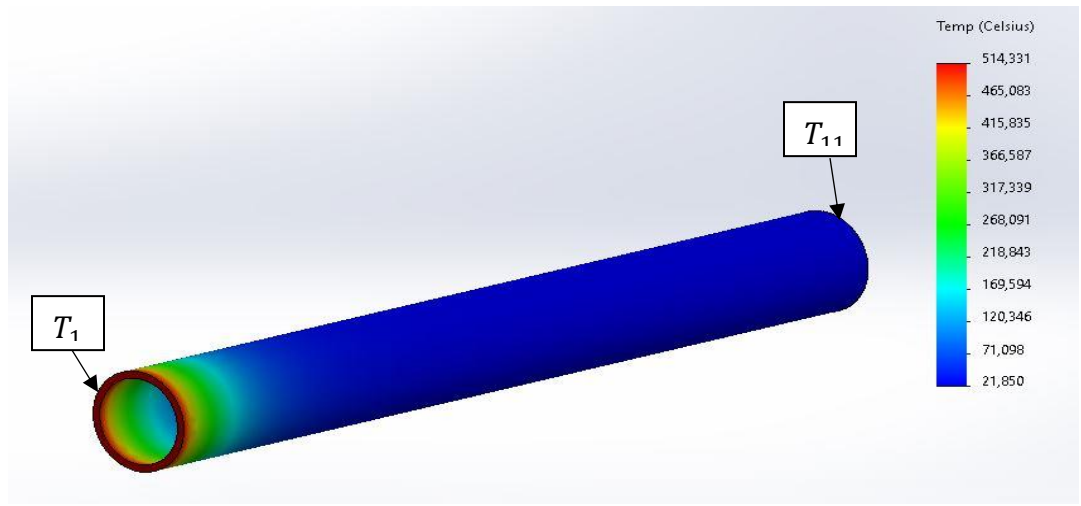
8.3.5 Análisis de temperatura del horno secador

Una vez seleccionado el lanzallamas y conociendo su potencia de 32kW, considerando una temperatura ambiente de 22°C o 295,15K, asumiendo además por cuestiones de diseño y facilidad en los cálculos que la temperatura de los gases es la misma que las paredes al interior del horno, a pesar que sus valores son diferentes debido al flujo de aire al interior del mismo. Se obtuvieron las diferentes temperaturas (presentes en la ilustración 35) a lo largo del horno. Donde la temperatura promedio está dada por:

$$T_p = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11}}{11}$$

$$T_p = 267.63^\circ C$$

Ilustración 35. Análisis de temperatura del acero A36 en software SolidWorks.

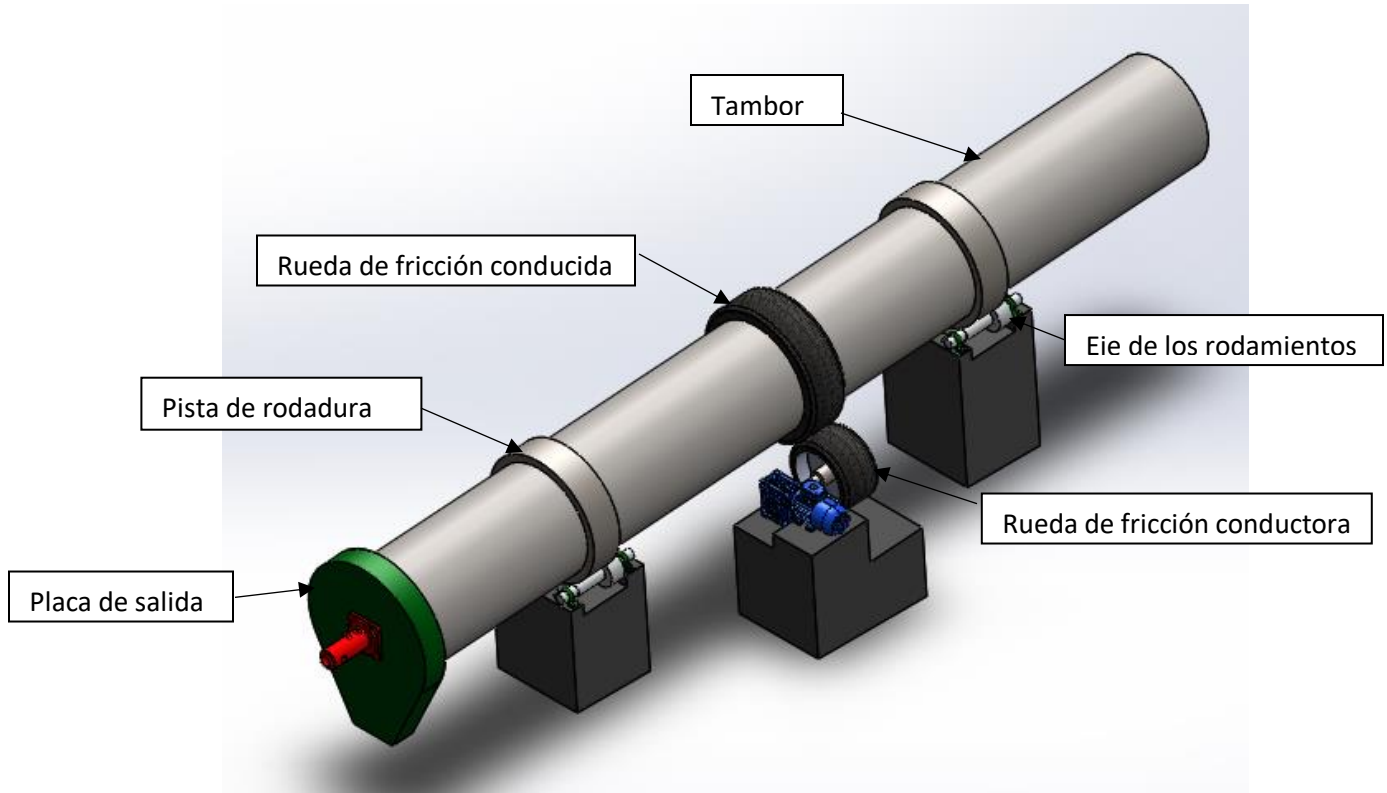


Fuente: autores.

La temperatura promedio al interior del horno es de 267.63°C y la temperatura del lanzallamas es de 514.33°C aproximadamente, durante los 15 minutos que la arena permanece dentro del horno nunca alcanzará esta temperatura. Este análisis realizado estudia el comportamiento del material bajo el efecto del uso del lanzallamas.

A continuación, se presenta el diseño final del horno secador para arena realizado en el software de simulación SolidWorks. Los planos a detalle se encuentran en los anexos.

Ilustración 36. Diseño final horno secador para arena.



Fuente: Autores

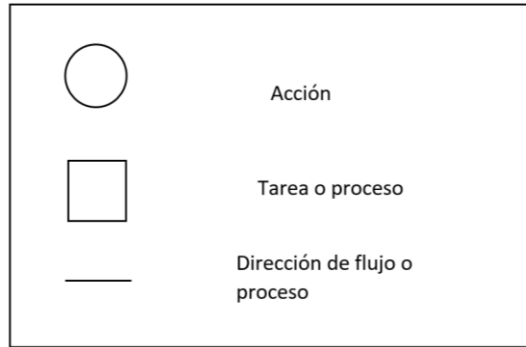
8.3.6 Proceso de manufactura del horno secador para arena

Se describirá los pasos a seguir para la puesta en marcha del horno secador con el tipo de procesos que requiere, para esto se utilizara un diagrama de definición de operaciones, que comienza con sus partes fundamentales como lo son: cilindro, motor, secador, rodillos y su base.

8.3.6.1 Diagrama y definición de operaciones

Se observa en la ilustración 38 los símbolos del diagrama de operaciones

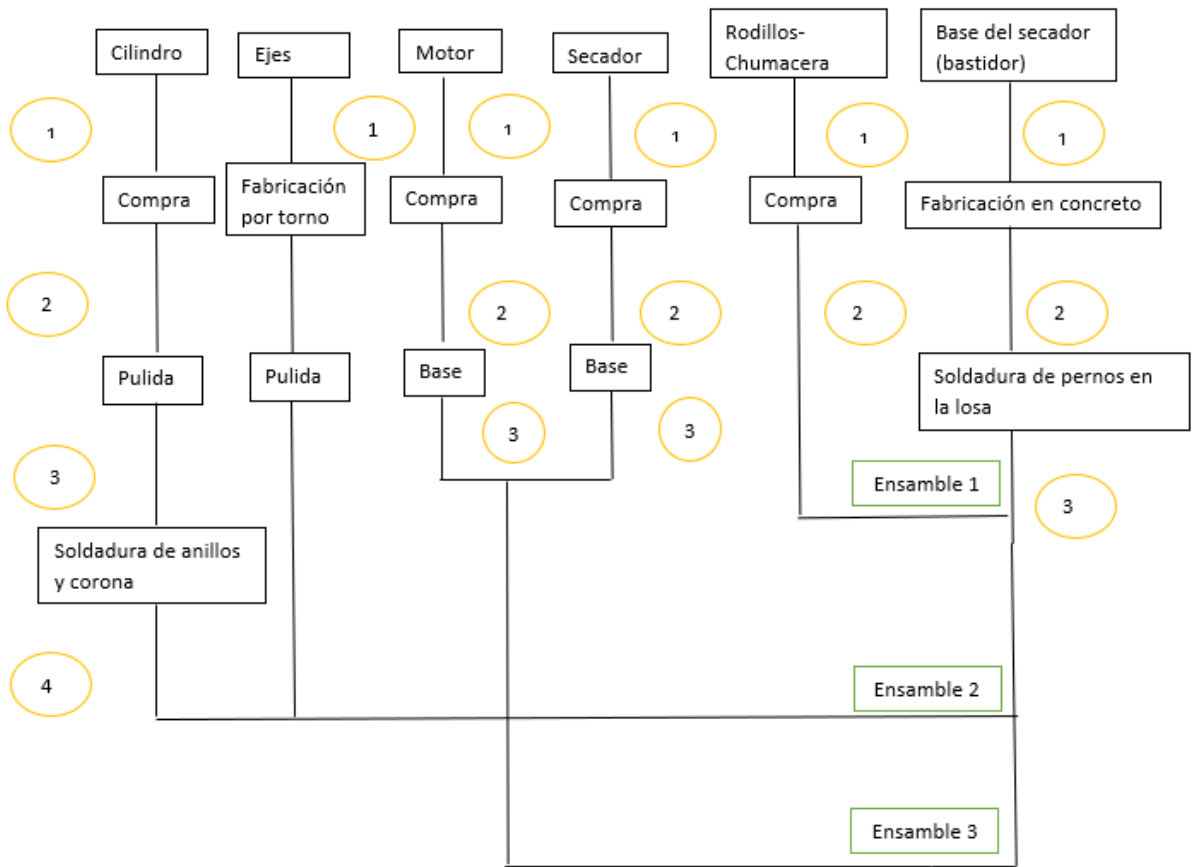
Ilustración 37. Símbolos del diagrama de operaciones.



Fuente: Autores

A continuación, se observa el diagrama de operaciones en la ilustración 38.

Ilustración 38. Diagrama de operaciones.



Fuentes: Autores

Definición de acciones

Soportes

- La construcción de la base será en concreto y varilla corrugada de 1/2 pulgada para así reforzar la estructura.
- Se soldán pernos de anclaje M24 que tiene una longitud de 300mm esto con el fin de ubicarlos en la base, obteniendo un bastidor solido con pernos incrustados para luego darle soporte al cilindro.

Definición de procesos

Ensamble 1

Al tener la base hecha, se procede a ubicar el sistema de soporte del cilindro o tambor, las chumaceras y rodillos y sus respectivos ejes recordando que los pernos ya están ubicados en el sistema.

Ensamble 2

Para la instalación de la cámara de secado se hará uso de un tacle de 4 toneladas para poder ubicarla sobre el bastidor.

Ensamble 3

Se construye con bloques de hormigón bases para el motor y la caja reductora necesaria para poder tensar la banda de transmisión que conduce las poleas del motor y de la caja, de igual forma se construye una base para el secador en la parte inferior del tambor en donde la arena saldrá con menor porcentaje de humedad.

9. CONCLUSIONES

Se identificaron las características principales para el diseño del horno teniendo como base los objetivos planteados en el proyecto, de tal manera se elaboró el diseño conceptual evaluando tres posibles diseños, realizando el diseño a detalle se eligieron los componentes para un mejor y eficaz funcionamiento de la máquina, dando como resultado final el diseño de un horno rotativo secador para arena.

Se realizó el prototipo final del horno secador para arena en el software CAD SolidWorks con sus dimensiones y materiales para cada uno de sus componentes.

Se realizaron los cálculos pertinentes para cada componente en la máquina, evaluando así cada aspecto que conlleva el diseño, se realizaron los análisis estáticos y en movimiento del horno.

Se analizó e indago mediante diferentes fuentes bibliográficas las características claves en el diseño del horno, como los son: longitud, diámetro y material a secar.

10. RECOMENDACIONES

El diseño del horno secador es en base al secado de 2 Ton/h de arena que debe procesar, por lo tanto, si se requiere el secado de una mayor o menor cantidad se recomienda la reingeniería de la máquina.

El diseño mecánico del horno se basa en la sencillez, de igual forma si se lleva a cabo su construcción se deben tomar todas las medidas preventivas para evitar cualquier tipo de accidente en su operación.

11. BIBLIOGRAFÍA

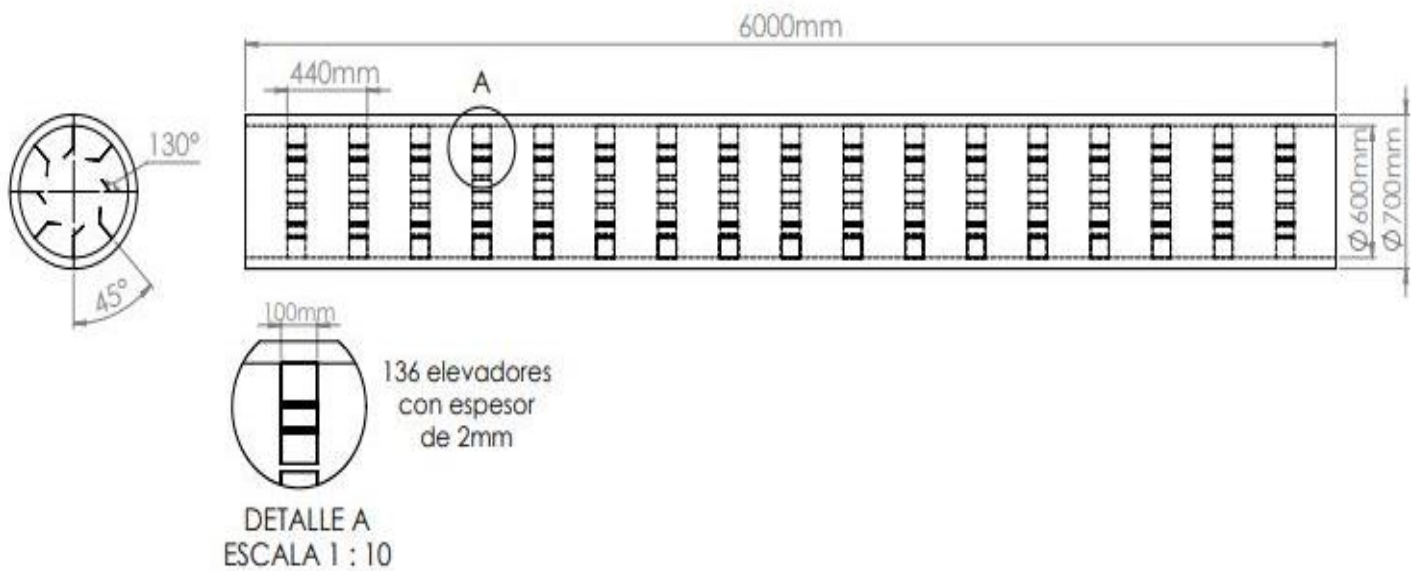
1. A. Ortega Castro, <<Diseño y construcción de una secadora de arenas para la producción de morteros en la hormiguera Hormicen>>,2018.
2. Y. Rueda Ordoñez y D. Rueda Ordoñez, <<Diseño y construcción de secador rotativo directo cilíndrico para pollinaza>>, 2009.
3. E. Figueroa, << Balance térmico y de masa para el secado de arena sílice en cilíndricos rotativos horizontales>>, 2014.
4. A. Abarca y M. Aldaz, << Diseño y construcción de un secador para la obtención de escamas PET>>,2014.
5. J. Rodríguez, << Diseño de un secador rotativo para 30 Ton/h de arena, para la empresa ECOMONESA S.A>>, 2019.
6. J. Rodríguez, << Fundamento de procesos unitarios>>,2014.
7. E. Gálvez, << Diseño de una secadora de quinua en el departamento de La Paz – Bolivia>>,2016.
8. J.Sper y I.Torres, << Diseño de una planta deshidratadora de banano usando secador rotatorio>>,2009.
9. F. Vargas, <<Proceso del café: lavado, natural y honey>>,2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/procesos-del-cafe-lavado-natural-y-honey/>
- 10.<<El hormigón>>,2015. [En línea]. Disponible en: https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase_2_construcci%C3%B3n_1_n%C3%A1utica_2015_Hormig%C3%B3n.pdf
- 11.<<UMACOM>>, Los Principales Tipos de Hormigón y sus Aplicaciones. En línea. Disponible en: <http://www.umacon.com/noticia.php/es/principales-10-aplicaciones-y-tipos-de-hormigon/428>
- 12.<<Importancia de la arena en el hormigón>>,2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.waldhus.com/Q2ZXOQ5N/>
- 13.R.Treybal, <<Operaciones de transferencia de masa>>, segunda edición.
14. Knoule F, <<El secado>>.1968. Ediciones Urno.
15. Topp, G. C., Davis, J. L. y Annan, A. P., 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, volumen 16.
- 16.S.Orduz, <<Diseño mecanico de horno rotativo de funcionamiento horizontal>>, 2012.
- 17.P.Fito, A. Grau, J.Barat y A. Albors, <<introducción al secado de alimentos por aire caliente>>, primera edición, 2001.
- 18.M. Fabela, <<Secado por aspersión>>, 2017.
- 19.McCabe & Smith, <<Operaciones unitarias en ingeniería química>>m cuarta edición, 1991.

20. L. Andrade y H. Rodríguez, <<Diseño de una maquina secadora de hojas aromáticas>>, 2009.
21. Universidad de Granada, <<Secador por Liofilización>>. [en línea], disponible en: <http://fciencias.ugr.es/practicadocentes/wp-content/uploads/guiones/SecadoPorLiofilizacion.pdf>
22. Y. Cengel, <<Transferencia de calor>>, segunda edición. 2002. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/138951093/Transferencia-de-Calor-Cengel-pdf>
23. Fenómenos de transporte conducción de calor. [en línea]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/transporte/cond_calor/conduccion/conduccion.html
24. J. Flores, <<sistemas de transmisión mecánica>>, 2014. [en línea]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/15454/EG-1080-%20Flores%20Garc%C3%ADa%20Juan%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
25. M. Quesada, <<Manual para el diseño, calculo, selección y mantenimiento de bandas planas de transmisión>>, 1997.
26. Transmisión por engranajes. [en línea]. Disponible en: <http://files.cesarruiz.webnode.com.co/200000096-aa626ac2cd/TransmisionPorEngranajes.pdf>
27. W. Duda, <<Manuel tecnológico de cemento>>, 1977.
28. <https://imocom.com.co/ingenieria-y-proyectos/dosificacion-pesaje/> (IMOCON S.A.S, 2018. Dosificación y pesaje. [En línea]
29. Olx. Bandas transportadoras. Disponible en: <https://www.olx.com.co/item/banda-transportadora-iid-1110705550>
30. IGUS. Gear service life calculator. Disponible en: [<https://iglidur-gears-expert.igus.tools/configuration?l=es&c=ES>]
31. Material Mundial Grados, 7 Marzo 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.materialmundial.com/politica-de-privacidad/>
32. <<GLP: principales ventajas y desventajas>>, 22 noviembre 2016. [En línea]. Disponible en: GLP: <https://www.dincorsa.com/blog/glp-principales-ventajas-desventajas/>
33. <<Principales ventajas del gas natural>>, 26 junio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbg.es/es/compartiendo-ideas/noticias/principales-ventajas-del-gas-natural/>
34. K. Cauca, <<Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética>>, 2013.

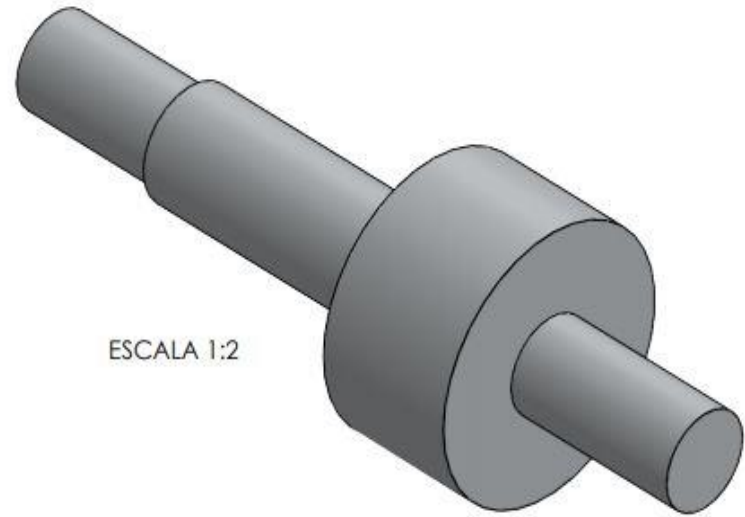
12. ANEXOS

12.1 Planos componentes horno secador para arena

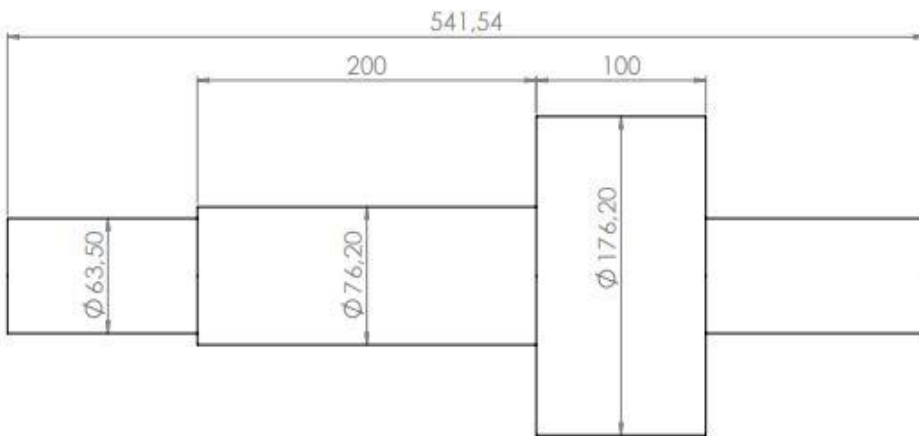
Plano del tambor



Plano de los ejes de las pistas de rodadura

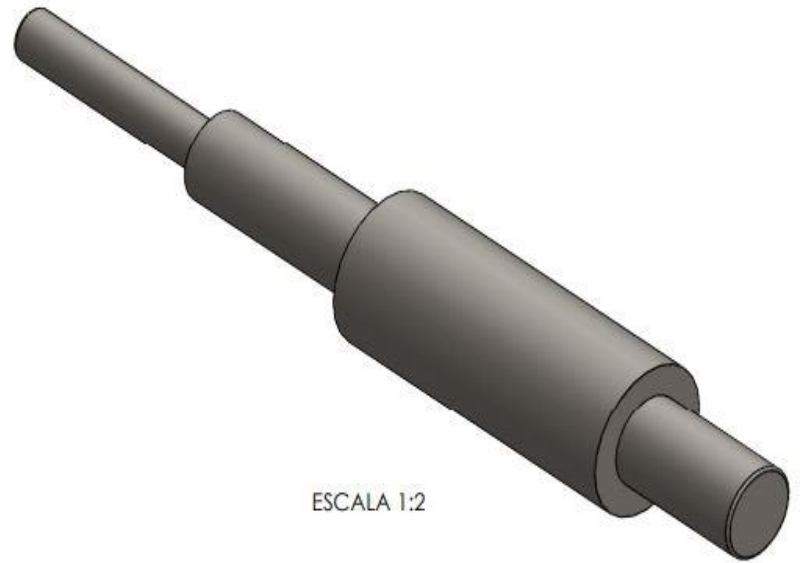


ESCALA 1:2

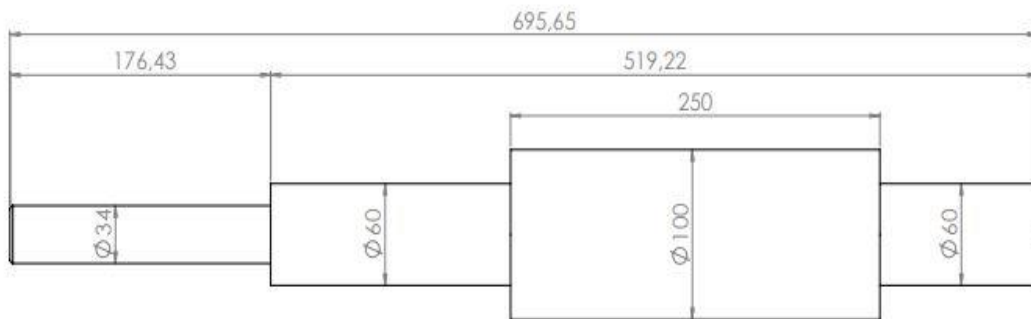


TODAS LAS MEDIDAS
EN MILIMETROS

Plano del eje del motor

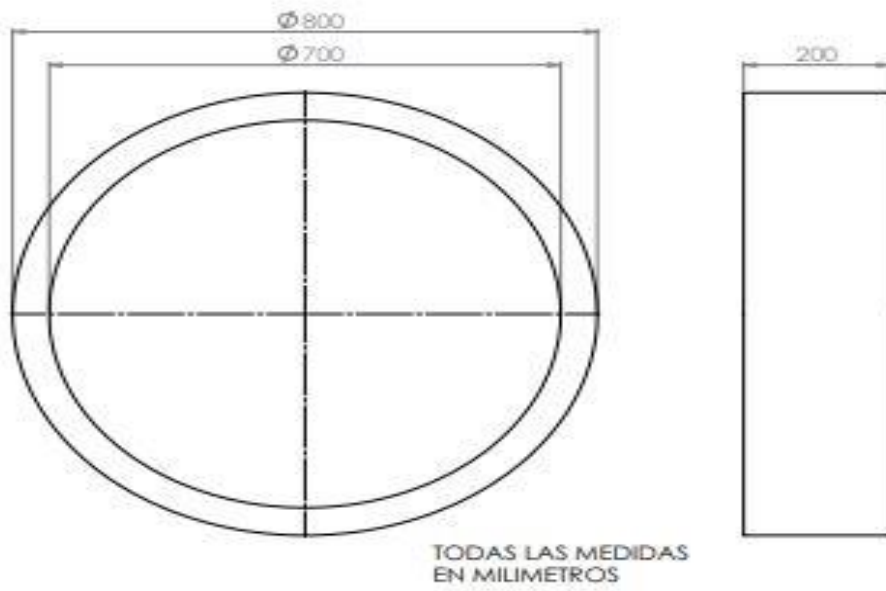


ESCALA 1:2



TODAS LAS MEDIDAS
EN MILIMETROS

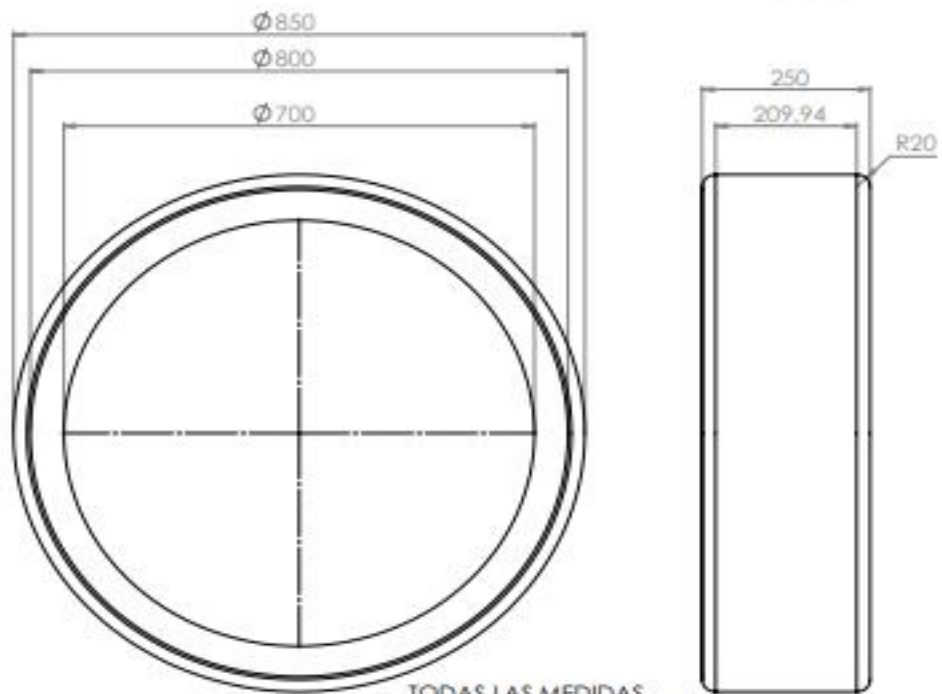
Plano de las pistas de rodadura



Plano rueda de fricción conducida



ESCALA 1:5

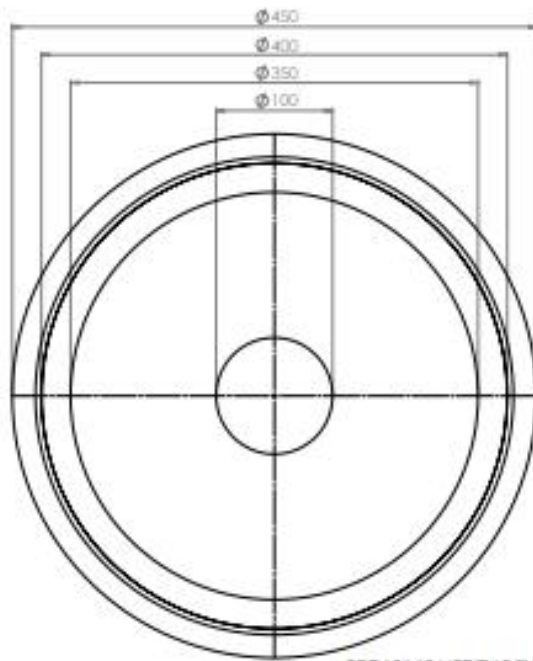


TODAS LAS MEDIDAS
EN MILIMETROS

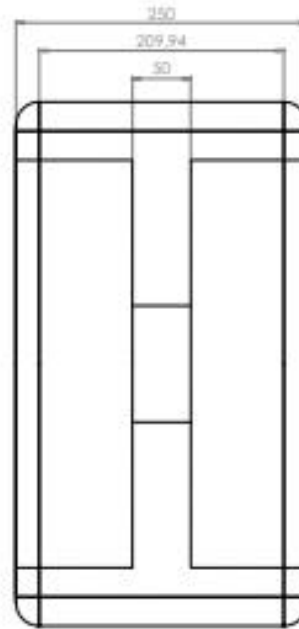
Plano rueda de fricción conductora



ESCALA 1:2



TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS



Plano placa de salida



ESCALA 1:5

