



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO DE UN SECADOR CONVECTIVO PARA
EL SECADO DEL GRANO DE CACAO**

Autor(es)

Jaith Alfonso Agamez Parias

Universidad de Antioquia

Departamento de ingeniería mecánica

Medellín, Colombia

2020



Diseño de un secador convectivo para el secado del grano de cacao

Jaith Alfonso Agamez Parias

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para
optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Asesor:

Edwin Lenin Chica Arrieta, Ingeniero Mecánico

Línea de Investigación:

Este trabajo es ligado a la sección de diseño y energético.

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación de Energía Alternativa (GEA)

Universidad de Antioquia
Departamento de ingeniería mecánica
Medellín, Colombia
2020.

Agradecimientos

A mis padres, Emir y Yasmín por su gran cariño y apoyo incondicional brindado a lo largo de toda mi vida, quienes sin importar las circunstancias o los kilómetros que nos separan están atentos a dificultades y fortunas que se me presentan.

A Geraldine Rivera, Emirys Agamez, Yolanda Suarez y demás familiares cercanos que me impulsan a mejorar cada día y por compartirme gratos y provechosos consejos en conjunto de su apoyo cada vez que de ellos necesito.

A Edwin L. Chica A., por compartir sus conocimientos y experiencia en la realización de este trabajo, además de aceptarme como integrante del grupo de investigación de Energía Alternativa de la facultad de Ingeniería de la universidad de Antioquia.

Al laboratorio de operaciones unitarias del programa de ingeniería química de la universidad de Antioquia por facilitarme sus instalaciones y equipos para realizar ensayos pertinentes a este trabajo de grado.

A todos los compañeros con los que compartí en la vida académica en especial a Cristian Mejía, Julián Pérez y Alejandro Grajales quienes colaboraron en aspectos significativos de este proyecto.

A la Universidad de Antioquia y todos los docentes encargados de la formación académica que obtuve.

Resumen

En el presente proyecto se buscó diseñar una maquina térmica para realizar la deshidratación de cacao antioqueño, buscando primordialmente que dicha maquina en funcionamiento otorgue una calidad superior a la obtenida con los procesos de secado tradicionales.

Después de revisar los diferentes equipos útiles en la deshidración de cacao, sus ventajas y desventajas se tomó la decisión de diseñar una secadora de lecho fijo; el diseño final es consecuencia de buscar bajos costos de adquisición y funcionamiento, además de tener la posibilidad de fácil montaje, mantenimiento y desmontaje sin sacrificar la efectividad del proceso. El sistema diseñado está conformado por: base de secado, cámara de aire, elevador mecánico, mezcladores, estructura-rieles de mezcladores, ventiladores, intercambiador de calor, horno de biomasa y ciclón.

Gracias a la composición elemental de las cascarras del caco de estudio, estas pueden ser utilizadas como biocombustible en el proceso de beneficio del mismo fruto, aunque debe ser sometido a una previa deshumidificación para lograr una óptima combustión.

Para obtener el comportamiento cinético de secado del cacao, este fue sometido a un proceso de deshidratación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias del programa de Ingeniería Química, las condiciones de operación fueron: Temperatura del aire de secado a 50 ± 5 grados centígrados, con un caudal aproximado de $2400 \text{ m}^3/\text{h}$, correspondiente a una velocidad de $4,6 \text{ m/s}$; el cacao usado en la experimentación (355 gramos fermentados) poseía una humedad inicial de $59,9\%$ y estuvo sometido al proceso un tiempo alrededor de 16 horas para el cual no presentaba cambios en el peso.

Índice

1. Introducción	6
2. Objetivos	7
3. Marco teórico	7
3.1 Utilidad de la mazorca del cacao como combustible	8
3.2 Deshidratación de frutos	10
3.3 Secadores convectivos usados en la deshidratación	11
3.3.1 Secador rotativo vertical:.....	12
3.3.2 Secador rotativo horizontal:.....	13
3.3.3 Secador de bandeja de flujo paralelo:	14
3.3.4 Secador de bandeja tipo túnel:.....	14
3.3.5 Secador de lecho fluido:.....	15
3.3.6 Secador de lecho fijo	15
3.3.7 Secador con bomba de calor.....	16
3.3.8 Salón de secado.....	17
3.3.9 Secador solar	18
4. Metodología	19
4.1 Comportamiento cinético de las propiedades de la fruta deshidratada	19
4.2 Proceso de secado de cacao	23
4.3 Diseño de un secador convectivo para deshidratación de Cacao	31
4.3.1 Diseño Conceptual	31
5 Resultados y análisis	41
5.1 Deshidratación del cacao	41
5.2 Parámetros energéticos	44
5.3 Ciclón	47
5.4 Esquema de la secadora diseñada	49
5.5 Costos de la secadora de cacao	52
5.5.1 Cotización de adquisición	52
5.5.2 Costos de operación	55
6 Conclusiones	57
7 Referencias bibliográficas	58
8 Anexos	61

Índice de figuras

Figura 1. Crecimiento de la producción de cacao en Colombia. Tomado de la página web de Fedecacao.....	7
Figura 2. Esquema de transferencia de masa y calor en el secado.	11
Figura 3. Presentación de los diferentes tipos de secadores directos.....	12
Figura 4. Secador rotativo vertical. Tomado de [17]	12
Figura 5. Esquema de secador rotativo horizontal. Tomado de [19].....	13
Figura 6. Secador de bandeja de flujo paralelo y esquema. Tomado de [21], [12].....	14
Figura 7. Secador de bandeja tipo túnel. Tomado de [23].....	15
Figura 8. Esquema de secador de lecho fluido. Tomado de [12].	15
Figura 9. Diagrama de secador de lecho fijo. Tomado de [18].....	16
Figura 10. Esquema de secador apoyado en bomba de calor. Tomado de [27].....	17
Figura 11. Salones de secado natural. Tomado de la página web de Fedecacao.	17
Figura 12. Esquema de secador solar. Tomado de [30].	18
Figura 13. Subclasificación de los secadores usados en la literatura seleccionada.	19
Figura 14. Equipo de secado de operaciones unitarias UdeA.	24
Figura 15. Hardware y software encargados del control del proceso.....	24
Figura 16. Evolución de las variables en el proceso.	25
Figura 17. Cacao de prueba en la deshidratación.....	26
Figura 18. Cacao después de partir la cascara.	26
Figura 19. Cacao en baba.	27
Figura 20. Comparación de características de los granos de cacao al terminar la fermentación. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.....	27
Figura 21. Grano de cacao parcialmente fermentado. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.....	28
Figura 22. Grano de cacao bien fermentado. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.....	28
Figura 23. Cacao después del proceso de fermentación.....	29
Figura 24. Secado de cacao en el laboratorio de Operaciones Unitarias UdeA.....	29
Figura 25. Cacao deshidratado.	30
Figura 26. Cacao quebrado al finalizar el proceso.	30
Figura 27. Proceso de secado del cacao del secador a diseñar.	32
Figura 28. Proceso detallado del secado del cacao.	33
Figura 29. Proceso final detallado del secado de cacao.	40
Figura 30. Balance de masa del sistema.....	40
Figura 31. Variación de la humedad en función del tiempo.....	42
Figura 32. Velocidad de secado en función del tiempo.	43
Figura 33. Velocidad de secado en función de la humedad del cacao.	43
Figura 34. Esquema de un ciclón. Tomado de [37].	47
Figura 35. Equipo de secado, detallando los elementos que lo conforman (1).....	49
Figura 36. Equipo de secado, detallando los elementos que lo conforman (2).....	50
Figura 37. Vista lateral del equipo de secado.....	51
Figura 38. Vista isométrica de la secadora diseñada.	51
Figura 39. Ventilador de secado seleccionado.....	52
Figura 40. Ventilador para impulsar el aire de combustión seleccionado.	52

Figura 41. Motor eléctrico seleccionado.	53
Figura 42. Piñón seleccionado.	53
Figura 43. Cremallera seleccionada.	53
Figura 44. Funcionamiento de los ventiladores utilizados en el secado.	55
Figura 45. Funcionamiento del ventilador utilizado en la combustión.	56

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química de la cascara de mazorca del cacao. Adaptado de [6].	9
Tabla 2. Composición inmediata de las cascara de cacao. Adaptada de [10]	9
Tabla 3. Composición elemental de las cascara de cacao. Adaptada de [10]	9
Tabla 4. Potenciales caloríficos de la biomasa de interés. Adaptada de [10]	9
Tabla 5. Estudios previos de secado del cacao.	20
Tabla 6. Criterios de evaluación con su respectivo valor.	36
Tabla 7. Evaluación de portadores para captar el cacao.	36
Tabla 8. Evaluación de portadores para impulsar el aire de secado.	37
Tabla 9. Evaluación de portadores para calentar el aire de secado.	37
Tabla 10. Evaluación de portadores para controlar el proceso.	38
Tabla 11. Evaluación de portadores para homogeneizar el cacao.	38
Tabla 12. Evaluación de portadores para disponer del cacao.	39
Tabla 13. Aire necesario en reacción estequiométrica.	44
Tabla 14. Datos y propiedades del aire de secado.	44
Tabla 15. Datos y propiedades de la biomasa (cascara de cacao).	45
Tabla 16. Características de los ciclones de alta eficiencia. Tomado de [37].	47
Tabla 17. Dimensiones del ciclón seleccionado.	48
Tabla 18. Costo de los elementos del sistema.	54

Introducción

Colombia es conocido mundialmente por la gran diversidad en fauna y flora que posee, es un país referente productor de café y frutos exóticos. Al pasar el tiempo Colombia también ha logrado reconocimiento por la producción y calidad del cacao, logrando un impacto tan significativo que en la actualidad aproximadamente 10 departamentos participan en la producción del grano, en los cuales 350 municipios sustentan una parte de su economía local en la producción del mismo [1], [2].

Sin embargo, las características fisiológicas del fruto lo hacen muy susceptible a sufrir daños durante las etapas de cosecha y postcosecha, lo que acorta su vida útil como fruta fresca, obligando al productor a desarrollar vías de transformación para su conservación [3]. Para brindar al fruto una mayor duración, se perfila como estrategia el secado convectivo, ya que es uno de los procesos de deshidratación más utilizados y precisos para la conservación de alimentos actualmente [4].

El proceso de secado usado por las familias y/o pequeñas empresas involucradas en el campo del cacao se realiza con mayor porcentaje de manera natural (usando la radiación solar) a pesar de que tiene consecuencias en la calidad del producto final; y no la artificial porque se percibe como un proceso que necesita apoyo económico al estar en funcionamiento, principalmente por la fuente de calor. Pero el fruto del cacao, en su mayoría, alrededor del 90% se convierte en desechos que los agricultores normalmente usan como abono en sus cultivos llevando consecuencias a los mismos, estos desechos (biomasa) tiene un potencial energético que puede ser usado para darle las condiciones finales al producto, en un proceso sutilmente controlado [5], [6].

Con este proyecto se busca realizar el diseño de un secador convectivo para el proceso de producción del cacao en Colombia, teniendo como prioridad la calidad del producto final y obteniendo parámetros tanto de operación como del fruto específicos para el funcionamiento óptimo de dicha maquina térmica, utilizando como fuente de energía en el proceso de secado a las cascaras del mismo fruto.

1. Objetivos

Objetivo general

➤ Diseñar un secador convectivo que se pueda implementar en la deshidratación del cacao en Colombia.

Objetivos específicos

- Identificar las variables que influyen en el proceso de secado del cacao.
- Dimensionar, detallar y especificar elementos que conformen la maquina térmica a diseñar.

2. Marco teórico

Colombia, gracias a su ubicación geográfica, cuenta con condiciones agroecológicas óptimas y excelentes materiales genéticos para la producción de gran variedad de frutos distinguidos, entre ellos el cacao que gracias a sus cualidades su producción crece constantemente [7].

Como se puede apreciar en la Figura 1, en el registro de Fedecacao (federación nacional de cacaoteros en Colombia), desde el año 2011 y hasta el 2017 la producción del cacao ha aumentado año a año; llegando a un valor mayor de 60.000 toneladas comercializadas.



Figura 1. Crecimiento de la producción de cacao en Colombia. Tomado de la página web de Fedecacao.

3.1 Utilidad de la mazorca del cacao como combustible

Gran cantidad de estudios han ido encaminados a la caracterización energética de biomasa, tanto la procedente de árboles forestales como de residuos de plantaciones agrícolas, para evitar así el consumo de combustibles provenientes de fuentes no renovables en procesos energéticos [8], variando desde el uso de la biomasa en la cocina de hogares de bajos recursos hasta la generación de energía eléctrica en grandes magnitudes.

Todo material considerado combustible posee poder calorífico que es la cantidad de energía específica (por unidad de masa) desprendida durante un proceso termoquímico de oxidación denominado combustión, este es un valor constante para un material con composición elemental fija. Pero la biomasa, posee cierta variabilidad, porque son materiales higroscópicos y absorben humedad de acuerdo a las condiciones climáticas a las que son sometidos [9].

En la caracterización de la biomasa como combustible se debe determinar el poder calorífico que normalmente se realiza con un calorímetro donde una muestra se hace combustionar en una cámara con condiciones controladas, midiendo el incremento de temperatura experimentado por el agua envolvente a la cámara de combustión. Otros parámetros importantes evaluados en la caracterización de los combustibles es el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S), metales y otros; además del contenido de cenizas, humedad y volátiles [9], [10].

Para las mazorcas de cacao se han realizado varios estudios y se ha determinado que es viable como fuente de energía en los procesos que se requiera después de darle tratamientos necesarios por el hecho de pertenecer a la familia de biocombustibles higroscópicos [10], por practicidad y límites económicos en este trabajo, los datos de las propiedades de los combustibles mencionadas anteriormente, fueron tomados de la literatura filtrando principalmente por el tipo (familia) de cacao.

Se presentarán los datos obtenidos de laboratorios en los cuales se realizaron los debidos experimentos, acompañados de datos que fueron calculados a partir de los obtenidos.

En la Tabla 1 se muestra la composición química obtenida de las cascarras de cacao por un estudio realizado por parte de **CORPOICA** (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria) en la ciudad de Bucaramanga [6].

Tabla 1. Composición química de la cascara de mazorca del cacao. Adaptado de [6].

Composición química	
Componente	% p/p
Humedad	85
Proteínas	1,07
Minerales	1,41
Grasa	0,02
Fibra	5,45
Carbohidratos	7,05
N	0,171
P	0,026
K	0,545
Pectinas	0,89

Los siguientes datos mostrados en las Tablas 2, 3, y 4 fueron tomados de un estudio enfocado a realizar la caracterización de cascara de cacao de una especie híbrida (clonada), que es la mayor presente en los cultivos de este fruto en nuestros días, por sus mejoras en producción y defensas contra enfermedades [10]; y serán usados en los cálculos donde se necesiten.

Tabla 2. Composición inmediata de las cascara de cacao. Adaptada de [10]

Composición inmediata en base seca [%]			
Material	Cenizas	Volátiles	Carbón fijo
	CZ	V	CF
Cantidad	1,55	69,73	28,72

Tabla 3. Composición elemental de las cascara de cacao. Adaptada de [10]

Composición de la biomasa [% en base seca]					
Elemento	Carbono	Hidrogeno	Oxigeno	Nitrógeno	Azufre
	C	H	O	N	S
Cantidad	41,63	5,45	50,48	0,90	0,00

Tabla 4. Potenciales caloríficos de la biomasa de interés. Adaptada de [10]

	PCS [MJ/Kg]	PCI* [MJ/Kg]	PCI** [MJ/Kg]
Cascara de cacao	14,00	11,70	12,25

* Calculado a partir del valor del poder calorífico superior.

** Calculado a partir del análisis elemental.

3.2 Deshidratación de frutos

Para la conservación de este grano, las pequeñas y medianas empresas y/o familias que se encargan de la cosecha del fruto tienen como gran alternativa, la deshidratación, que es uno de los métodos usados por la sociedad desde tiempos antiguos para la conservación de alimentos, este proceso impide cualquier actividad microbiana o enzimática al disminuir gran porcentaje de humedad del alimento, esta técnica surgió a partir de la necesidad de consumir alimentos susceptibles a dañarse debido a su composición química (alto contenido de agua) fuera de su época de cosecha o producción [11], [12].

Los métodos del secado al igual que el fenómeno de transferencia de calor se puede dar por medio de 3 mecanismos, cabe aclarar que pueden ser simultáneos en ciertas situaciones [13], [14].

- Método conductivo: Es cuando se transfiere energía de las partículas más energéticas de una sustancia **en reposo** hacia las adyacentes menos energéticas, aplica para sólidos, líquidos y gases.
- Método convectivo: La transferencia de energía distintiva de este mecanismo se da a través de un fluido que presenta un **movimiento** relativo al cuerpo de interés.
- Método radiante: La energía es transmitida por un cuerpo a otro debido a la temperatura que posea, particularmente en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor.

Para tomar una decisión de que método de secado seleccionar para el proceso que se desee, se debe realizar una revisión de los siguientes factores [12]:

- El tipo de producto a secar
- Las propiedades finales del producto
- La sensibilidad del producto a altas temperaturas
- Posibles pretratamientos antes del secado
- Costos iniciales y de funcionamiento de los equipos
- Condiciones ambientales donde se requiera implementar

3.3 Secadores convectivos usados en la deshidratación

Los métodos de secado convectivos o directos son los más usados en la actualidad, gracias a su versatilidad y fácil manejo en operación, además que preservan la calidad de los alimentos procesados, la transferencia de calor y masa presentes en este mecanismo se logra por el contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes, los cuales remueven la humedad a medida que el líquido se vaporiza como se muestra a continuación en la Figura 2. [14], [15].

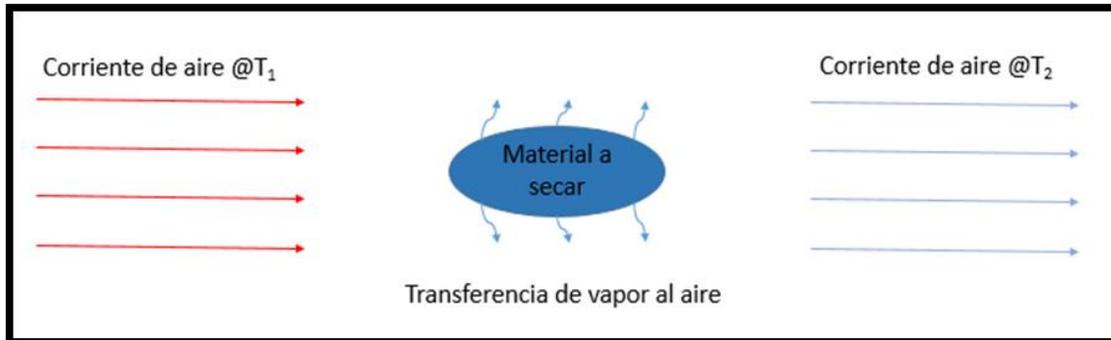


Figura 2. Esquema de transferencia de masa y calor en el secado.

Las características generales y más significativas de operación de los secadores directos o convectivos son [16]:

- El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.
- Las temperaturas de secado varían hasta 1000 °K, que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común.
- Para secados a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizás sea necesario deshumidificar el aire de secado.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida constante.
- Las cantidades de combustible para abastecer el proceso dependen de las propiedades de este, la temperatura de secado y la cantidad de materia a tratar.
- Se requieren equipos grandes cuando las partículas del sólido son pequeñas.

En la Figura 3 se aprecian los tipos de secadores convectivos o directos, clasificados según su naturaleza; luego se ilustran y detalla el funcionamiento de cada tipo.

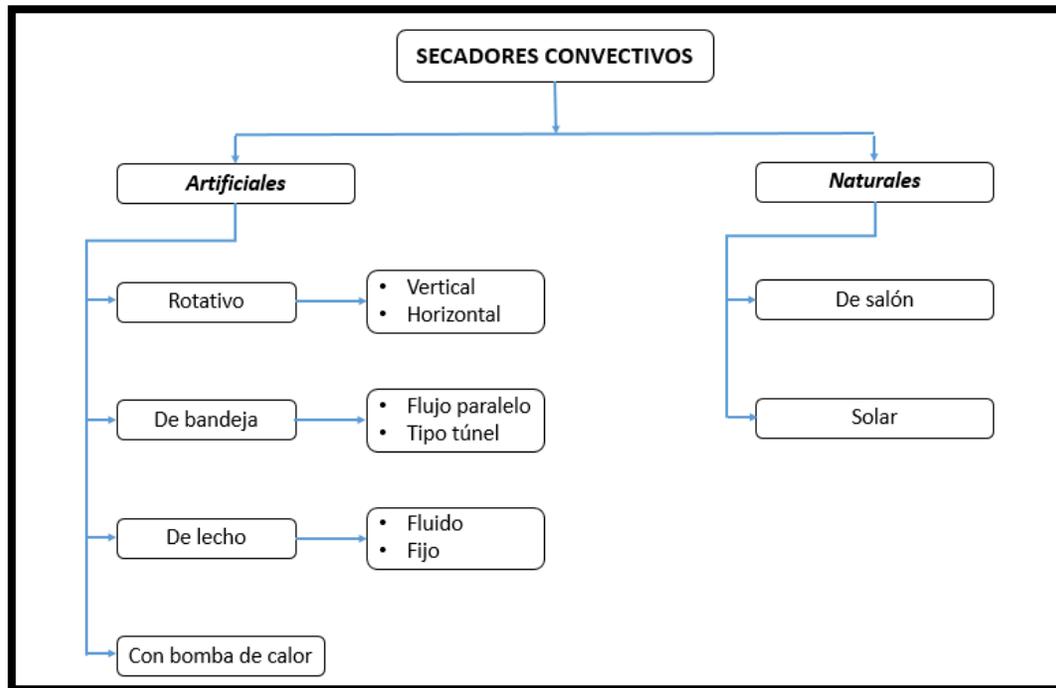


Figura 3. Presentación de los diferentes tipos de secadores directos.

3.3.1 Secador rotativo vertical:

El secador rotativo vertical mostrado en la Figura 4 ofrece una alta homogeneidad en el producto final al implementar un sistema de brazos móviles internos; además de la alta seguridad que evita posibles riesgos laborales. Pero tiene poca aparición en el proceso de deshidratación de alimentos porque solo permite secar productos granulares de poca adhesión y el consumo de energía específico es considerablemente alto en el proceso de secado [17], [18].



Figura 4. Secador rotativo vertical. Tomado de [17]

3.3.2 Secador rotativo horizontal:

Es un método rápido y de bajo costo unitario solo cuando se trata de grandes cantidades de material a tratar, se obtiene una deshidratación homogénea y son muy adecuados para el secado de productos granulares, ya que se forma una cortina de producto expuesta perpendicular en contacto directo con el aire caliente, pero el deterioro mecánico producido limita el tipo de productos que pueden ser deshidratados en dicho equipo [20], [18]. En la Figura 5 se muestra un esquema de un secador rotativo horizontal.

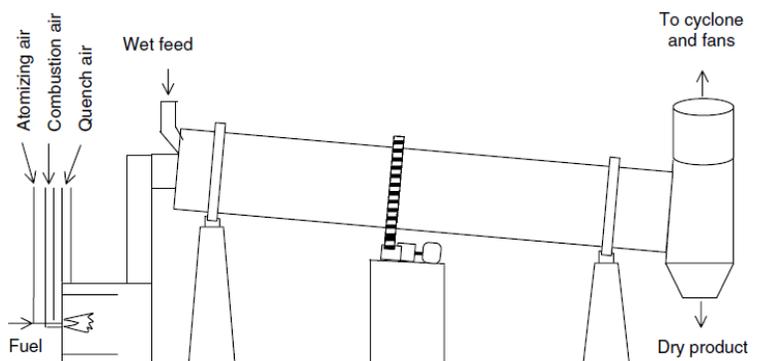


Figura 5. Esquema de secador rotativo horizontal. Tomado de [19].

3.3.3 Secador de bandeja de flujo paralelo:

Los secadores de bandeja de flujo paralelo mostrado en la Figura 6 poseen una alta velocidad de deshidratación, son económicos en adquisición y funcionamiento y como desventaja el producto final no es homogéneo en humedad y propiedades físicas y químicas [12], [16], [22].

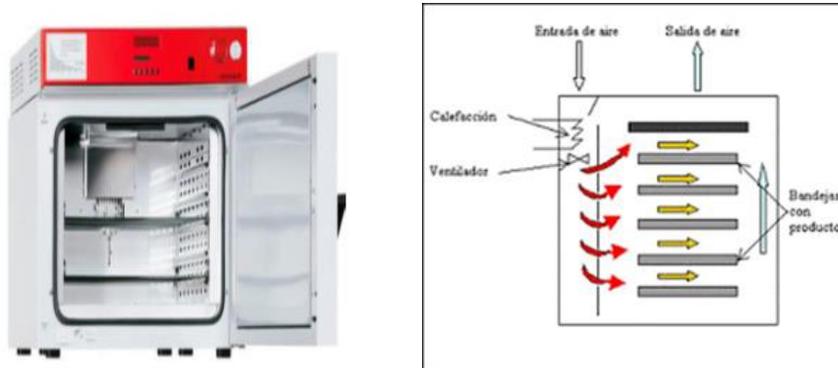


Figura 6. Secador de bandeja de flujo paralelo y esquema. Tomado de [21], [12].

3.3.4 Secador de bandeja tipo túnel:

En este equipo se logra obtener tiempos cortos de secado, son energéticamente eficientes, requieren baja mano de obra, los productos finales contienen alta calidad y homogeneidad, se controlan fácilmente las variables del proceso de transferencia de calor y masa, como adversidad se encuentran que son equipos "muy largos" respecto a las demás dimensiones, el sistema de calentamiento normalmente son resistencias eléctricas y permite tratar son pocas cantidades de producto [12], [24]. En la Figura 7 se muestra un esquema de un secador tipo túnel.



Figura 7. Secador de bandeja tipo túnel. Tomado de [23].

3.3.5 Secador de lecho fluido:

Los secadores de lecho fluido brinda altas capacidades de deshidratación, amplia gama de productos a tratar, se obtiene producto con alta calidad, sus costos de adquisición y funcionamiento son bajos, pero las instalaciones deben tener una altura considerable y solo se aplica en productos pre-deshidratados [12], [25]. En la Figura 8 se muestra un esquema de este tipo de secador.

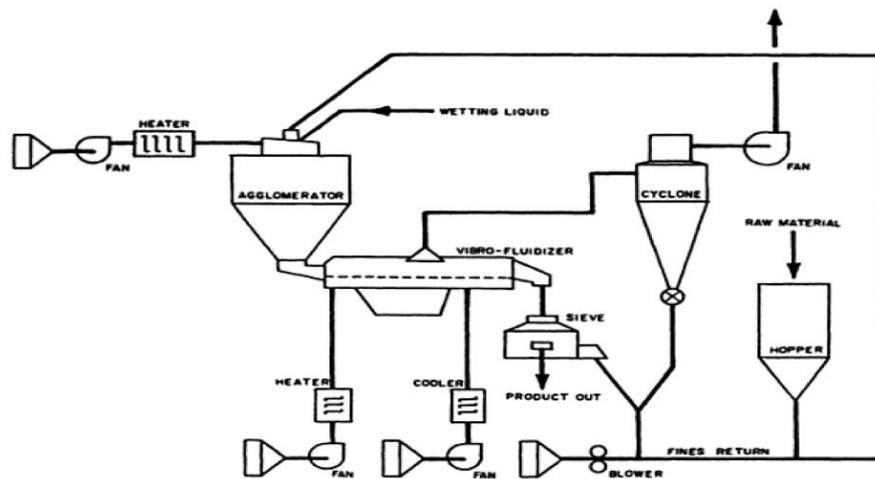


Figura 8. Esquema de secador de lecho fluido. Tomado de [12].

3.3.6 Secador de lecho fijo

Los sistemas de este tipo ocupan poco espacio respecto a otros secadores para secar la misma cantidad de producto, los parámetros de secado son fáciles de controlar, necesitan baja mano de obra, los tiempos de secado son cortos manteniendo la calidad del producto, su consumo energético es considerable debido a la carga que recibe y solo puede ser usado por material particulado o granular [18], [26]. En la Figura 9 se muestra un esquema de un secador de lecho fijo.

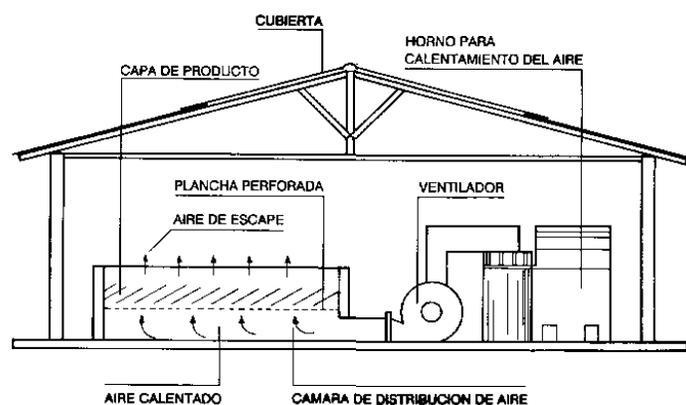


Figura 9. Diagrama de secador de lecho fijo. Tomado de [18].

3.3.7 Secador con bomba de calor

Esta tecnología otorga condición de secado suave, beneficiosa especialmente en la retención de compuestos bio-activos que son sensibles al calor, alta eficiencia energética, pérdida de calidad reducida por el proceso de secado forzado, control independiente de los parámetros de operación e idoneidad para el proceso de deshidratación, pero el costo de adquisición del sistema es muy elevado [27], [28]. En la Figura 10 se muestra un esquema de un sistema de secado con bomba de calor.

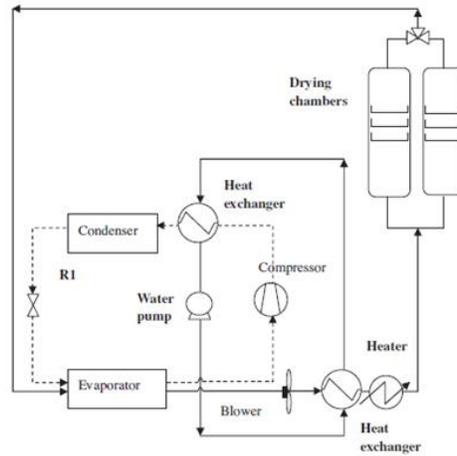


Figura 10. Esquema de secador apoyado en bomba de calor. Tomado de [27].

3.3.8 Salón de secado

Este método es el más simple y económico para realizar el secado de frutas frescas, pero los productos son susceptibles a la contaminación con materiales extraños, como polvo y basura, y pueden estar expuestos a hongos, pájaros, insectos y roedores, lo que puede causar el crecimiento de microorganismos y el deterioro de la calidad del sabor [18], [29]. En la Figura 11 se muestra una fotográfica de un salón de secado natural.



Figura 11. Salones de secado natural. Tomado de la página web de Fedecacao.

3.3.9 Secador solar

En este tipo de secadores se encuentra simplicidad del diseño, configuración de bajo costo, gasto energético nulo, se obtienen productos con propiedades sensoriales superiores en relación a los otros tipos de secado, pero ya que la energía solar es fluctuante, los tiempos de secado son prolongados y el producto es susceptible a sufrir daños en los lapsos largos sin recibir radiación solar, además de que es propenso a ser contaminado por distintos animales y/o materiales [20], [18], [29]. En la Figura 12 se muestra un esquema de un secador solar.



Figura 12. Esquema de secador solar. Tomado de [30].

3.3.10 Conclusiones

En la Figura 13 se muestra la cantidad de secadores de cada tipo usados por la literatura, principalmente se filtró buscando diseños de secadores para cacao y café, y experimentos de secado en ambos frutos.

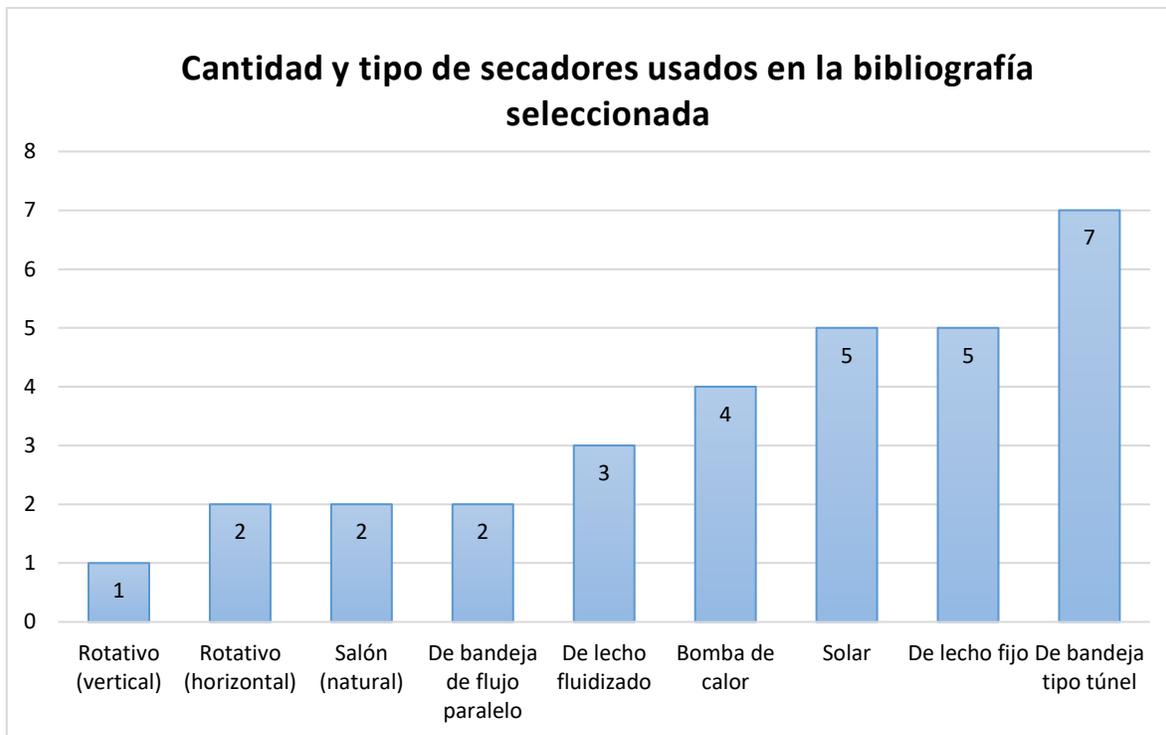


Figura 13. Subclasificación de los secadores usados en la literatura seleccionada.

Con toda la información acumulada, dándole el valor a las ventajas, desventajas, funcionamiento y tipo de material que puede tratar cada equipo de secado, además de la frecuencia con la cual aparece en otros estudios, y en búsqueda de obtener principalmente un producto final con grandes propiedades organolépticas y de buena calidad, se escoge realizar el diseño de un **secador de lecho fijo** cuyas ventajas principales son: facilidad de control de los parámetros de secado, necesidad baja en la mano de obra, los tiempos de secado son cortos manteniendo la calidad del producto, permite tratar grandes cantidades de producto; y además se encuentra entre los 3 más usados de la literatura seleccionada.

4. Metodología

4.1 Comportamiento cinético de las propiedades de la fruta deshidratada

En la tabla 5, se muestra información obtenida de la literatura referente al proceso de secado de cacao.

Tabla 5. Estudios previos de secado del cacao.

Referencia	Procedimiento	Características del cacao	Resultados																								
[31]	<p>Se plantearon 5 condiciones, donde se varía el flujo másico del aire y la temperatura del mismo; en la situación 3 el aire posee mayor humedad que en la 4.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$T (^{\circ}C)$</td> <td>42</td> <td>60</td> <td>80</td> <td>80</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>$\dot{m} (g/s)$</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>170</td> </tr> <tr> <td>Area (m2)</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table>		1	2	3	4	5	$T (^{\circ}C)$	42	60	80	80	70	$\dot{m} (g/s)$	150	150	150	150	170	Area (m2)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<p>La humedad inicial del cacao se encontraba entre 50-60 % bulbo seco y se llevó hasta 8% de humedad final, este cacao de estudio fue de origen mexicano.</p>	<p>Las situaciones 1, 2 y 3 necesitan de mucho tiempo para completar el proceso de deshidratación, se muestra que las condiciones 4 y 5 secan el cacao a una velocidad mayor que la condición 3, la condición 4 elimina más acidez que la condición 3, sin embargo, la condición 4 produce una mayor temperatura en los granos de cacao durante el secado, esto puede producir pérdidas de calidad en el cacao seco. En estas condiciones, la 5 es la mejor porque mantiene la temperatura del cacao por debajo de 70 °C, elimina la acidez a una velocidad similar a la condición 3, pero tiene un ahorro de energía del 77% con respecto a la misma.</p>
	1	2	3	4	5																						
$T (^{\circ}C)$	42	60	80	80	70																						
$\dot{m} (g/s)$	150	150	150	150	170																						
Area (m2)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1																						
[32]	<p>Los experimentos fueron realizados en un secador solar, donde la radiación solar diaria tuvo variaciones entre 34 y 1406 W/m², la temperatura del aire ambiente varió de 29,66 a 31,66 °C, la humedad relativa del aire ambiente de 57,50 a 76,50% y el flujo de aire de secado de 0,76 a 1,21 m/s.</p>	<p>La humedad inicial del cacao de prueba fue de 55-60 % bulbo húmedo y se llevó hasta 7,5% de humedad final, dicho cacao es nativo del África, costa de marfil.</p>	<p>De los 14 modelos matemáticos dados por varios autores para las curvas de secado, el modelo logarítmico (5) es el que mejor se ajusta al proceso.</p>																								

[33]	Para los ensayos realizados, el cacao se depositaba en el secador hasta lograr una altura de 5 cm, la velocidad del aire de secado fue de 2,51 m/s y los valores de temperatura usados fueron de: 55, 70, 81 °C.	La humedad inicial de este tipo de cacao era de 56,6% bulbo seco y se llevó hasta aproximadamente 6% de humedad final, el cacao evaluado era cosechado en Nigeria.	El modelo de Henderson and Parbis tuvo un mayor ajuste cuadrático y un menor error cuadrático medio y chi-cuadrado en comparación con otros métodos de la literatura, los valores de difusividad obtenidos variaron de $6,137 \times (10^{-10})$ a $2,1855 \times (10^{-9})$ m ² /s para la temperatura usada. La constante de Arrhenius (D) predicha fue $8,64 \times (10^{-4})$ m ² /s mientras la energía de activación predicha fue 39,94 kJ/mol.
[34]	Las temperaturas del aire de secado usadas en la experimentación fueron de: 40, 50 y 60 °C, manteniendo una velocidad constante de 3 m/s.	El cacao usado en este trabajo fue una presentación de la familia trinitario CNN51, obtenido en Antioquia, Colombia.	Fueron: 17,1; 20,16 y 25,6 horas del análisis experimental de la degradación del agua y los fenoles totales a distintas temperaturas, siendo el mayor tiempo a menor temperatura, se encontró que a 40°C se puede realizar una buena deshidratación de los granos, obteniendo de esta manera una alta concentración de fenoles al final del proceso, correspondiente a un tiempo de 24 horas de secado.
[27]	Para este estudio, se realizaron 3 condiciones, todas con una velocidad de $4,6 \pm 0,5$ m/s, temperaturas de 56; 40,4 y 28,2 °C y humedades relativas de 14,6; 18,1 y 26,7% respectivamente, donde se deshidrató alrededor de 700g de cacao por ensayo.	El cacao usado para esta prueba fue cultivado en Malasia	Los análisis de calidad del producto mostraron que el porcentaje de retención de polifenoles de cacao varió de 44% a 73% en comparación con la muestra liofilizada. Siendo inverso el potencial de retención a la temperatura de secado.
[35]	En esta experimentación la temperatura del horno tuvo valores de: 35, 40, 45, 50 y 55 °C	El cacao de estos ensayos era de Nigeria	Se obtuvo una calidad de grano óptima para los granos de cacao secados a una temperatura de horno de 45 °C. Tomando como parámetros de evaluación el índice del ácido acético, el PH, el color y el sabor.

[28]	Los granos de cacao fermentados se sometieron a 3 tipos de secado: a temperatura constante (56 °C); temperatura de aumento (30,7 - 43,6 - 56,9 °C) y temperatura de descenso (54,9 - 43,9 °C) para construir los perfiles de secado; manteniendo una velocidad del aire de secado de 4m/s.	El secado se realizó hasta obtener una humedad en base seca de 7% del cacao, siendo este de originario de Malasia.	Los resultados mostraron un acuerdo razonablemente entre los datos experimentales y predichos en la relación de humedad y los perfiles de temperatura del frijol; se evaluó el factor de contracción para predecir la difusividad siendo más significativa la temperatura que la humedad del proceso.
[17]	Para estos ensayos se utilizó una secadora circular, con ingreso de aire a $53\pm 2^{\circ}\text{C}$ y velocidad angular de 1,2 RPM	La muestra utilizada en la investigación fueron lotes de cacao provenientes de diversos cantones de la provincia del Guayas y Los Ríos, Ecuador. Se secaron hasta llegar a la humedad de 7%.	Para hacer un secado y selección del cacao en grano que conserve las características sensoriales se debe usar una temperatura de $53\pm 2^{\circ}\text{C}$ y 1.2 RPM hasta llegar a una humedad final del cacao al 7%, el diseño y construcción de los equipos deben cumplir con normas y estándares de seguridad industrial para la prevención de accidentes y enfermedades laborales.
[36]	En la experimentación se utilizaron temperaturas 30, 40, 50, 60 °C del aire con una velocidad de 0,6 m/s; y luego una temperatura de 60 °C con velocidades de 0,3; 0,6 y 1 m/s.	Para realizar este trabajo se hizo uso de un cacao amazónico forastero, obtenido en Pará, Brasil.	Al considerar la calidad sensorial y organoléptica del chocolate producido, el secado de los granos de cacao amazónicos debe realizarse a una temperatura moderada (30 – 40 °C) del aire de secado.

[30]	Las pruebas se realizaron en un secador solar indirecto, alrededor de 15 kg de granos de cacao fermentados se esparcieron en bandejas dentro de la cámara de secado. El secado se terminó cuando los granos de cacao alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio prolongando el proceso de secado hasta que no se observó ningún cambio adicional en el peso.	Para este estudio se usó cacao de Costa de marfil.	Los valores del contenido efectivo de humedad variaron de $5,49 \times 10^{-10}$ a $4,26 \times 10^{-10}$ m ² /s; la contracción disminuyó linealmente con la disminución del contenido de humedad; la densidad real disminuyó de 825,10 a 695,25 kg/m ³ ; la porosidad aumentó de 15,82 a 24,67%; los coeficientes de transferencia de calor y masa aumentaron durante el proceso de secado y estuvieron en el rango de $1,92 \times 10^4$ a $8,08 \times 10^2$ W/m ² K y de $1,88 \times 10^7$ a $7,88 \times 10^5$ m/s, respectivamente.
------	--	--	--

4.2 Proceso de secado de cacao

En el laboratorio de Operaciones Unitarias del programa de ingeniería química situada en las instalaciones de la universidad de Antioquia se realizaron los ensayos de secado, en un equipo de la familia de secadores de túnel, donde el aire utilizado en la deshidratación es succionado por un ventilador centrifugo de velocidad variable, en el trayecto antes de interactuar con el material a deshidratar dicho flujo aumenta su energía (temperatura) al entrar en contacto con resistencias eléctricas (también se encuentra la alternativa de calentar la corriente principal en un intercambiador utilizando vapor, solo es necesario para altas temperaturas); el equipo contiene una celda de carga que evalúa el peso de la muestra durante toda la práctica y hace uso de un control PID para regular las variables del proceso. En la Figura 14 se puede apreciar el equipo usado para el secado del cacao.

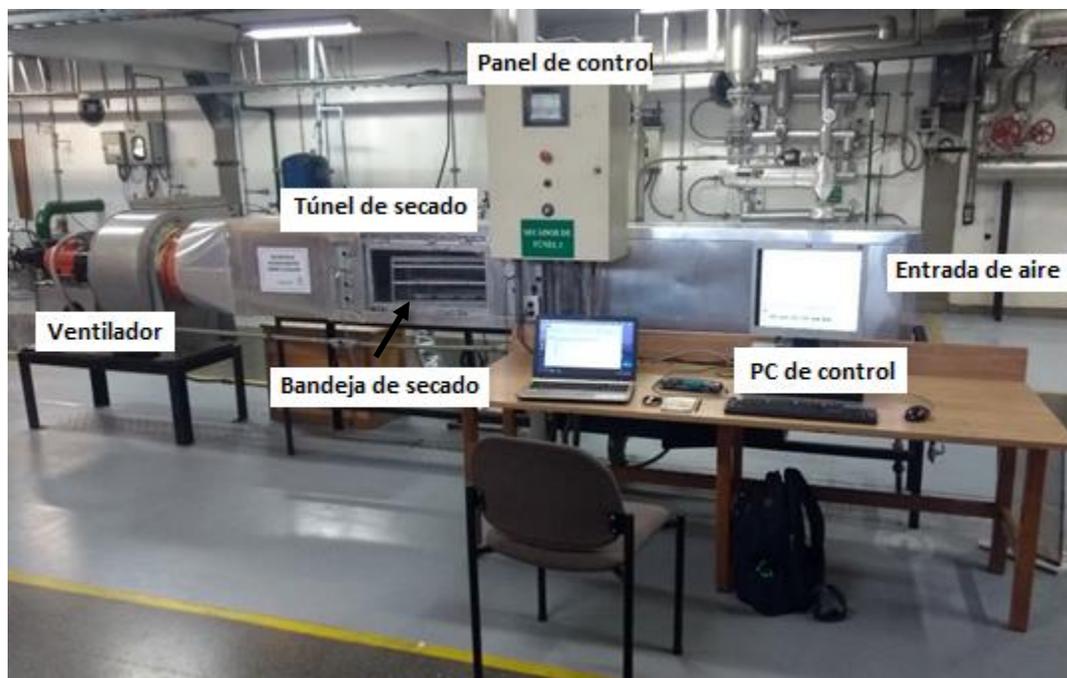


Figura 14. Equipo de secado de operaciones unitarias UdeA.

El proceso se parametriza en el software del computador, allí se ingresa la temperatura deseada de secado, se enciende el ventilador, y el método de calentamiento del aire, resistencias, flujo de vapor o combinado. En la Figura 14 se muestra una imagen del hardware y software encargado del control del proceso.

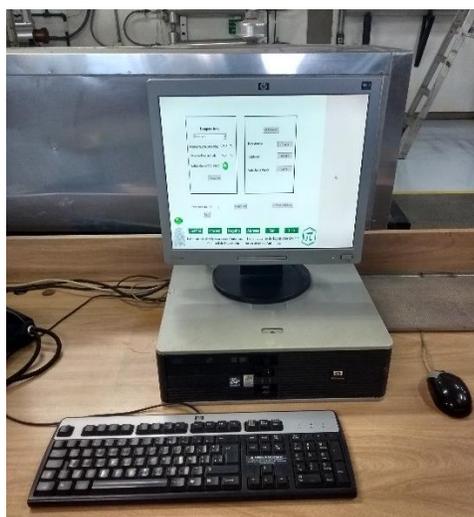


Figura 15. Hardware y software encargados del control del proceso.

Al iniciar el secado, las variables del proceso son mostradas en una ventana del software, estas son: la velocidad angular del motor, el peso de la muestra, la temperatura y humedad del aire justo antes de entrar en

contacto con el material a secar y justo después; también se percibe si las resistencias o el circuito de vapor se encuentran encendidos o apagados; en otra ventana del software se muestra el registro de las temperaturas y humedades, estas son de forma senoidal ya que el sistema de calentamiento funciona de manera intermitente para mantener la temperatura de secado. En la Figura 16 se muestra la evolución de las variables del proceso.

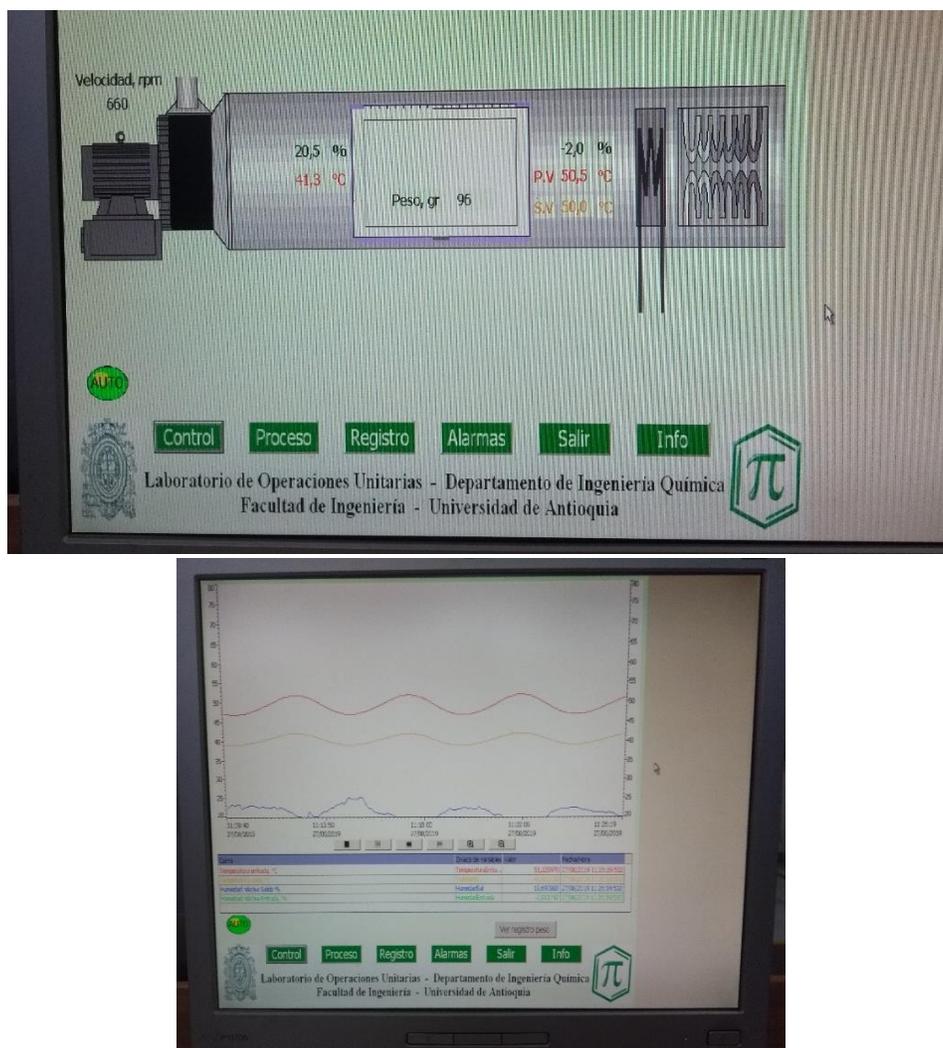


Figura 16. Evolución de las variables en el proceso.

Estos ensayos de secado fueron realizados utilizando un cacao proveniente de la región antioqueña (Colombia), facilitado por comerciantes que transportan diversos tipos de mercancía alimenticia a la ciudad de Medellín, la cantidad de prueba fue de 16 mazorcas correspondiente a 4.130 gramos.

Este cacao pertenece a la familia de híbridos, resultante del cruzamiento entre clones, cultivo que ha ganado terreno en las fincas cacaoteras

colombianas gracias a sus beneficios al aumentar producción y calidad; y a su vez la plantación de este espécimen es más fuerte contra plagas y enfermedades. En la Figura 17 se muestran las mazorcas de cacao usadas para el secado y en las Figuras 18 y 19 se muestran el proceso de recolección del grano.



Figura 17. Cacao de prueba en la deshidratación.



Figura 18. Cacao después de partir la cascara.

Después de quebrar la mazorca que envuelve a los granos de interés, estos son retirados, dejando de lado el mucilago que los une, como se puede observar en la siguiente figura; en la industria cacaotera el cacao en este punto se conoce como “cacao en baba” y se encuentra listo para empezar el proceso de fermentación, para este caso se tuvo 1.300 gramos.



Figura 19. Cacao en baba.

El proceso de fermentación debe ser realizado en recipientes de madera, tiene una duración de aproximadamente 7 días (depende de las condiciones climáticas del sitio donde se realice), al transcurrir 48 horas de iniciada la fermentación el cacao se debe mezclar y desde allí cada 24 horas hasta terminar el proceso. En la Figura 20 se muestra criterios de comparación del grano del cacao luego del proceso de fermentado. En las Figuras 21 y 22 se muestran imágenes con características del grano luego del proceso de fermentado.

Características	Bien fermentados	Poco fermentados
Forma	Hinchada y grueso	Más bien aplanado
Color externo	Café oscuro o marrón	Rojizo
Color interno	Color a chocolate	Gris, negruzco, violeta
Consistencia	Quebradiza	Duro en algunos casos en otros huloso
Olor interno	A chocolate, agradable, aromático	Olor desagradable, sin olor
Sabor	Medianamente amargo	Astringente

Figura 20. Comparación de características de los granos de cacao al terminar la fermentación. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.



Figura 21. Grano de cacao parcialmente fermentado. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.



Figura 22. Grano de cacao bien fermentado. Tomado del ministerio de agricultura y ganadería de Costa Rica.

Al evaluar el cacao con las características y aspectos tomados del ministerio de agricultura y ganadería costarricense, se percibe que en el cacao de estudio una porción quedó bien fermentada mientras la complementaria quedó parcialmente fermentada, para este punto la masa en cuestión fue de 735 gramos. En la Figura 23 se pueden ver una imagen del cacao después del proceso de fermentación.



Figura 23. Cacao después del proceso de fermentación.

Después del proceso de fermentación el cacao fue transportado a las instalaciones del laboratorio de Operaciones Unitarias en la universidad de Antioquia, donde se realizó la deshidratación del fruto en el equipo mencionado anteriormente, el cacao se dispone sobre una bandeja que se apoya en una estructura soportada de una celda de carga; el quipo consta de una ventana de un material transparente para permitir supervisar el secado. En la Figura 24 se muestra una imagen del proceso de secado.



Figura 24. Secado de cacao en el laboratorio de Operaciones Unitarias UdeA.

Estos ensayos se realizaron hasta obtener una humedad en el sólido de cero para lograr determinar las curvas de secado en su totalidad, el cacao al final del proceso tuvo un peso de 444 gramos y se presenta en la Figura 25; cabe aclarar que en el proceso de secado para el beneficio de cacao lo

ideal es obtener una humedad final del 8% en el sólido; la temperatura de secado seteada fue de 50°C y se mantuvo el proceso con velocidades de 4,6 y 5 m/s siendo la primera más presente.



Figura 25. Cacao deshidratado.



Figura 26. Cacao quebrado al finalizar el proceso.

El cálculo de humedad se realizó con la próxima ecuación:

$$X_{(t)} = \frac{m_{(t)} - m_{ss}}{m_{ss}}$$

Donde:

- $X_{(t)}$ [%] es la humedad en el sólido en función del tiempo
- $m_{(t)}$ [g] es la masa del solido en función del tiempo
- m_{ss} [g] es la masa del solido seco

Para el cálculo de la velocidad de secado se utilizó la siguiente ecuación:

$$n'' = \frac{dX_{(t)}}{dt} \left(\frac{m_{ss}}{A} \right)$$

Donde:

- n'' $\left[\frac{g}{m^2s} \right]$ es la humedad en el sólido en función del tiempo
- A [m²] es el área de la superficie de secado

Nota: Ecuaciones tomadas de la Guía de laboratorio del laboratorio de operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antioquia.

Basados en el estado del arte y apoyados en los ensayos realizados de secado de cacao, se determina que los parámetros de funcionamiento de la maquina a diseñar serán; tener un aire de secado a una temperatura máxima de 42 ± 5 grados centígrados, con una velocidad (al entrar en contacto con los granos) de 2 m/s.

4.3 Diseño de un secador convectivo para deshidratación de Cacao

4.3.1 Diseño Conceptual

A continuación, se ilustra en la Figura 27 lo que sucede en el proceso de secado de la máquina a diseñar, el cacao húmedo es introducido en la maquina térmica, mientras el aire de secado es calentado gracias a una fuente energética, luego dicho aire (impulsado artificialmente) absorbe la humedad del producto de interés en el interior del equipo para luego ser expulsado al ambiente.

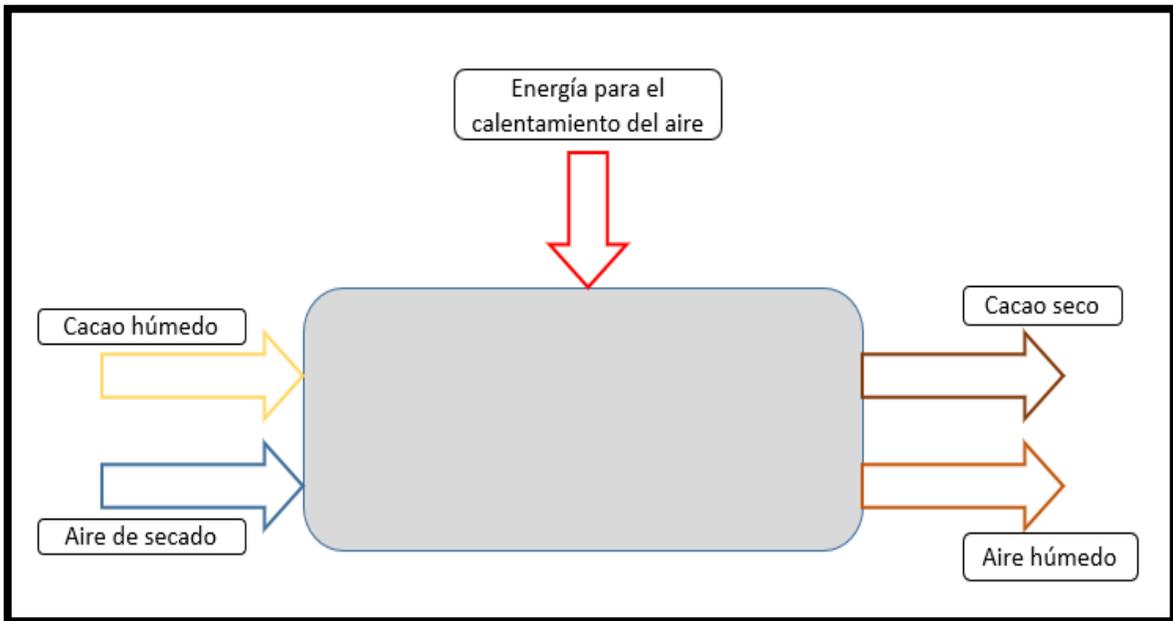


Figura 27. Proceso de secado del cacao del secador a diseñar.

Cabe recalcar que el procedimiento de secado brindado por este equipo es discontinuo, es decir, por lotes. En el cual el aire de secado realiza su función sobre un bache específico del material de interés a deshidratar, el tiempo necesario hasta obtener la humedad requerida del producto final.

4.3.1.1 Funciones del proceso

En la Figura 28 se muestra los subprocessos necesarios para cumplir con la deshidratación del cacao.

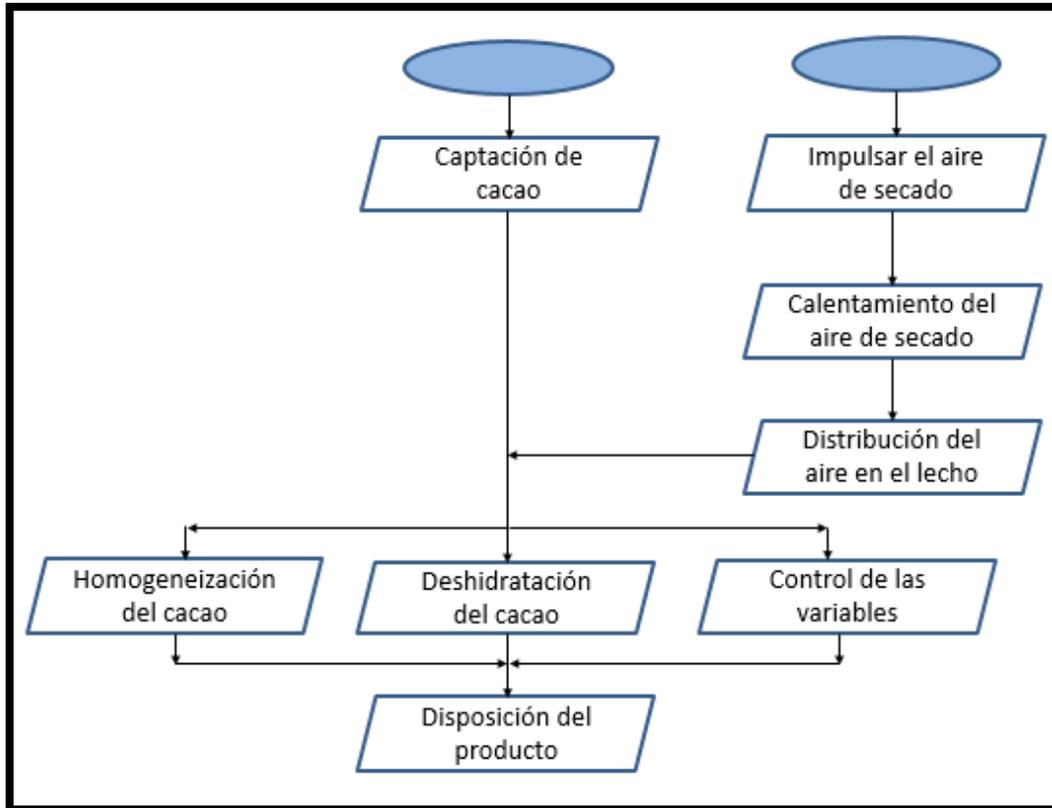


Figura 28. Proceso detallado del secado del cacao.

4.3.1.2 Portadores de funciones.

Captación del cacao en la máquina.

La cámara de secado para este tipo de equipo normalmente de base posee una placa perforada por donde pasara el aire de deshidratación y donde se dispone el material a secar; con apoyo de paredes laterales para evitar que los granos de interés caigan al suelo. Para llevar el material a este punto se tienen las siguientes alternativas:

- Disponer de una tolva móvil que, al dejar caer el material, lo deposite a lo largo de todo el sistema.
- Disponer de una tolva estática.
- Realizarlo de forma manual (operarios carguen los costales hasta la placa de secado)

Impulsar el aire de secado.

Para brindarle al aire la velocidad requerida en el proceso de secado, se debe hacer uso de un ventilador para esta función se puede hacer uso de:

- Ventilador centrífugo
- Ventilador con variador de velocidad
- Turbina

Calentamiento del aire de secado.

Para llevar al aire a la temperatura de secado requerida en el proceso se tienen las siguientes opciones:

- Calentador de resistencias
- Horno de biomasa con intercambiador
- Horno a gas
- Caldera con intercambiador

Distribución del aire en el lecho.

Ya que la velocidad del aire al entrar en contacto con el material a deshidratar debe ser igual en cada punto para así lograr obtener una buena homogeneidad en el producto final y además para reducir la velocidad del aire que sale del ventilador que generalmente es muy elevada se debe hacer uso de cámara de distribución.

Control de variables.

Para controlar las variables del proceso (temperatura y velocidad del aire de secado) se tiene:

- Incorporar un ventilador auxiliar que sea accionado por un control PID.
- Mantener los flujos de aire y calor constantes durante el proceso.

Deshidratación del cacao.

Este subproceso se realiza en la misma estructura donde es recolectado el material a deshidratar.

Homogeneización.

Buscando una calidad óptima del producto el material debe ser mezclado mientras se encuentra en el proceso de secado, y se puede realizar con:

- Brazos móviles dentro de la cámara de secado accionado por el operario.
- Brazos móviles automáticos dentro de la cámara de secado.
- Realizarlo de forma artesanal como se acostumbra.

Disposición del producto.

Para el empacado del cacao deshidratado, se tienen las siguientes opciones:

- Aberturas de descargas en las paredes laterales.
- Un sistema para inclinar la base de secado y direccionar el material hacia una tolva de empaquetado.
- Realizarlo manualmente.

4.3.1.3 *Requerimientos de la máquina.*

- Poder deshidratar el cacao manteniendo la calidad que se logra obtener con los procesos de secado tradicionales.
- Controlar las variables involucradas en el proceso de deshidratación.
- Utilizar aire del ambiente "limpio" para el proceso de secado.
- Obtener una humedad final en el producto de 8 %.
- Mantener costos de operación bajos.

4.3.1.4 *Requisitos del sistema.*

- Bajo costo de fabricación y/o compra de los elementos que conforman a la máquina.
- Fácil montaje, desmontaje y mantenimiento del sistema.
- Uso óptimo y minimizado del espacio necesario del sistema para la deshidratación.
- Alto control de calidad y capacidad de producción.
- Ergonomía y seguridad de trabajo aceptables.

4.3.1.5 *Criterios de diseño propuestos.*

Dichos parámetros se listan y explican a continuación:

- Costo de adquisición: Está relacionado con el valor de la fabricación y compra de materiales necesarios en la construcción del sistema.
- Costo de funcionamiento: Se cuantifica con base al consumo de recursos que genera el portador de función a evaluar.
- Montaje y desmontaje: Para facilitar la movilización del equipo y así llegar a lugares de difícil acceso, serán elegidos los elementos de fácil acople al sistema.
- Mantenimiento: Proceso en el cual se verifica el estado de funcionamiento del equipo, puede ser preventivo o correctivo. Debe ser sencillo y económico.
- Efectividad: Con base a la literatura, se califica el buen funcionamiento de los elementos para ser utilizados en sistemas de secado de cacao.
- Espacio ocupado: Refiriéndose al espacio necesario para el funcionamiento de la maquina térmica.
- Seguridad: El sistema debe prestar su uso, minimizando la probabilidad de riesgos a los usuarios bajo las condiciones de operación de este.

En la Tabla 6, se impone un valor a cada criterio para luego de realizar la evaluación de los posibles portadores de funciones sea escogido el de mayor puntaje.

Tabla 6. Criterios de evaluación con su respectivo valor.

#	Criterio por evaluar	Valor [%]
1	Costo de adquisición	16
2	Costo de funcionamiento	20
3	Montaje y desmontaje	18
4	Mantenimiento	15
5	Efectividad	12
6	Espacio ocupado	10
7	Seguridad	9

4.3.1.6 Selección de portadores de funciones.

A cada alternativa, según el criterio se le dio una valoración entre 0 y 10, y se escoge la opción que obtenga al final un mayor valor acumulado.

Captación del cacao en la máquina:

En la Tabla 7 se muestra la evaluación de las alternativas del proceso de captación del grano.

Tabla 7. Evaluación de portadores para captar el cacao.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7
Tolva móvil	2	4	3	3	9	4	6
Tolva estática	5	10	6	6	7	6	7
Manual	10	3	10	10	6	9	5

								Acumulado
Tolva móvil	0,3	0,72	0,54	0,45	1,26	0,4	0,6	4,27
Tolva estática	0,75	1,8	1,08	0,9	0,98	0,6	0,7	6,81
Manual	1,5	0,54	1,8	1,5	0,84	0,9	0,5	7,58

El cacao después de fermentado será transportado por empleados hasta la base donde es intervenido por el aire de secado.

Impulsar el aire de secado:

En la Tabla 8 se muestra la evaluación de las alternativas del proceso de impulsar el aire de secado.

Tabla 8. Evaluación de portadores para impulsar el aire de secado.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7
Ventilador centrifugo	7	4	8	7	6	8	8
Ventilador centrifugo con variador	5	6	8	5	8	8	8
Ventilador axial	7	4	8	6	5	7	7
Compresor	4	6	8	5	4	4	7

								Acumulado
Ventilador centrifugo	1,05	0,72	1,44	1,05	0,84	0,8	0,8	6,7
Ventilador centrifugo con variador	0,75	1,08	1,44	0,75	1,12	0,8	0,8	6,74
Ventilador axial	1,05	0,72	1,44	0,9	0,7	0,7	0,7	6,21
Compresor	0,6	1,08	1,44	0,75	0,56	0,4	0,7	5,53

Se seleccionará un ventilador centrifugo con variador de velocidad que cumpla con las condiciones de operación necesarias para impulsar el aire del secado.

Calentamiento del aire de secado:

En la Tabla 9 se muestra la evaluación de las alternativas del proceso de calentar el aire de secado.

Tabla 9. Evaluación de portadores para calentar el aire de secado.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7
Resistencias	6	6	3	7	7	7	8
Horno de biomasa	6	9	6	6	5	6	7
Horno a gas	4	3	10	5	6	7	7
Caldera	2	3	10	2	4	2	6

								Acumulado
Resistencias	0,9	1,08	0,54	1,05	0,98	0,7	0,8	6,05
Horno de biomasa	0,9	1,62	1,08	0,9	0,7	0,6	0,7	6,5
Horno a gas	0,6	0,54	1,8	0,75	0,84	0,7	0,7	5,93
Caldera	0,3	0,54	1,8	0,3	0,56	0,2	0,6	4,3

Se tomó la decisión de implementar el horno que utiliza como combustible la biomasa y así poder darle uso a la cascara del cacao de la cual se dispone de los cultivos, pero se debe diseñar un **intercambiador de calor** para que los productos de la combustión no entren en contacto directo con el grano de cacao, además de añadir al sistema un **ciclón** que evite el flujo de cenizas y material particulado del horno al intercambiador.

Distribución del aire en el lecho: Se diseñará una cámara ubicada en la parte inferior de la zona de secado, parametrizando la velocidad del viento al contacto con los granos.

Deshidratación del cacao: Se diseña la base perforada sujeta a una estructura en la que se encuentran paredes laterales, dicho sistema se diseña por módulos para un fácil montaje, desmontaje y transporte.

Control de variables:

En la Tabla 10 se muestra la evaluación de las alternativas para controlar el proceso de secado.

Tabla 10. Evaluación de portadores para controlar el proceso.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7	
Ventilador auxiliar (PID)	4	6	6	8	10	6	10	
Flux constantes	9	10	8	9	0	6	2	
								Acumulado
Ventilador auxiliar (PID)	0,6	1,08	1,08	1,2	1,4	0,6	1	6,96
Flux constantes	1,35	1,8	1,44	1,35	0	0,6	0,2	6,74

De las opciones propuestas, se escoge implementar un ventilador secundario con variador de velocidad, ya que de esa manera se tiene un mayor control del proceso (basado en un control por Raspberry) y no se ve afectada la calidad del producto, sin elevar considerablemente los costos de operación.

Homogeneización:

En la Tabla 11 se muestra la evaluación de las alternativas para homogeneizar el proceso de secado del grano.

Tabla 11. Evaluación de portadores para homogeneizar el cacao.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7	
Brazos móviles	7	8	7	8	10	7	9	
Brazos móviles automáticos	3	3	5	6	9	5	10	
Manual	10	9	10	9	5	6	3	
								Acumulado
Brazos móviles	1,05	1,44	1,26	1,2	1,4	0,7	0,9	7,95

Brazos móviles automáticos	0,45	0,54	0,9	0,9	1,26	0,5	1	5,55
Manual	1,5	1,62	1,8	1,35	0,7	0,6	0,3	7,87

Para las cantidades de cacao a secar, se selecciona un sistema de brazos móviles en el interior de la cámara de secado, impulsado por un sistema mecánico de bajo costo operativo.

Decantación de sólidos en los humos de combustión: Tomada la decisión de usar la mazorca como fuente de energía, se debe hacer una limpieza al aire antes de entrar al intercambiador de calor, para ello se usa un ciclón que impide el paso de la mayoría del material sólido.

Deshidratación de la mazorca: Para aumentar la eficiencia global del sistema, se hace uso del calor residual en los productos de combustión para hacerle un proceso de secado a la mazorca que posteriormente se introducirá al horno de quema.

Expulsar humos productos de combustión: Para cumplir este subproceso se introduce en el diseño una chimenea.

Disposición del producto:

En la Tabla 12 se muestra la evaluación de las alternativas del proceso de disponer los granos de cacao.

Tabla 12. Evaluación de portadores para disponer del cacao.

Alternativa/criterio	1	2	3	4	5	6	7
Abertura en las paredes	6	8	7	8	5	9	7
Placa base móvil	5	8	5	8	9	8	9
Manual	10	2	10	10	2	6	8

								Acumulado
Abertura en las paredes	0,9	1,44	1,26	1,2	0,7	0,9	0,7	7,1
Placa base móvil	0,75	1,44	0,9	1,2	1,26	0,8	0,9	7,25
Manual	1,5	0,36	1,8	1,5	0,28	0,6	0,8	6,84

En función de realizar un fácil empaquetado se hace uso de un sistema para inclinar la base de secado y direccionar el material hacia una tolva de empaquetado.

El proceso global de secado tuvo cambios por el ingreso de subprocesos alternos del sistema y elementos portadores de funciones que requerían un nuevo subproceso mostrado en la Figura 29 y 30.

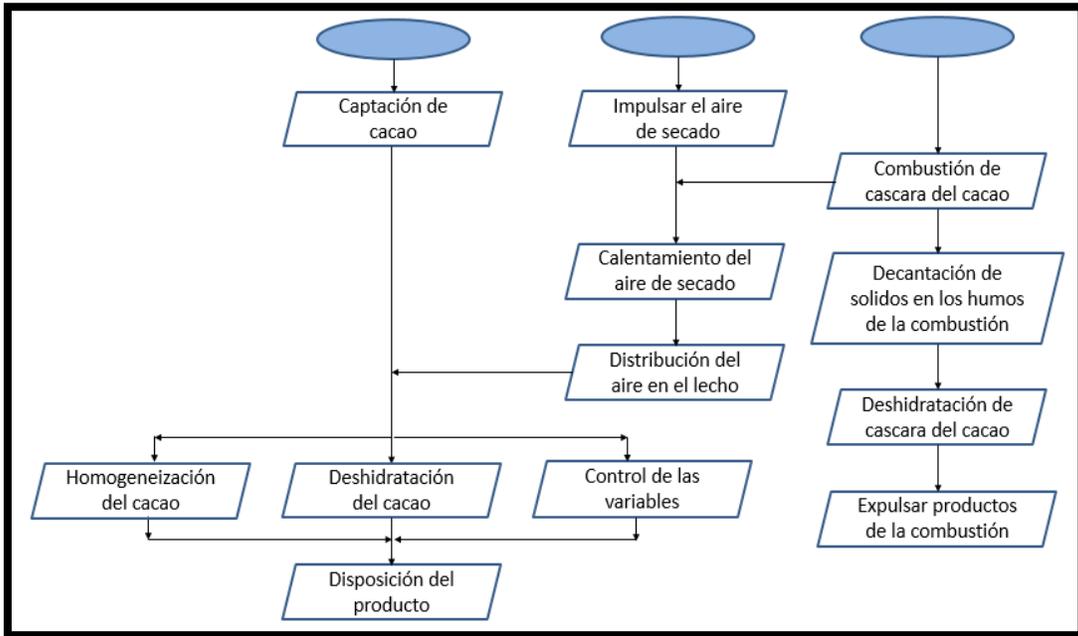


Figura 29. Proceso final detallado del secado de cacao.

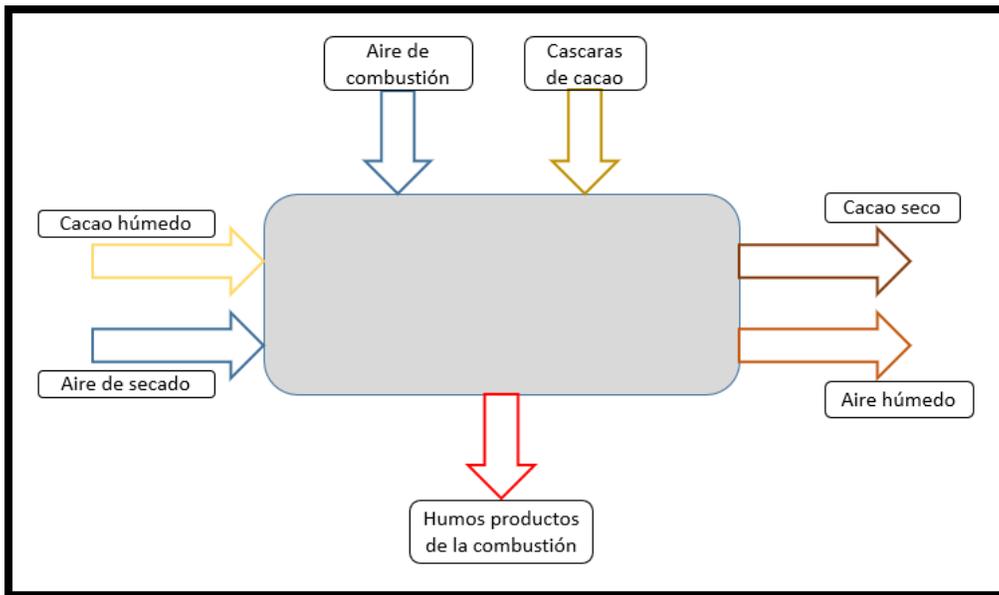


Figura 30. Balance de masa del sistema.

4.3.1.7 Elementos que conforman el sistema

- Horno de biomasa
- Ciclón
- Intercambiador de calor
- Ventilador de tiro forzado para apoyar la combustión
- Ventilador centrífugo con variador de velocidad
- Ventilador centrífugo con variador de velocidad auxiliar
- Cámara de distribución del aire
- Cámara de secado del cacao
- Brazos de mezclado del cacao
- Cámara de secado de la mazorca
- Chimenea
- Sistema de inclinación de la base de secado
- Conexiones entre los elementos
- Estructura principal

5 Resultados y análisis

5.1 Deshidratación del cacao

La muestra de cacao inicial se dividió en 2 partes iguales para tener repetibilidad del ensayo, y los datos obtenidos son consecuencia del valor promedio de dichas prácticas, como lo indica la teoría de secado, se presentan 3 tendencias dentro de la curva humedad contra tiempo, el tramo 1 es curvo y es bien definido por un polinomio grado 3, luego se presenta una región donde la humedad disminuye de forma lineal a medida que aumenta el tiempo y por último se encuentra una tercera curva definida por una tendencia logarítmica, dicho fenómeno se presenta en la Figura 31.

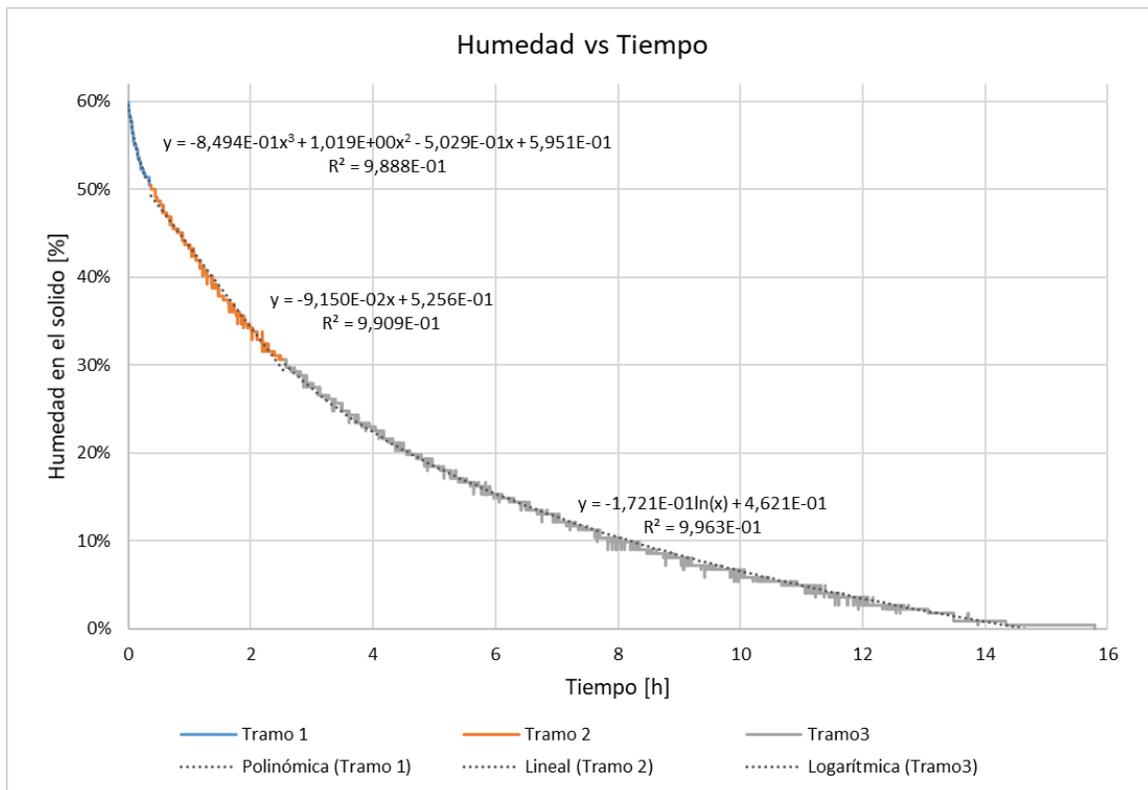


Figura 31. Variación de la humedad en función del tiempo.

De la Figura 31 se puede observar que el tiempo de secado hasta obtener una humedad de alrededor del 8% fue de casi 9 horas (8,876 precisamente), para dicho momento el cacao se encontraba en la tercera etapa del proceso de secado.

Al obtener las ecuaciones tendencias de los 3 tramos directrices del ensayo de secado respectivo de cacao, fueron derivadas y evaluadas en función del tiempo, para así poder obtener las curvas de velocidad de secado que se presentan posteriormente en la Figura 32.

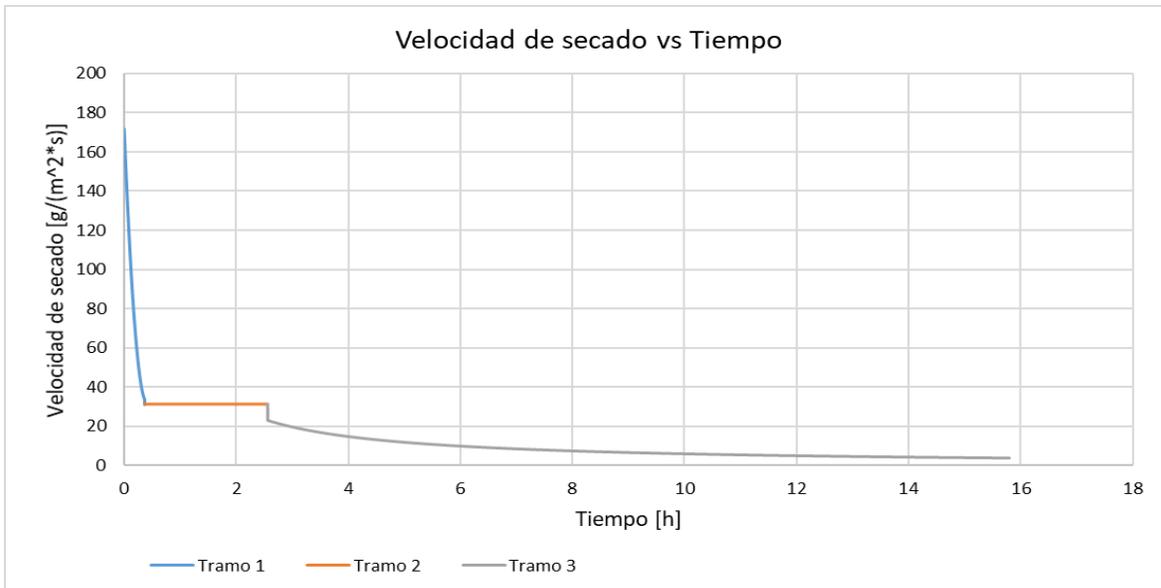


Figura 32. Velocidad de secado en función del tiempo.

En el proceso de deshidratación de este producto, la velocidad de secado mayor se da al inicio de 171,76 [g/m²s], cuando la humedad del elemento de interés es mayor a 50%, luego cuando la humedad se presenta entre 50 y 30% la velocidad mantiene un valor constante de 31,25 [g/m²s], en el tercer tramo decae hasta hacerse mínima.

En la Figura 32 se percibe la cinética de secado del cacao bajo la condición propuesta en el ensayo realizado.

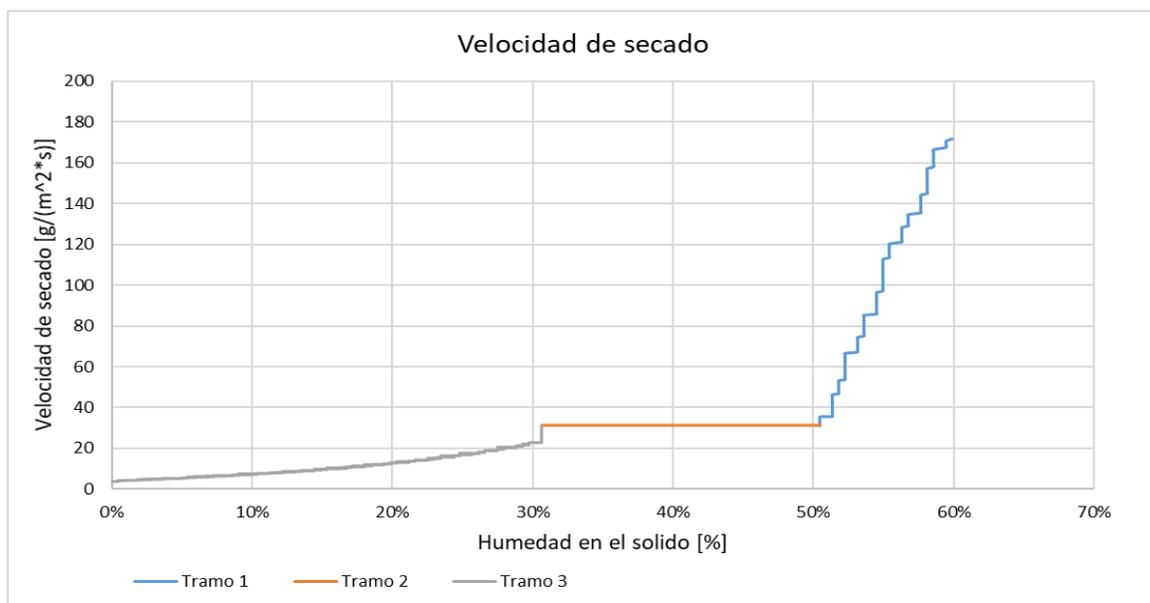


Figura 33. Velocidad de secado en función de la humedad del cacao.

5.2 Parámetros energéticos

En función de la composición elemental del biocombustible tratado en este documento (Tabla 3), se calculó la cantidad de aire necesaria para que, dé lugar a una reacción estequiométrica (tabla 13), obteniendo así los siguientes datos de interés mostrados en la Tabla 14.

Tabla 13. Balance estequiométrico de las cascavas del cacao.

C	H	O	N	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
41,63	5,45	50,48	0,9		17,75	66,75		41,63	2,73	67,20

Tabla 14. Aire necesario en reacción estequiométrica.

0,858	kmol (aire) / kmol (combustible)
1,878	kg (aire) / kg (combustible)

Realizando un balance de energía sobre el flujo de aire de secado (0,4 m³/s) con ayuda de la ecuación que se ilustra a continuación, se halló la cantidad de energía en función del tiempo (potencia) necesaria para sostener el sistema en funcionamiento. En la Tabla 14 se muestran los datos del aire del secador.

$$\dot{Q} = V * A * \rho * C_p * (T_2 - T_1)$$

Donde:

- \dot{Q} [kW] es la energía en unidad de tiempo (potencia)
- V [m/s] es la velocidad del aire a calentar
- A [m²] es el área que debe atravesar el aire con la velocidad seteada
- ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ es la densidad del aire
- C_p $\left[\frac{kJ}{kg-K}\right]$ es la capacidad calorífica del aire
- T_2 y T_1 Temperaturas de salida y entrada del aire respectivamente

Tabla 15. Datos y propiedades del aire de secado.

Datos del aire de secado		
Densidad del aire @ T1 [kg/m ³]	ρ	0,9979
Capacidad calorífica @ T1 [kJ/kg-K]	C_p	1,007
Temperatura de entrada [°C]	T_1	24
Temperatura de salida [°C]	T_2	60
Calor necesario [kW]	\dot{Q}	14,5

Con los datos de combustión y de potencia requerida, se calculó los flujos de combustible y comburente (aire) del proceso; partiendo con inferir una eficiencia térmica y parametrizar la humedad del comburente alrededor del 15%. En la Tabla 15 se muestran los datos del combustible.

$$\dot{Q} = \dot{m} * PCI * \eta$$

Donde:

- \dot{Q} [kW] es la energía en unidad de tiempo (potencia)
- \dot{m} [kg/s] es el flujo másico del combustible
- PCI [kJ/kg] es el poder calorífico inferior del combustible
- η [-] es la eficiencia térmica del sistema

Tabla 16. Datos y propiedades de la biomasa (cascaras de cacao).

Datos del combustible		
Eficiencia térmica del sistema	η	0,45
Poder calorífico inferior [kJ/kg]	PCI	11700
Flujo masico [g/s]	\dot{m}	2,748

Datos del aire de combustión		
Flujo masico [kg/s]	\dot{m}	0,007
Flujo volumétrico [m3/s]	\dot{V}	0,040

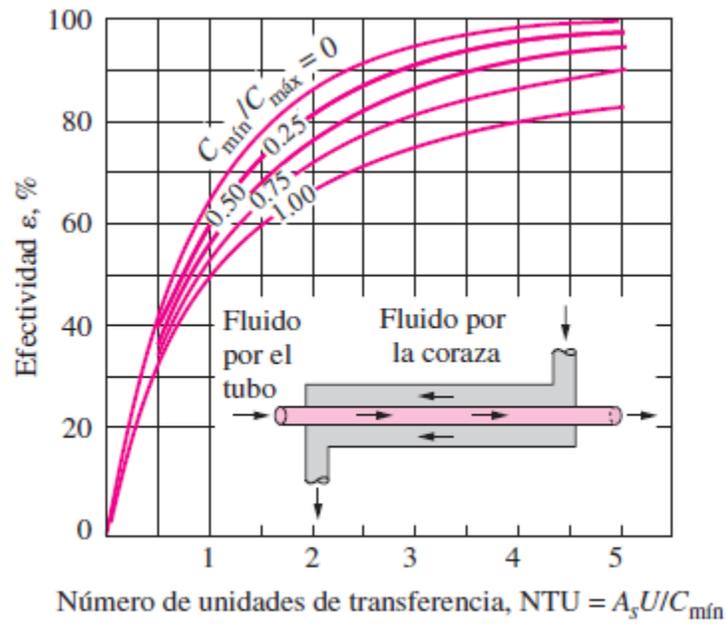
El siguiente paso fue dimensionar el intercambiador de calor, tomando como datos de entrada, las temperaturas de entrada y salida de los flujos de aire y de productos de combustión; además de la cantidad de estos. Variando las dimensiones para obtener el intercambio de calor justo a las temperaturas seteadas.

En función de dimensiones, facilidad de diseño y bajo costo de adquisición se optó por implementar un intercambiador de calor de tubo a contraflujo por un paso por la coraza, constituido por tubería comercial, en la tabla 17 se muestra el valor de las resistencias térmicas y el coeficiente de transferencia del arreglo.

Tabla 17. Valores de resistencias térmicas y unidades de transferencia de calor del arreglo propuesto.

R (humos)	R (tubo)	R (aire)	
0,135	0,004	0,124	[W/mK]

U (humos)	U (tubo)	U (aire)	U combinado
1181,25	4,87	5,83	1191,95



b) Contraflujo

Figura 34. Ilustración del arreglo usado para el intercambiador de calor. Tomado de Transferencia de calor y masa de Cengel.

Apoyados en el método de NTU (número de unidades de transferencia) se encontró que la longitud requerida para este diseño del intercambiador es de 0,6 metros.

5.3 Ciclón

Por reglamento en pro a la protección de la salud y las características de los productos de combustión de la biomasa, se elige dimensionar un ciclón de la familia de alta eficiencia, tipo Echeverry. En la Tabla 16 se muestran las características de este tipo de ciclón.

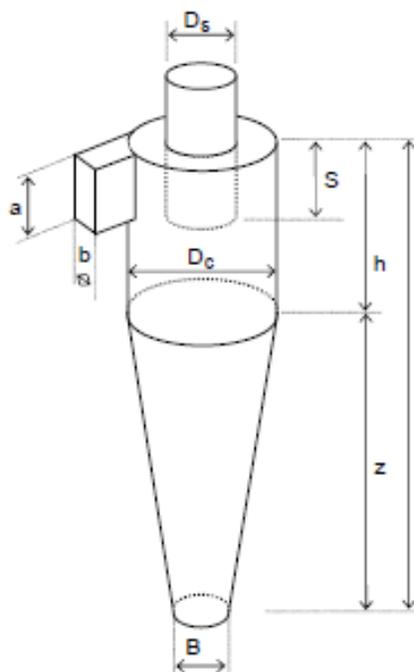


Figura 35. Esquema de un ciclón. Tomado de [37].

Tabla 18. Características de los ciclones de alta eficiencia. Tomado de [37].

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/D_c	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/D_c	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/D_c	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/D_c	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

El parámetro de entrada para dimensionar ciclones (luego de escoger la familia y el tipo) es el caudal que viajara por el conducto; para este caso es el mismo caudal necesario para la combustión y de allí se obtiene las siguientes dimensiones mostradas en la Tabla 17, resultado de la matemática encontrada en [37].

Tabla 19. Dimensiones del ciclón seleccionado.

Dimensión	Cota	Echeverri	
		[m]	[mm]
Diámetro del ciclón	Dc	0,132	132
Altura de entrada	a	0,066	66
Ancho de entrada	b	0,026	26
Altura de salida	S	0,082	82
Diámetro de salida	Ds	0,066	66
Altura sección cilíndrica	h	0,198	198
Altura sección cónica	z	0,330	330
Altura total del ciclón	H	0,528	528
Diámetro salida de partículas	B	0,049	49
Factor de configuración	G	585,71	
Numero cabezas de velocidad	NH	6,4	
Numero de vórtices	N	5,5	

Al evaluar la resuspensión en el elemento se encontraron los siguientes datos:

W	1,34
Vi	23
Vs	26,31
Vi/Vs	0,87

Donde:

- W es la velocidad equivalente
- V_i es la velocidad de entrada
- V_s es la velocidad de saltación

Al obtener una relación entre la velocidad de entrada y la de saltación menor a 1,35 no se genera resuspensión de material particulado en el ciclón.

5.4 Esquema de la secadora diseñada

En Colombia se encuentran alrededor de 35000 familias involucradas en el sector cacaotero, correspondientes a 175000 hectáreas cultivadas; por lo cual se tiene una relación promedio de 5 hectáreas cultivadas de cacao por familia. En la zona de Antioquia, la producción de cacao por hectárea al año varía entre 500 y 1500 kilogramos, las cosechas son dependientes de las condiciones climáticas y también del tipo de cultivo que se tenga; en la literatura se encuentra que en estas plantaciones se realizan alrededor de 30 recolectas de frutos anualmente; utilizando estos datos se estimó que cada familia necesita deshidratar entre 200 y 250 kg de cacao en baba por recolecta; se diseñó una máquina capaz de prestar sus servicios para la producción obtenida en 3 familias por operación.

La capacidad de cacao (fermentado) a secar del siguiente sistema es de **500 kilogramos**, la estructura principal consta de una altura poco menor a 1,5 m, de largo tiene 2,7 m y de ancho de 1,4 m; el sistema necesita un espacio mínimo de 3,5X6 metros para ser acomodado. El área perforada de la base de secado es de 0,4 m² (consecuentemente se tiene un caudal de secado de 0,8 m³/s). En las figuras 35 y 36 se identifican los elementos que conforman el sistema diseñado, en la figura 37 se visualiza en vista de plano lateral el conjunto y en la figura 38 se muestra un enfoque a la secadora diseñada.

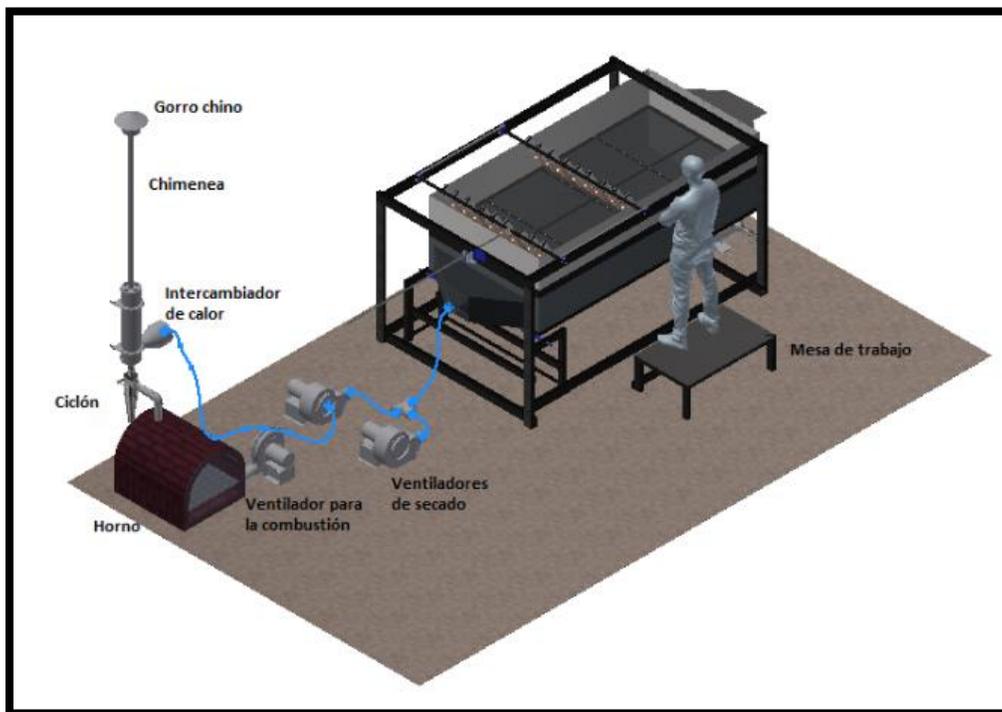


Figura 36. Equipo de secado, detallando los elementos que lo conforman (1).

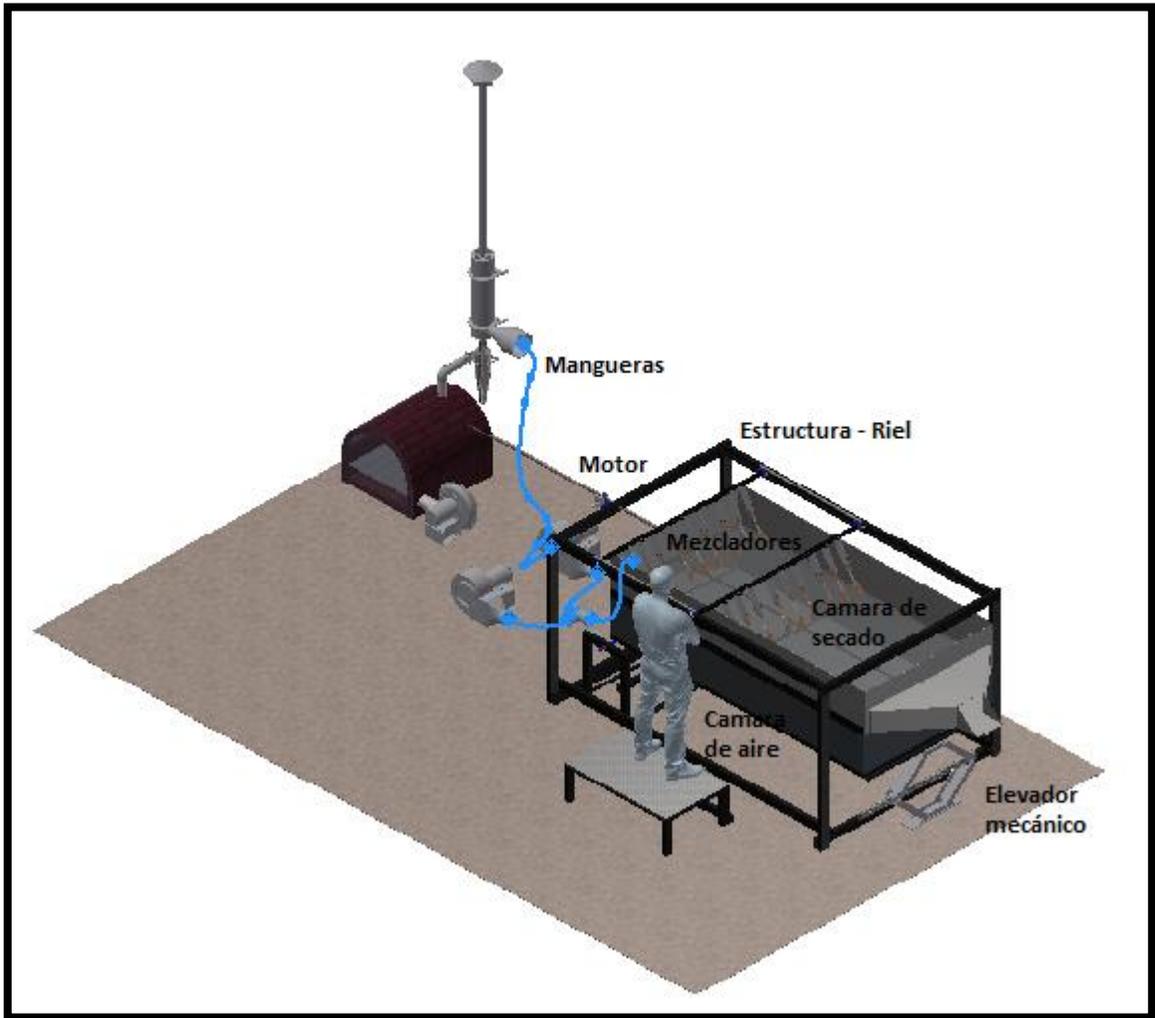


Figura 37. Equipo de secado, detallando los elementos que lo conforman (2).

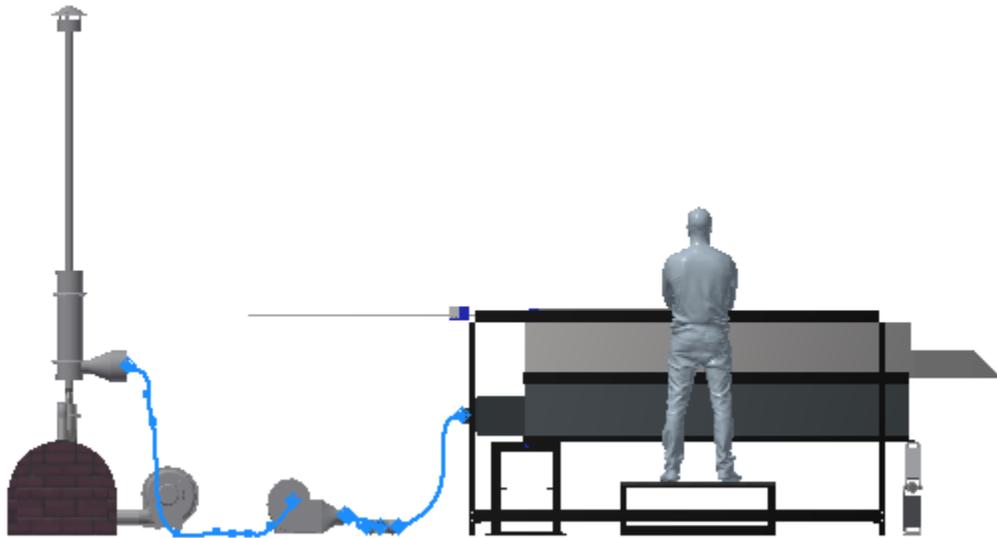


Figura 38. Vista lateral del equipo de secado.

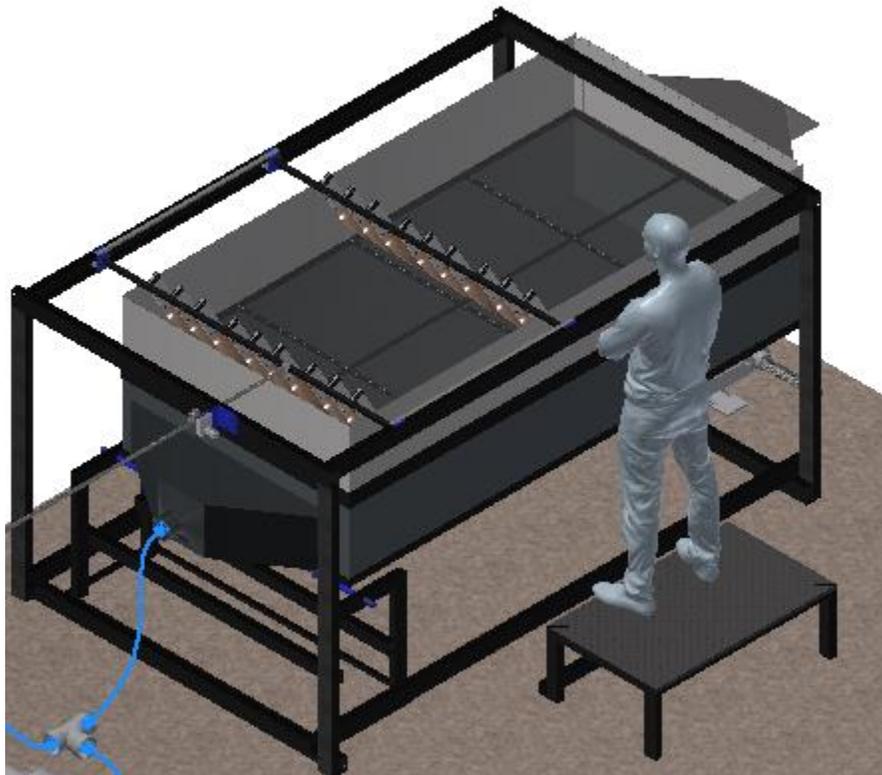


Figura 39. Vista isométrica de la secadora diseñada.

5.5 Costos de la secadora de cacao

5.5.1 Cotización de adquisición

5.5.1.1 Selección de elementos comerciales

Para el secado de cacao, vinculados al control PID se necesitan 2 ventiladores de la misma referencia que puedan ofrecer 850 CFM (0,4 m³/s) cada uno, fue seleccionado el que se resalta en la siguiente figura.

Blowers															
Airflow @ Static Pressure	Volume	Motor Speed, rpm	Power, hp	Outlet			Overall			Temp. Range, °F	Mount. Fasteners Included	Mount. Hole Dia.	Each		
				Ht.	Wd.	Inlet Dia.	Wheel Dia.	Ht.	Wd.					Dp.	
With Rectangular Outlet and Round Inlet—Open Dripproof Motor Enclosure															
120V AC, Single Phase—Hardwire															
300 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	45 dB @ 15 ft.	1,750	1/8	7 3/8"	4 1/4"	6"	6 1/4"	15 5/8"	15"	11"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K13	\$349.01
515 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															
120/230V AC, Single Phase—Hardwire															
855 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	50 dB @ 15 ft.	1,140	1/3	10 3/4"	6 1/2"	9"	9"	18 5/8"	17 5/8"	14 7/8"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K37	685.94
1,100 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															
865 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	50 dB @ 15 ft.	1,750	1/3	8 1/4"	5 3/8"	8"	7 3/4"	16 1/2"	16 1/4"	13 5/8"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K15	428.66
1,000 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															
1,500 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	55 dB @ 15 ft.	1,150	3/4	11 3/4"	8"	10"	10 5/8"	22 1/2"	18 7/8"	17 1/4"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K39	1,118.27
1,800 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															
230/460V AC, Three Phase—Hardwire															
300 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	45 dB @ 15 ft.	1,750	1/4	7 3/8"	4 1/4"	6"	6 1/4"	15 5/8"	15"	11"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K24	433.65
515 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															
855 cfm @ 3/4 in. of H ₂ O	50 dB @ 15 ft.	1,150	1/3	10 3/4"	6 1/2"	9"	9"	18 5/8"	17 5/8"	14 7/8"	-15° to 180°	No	3/8"	1963K48	754.75
1,100 cfm @ 1/4 in. of H ₂ O															

Figura 40. Ventilador de secado seleccionado.

Para garantizar el flujo del aire correspondiente a la combustión, se seleccionó un ventilador de bajo caudal, capaz de vencer la presión estática de los ductos de escape.

Blowers																
Airflow @ Static Pressure	Volume	Motor Speed, rpm	Power, hp	Outlet			Overall			Temp. Range, °F	Mount. Fasteners Included	Mount. Hole Dia.	Each			
				Ht.	Wd.	Inlet Dia.	Wheel Dia.	Ht.	Wd.					Dp.		
With Round Outlet and Inlet—Totally Enclosed Motor Enclosure																
230/460V AC, Three Phase—Hardwire																
120 cfm @ 5 in. of H ₂ O	65 dB @ 15 ft.	3,450	1/3	4"	—	—	5"	9"	17 3/4"	15 3/8"	17 3/4"	-10° to 150°	No	7/16"	1953K26	\$575.00
315 cfm @ 3 in. of H ₂ O																
515 cfm @ 5 in. of H ₂ O	65 dB @ 15 ft.	3,450	1	6"	—	—	6"	11"	21 1/8"	19 1/8"	18 1/4"	-10° to 150°	No	7/16"	1953K27	797.22
680 cfm @ 3 in. of H ₂ O																
1,000 cfm @ 5 in. of H ₂ O	70 dB @ 15 ft.	3,450	3	6"	—	—	7"	13"	21 1/8"	19 1/8"	18 7/8"	-10° to 150°	No	7/16"	1953K66	940.00
1,200 cfm @ 3 in. of H ₂ O																
1,500 cfm @ 5 in. of H ₂ O	75 dB @ 15 ft.	3,450	5	8"	—	—	8"	14"	26 1/8"	23 3/4"	25 1/4"	-10° to 150°	No	7/16"	1953K67	1,520.00
1,900 cfm @ 3 in. of H ₂ O																

Figura 41. Ventilador para impulsar el aire de combustión seleccionado.

Motor eléctrico

Es el encargado de realizar el movimiento de vaivén de los mezcladores, dicho movimiento es posible gracias al circuito que se muestra en la Figura 42.

Speed @ Continuous Operating Torque	Power, hp	Full Load Current, A	Overall			Shaft			Insulation		Each	
			Lg.	Wd.	Ht.	Dia.	Lg.	Center to Base (A)	Class	Max. Temp., ° F		
24 Volts DC												
1.2 rpm @ 800 in.-oz.	0.001	0.1	3 1/4"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K21	62.74
4 rpm @ 800 in.-oz.	0.0033	0.4	3 1/4"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K22	62.74
8 rpm @ 544 in.-oz.	0.0043	0.5	3 1/2"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K23	62.74
12 rpm @ 384 in.-oz.	0.0045	0.4	3 1/2"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K24	62.74
17 rpm @ 272 in.-oz.	0.0045	0.5	3 1/2"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K25	62.74
25 rpm @ 800 in.-oz.	0.02	1.1	4"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	1.43"	B	266°	6409K26	62.74
47 rpm @ 448 in.-oz.	0.02	1.1	4"	2 3/4"	3"	5/16"	1"	2.08"	B	266°	6409K27	62.74

Figura 42. Motor eléctrico seleccionado.

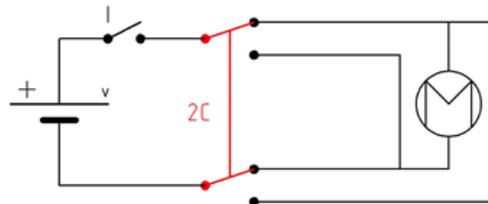


Figura 43. Circuito de cambio de giro en motor DC.

Piñón

Pitch	Number of Teeth	Pitch Dia.	OD	Face Wd.	Overall Wd.	For Shaft Dia.	Material	Teeth Heat Treatment	Hub		Set Screw Thread Size	Each	
									Dia.	Wd.			
Round Bore													
20	20	1.25	1.35	1/2	0.94	1/2	1020 Carbon Steel	Not Hardened	0.97	0.44	—	5172T13	24.37
20	30	1.5	1.6	1/2	0.94	1/2	1020 Carbon Steel	Not Hardened	1.22	0.44	—	5172T14	26.73
20	35	1.75	1.85	1/2	1"	1/2	1020 Carbon Steel	Not Hardened	1.47	0.5"	—	5172T15	35.49
20	40	2"	2.1"	1/2"	1"	1/2"	1020 Carbon Steel	Not Hardened	1.72"	0.5"	—	5172T16	37.43
20	50	2.5	2.6	1/2	1"	1/2	1117 Carbon Steel	Not Hardened	1.62	0.5	—	5172T58	52.51
20	60	3"	3.1"	1/2	1"	1/2	1117 Carbon Steel	Not Hardened	2.12"	0.5"	—	5172T59	53.63
16	12	0.75"	0.88"	3/4"	1.25"	3/8"	1117 Carbon Steel	Not Hardened	0.56"	0.5"	—	5172T55	22.39

Figura 44. Piñón seleccionado.

Cremallera

Pitch	Lg.	Pitch Ht.	Ht.	Face Wd.	Material	Teeth Heat Treatment	Each
64	11"	0.464"	1/2"	1/4"	416 Stainless Steel	Not Hardened	6832K73 \$102.40
64	2ft.	0.11"	1/8"	1/8"	Brass	—	7854K11 31.98
48	18"	0.459"	1/2"	1/4"	416 Stainless Steel	Not Hardened	6832K74 125.40
48	2ft.	0.104"	1/8"	1/8"	Brass	—	7854K12 31.98
32	18"	0.449"	1/2"	1/4"	416 Stainless Steel	Not Hardened	6832K75 126.97
32	2ft.	0.156"	3/16"	3/16"	Brass	—	7854K13 33.73
24	18"	0.438"	1/2"	1/4"	416 Stainless Steel	Not Hardened	6832K76 141.07
24	2ft.	0.208"	1/4"	1/4"	Brass	—	7854K15 39.67
20	2ft.	0.45"	1/2"	1/2"	1018 Carbon Steel	Not Hardened	5174T1 27.57
20	4ft.	0.45"	1/2"	1/2"	1018 Carbon Steel	Not Hardened	5174T11 51.69
20	6ft.	0.45"	1/2"	1/2"	1018 Carbon Steel	Not Hardened	5174T21 74.09
16	2ft.	0.687"	3/4"	3/4"	1018 Carbon Steel	Not Hardened	5174T2 33.51
16	4ft.	0.687"	3/4"	3/4"	1018 Carbon Steel	Not Hardened	5174T12 63.74

Figura 45. Cremallera seleccionada.

5.5.1.2 Resumen de costos

Con un valor del dólar de 3373,00 COP se detallan los costos por cada elemento a continuación.

Tabla 20. Costo de los elementos del sistema.

Elemento	Costo unitario		Cantidad	Costo
	Dólar	COP		
Ventilador de secado	428,66	\$ 1.445.870	2	\$ 2.891.740
Ventilador de combustión	575,00	\$ 1.939.475	1	\$ 1.939.475
Motor DC	62,74	\$ 211.622	1	\$ 211.622
Cremallera	74,09	\$ 249.906	1	\$ 249.906
Piñón	37,43	\$ 126.251	1	\$ 126.251
Cáncamo	8,10	\$ 27.321	3	\$ 81.964
Ruedas	4,08	\$ 13.762	4	\$ 55.047
Tornillos-tuercas-arandelas	20,56	\$ 69.349	1	\$ 69.349
Mangueras	70,00	\$ 236.110	1 set	\$ 236.110
Unión T	13,04	\$ 43.984	1	\$ 43.984
Elevador mecánico	-	\$ 39.900	1	\$ 39.900
Eje	-	\$ 145.000	1	\$ 145.000
Sistema de mezclado	-	\$ 500.000	1	\$ 500.000
Estructura-riel	-	\$ 1.050.000	1	\$ 1.050.000
Cámara de aire	-	\$ 1.380.000	1	\$ 1.380.000
Base de la cámara de aire	-	\$ 280.000	1	\$ 280.000
Cámara de secado	-	\$ 2.900.000	1	\$ 2.900.000
Mesa de trabajo	-	\$ 300.000	1	\$ 300.000
Ciclón	-	\$ 900.000	1	\$ 900.000
Horno	-	\$ 300.000	1	\$ 300.000
Tubería Galvanizada	-	\$ 450.000	1	\$ 450.000
Control y eléctricos	-	\$ 500.000	1	\$ 500.000
				\$ 14.650.348

Factor de seguridad	1,1
Costo de adquisición	\$ 16.115.383
Valor de venta aproximado	\$ 19.338.460

5.5.2 Costos de operación
Ventiladores de secado:

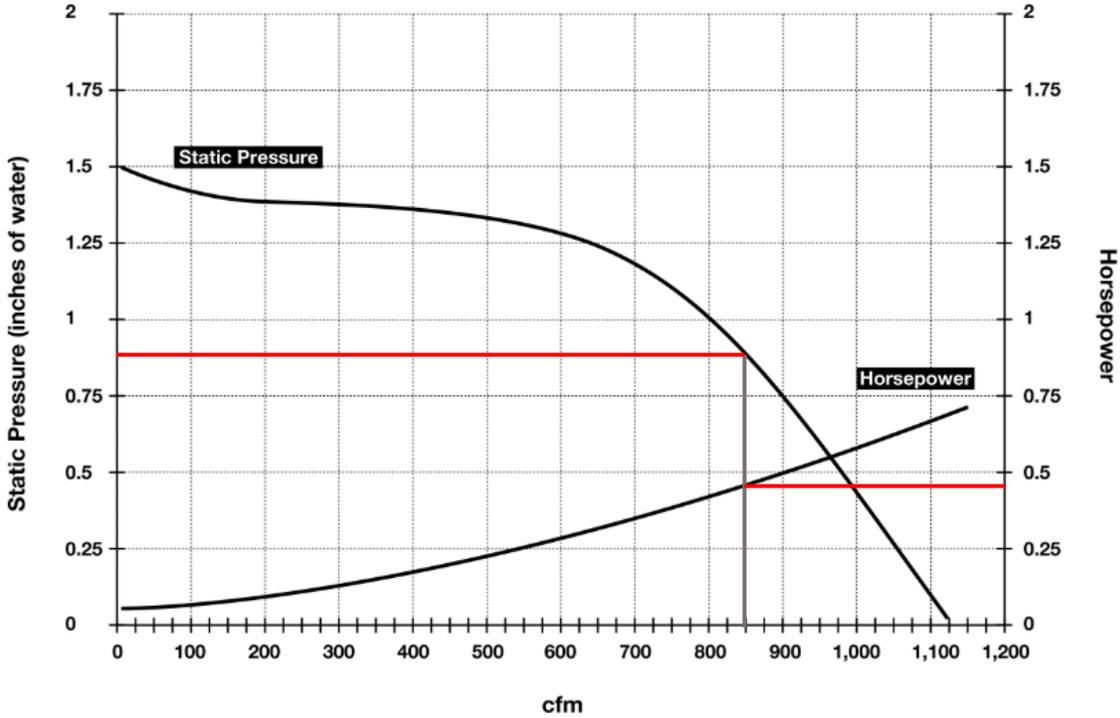


Figura 46. Funcionamiento de los ventiladores utilizados en el secado.

El consumo energético de este equipo a las condiciones estipuladas es de 0,45 hp (al ser 2 ventiladores el consumo se duplica)

Ventilador para el aire de combustión:

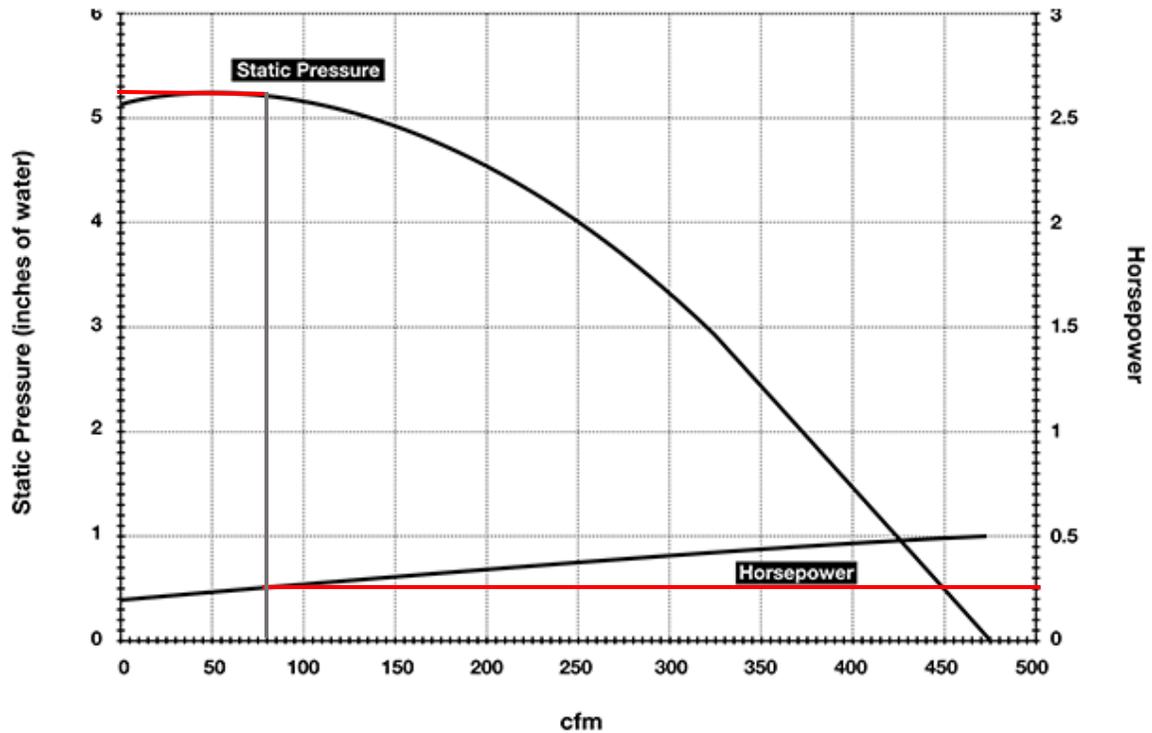


Figura 47. Funcionamiento del ventilador utilizado en la combustión.

Este equipo consume 0,25 hp de potencia al estar en funcionamiento; y el Motor eléctrico consume 0,02 hp (trabaja un 10% del tiempo).

En total la energía consumida es de 1,152 Hp (0,86 kW), y el tiempo de secado estimado al cambiar las condiciones de operación del ensayo realizado es de 15 horas máximo; por lo que cada lote tendría un consumo de 12,9 kWh, con un valor de energía representativo de 528,57\$/kWh, lo cual equivale a tener un gasto de **6.820\$/lote**.

6 Conclusiones

- El fenómeno de transferencia de masa (secado), depende de la temperatura, humedad y velocidad del aire de secado, pero estos parámetros tienen límites en función del material a secar, también tiene importancia el área de transferencia, la masa y humedad inicial del producto; La cinética de secado para este fruto, bajo las condiciones implementadas funciona de la siguiente manera, con una humedad mayor a aproximadamente 50% la curva de humedad vs tiempo se parametriza con un polinomio grado 3, entre 50 y 30% se comporta de forma lineal y menor a 30% se describe mediante una ecuación logarítmica.
- En función de buscar un sistema de bajo costo de adquisición y operación, que garantice alta calidad en el beneficio de cacao, sin afectar significativamente las costumbres de secado de los campesinos, se obtuvo un sistema conformado por: una **Base de secado** donde disponen el cacao de una manera similar a la que se realiza en los salones de secado, una **Cámara de aire** en donde se distribuye el aire de secado, un **Elevador mecánico** que permite inclinar la base de secado para poder empacar el cacao seco, **Mezcladores** para garantizar homogeneidad en el secado de los grano (similar a como se realiza en los salones de secado), **Estructura-Rieles de mezcladores, Ventiladores** para garantizar en función de un control PID el caudal y la temperatura del flujo de secado, un **Intercambiador de calor** para que el aire de secado sea "limpio", un **Horno de biomasa** que reduce significativamente los costos de operación y un **Ciclón** para no poner en riesgo la salud de las personas vinculadas en la operación del equipo.

7 Referencias bibliográficas

- [1] J. O. Rangel-Ch, P. D. Lowy-C, and M. Aguilar-P, "Distribucion de los tipos de Vegetación en las regiones," *Colomb. Divers. Biot.* *II*, pp. 383–402, 1997.
- [2] D. L. Suarez and D. M. Orozco, "OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PECTINA A PARTIR DE LA CASCARILLA DE CACAO DEL *Theobroma cacao* L. SUBPRODUCTO DE UNA INDUSTRIA CHOCOLATERA NACIONAL," *Univ. Tecnológica Pereira - Fac. Technol. - Esc. Química*, vol. 1, pp. 1–102, 2014.
- [3] M. Marcano *et al.*, "A genomewide admixture mapping study for yield factors and morphological traits in a cultivated cocoa (*Theobroma cacao* L.) population," *Tree Genet. Genomes*, vol. 5, no. 2, pp. 329–337, 2009.
- [4] P. Singh and P. Talukdar, "Design and performance evaluation of convective drier and prediction of drying characteristics of potato under varying conditions," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 142, pp. 176–187, 2019.
- [5] O. A. Jiménez Ramírez and C. L. Mantilla Badillo, "Aprovechamiento de la cascara de mazorca de cacao en la elaboración de carbono activo para el tratamiento de aguas residuales," pp. 1–78, 2016.
- [6] C. Ardila Suárez and S. C. Carreño Jerez, "Aprovechamiento De La Cáscara De La Mazorca De Cacao Como Adsorbente," *UNIDADES TECNOLÓGICAS SANTANDER Fac. CIENCIAS Nat. E Ing.*, p. 59, 2011.
- [7] Federación Nacional de Cacaoteros, "CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL GRANO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN COLOMBIA," *Fed. Nac. Cacaoteros, Fedecacao*, p. 32, 2012.
- [8] G. Grillo *et al.*, "Cocoa bean shell waste valorisation; extraction from lab to pilot-scale cavitation reactors," *Food Res. Int.*, vol. 115, no. August 2018, pp. 200–208, 2019.
- [9] M. Del and V. D. E. Aburrá, "Combustibles Sólidos Maderables Del Área," vol. 59, no. 2, pp. 3557–3564, 2006.
- [10] J. Sánchez, "Evaluación energética de cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51," *El Escorial*, p. 34,56, 2013.
- [11] P. Maupoey, A. . Grau, J. . Barat, and A. . Albors, "Introducción al secado de alimentos," *UPV*, p. 202, 2001.
- [12] O. Cano Cruz, "Tipos de secado en alimentos," p. 74, 2014.
- [13] A. Bück, C. Seidel, R. Dürr, and C. Neugebauer, "Robust feedback

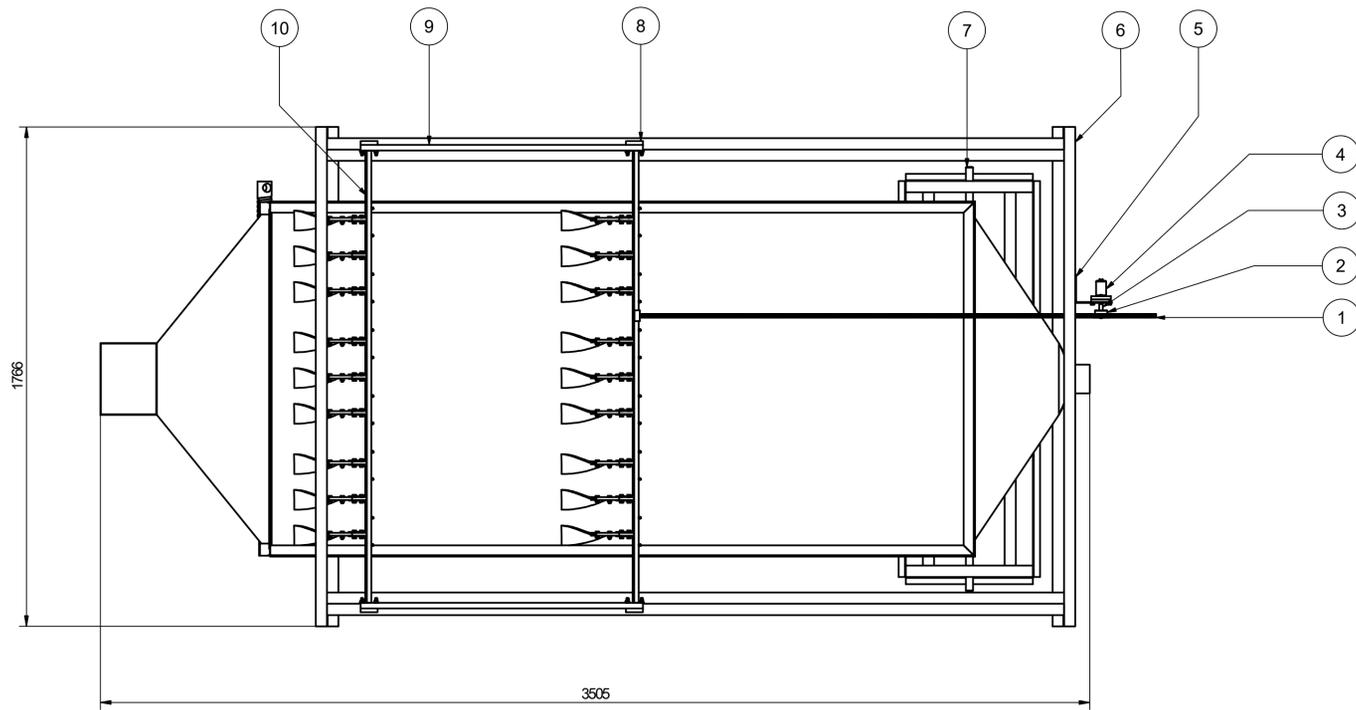
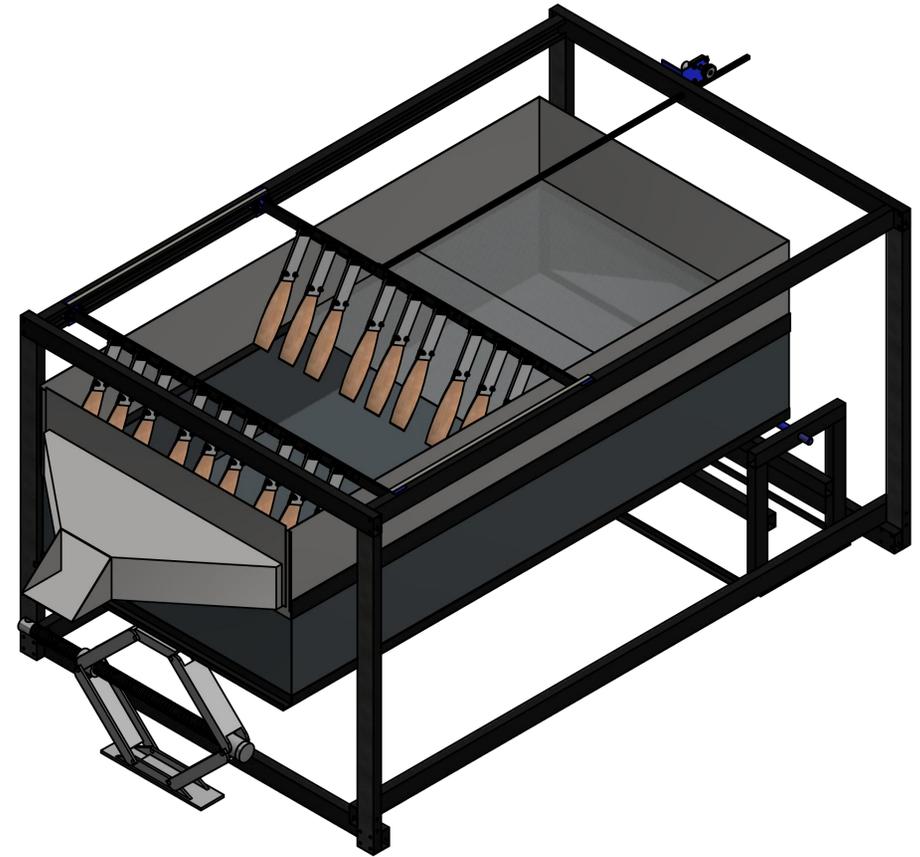
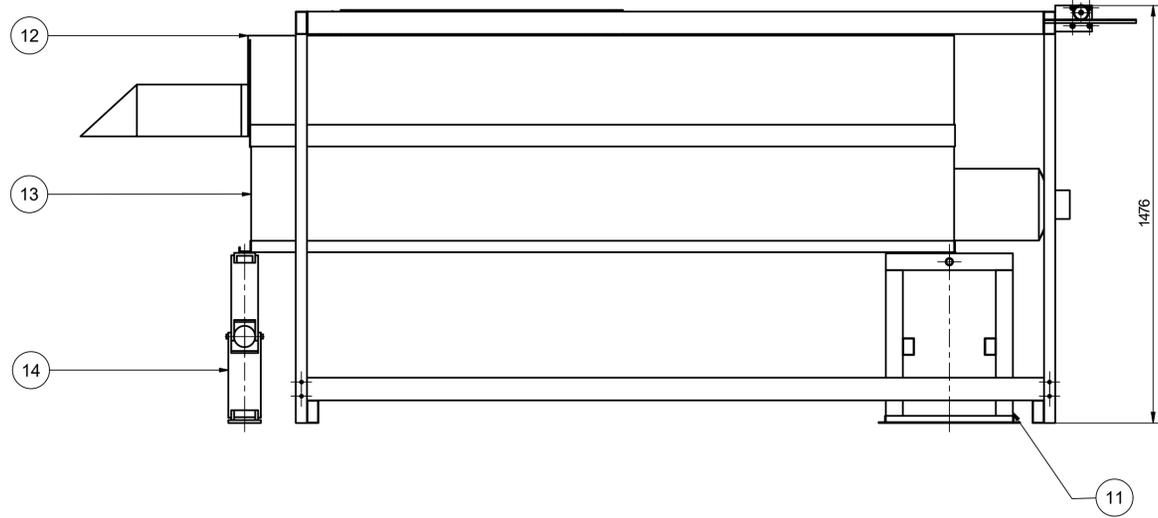
control of convective drying of particulate solids," *J. Process Control*, vol. 69, pp. 86–96, 2018.

- [14] A. G. Yunus Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, vol. 1. 2011.
- [15] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6th. 2007.
- [16] I. R. ;Amezquita J. C. Cifuentes, "Diseño De Un Secador De Polen Con Sistema De Control Y Supervision De Temperatura," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, p. 244, 2006.
- [17] S. J. Núñez Solano, R. E. Moscoso Jácome, and A. E. Rivas Tufiño, "Automatización De Los Procesos De Secado Y Selección Del Cacao Ecuatoriano Conservando Las Características Sensoriales Y Previniendo Riesgos Laborales," *Ind. Data*, vol. 20, no. 2, p. 21, 2017.
- [18] V. C. Jiménez C., "Diseño De Un Sistema De Secado De Café," 2009.
- [19] J. Adamiec *et al.*, "Industrial Drying Handbook," 2006.
- [20] J. Henao Arismendy, "Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza," p. 100, 2015.
- [21] L. Paúl and S. Byron, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DESHIDRATADOR DE FRUTAS DE CAPACIDAD DE 12 KG. CON CIRCULACIÓN DE AIRE FORZADO UTILIZANDO RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.," 2015.
- [22] C. L. Hii, C. L. Law, and M. Cloke, "Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa," *J. Food Eng.*, vol. 90, no. 2, pp. 191–198, 2009.
- [23] Edibon, "Pasteurizador de Laboratorio Controlado desde Computador (PC), con SCADA y Control PID," pp. 1–15, 2013.
- [24] P. F. Maupoey, A. María, A. Grau, J. Manuel, B. Baviera, and A. Sorolla, "Introducción al secado de alimentos por aire caliente EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA," p. 19, 2001.
- [25] K. W. Chikaraishi, Makoto; Fujiwara, Akimasa; Zhang, Junyi; Axhausen, "Decomposing variations and co-variations in discrete travel choice behavior with multilevel cross-classified logit model," *Conf. Pap.*, vol. 44, no. 23, 2009.
- [26] F. M. Borém, E. R. Marques, and E. Alves, "Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells," *Biosyst. Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 62–66, 2008.

- [27] C. L. Hii, C. L. Law, and S. Suzannah, "Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying," *J. Food Eng.*, vol. 108, no. 2, pp. 276–282, 2012.
- [28] C. L. Hii, C. L. Law, and M. C. Law, "Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 54, no. 1, pp. 264–271, 2013.
- [29] W. Dong, R. Hu, Z. Chu, J. Zhao, and L. Tan, "Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans," *Food Chem.*, vol. 234, pp. 121–130, 2017.
- [30] B. K. Koua, P. M. E. Koffi, and P. Gbaha, "Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 72–82, 2019.
- [31] P. García-Alamilla, M. A. Salgado-Cervantes, M. Barel, G. Berthomieu, G. C. Rodríguez-Jimenes, and M. A. García-Alvarado, "Moisture, acidity and temperature evolution during cacao drying," *J. Food Eng.*, vol. 79, no. 4, pp. 1159–1165, 2007.
- [32] A. D. Clement, A. N. Emmanuel, K. Patrice, and Y. K. Benjamin, "Mathematical modelling of sun drying kinetics of thin layer cocoa (*Theobroma cacao*) beans," *J. Appl. Sci. Res.*, vol. 5, no. 9, pp. 1110–1116, 2009.
- [33] N. MacManus Chinenye, A. . Ogunlowo, and O. . Olukunle, "Cocoa Bean (*Theobroma cacao* L.) Drying Kinetics," *Chil. J. Agric. Res.*, vol. 70, no. 4, pp. 633–639, 2010.
- [34] J. Alean, "Modelado y simulación del secado de cacao con aire," 2011.
- [35] D. O. O. and K. F. Omotayo, "Effect of forced-air artificial intermittent drying on cocoa beans in South-Western Nigeria," *J. Cereal. Oilseeds*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2012.
- [36] C. Herman, L. Spreutels, N. Turomzsa, E. M. Konagano, and B. Haut, "Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling," *Food Bioprod. Process.*, vol. 108, pp. 81–94, 2018.
- [37] C. Alberto and E. Londo, "Diseño óptimo de ciclones," no. July 2006, 2015.

8 Anexos

- Planos de construcción de máquina térmica diseñada
 - P1_Secadora de cacao
 - P2_Cremallera
 - P3_Piñón
 - P4_Buje
 - P5_Motor eléctrico
 - P6_Soporte Motor DC
 - P7_Estructura – Riel
 - P8_Eje
 - P9_Eje Rueda
 - P10_Mezcladores
 - P11_Base cámara de aire
 - P12_Cámara de secado
 - P13_Cámara de aire
 - P14_Ventilador de secado
 - P15_Ventilador para combustión
 - P16_Sistema de calentamiento
 - P17_Horno
 - P18_Tapa de restricción 1
 - P19_Intercambiador de calor
 - P20_Tapa de restricción 2
 - P21_Acople horno – ciclón
 - P22_Acople manguera – ventilador
 - P23_Mesa de trabajo
- Cotización obtenida



Nota:
*Unidades en mm

NA	CÁMARA DE AIRE	1	A3-05	ACERO HR	LÁMINA CALIBRE 12	SOLDADO
NA	CÁMARA DE SECADO	1	A3-04	ACERO INOX 304	LÁMINA CALIBRE 12	SOLDADO
NA	BASE DE CÁMARA DE AIRE	1	A3-03	ACERO ESTRUCTURAL	PERFILES COMERCIALES	SOLDADO
NA	MEZCLADORES	2	A3-02	VARIOS	NA	MECANIZADO
NA	CONECTOR DE MEZCLADORES	2	NA	ACERO	ÁNGULO DE 20 mm DE LADO	PERFORADO EN EXTREMOS
NA	EJE RUEDA	1	A4-07	ACERO 1020	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
NA	EJE	1	A4-06	ACERO 1040	Ø25.4 X 1500	MECANIZADO
NA	ESTRUCTURA-RIEL	1	A3-01	ACERO ESTRUCTURAL	PERFILES COMERCIALES	PERFORADO
NA	SOPORTE DEL MOTOR DC	1	A4-04	ACERO 1020	NA	MECANIZADO
6409K27	MOTOR DC	1	A4-03	ACERO	REDUCTOR COMPACTO	COMERCIAL
NA	BUJE	1	A4-03	ACERO 1020 HR	Ø12.7 X 50	MECANIZADO
5172T16	PIÑÓN	1	A4-02	ACERO AL CARBONO	Pitch 2"	COMERCIAL
5174T21	CREMALLERA	1	A4-01	ACERO AL CARBONO	6 FT DE LONGTUD	COMERCIAL
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

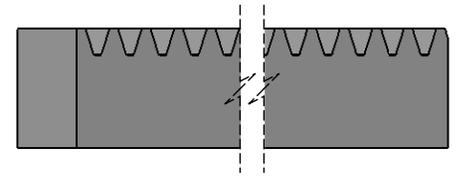
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SECADORA DE CACAO

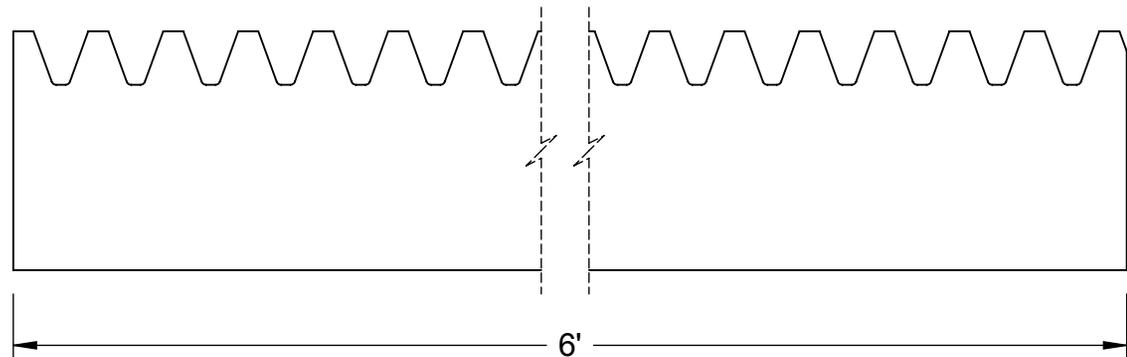
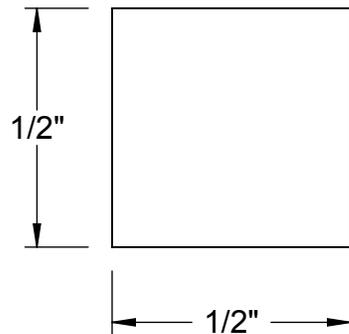
ESC: 0,08:1
FCH: 13/12/2019
O.T.: NA
MOD: NA
PLNo: A1-01

ARCHIVO: TDG

DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS
DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS
APRB: EDWIN CHICA ARRIETA
REV: EDWIN CHICA ARRIETA



Pitch: 20



McMASTER-CARR CAD

PART
NUMBER

5174T21

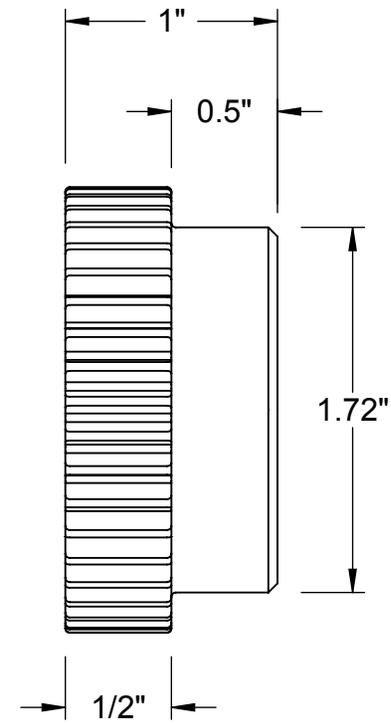
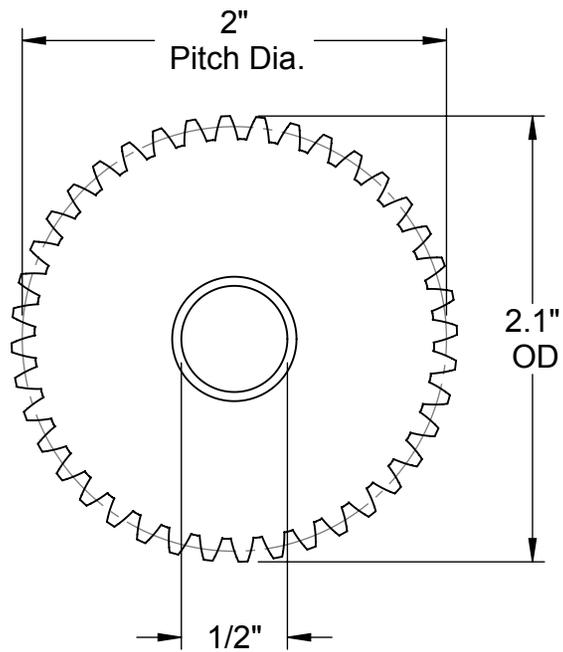
<http://www.mcmaster.com>
© 2015 McMaster-Carr Supply Company

High-Load Metal Gear Rack - 20°
Pressure Angle

Information in this drawing is provided for reference only.



Pitch: 20
Number of Teeth: 40



McMASTER-CARR CAD

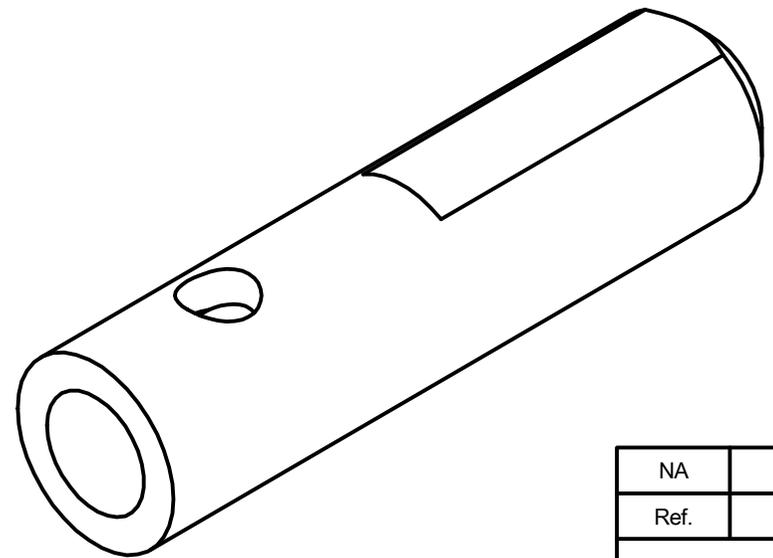
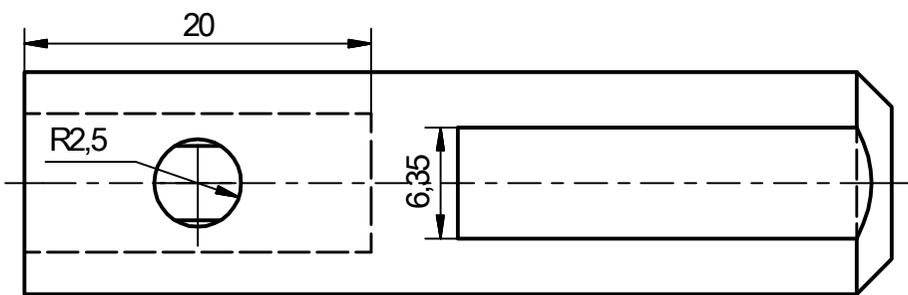
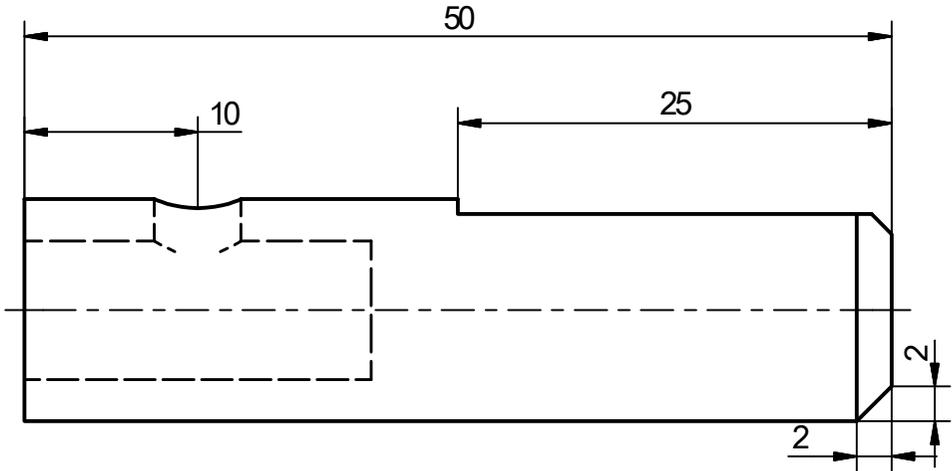
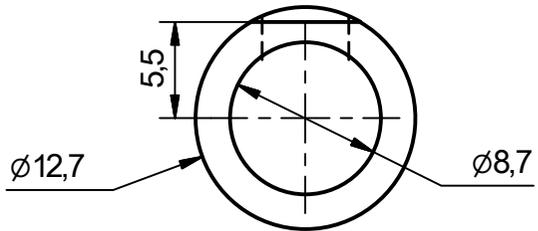
PART
NUMBER

5172T16

<http://www.mcmaster.com>
© 2015 McMaster-Carr Supply Company

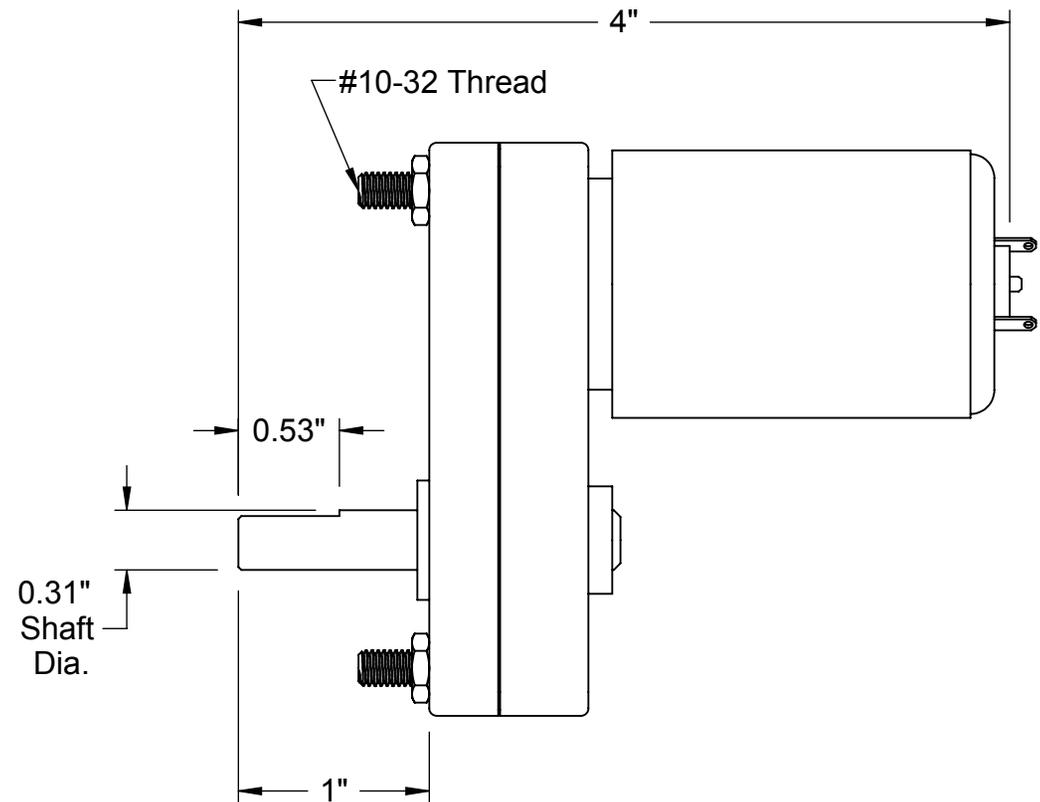
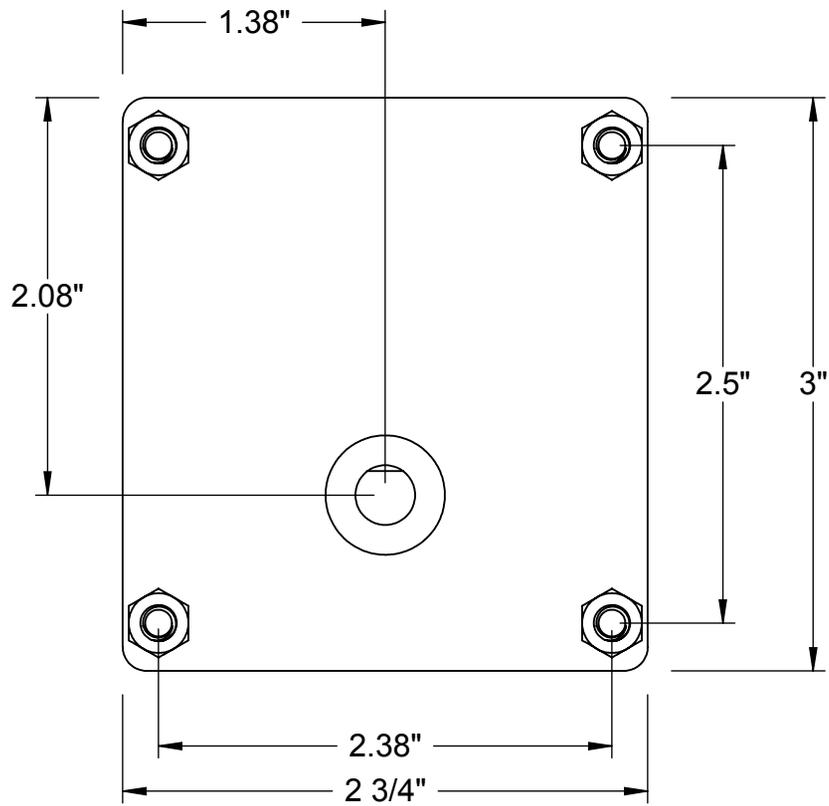
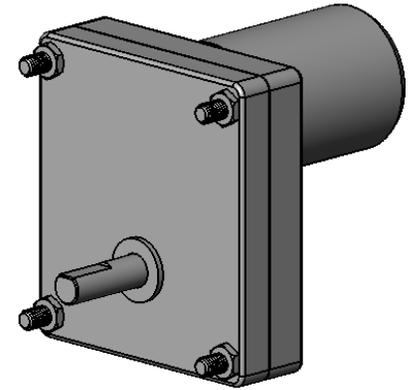
High-Load Metal Gear - 20°
Pressure Angle

Information in this drawing is provided for reference only.



Nota:
 * Unidades en mm
 * Machueliar agujero de 5mm de diametro

NA	BUJE	1	A4-03	1020 HR	Ø12,7 X 50	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						ESC: 2,3 : 1
	BUJE				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-03



McMASTER-CARR CAD

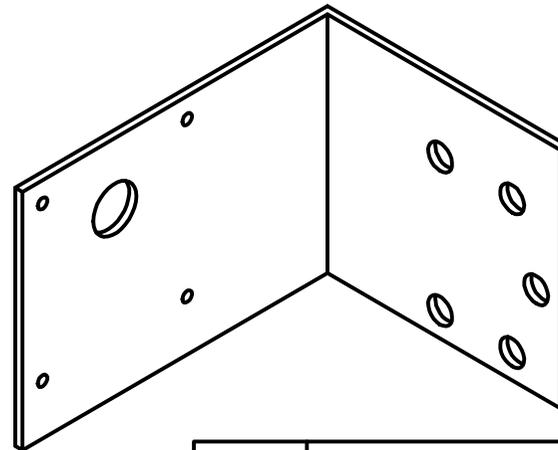
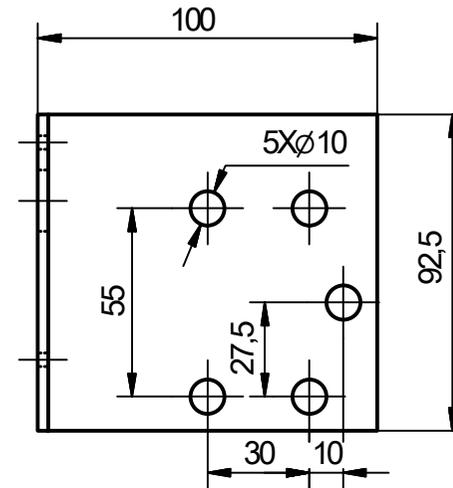
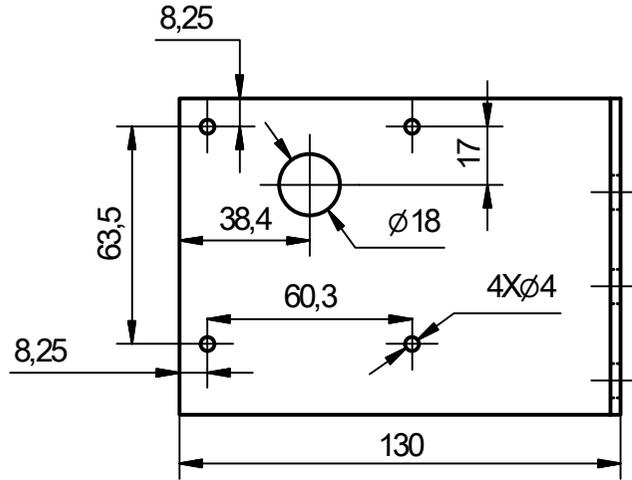
PART NUMBER

6409K27

<http://www.mcmaster.com>
 © 2018 McMaster-Carr Supply Company

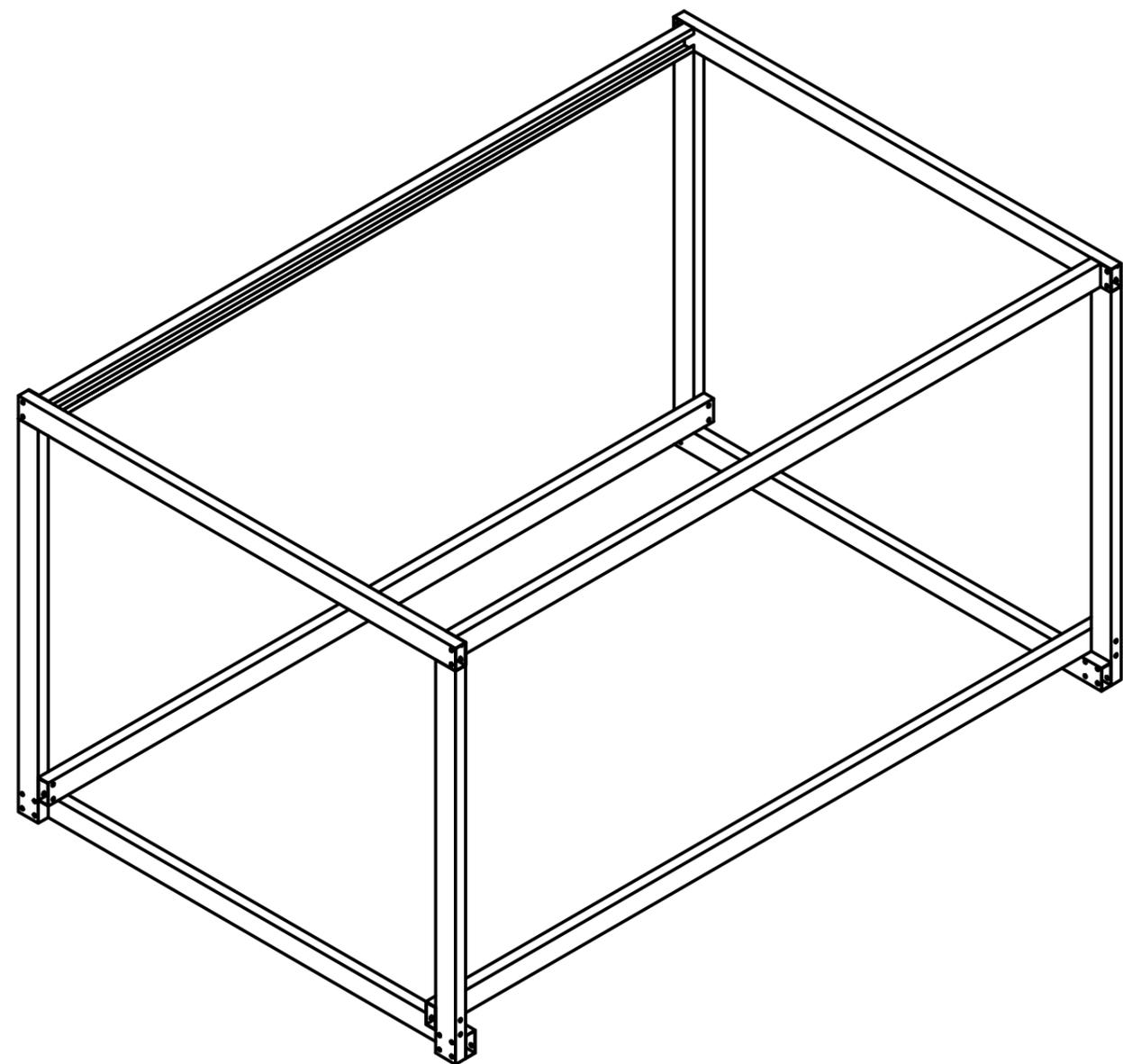
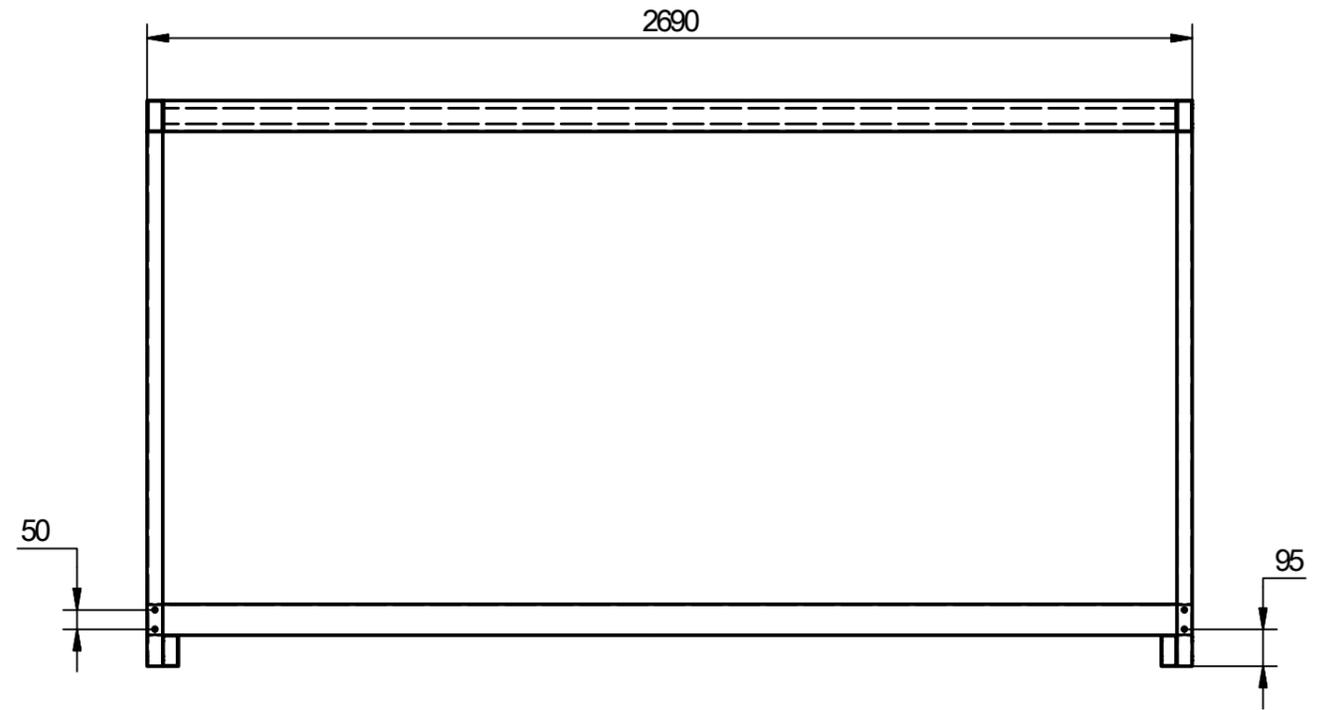
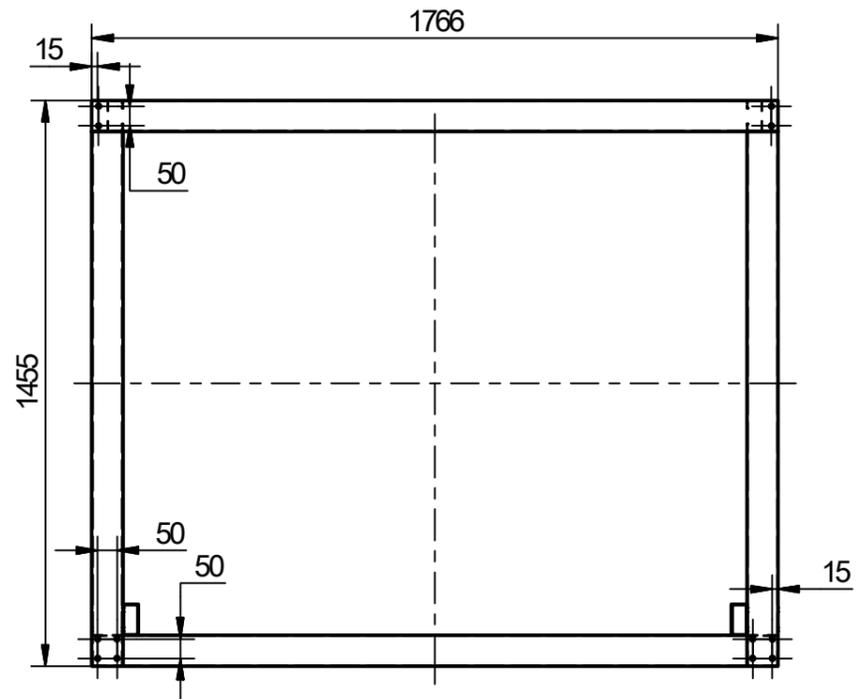
Compact Square-Face
 DC Gearmotor

Information in this drawing is provided for reference only.

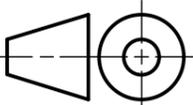


Nota:
 *Unidades en mm
 *Placa doblada

NA	SOPORTE DE MOTOR DC	1	A4-05	ACERO 1020	PLACA CALIBRE 11	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
						ESC: 0,9:1
	SOPORTE DE MOTOR DC				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-05

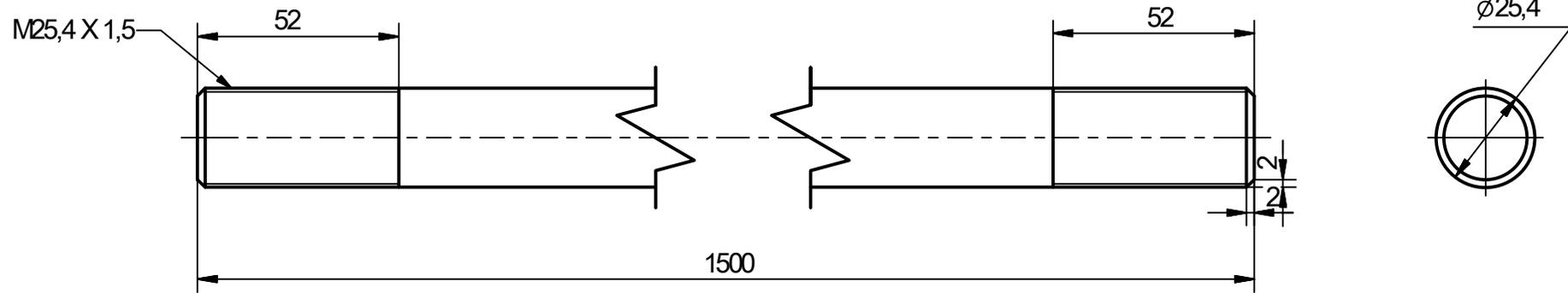


Nota:
 *Medidas en mm
 *Los perfiles longitudinales superiores son tipo C
 *Los agujeros (para tornillos) de 13 mm

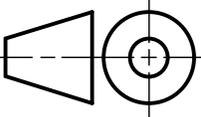
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	ESTRUCTURA-RIEL	1	A3-01	ACERO ESTRUCTURAL	PERFILES 80X40	NA
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
ESTRUCTURA-RIEL					ARCHIVO: TDG	ESC: 0,055 : 1
DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS			FCH: 13/12/2019
APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA			O.T.: NA
						MOD: NA
						PL.No: A3-01



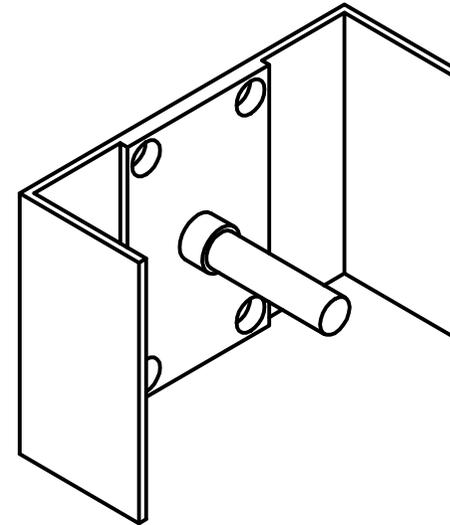
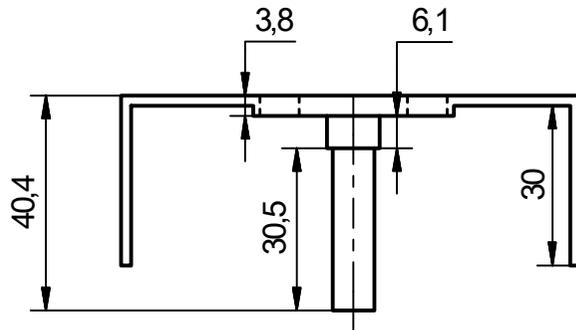
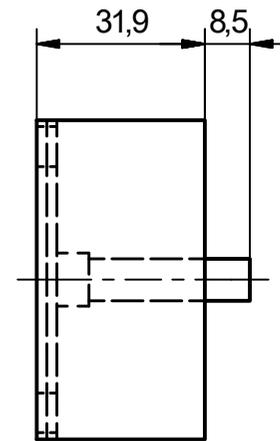
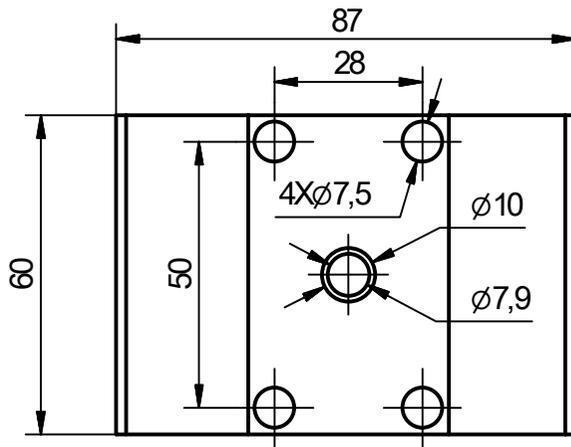
P8



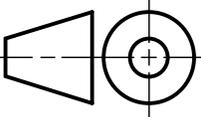
Nota:
*Unidades en mm

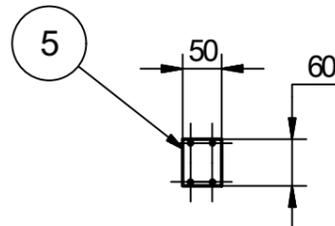
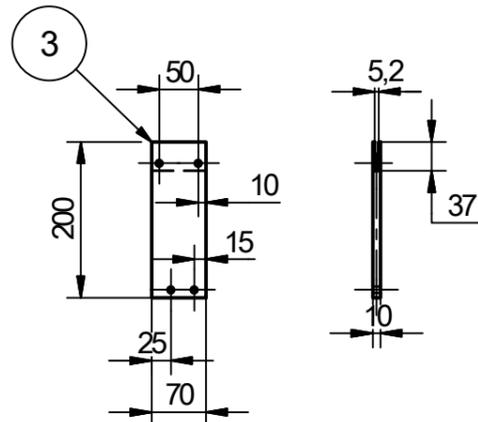
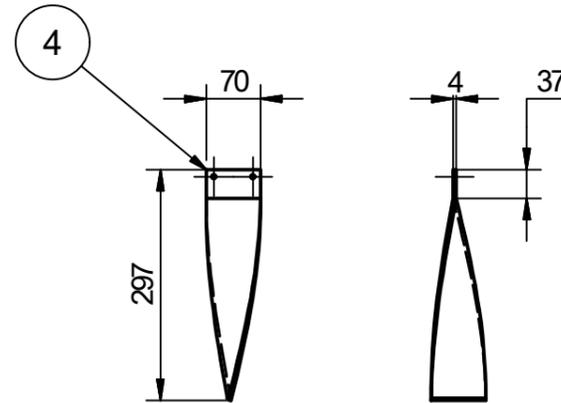
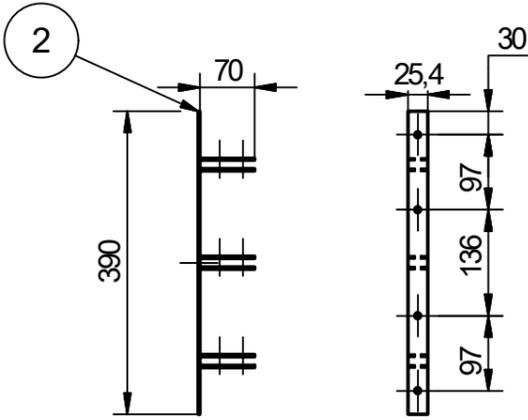
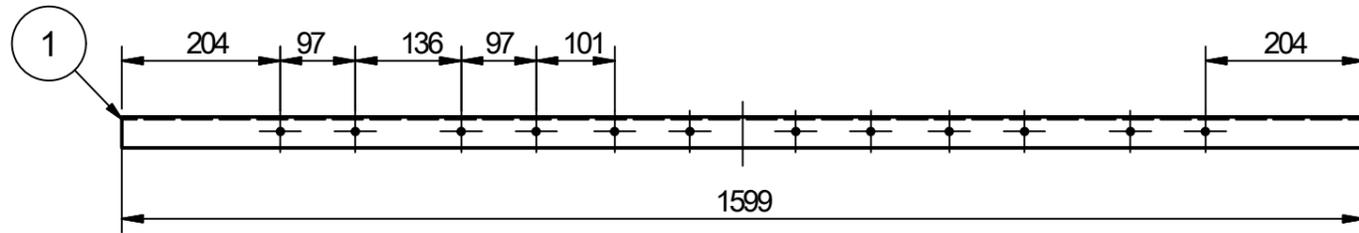
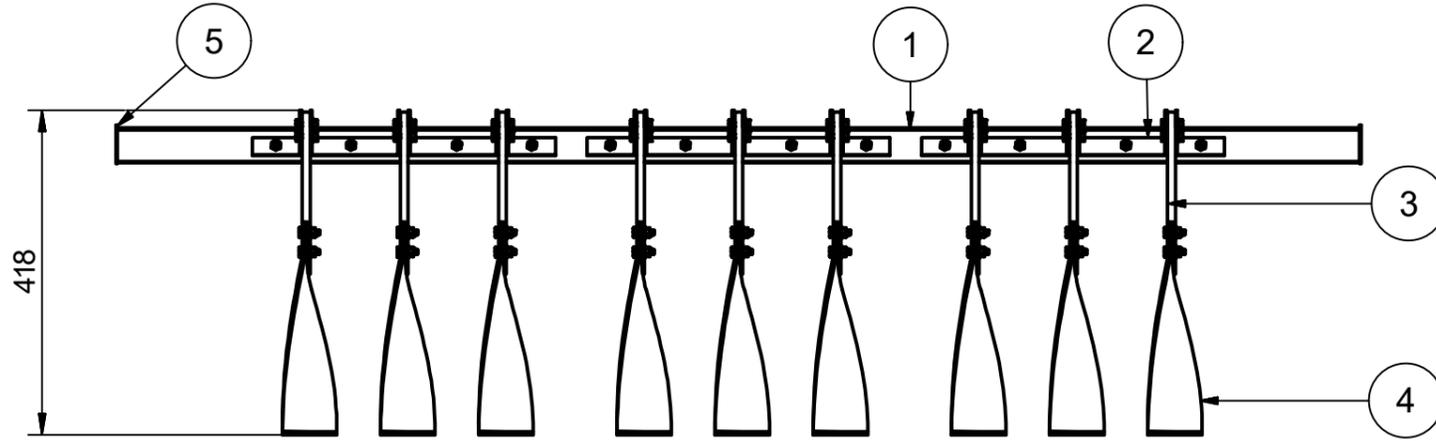
NA	EJE	1	A4-06	ACERO 1020	Ø25,4 X 1500	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	EJE				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-06

P9

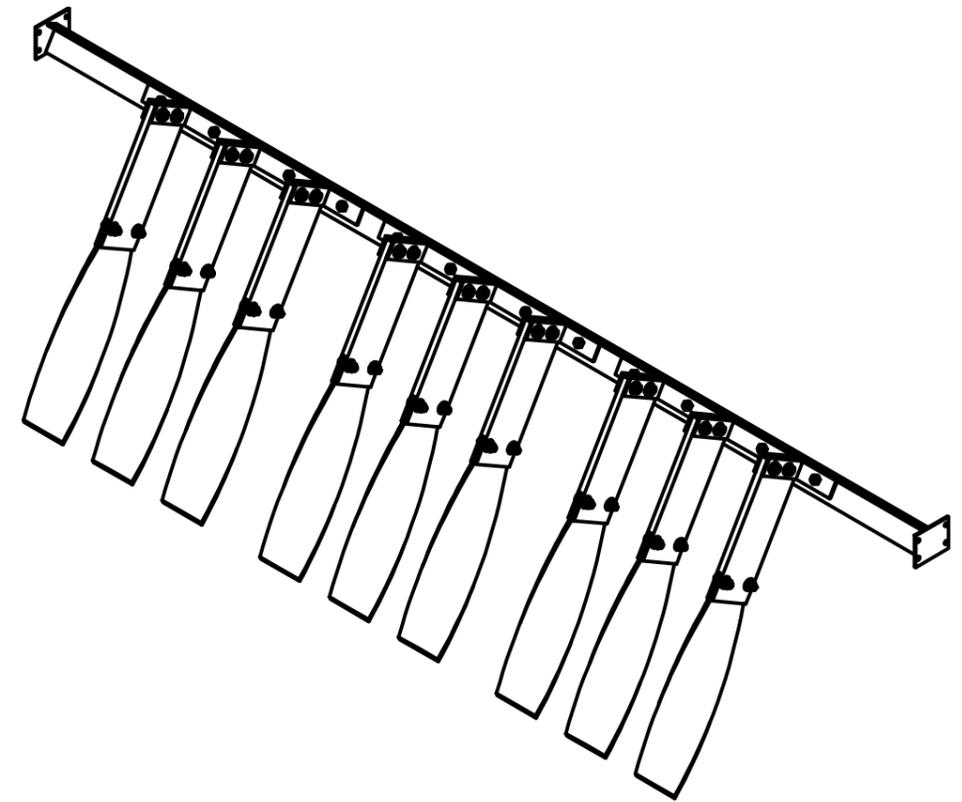


Nota:
*Unidades en mm

Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	EJE RUEDA	1	A4-07	ACERO 1020	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	EJE RUEDA				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-07



Nota:
 *Medidas en mm
 *Los agujeros (para tornillos) de 7 mm

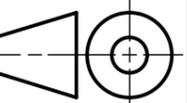


Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	ACOPLE A EJE	4	A3-02	ACERO ESTRUCTURAL	PLACA CALIBRE 10	PERFORADA
NA	MEZCLADOR	18	A3-02	MADERA FINA	TABLILLA DE 297X70X4	TORSIONADO 90°
NA	BASE DE MEZCLADORES	18	A3-02	ALUMINIO	PLACA DE 200X70X10	MECANIZADO
NA	ACOPLE DE MEZCLADORES	6	A3-02	ACERO ESTRUCTURAL	PLACA DE 1" CALIBRE 12	SOLDADO
NA	PERFIL GUIA	2	A3-02	ACERO ESTRUCTURAL	ÁNGULO DE 1"	PERFORADO

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



ESC: 0,11 : 1

MEZCLADORES

ARCHIVO:
TDG

FCH: 13/12/2019

O.T.: NA



DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS

DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS

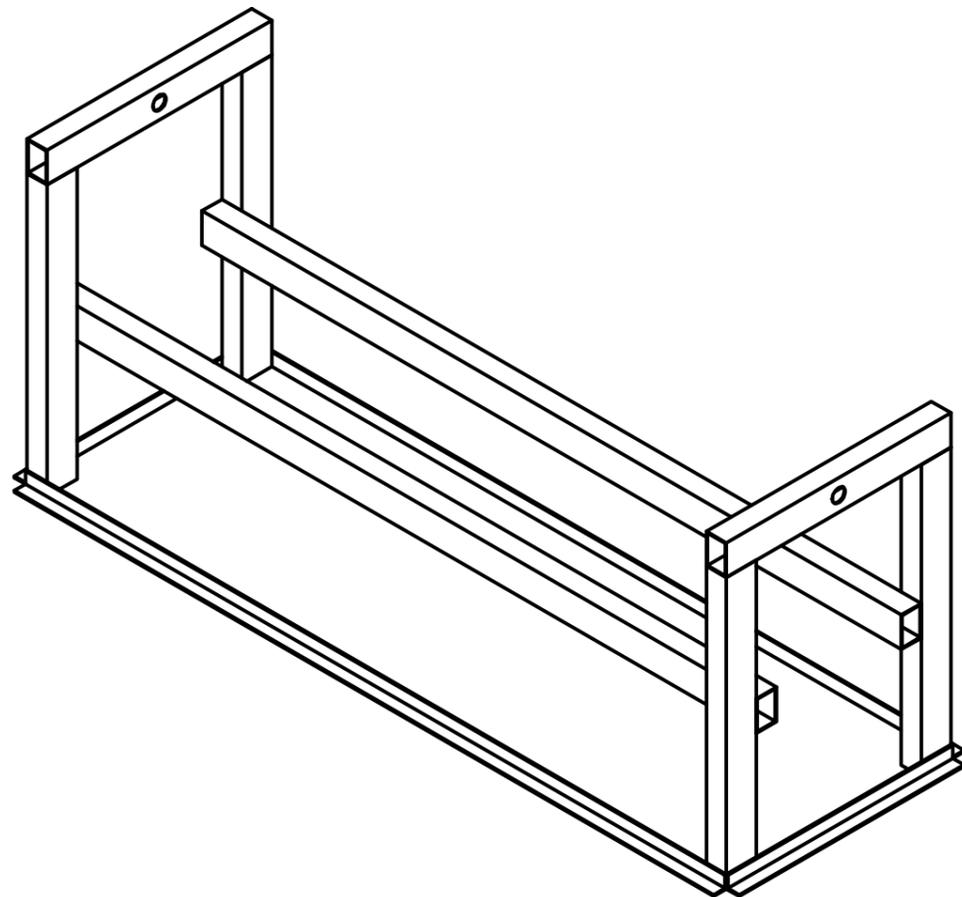
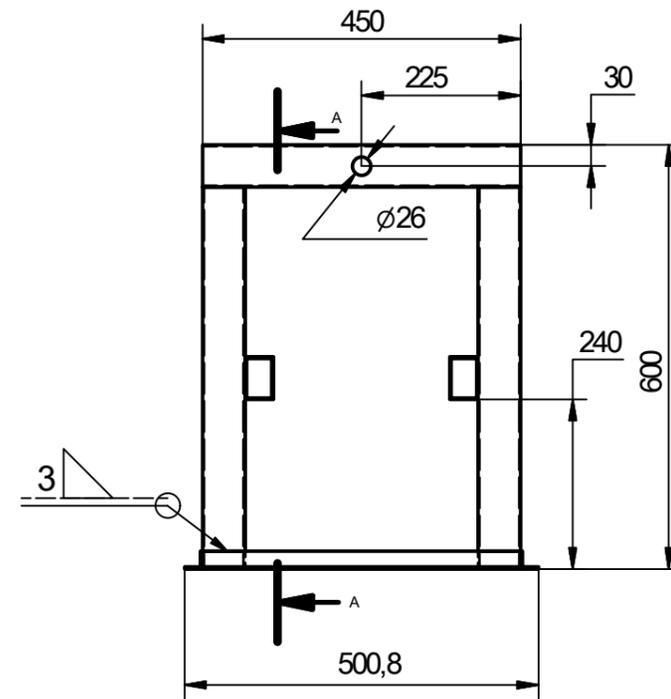
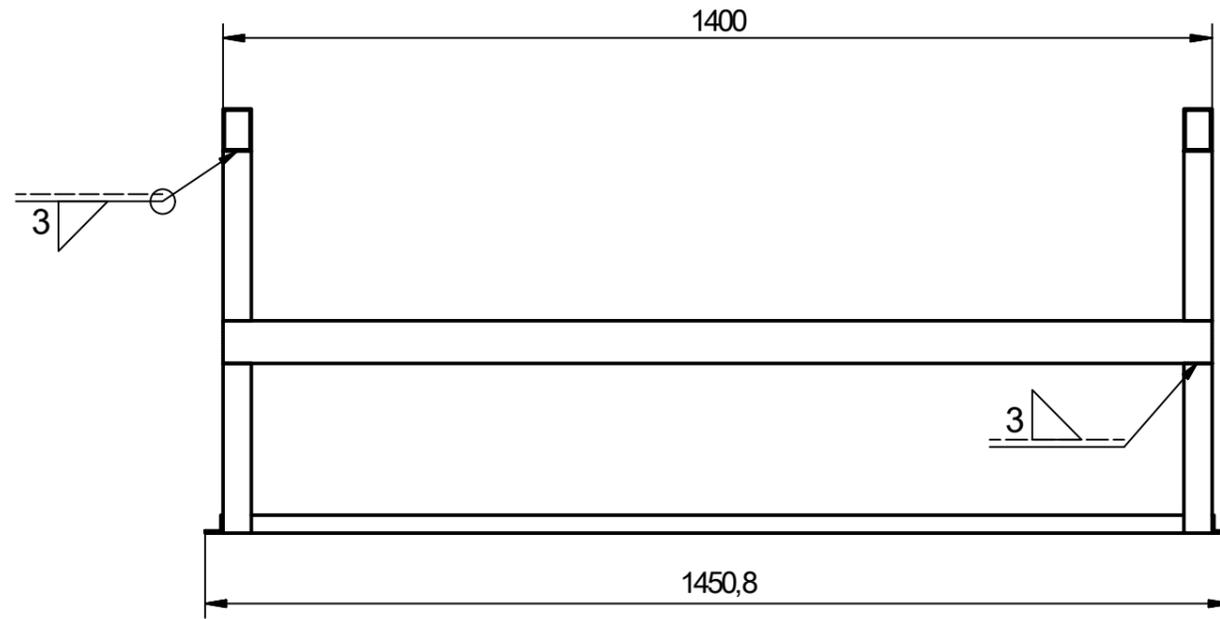
MOD: NA

APRB: EDWIN CHICA ARRIETA

REV: EDWIN CHICA ARRIETA

PL.No: A3-02

A-A (0,1 : 1)



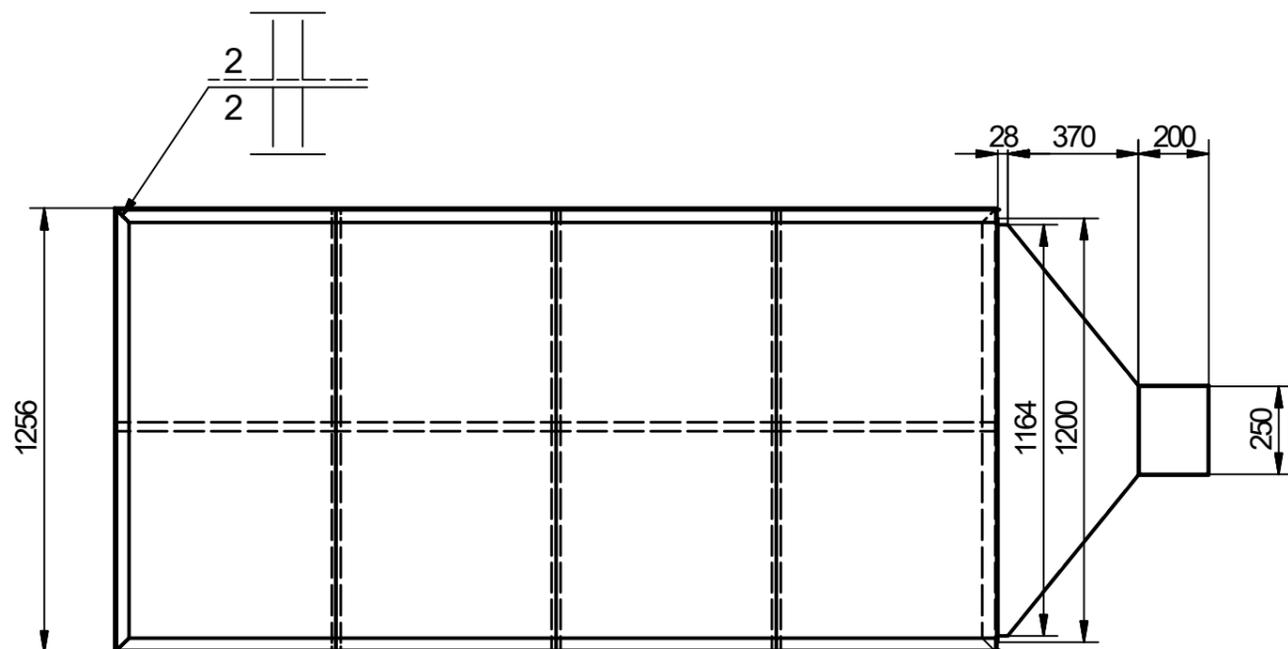
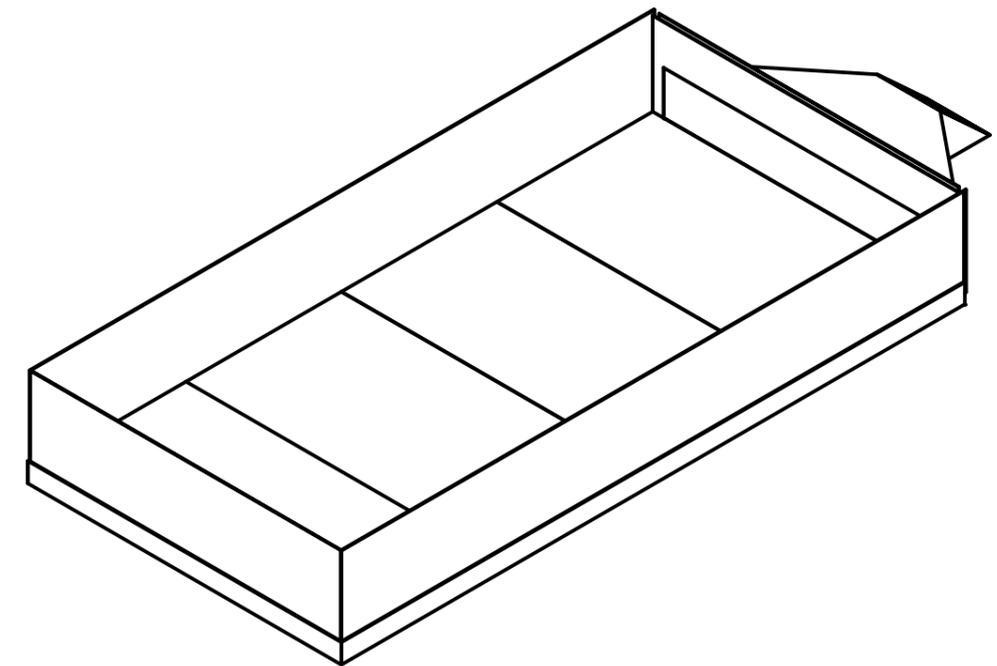
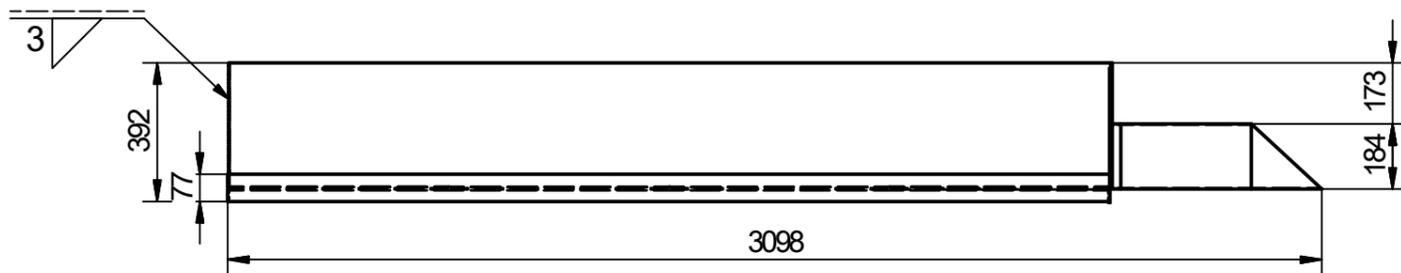
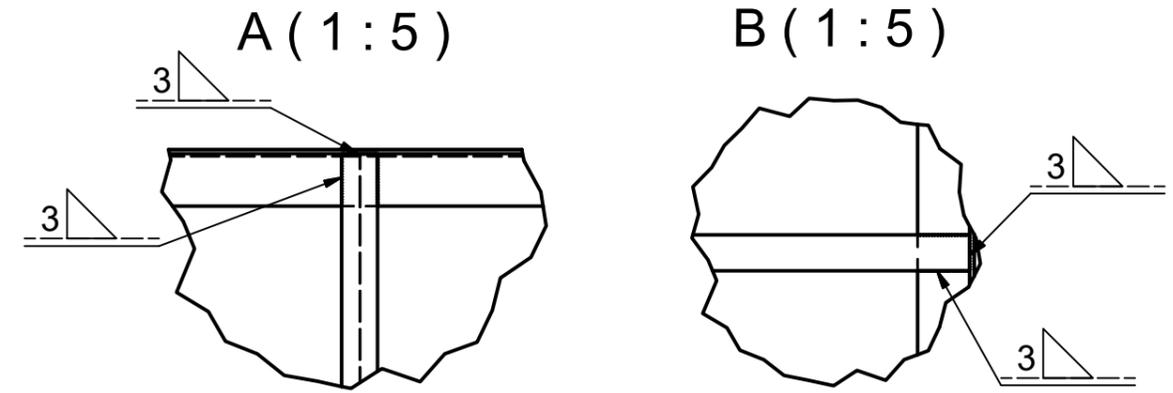
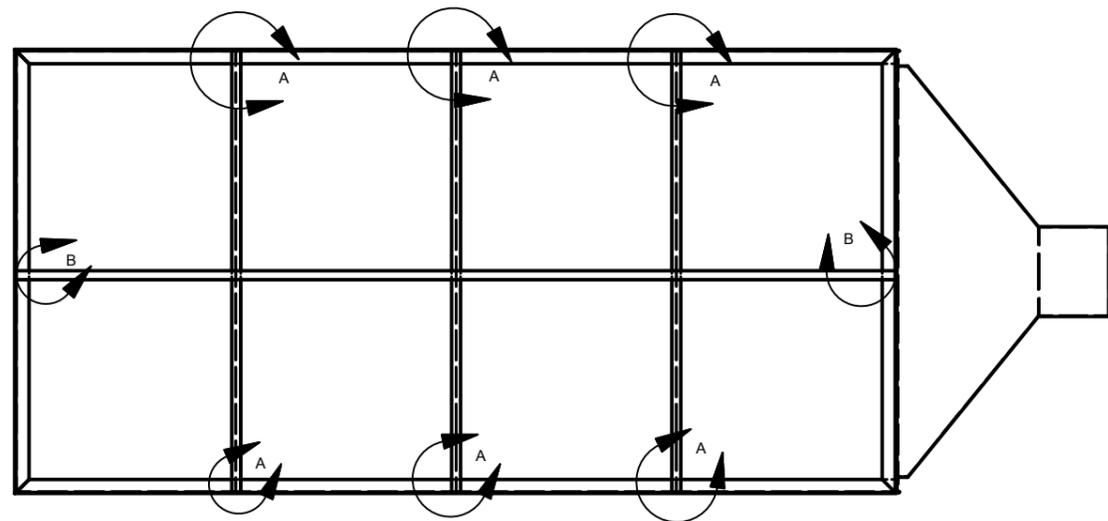
Nota:

*Medidas en mm

*Perfiles en ángulo de 1"

NA	BASE CAM DE AIRE	1	A3-03	ACERO ESTRUCTURAL	PERFILES 60X40	SOLDADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
BASE CÁMARA DE AIRE					ARCHIVO:	ESC: 0,1 : 1
					TDG	FCH: 13/12/2019
						O.T.: NA
DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS			MOD: NA
APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA			PL.No: A3-03





Nota:

*Medidas en mm

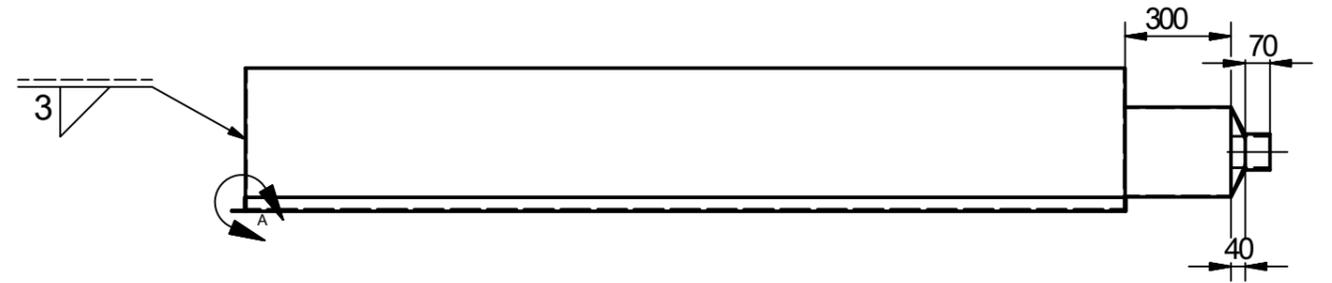
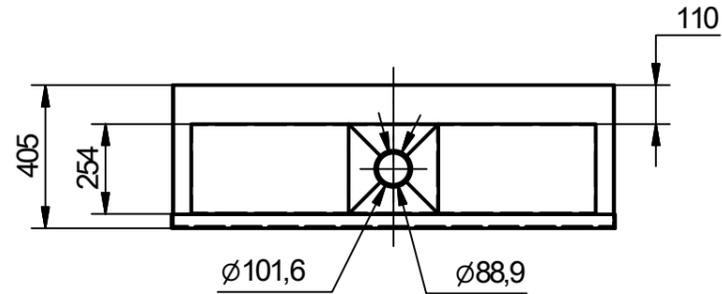
*Los perfiles de la base son tipo T en acero estructural, soldados

*Se encuentran 4 laminas delgadas (3 transversales y 1 longitudinal), soldadas a los perfiles tipo T

*Apoyadas en la base se encuentran 4 laminas de acero inoxidable perforadas de 625X1250 calibre 12

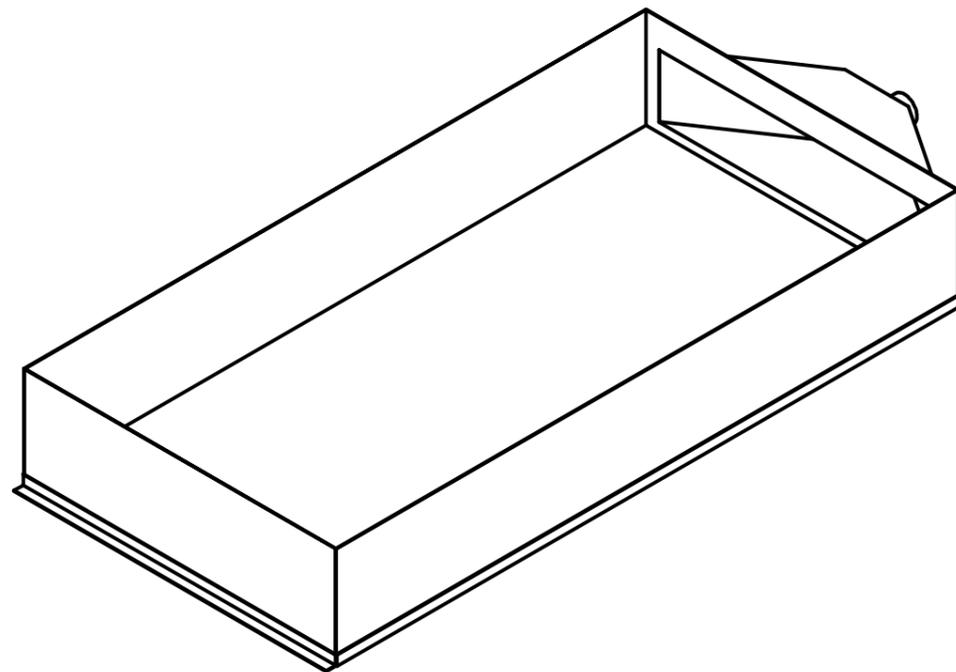
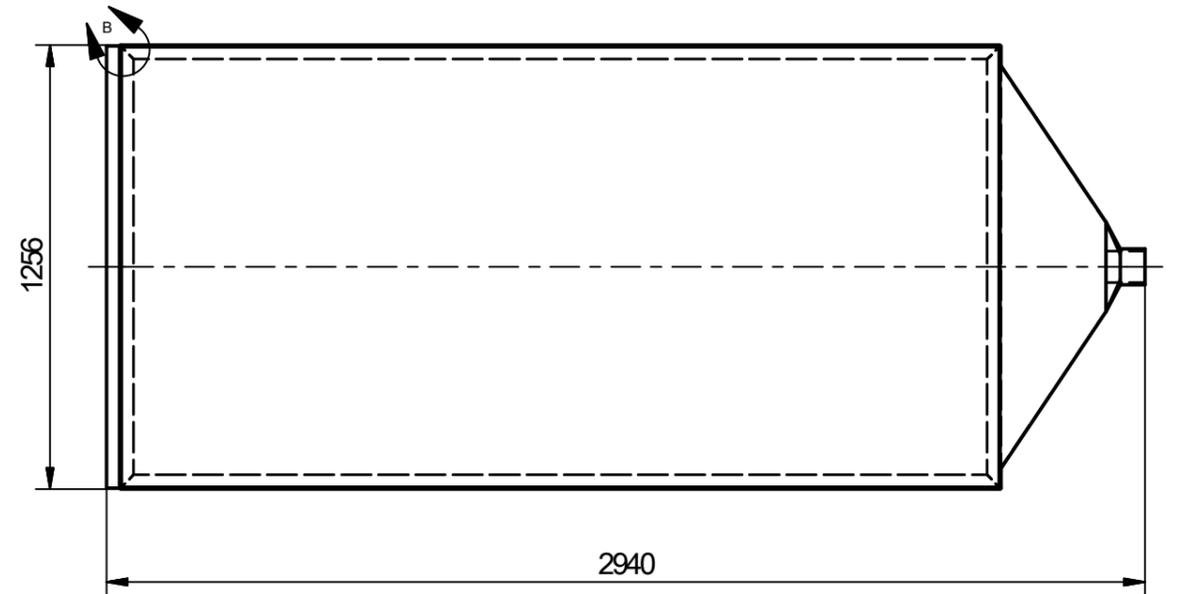
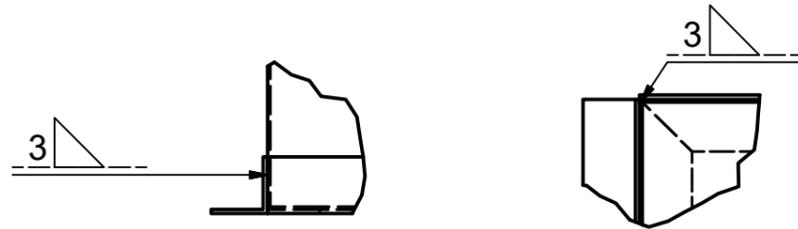
*Las laminas laterales son en acero inoxidable calibre 12

NA	CÁMARA DE SECADO	1	A3-04	ACERO INOXIDABLE 304	LÁMINAS CALIBRE 12	SOLDADO PARCIAL
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						ESC: 1:20
	CÁMARA DE SECADO				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A3-04



A (1:5)

B (1:5)



Nota:

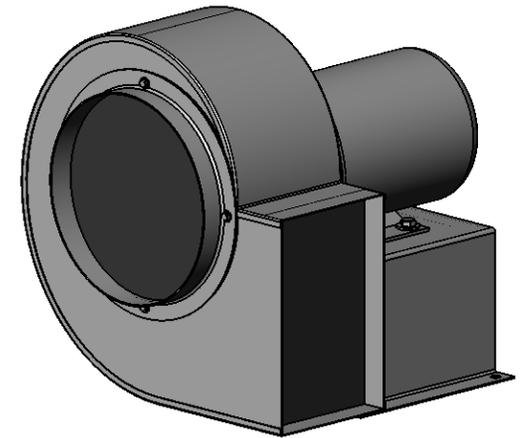
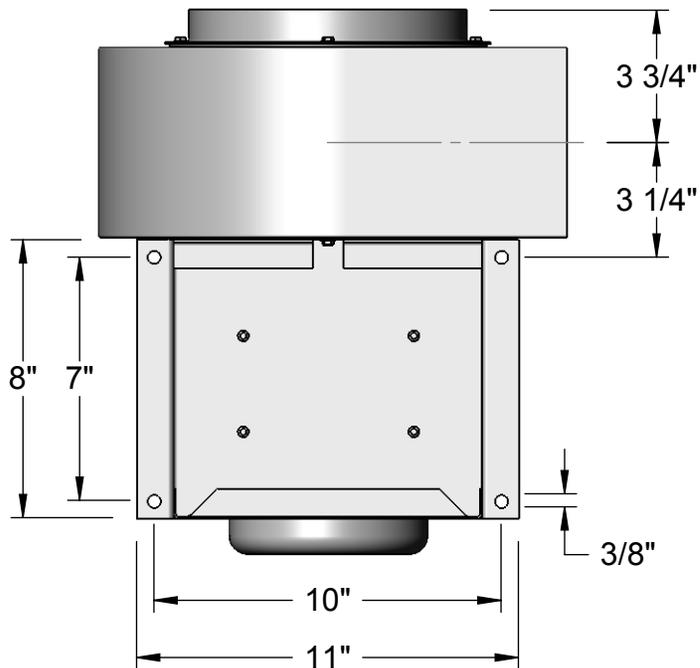
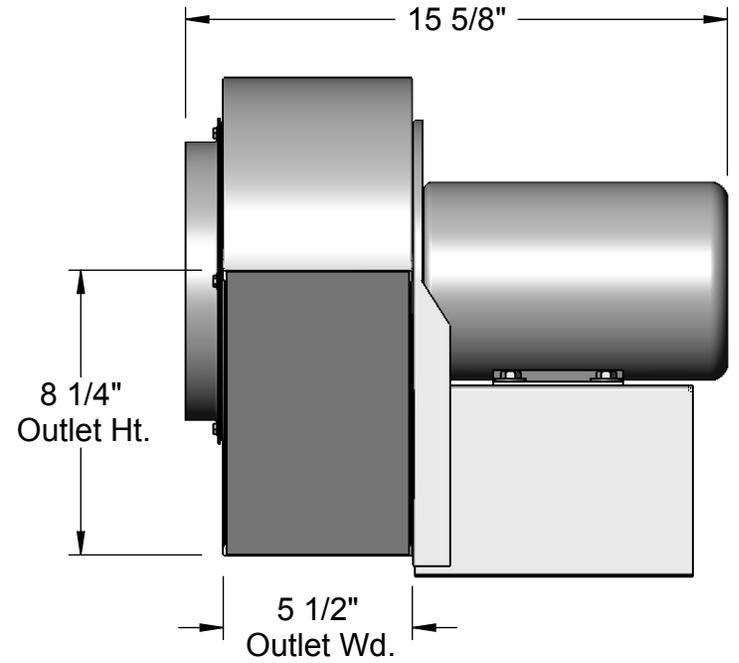
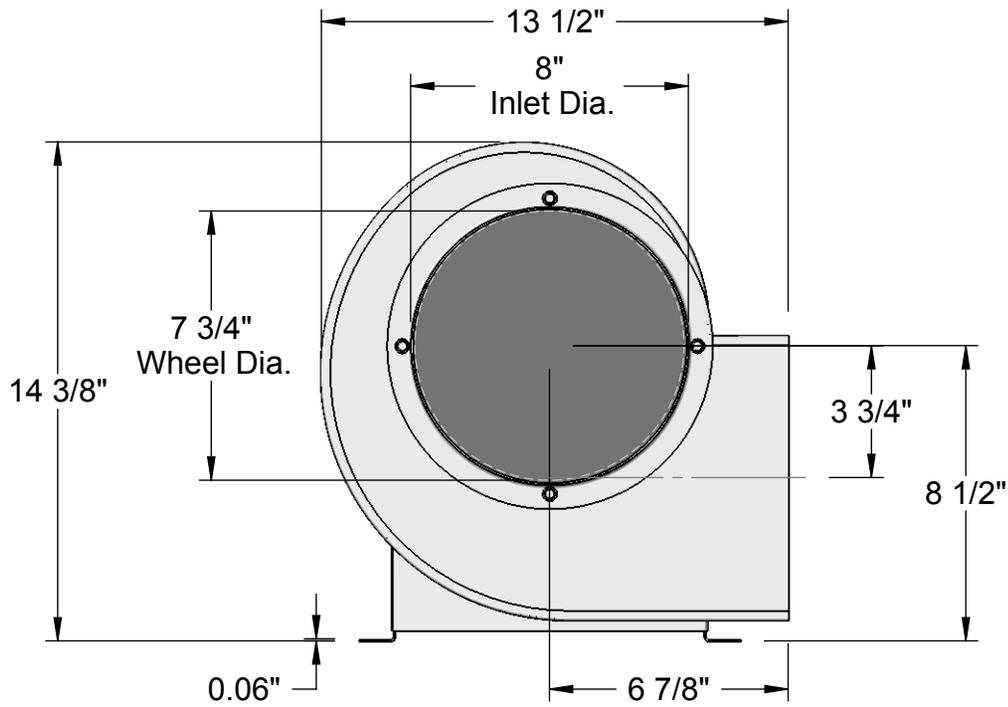
*Medidas en mm

*Los perfiles de la base son tipo ángulo de 1"

*Apoyadas en la base se encuentran 1 lamina de acero HR de 1250X2490 calibre 12

*Las laminas laterales son en acero HR calibre 12

NA	CÁMARA DE AIRE	1	A3-05	ACERO HR	LÁMINAS CALIBRE 10	SOLDADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						ESC: 1:20
	CÁMARA DE AIRE				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A3-05



McMASTER-CARR CAD

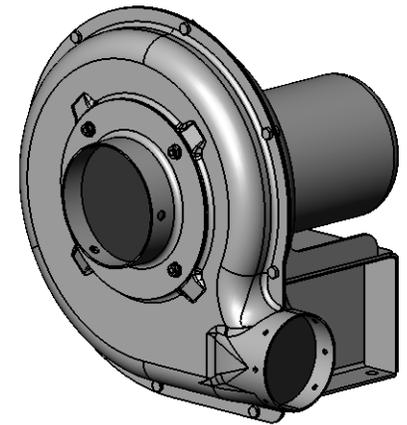
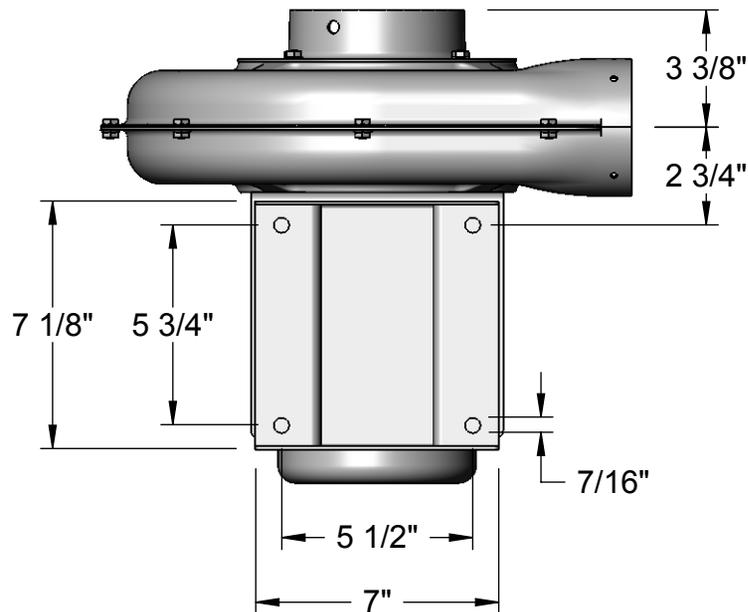
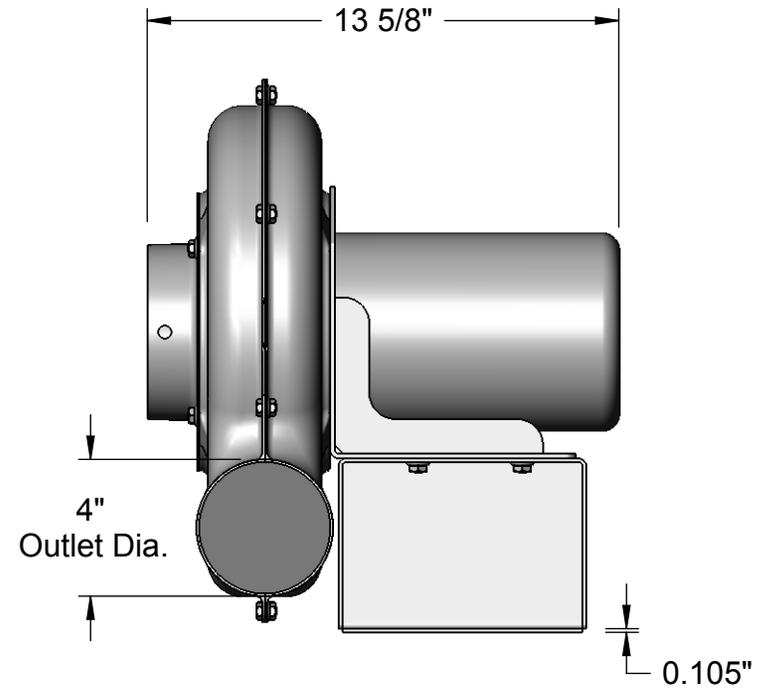
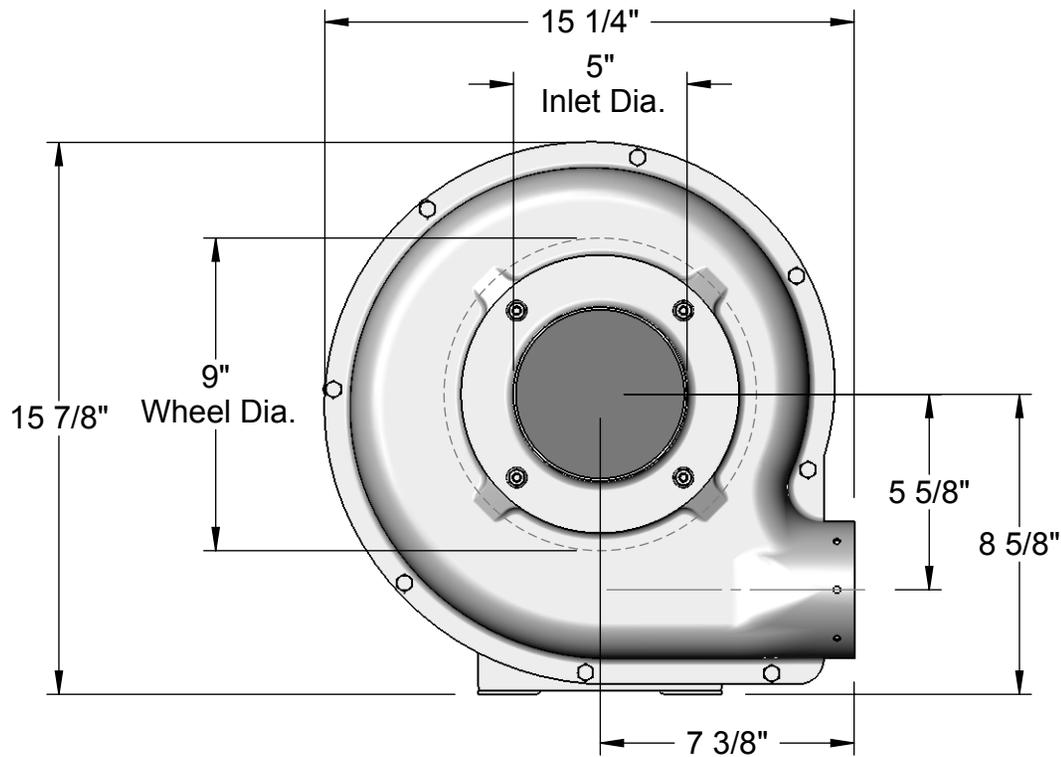
PART NUMBER

1963K15

<http://www.mcmaster.com>
© 2015 McMaster-Carr Supply Company

Blower

Information in this drawing is provided for reference only.



McMASTER-CARR CAD

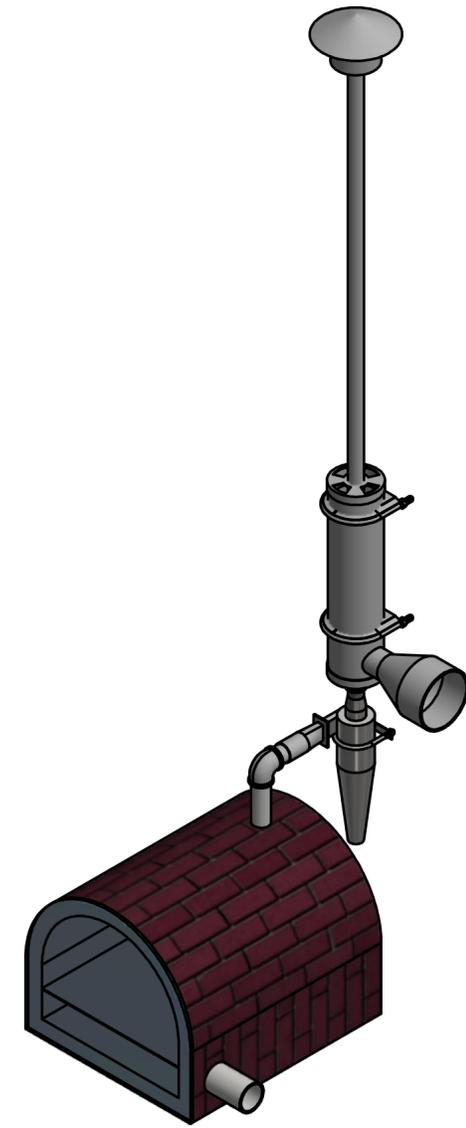
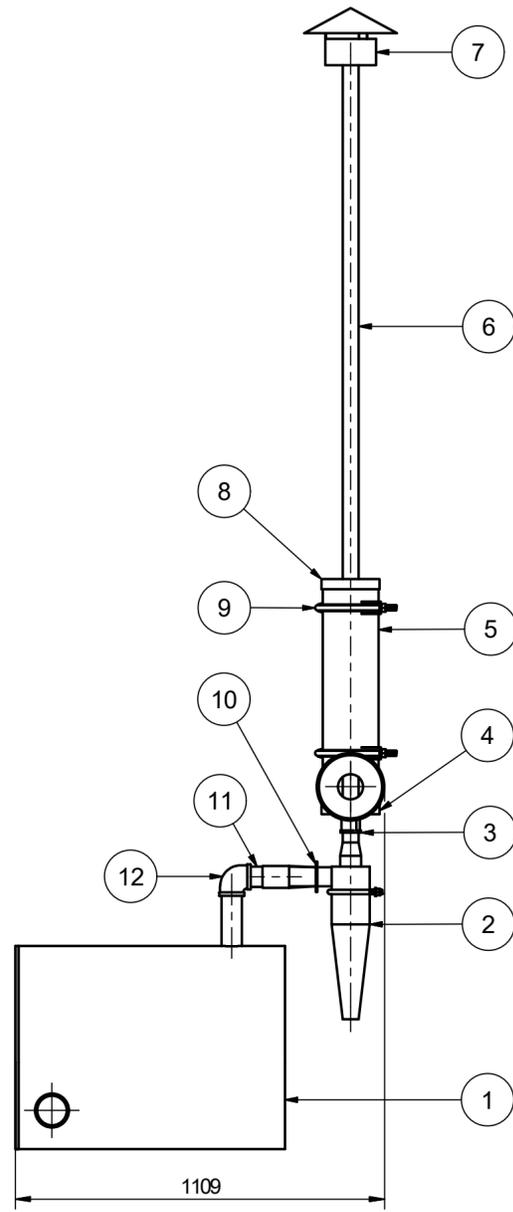
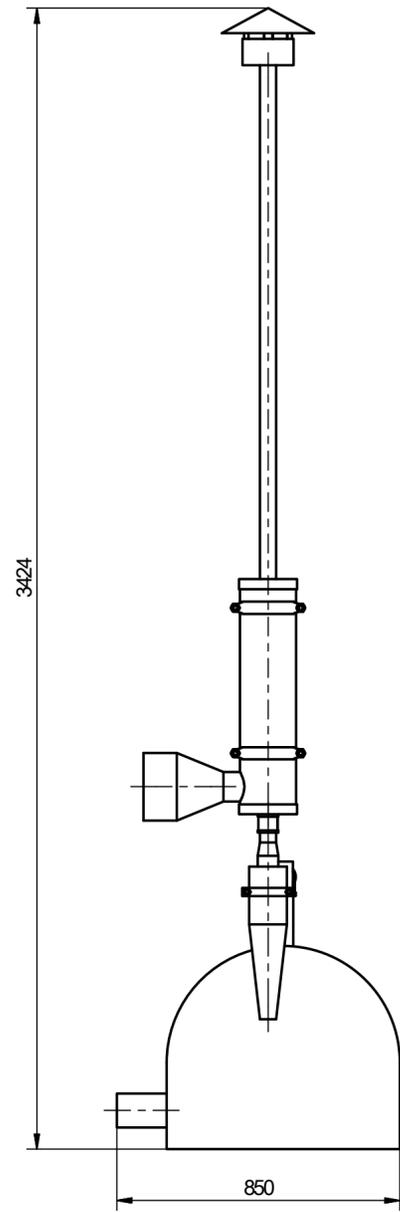
PART NUMBER

1953K26

<http://www.mcmaster.com>
© 2018 McMaster-Carr Supply Company

High-Output
Blower

Information in this drawing is provided for reference only.



Nota:
 *Unidades en mm
 *El acero galvanizado que transporta aire a alta temperatura debe ser recubierto con material aislante (manta de fibra de vidrio)

NA	NIPLE CODO	1	NA	ACERO GALVANIZADO	Ø 1,5"	COMERCIAL
NA	NIPLE CONECTOR	1	NA	ACERO GALVANIZADO	Ø1,5" X 100 DE LARGO	ROSCADO
NA	ACOPLE HORNO-CICLÓN	1	A4-12	ACERO GALVANIZADO	LÁMINA CALIBRE 10	MECANIZADO
NA	AGARRES	2	NA	ACERO SUAVE	Ø 6" INTERNO	COMERCIAL
NA	TAPA DE RESTRICCIÓN 2	1	A4-11	ACERO GALVANIZADO	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
NA	GORRO CHINO	1	NA	ACERO GALVANIZADO	CON ACOPLA A 1,5"	COMERCIAL
NA	CHIMENEA	1	NA	ACERO GALVANIZADO	TUBERIA Ø 1,5"	COMERCIAL
NA	INTERCAMBIADOR DE CALOR	1	A3-07	ACERO GALVANIZADO	TUBERIA COMERCIAL	MECANIZADO
NA	TAPA DE RESTRICCIÓN 1	1	A4-10	ACERO 1020 TRATADO	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
NA	ACOPLE NIPLE	1	NA	ACERO GALVANIZADO	Ø 1,5"	COMERCIAL
NA	CICLÓN	1	NA	ACERO GALVANIZADO	85 CFM	ESQUEMA MOSTRADO
NA	HORNO	1	A3-06	ADOBE	LADRILLOS COMERCIALES	CONSTRUCCIÓN
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SISTEMA DE CALENTAMIENTO

DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS

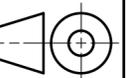
DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS

MOD: NA

APRB: EDWIN CHICA ARRIETA

REV: EDWIN CHICA ARRIETA

PL.No: A2-01

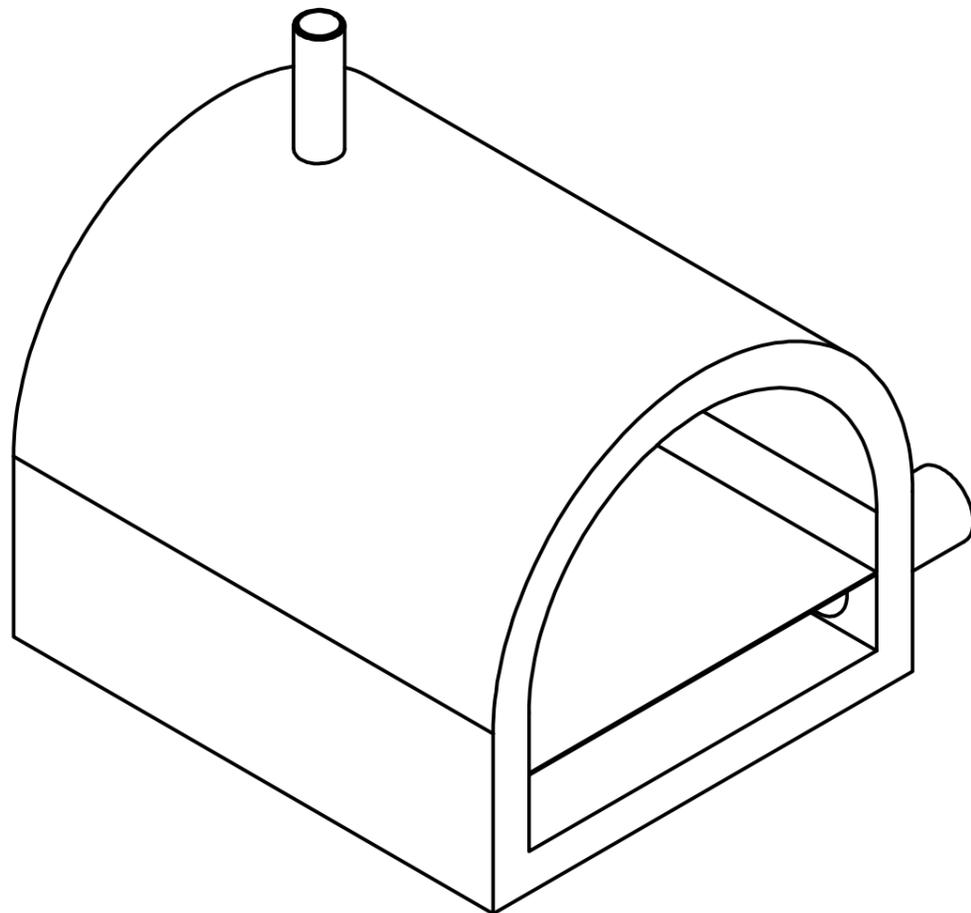
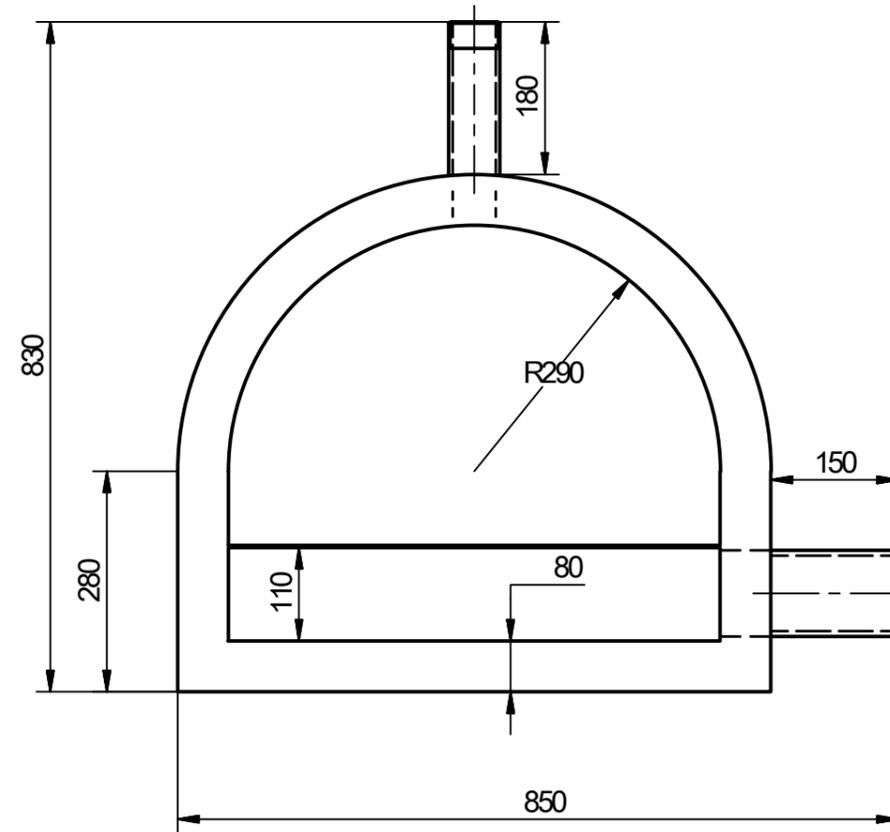
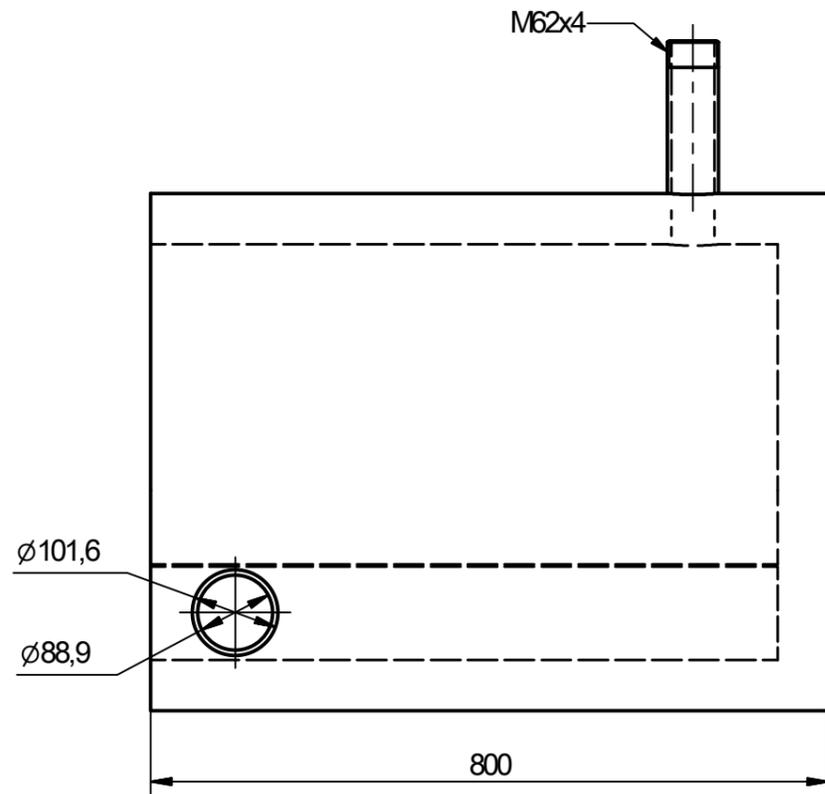


ESC: 1:15

FCH: 13/12/2019

O.T.: NA

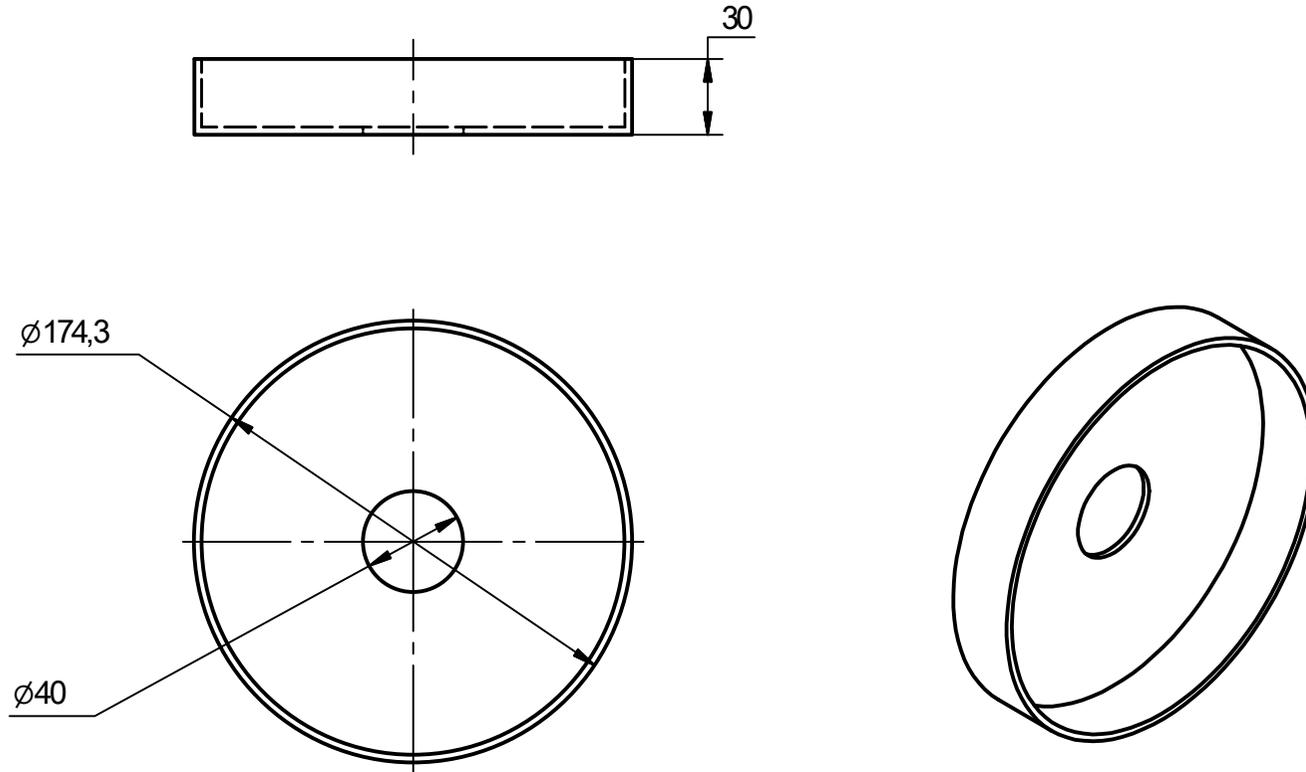




Nota:

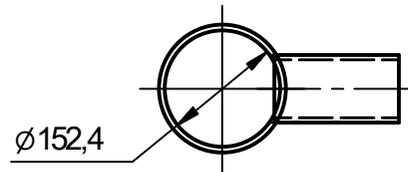
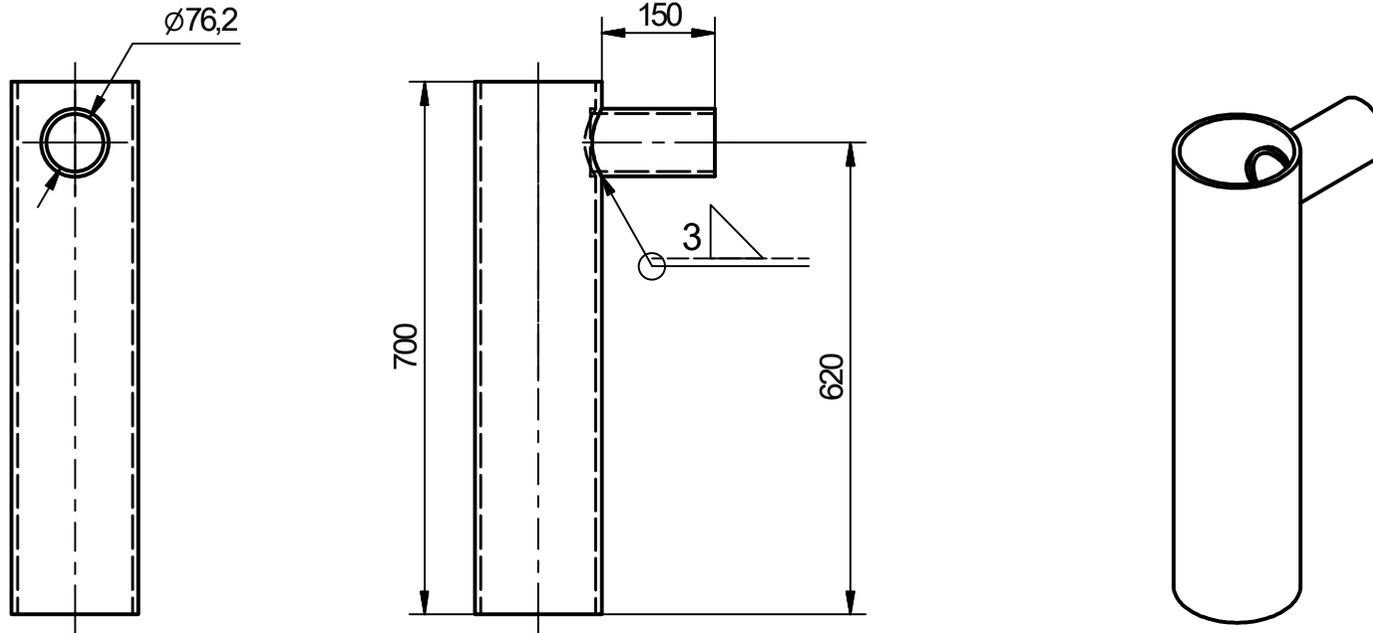
- *Medidas en mm
- *Contrucción para ser realizada por maestro de obra
- *En la parte interior debe llevar una capa de aislante termico (manta de fibra de vidrio)
- *Tubo galvanizado insertado en la parte superior de 2"
- *Tubo galvanizado insertado en la parte lateral de 3"

NA	HORNO	1	A3-06	ADOBE	LADRILLOS COMERCIALES	CONSTRUCCIÓN
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
HORNO						ESC: 0,12 : 1
				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019	
				TDG	O.T.: NA	
		DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS		DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
		APRB: EDWIN CHICA ARRIETA		REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A3-06



Nota:
*Unidades en mm

Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	TAPA DE RESTRICCIÓN 1	1	A4-10	ACERO GALVANIZADO	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	TAPA DE RESTRICCIÓN 1				ARCHIVO: TDG	ESC: 1 : 3
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		FCH: 13/12/2019
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		O.T.: NA
						MOD: NA
						PL.No: A4-10



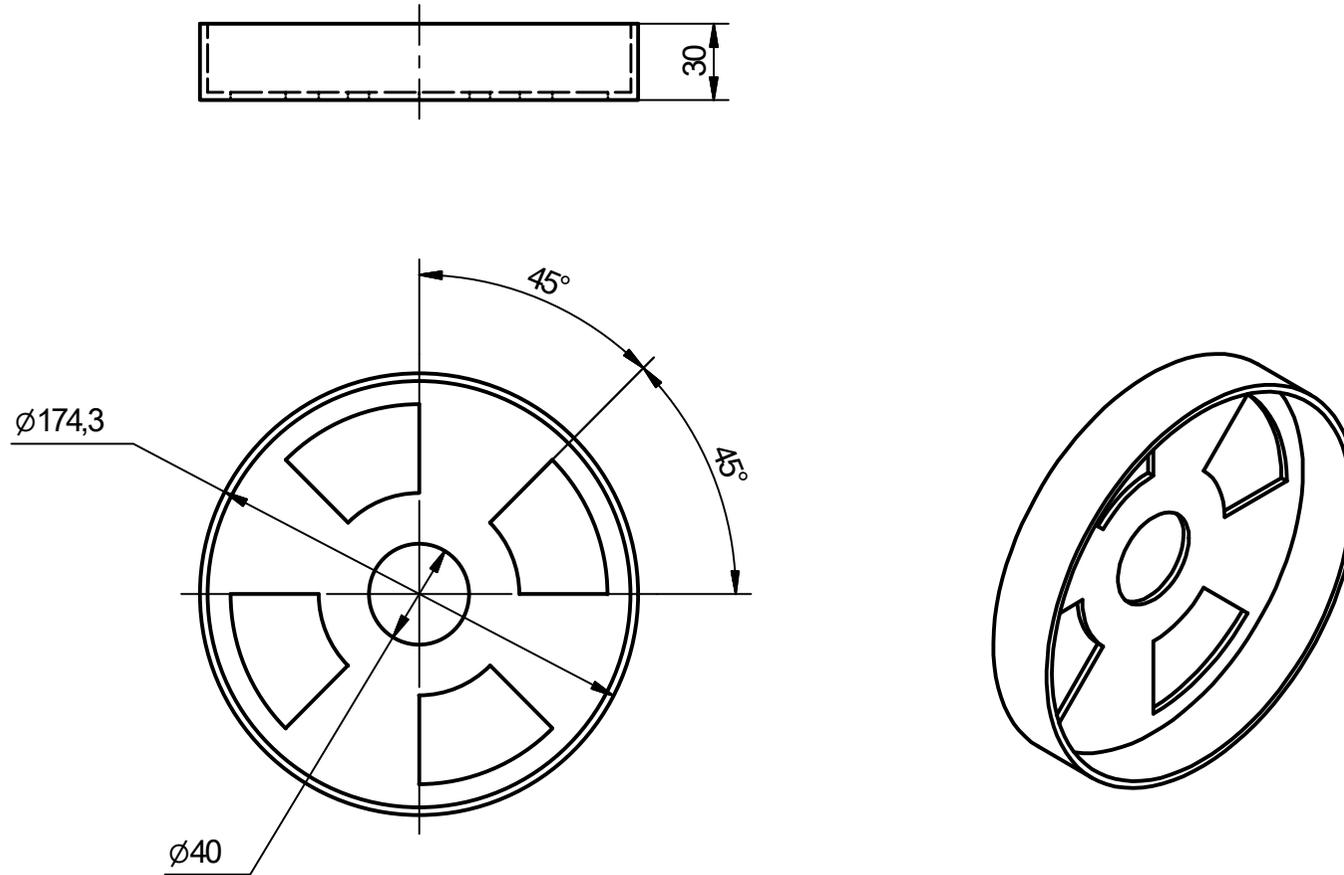
Nota:

*Medidas en mm

*Tubería principal de Ø 6"

*Tubería de salida del aire de Ø 3"

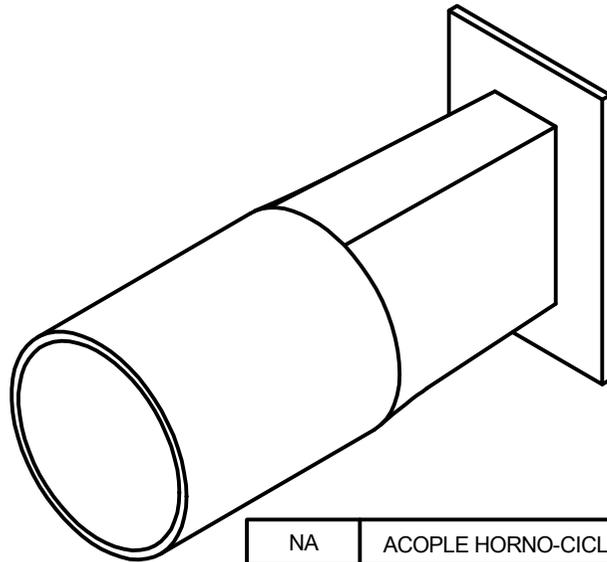
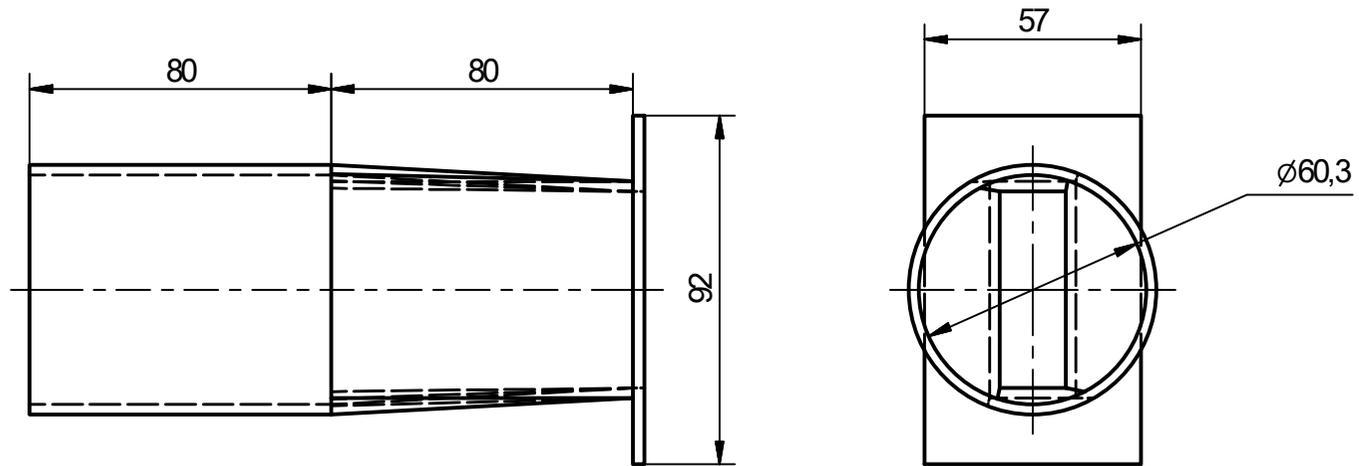
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	INTERCAMBIADOR (EXTERNO)	1	A4-11	TUBERIA 6"	LADRILLOS COMERCIALES	SOLDADO
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	INTERCAMBIADOR (EXTERNO)				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-11



Nota:
*Unidades en mm

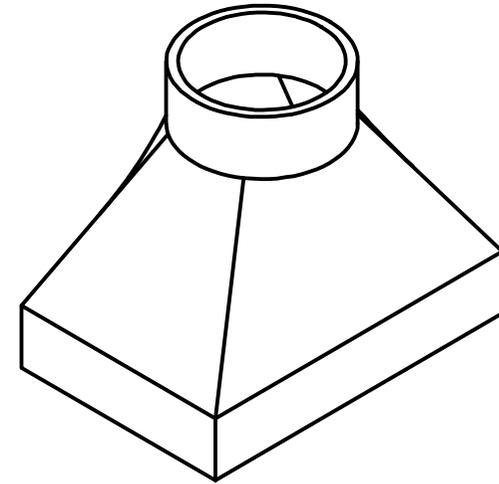
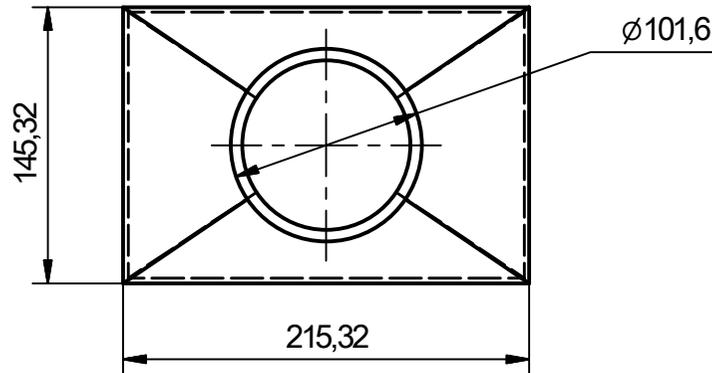
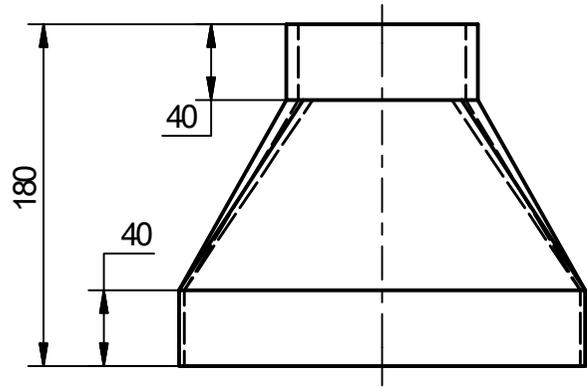
NA	TAPA DE RESTRICCIÓN 2	1	A4-12	ACERO GALVANIZADO	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	TAPA DE RESTRICCIÓN 2				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-12

P21



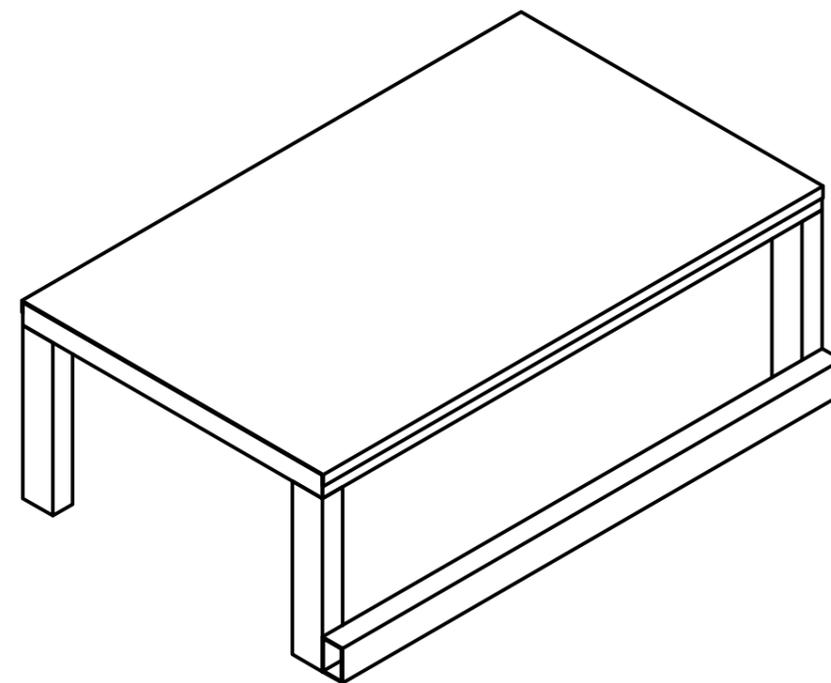
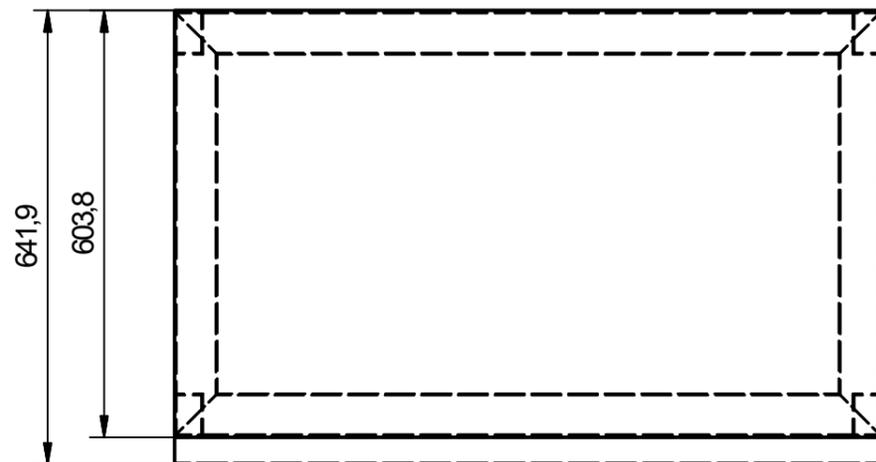
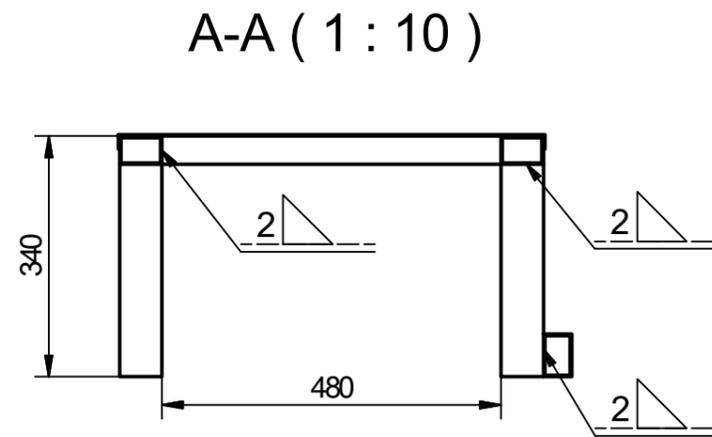
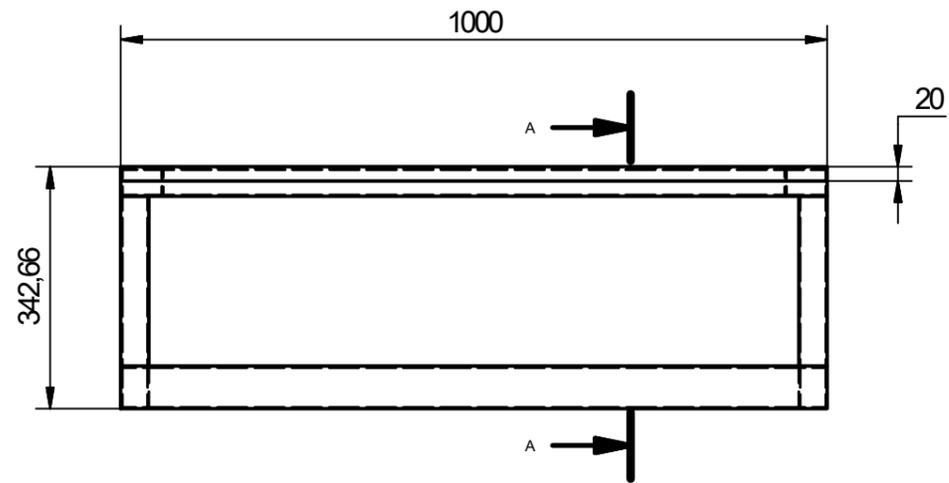
Nota:
*Unidades en mm

NA	ACOPLE HORNO-CICLÓN	1	A4-13	ACERO GALVANIZADO	PLACA CALIBRE 10	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	ACOPLE HORNO-CICLÓN				ARCHIVO:	FCH: 13/12/2019
					TDG	O.T.: NA
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		MOD: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		PL.No: A4-13



Nota:
*Unidades en mm

Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
NA	ACOPLE MANGUERA-VENTILADOR	2	A4-14	ACERO HR	PLACA CALIBRE 12	MECANIZADO
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	ACOPLE MANGUERA-VENTILADOR				ARCHIVO: TDG	ESC: 1 : 4
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		FCH: 13/12/2019
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		O.T.: NA
						MOD: NA
						PL.No: A4-14



Nota:
 *Medidas en mm
 *Perfiles comerciales 60X40
 *La lamina superior de acero grabado en relieve calibre 12

NA	MESA DE TRABAJO	1	A3-07	ACERO ESTRUCTURAL	PERFILES 60X40	SOLDADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA						
	MESA DE TRABAJO				ARCHIVO:	ESC: 1 : 10
					TDG	FCH: 13/12/2019
	DIS: JAITH AGAMEZ PARIAS			DIB: JAITH AGAMEZ PARIAS		O.T.: NA
	APRB: EDWIN CHICA ARRIETA			REV: EDWIN CHICA ARRIETA		MOD: NA
						PL.No: A3-07