

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TOSTADORA DE CAFÉ POR LECHO
FLUIDIZADO**

LUIS ARNULFO PINTO PINZÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.014

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TOSTADORA DE CAFÉ POR LECHO
FLUIDIZADO**

LUIS ARNULFO PINTO PINZÓN

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2.014**

DEDICATORIA

A Dios, le dedico todo el esfuerzo y sacrificios de mi familia y míos, pues sin su compañía y aliento quizás nunca hubiera llegado a la Universidad, y cuando peor estaban las cosas, la oración fue mi gran sostén para lograr permanecer y continuar.

A mis padres María Gladys Pinzón Báez y Juan Salomón Pinto Argüello; por sus insistentes esfuerzos por sacar a sus hijos adelante, por darnos la herencia del estudio. Gracias madre, gracias padre por apoyarme y por encomendarme a Dios todos los días, por sus oraciones y bendiciones.

A mis dos hermanos Edison y Mayerly, el apoyo incondicional que siempre me han brindado, la sinceridad y franqueza con que me hablan y me alientan a seguir.

A mi esposa y mi hija, por sus sacrificios, por apoyarme a mantener este sueño de ser Ingeniero Mecánico.

Luis Arnulfo Pinto Pinzón.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Omar Gélvez Arocha, por su respaldo, confianza y colaboración.

A La asociación de jóvenes productores rurales de Cincelada, en especial al señor Cayetano Pinzón Pinzón; quien me compartió sus experiencia y conocimientos sobre el café.

A mis padres María Gladys Pinzón Báez y Juan Salomón Pinto Argüello, por todos sus esfuerzo y sacrificios, consejos y el apoyo incondicional que me han brindado.

A todos las personas quienes me colaboraron en este proceso.

Luis Arnulfo Pinto Pinzón.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. CONCEPTOS BASICOS SOBRE EL CAFÉ.....	20
1.1. CAFES COMERCIALES.....	20
1.2. COMPOSICIÓN Y PROCESAMIENTO DEL CAFÉ.....	21
1.3. TUESTE DEL CAFÉ.....	22
1.3.1. Tipos y grados de tueste para el café	24
1.3.2. Variables básicas del tueste	27
2. SISTEMAS DE TUESTE.....	29
2.1. TOSTADORAS CONTINUAS.....	29
2.2. TOSTADORAS POR TANDAS.....	29
2.2.1. TOSTADORA DE TAMBOR	30
2.2.2. TOSTADORAS POR TURBO CONVECCIÓN	31
2.2.3. TOSTADORAS POR LECHO FLUIDIZADO	32
3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	34
4. LECHO FLUIDIZADO.....	36
4.1. PROPIEDADES DEL LECHO FLUIDIZADO.....	36
4.1.1. DENSIDAD DE PARTÍCULA (ρ_p)	36
4.1.2. DENSIDAD DEL LECHO (ρ_b)	37
4.1.3. POROSIDAD DEL LECHO O FRACCIÓN DE VACIO (ϵ).....	37
4.1.4. DIAMETRO EQUIVALENTE (d_{eq}).....	37

4.1.5. ESFERICIDAD DE UNA PARTÍCULA (ϕ).....	38
4.1.6. TAMAÑO DE PARTÍCULA (d_p).....	38
4.1.7. POROSIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN (ε_{mf}).....	38
4.2. CAIDA DE PRESIÓN DEL LECHO FLUIDIZADO	39
4.3. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN	42
4.4. VELOCIDAD DE SUSTENTACIÓN TOTAL	43
4.5. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN	43
4.6. TEMPERATURA DEL LECHO PARA EL TOSTADO DEL CAFÉ.....	46
5. DISEÑO CONCEPTUAL	48
6. DISEÑO DETALLADO	50
6.1. ELEMENTOS DE ENTRADA	51
6.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL LECHO.....	51
6.3. DISEÑO CÁMARA DE TOSTADO.....	52
6.3.1. ESFUERZOS MECÁNICOS CÁMARA DE TOSTADO	53
6.3.2. ESFUERZOS TERMICOS CÁMARA DE TOSTADO	54
6.3.3. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENICIONES PRINCIPALES DE LA CÁMARA DE TOSTADO	55
6.3.4. CALCULO DE VELOCIDAD DEL LECHO FLUIDIZADO	56
6.3.5. AISLAMIENTO CÁMARA DE TOSTADO	58
6.4. DISEÑO PLATO DISTRIBUIDOR.....	64
6.5. PÉRDIDAS EN TUBERIAS Y ACCESORIOS.....	69
6.5.1. PÉRDIDAS EN TUBERIAS.....	69
6.5.2. PÉRDIDAS EN ACCESORIOS.....	70

6.5.3. VÁLVULA CONTROL DE FLUJO	72
6.6. VENTILADOR.....	73
6.6.1. DISEÑO VENTILADOR	74
6.6.2. POTENCIA HIDRÁULICA DEL VENTILADOR	77
6.6.3. POTENCIA DE ARRANQUE VENTILADOR.....	77
6.7. CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	78
6.7.1. ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN.....	78
6.7.2. BALANCE DE ENERGÍA DEL LECHO.....	79
6.7.3. BALANCE DE ENERGÍA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	81
6.7.4. BALANCE DE ENERGÍA DE LA CÁMARA DE MEZCLA.....	82
7. PUESTA EN OPERACIÓN.....	86
7.1. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN.....	86
7.2. CALIBRACIÓN VELOCIDAD DEL LECHO FLUIDIZADO.....	88
8. PRUEBAS	90
8.1. PRUEBA DE CALENTAMIENTO HASTA LOS 250°C.....	90
8.2. PRUEBA DE TUESTE A 230°C POR 6,5 MINUTOS DE 141[g] DE CAFE.....	91
8.3. PRUEBAS DE TOSTADO DE CAFÉ	93
9. COSTOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN.....	95
10. CONCLUSIONES.....	96
OBSERVACIONES.....	98
BIBLIOGRAFIA	99
ANEXOS.....	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tostadora de café artesanal.....	16
Figura 2. Esquema tostadora de lecho fluido.....	19
Figura 3. Composición De La Cereza De Café.....	21
Figura 4. Beneficio del café	22
Figura 6. Tostadora De Tambor	31
Figura 5. Tostadora de granos con enfriador.....	30
Figura 7. Tostadora de turbo convección.....	32
Figura 8. Esquema de sistemas de lecho fluidizado.	33
Figura 9. Evolución de la pérdida de carga en el lecho ΔP_b con respecto de la velocidad superficial del gas u	40
Figura 10. Diagrama de clasificación de partículas según Geldart.....	44
Figura 11. Comportamiento de la temperatura del fluido.....	47
Figura 12. Esquema máquina de tostado de café por lecho fluidizado	50
Figura 13. Dimensiones principales de cámara de tostado.....	53
Figura 14. Red de resistencia térmica para un tubo aislado.	59
Figura 15. Conductividad térmica aislamiento.....	60
Figura 16. Tipos de distribuidor.....	65
Figura 17. Coeficiente de orificio en función del número de Reynolds	66
Figura 18. Geometría orificios plato distribuidor.....	67
Figura 19. Coeficiente de pérdidas (ζ) para accesorios.....	71
Figura 20. Válvula mariposa.....	72
Figura 21. Geometría ventiladores centrífugos.....	74
Figura 22. Número de alabes (Z) vs Desplazamiento de la envolvente (a)	76
Figura 23. Balance de energía cámara de tostado.....	80

Figura 24. Cámara de combustión.....	81
Figura 25. Cámara de mezcla.	82
Figura 26. Quemador con inyector.....	83
Figura 27. Tablero de control.....	87
Figura 28. Sistema de compuerta salida de producto.....	87
Figura 29. Válvula y quemador atmosférico.....	88
Figura 30. Tolva.....	88
Figura 31. Compuerta trampa de partículas.....	89
Figura 32. Curva de calentamiento tostadora por lecho fluidizado.....	91
Figura 33. Diseño y construcción tostadora de 141[g] de café.....	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Etapas y cambios físicos en el proceso de tostado.....	23
Tabla 2. Grados de tueste.....	26
Tabla 3. Niveles de tueste.....	27
Tabla 4. Tostadora de tambor o bombo Industrias FIMAR.	30
Tabla 5. Criterios de selección para tostadora de café.	34
Tabla 6. Criterio de selección para tostadoras de café por lecho fluidizado	35
Tabla 7. Clasificación de Geldart, de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.....	45
Tabla 8. Características físicas e hidrodinámicas café variedad Typica.....	52
Tabla 9. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304.....	53
Tabla 10. Resultados calculo de velocidades y flujo a temperaturas significativas (Pat = 90,7 [kpa]).....	57
Tabla 11. Resultado de propiedades para el diseño.....	58
Tabla 12. Resultados calculo aislamiento térmico cámara de tostado.....	63
Tabla 13. Calculo plato distribuidor	68
Tabla 14. Resumen del análisis CAE por elemento finitos (ver Anexo A).....	69
Tabla 15. Determinación de las pérdidas en la cámara de tostado.....	70
Tabla 16. Determinación perdida en tuberías auxiliares.....	70
Tabla 17. Determinación perdida en accesorios	72
Tabla 18. Valores de n para una válvula tipo mariposa.	72
Tabla 19. Cuantificación de pérdidas	74
Tabla 20: Calculo dimensional de ventiladores radiales.	75
Tabla 21. Número de alabes (Z) vs Desplazamiento de la envolvente (a).....	76
Tabla 22. Composición volumétrica del gas natural.....	78

Tabla 23. Resultados cálculo cámara de combustión.....	84
Tabla 24. Diámetros de inyectores Sobre coeficiente 0.9 y Presión de suministro normal.....	85
Tabla 25. Calentamiento tostadora por lecho fluidizado	91
Tabla 26. Tostado de café a 230°C por 6,5 minutos.	93
Tabla 27. Tostado de café	94
Tabla 28. Costos de fabricación.	95

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TOSTADORA DE CAFÉ POR LECHO FLUIDIZADO*

AUTOR: LUIS ARNULFO PINTO PINZÓN**

PALABRAS CLAVES: Tostado de café, Lecho fluidizado, densidad de partícula, densidad lecho, porosidad del lecho; velocidad de mínima fluidización.

DESCRIPCIÓN:

En Colombia el café es uno de los productos más representativos y es comercializado por los caficultores en pergamino, pero las condiciones actuales del mercado los ha obligado a incursionar en la venta del café tostado y molido, este fenómeno se ha ido incrementando y a generado la demanda de equipos como las tostadoras de café; que a nivel industrial en Santander, está tecnológicamente rezagado.

Tostar por lecho fluidizado es una técnica cuyo mecanismo de transferencia de calor es la convección, de alta eficiencia y aplicable al tostado de café. Requiere esencialmente de la cámara de tostado, ventilador o compresor que genere el flujo suficiente para hacer levitar los granos del lecho, un sistema de filtrado de partículas y una cámara de combustión que inyecte la suficiente energía calorífica para tostar los granos y compensar las pérdidas de calor.

El diseño de una tostadora por lecho fluidizado, parte de conocer el comportamiento físico e hidrodinámico del producto a tostar, como lo son; densidad de partícula, densidad lecho, esfericidad de partícula, porosidad del lecho y la porosidad de mínima fluidización. Estas permiten determinar la velocidad de mínima fluidización y la caída de presión en el lecho que son la base para el diseño y selección de todos los demás componentes.

Se desarrolló una tostadora de café por lecho fluidizado con sistema de recirculación, que permitió aprovechar los gases que salen de la cámara de tostado; determinar sus debilidades y fortalezas y su aplicabilidad en el proceso de tostado de café.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FLUIDIZED BED COFFEE ROASTER*

AUTHOR: LUIS ARNULFO PINTO PINZÓN**

KEYWORDS: Coffee roasting, fluidized bed, particle density, bed density, porosity of the bed; minimum fluidization velocity.

DESCRIPTION:

In Colombia coffee is one of the most representative products and is marketed by farmers on parchment, but current market conditions forced them to venture into the sale of roast and ground coffee, this phenomenon has been increasing since generated demand equipment such as coffee roasters; that industrial level in Santander, is technologically behind.

Toast fluidized bed is a technique whose mechanism of heat transfer is convection, high efficiency and applicable to coffee roasting. Requires essentially the roasting chamber, fan or compressor generating sufficient flow to levitate beads bed, a particle filtering system and combustion chamber inject sufficient heat energy to roast the beans and compensate for losses heat.

The design of a fluid bed toaster, of known physical and hydrodynamic behavior of the product to be toasted, as they are; particle density, bed density, sphericity particle bed porosity and porosity of minimum fluidization. These can determine the minimum fluidization velocity and the pressure drop in the bed which are the basis for the design and selection of all other components.

They developed a coffee roaster fluidized bed with recirculation system, which allowed reap the gases leaving the roasting chamber; determine their strengths and weaknesses and their applicability in the process of roasting coffee.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

Los caficultores colombianos están pasando por muchas dificultades debido al bajo precio del café, el alto precio de fertilizantes e insecticidas, las plagas como la broca, los nuevos y cada vez más exigentes estándares de calidad.

En el corregimiento de Cincelada-Coromoro, la Asociación de jóvenes productores Rurales, compuesta en su mayoría por caficultores, debido a la problemática mencionada, se las han ingeniado para poder vender en el mercado local el café tostado, molido y empacado, mediante la fabricación artesanal de tostadoras de café (ver Figura 1) lo que ha permitido el desarrollo de pequeñas microempresas, con gran acogida por ser un café de primera, sin conservantes y con un sabor más natural según clientes.

Figura 1. Tostadora de café artesanal



La asociación de jóvenes productores rurales de Cincelada y otros caficultores que están en esta tipo de empresa, manifiesta la necesidad de maquinaria más

asequible, que les ayude a mejorar la rentabilidad y calidad del tostado del café, que sea de fácil manejo y mantenimiento, y en lo posible se pueda fabricar en la industria local.

El tostado de granos es un proceso que ha estado evolucionando, en el mercado actual se habla de las tostadoras de lecho fluido como la mejor alternativa; por ser un sistema por convección; esto las hace eficientes energéticamente, ofrece tostados más homogéneos, evita el sobre-quemado superficial y reduce los tiempos de producción.

Actualmente se hacen tostadoras por lecho fluidizado a nivel industrial, y empresas como la Nacional de Chocolates ya llevan tiempo de haberlas implementado; mientras empresas como Industrias FIMAR, PENAGOS y otras metalmecánicas, persisten en la tradicional tostadora de tambor. Al preguntar el por qué, se hace evidente la falta de interés en investigación y desarrollo de este producto, aun cuando empresas como INGEC en Bogotá, ya incursionaron con sus tostadoras de lecho en suspensión con movimiento radial, las cuales son automatizadas y cuentan con un control PLC.

Diseñar una tostadora de café por lecho fluidizado, que trabaje con gas natural, de buen rendimiento térmico, con un control sencillo, buscando una manufactura que permita su fabricación en metalistería, es una alternativa que soluciona el problema base; la necesidad de una tostadora de café y proporciona una fuente de consulta para el diseño y construcción de estos equipos.

Con el fin de dar un empuje a la industria local, dar respuesta a diversas dudas sobre el tostado por lecho fluidizado, y poder observar los efectos que puede causar el tostar y re-circular los gases de combustión, se propone diseñar y construir un prototipo de tostadora de café por lecho fluidizado, teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Continuar con la misión y visión de la Universidad Industrial de Santander de atender y dar soluciones a los problemas y necesidades de nuestra comunidad, a través de un proceso de investigación y desarrollo de equipos para procesos como el tostado de café, beneficiando al sector agroindustrial.

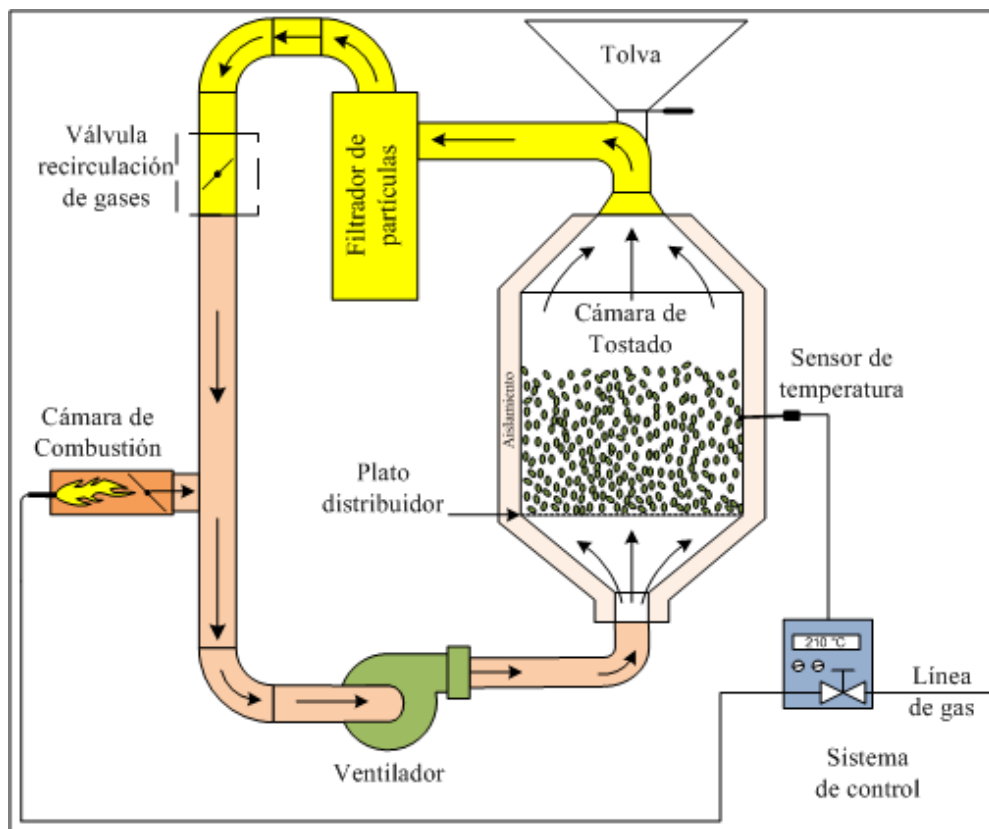
Objetivos Específicos

- Diseñar y construir una tostadora de lecho fluido para café con las siguientes características:
 - ✓ Capacidad mínima de 60 gramos de café por ciclo.
 - ✓ Un tiempo de tostado inferior a 18 minutos.
 - ✓ Combustible gas natural.
- Se diseñarán, construirán o seleccionarán los siguientes elementos (ver Figura 2.):
 - ✓ Cámara de tostado del café.
 - ✓ Ventilador(es) para la combustión y aceleración del lecho.
 - ✓ Cámara de combustión.
 - ✓ Válvula para recirculación de gases calientes.
 - ✓ Filtro de partículas.
 - ✓ Sensores de temperatura.
 - ✓ Válvula para control de flujo del gas.
- El control para la temperatura de la cámara de tostador se efectuará regulando manualmente la apertura de la válvula de flujo del gas a partir de la señal de un sistema digital de monitoreo de la temperatura de la cámara de tostado.

🖨️ Evaluar en el prototipo el costo por kilogramo de producto, la influencia de la temperatura vs tiempo de tostado en el tipo de tueste:

- ✓ Tueste Claro.
- ✓ Tueste medio.
- ✓ Tueste Oscuro.
- ✓ Tueste muy Oscuro.

Figura 2. Esquema tostadora de lecho fluido



1. CONCEPTOS BASICOS SOBRE EL CAFÉ

El árbol de café (cafeto), pertenece a la familia de las RUBIÁCEAS, género COFFEA. En esta familia hay más de 500 géneros y 6000 especies diferentes, casi todos son arbustos y árboles tropicales desde los 30 centímetros hasta 10 metros de alto. La gran mayoría son leñosos y sus hojas pueden ir desde al amarillo hasta el morado.

1.1. CAFES COMERCIALES

Los cafetos más importantes, comercialmente conocidas como especies mayores son el coffea Arábica y Coffea Canephora o café robusta.

- El 62,9% del café que se consume en el mundo pertenece a la especie Coffea Arábica y se cultiva particularmente en América y en algunas regiones de África y Asia, en zonas altas.
- El 37,1% restante del consumo está representado por la Coffea Canephora, la cual es sembrada principalmente en Vietnam y en África, en zonas bajas, por sus condiciones especiales y resistencia a la roya.

En Colombia se cultiva únicamente la especie coffea Arábica que produce una bebida suave y es de mayor aceptación en el mundo. Las variedades de café Arábica que se cultiva en Colombia son:

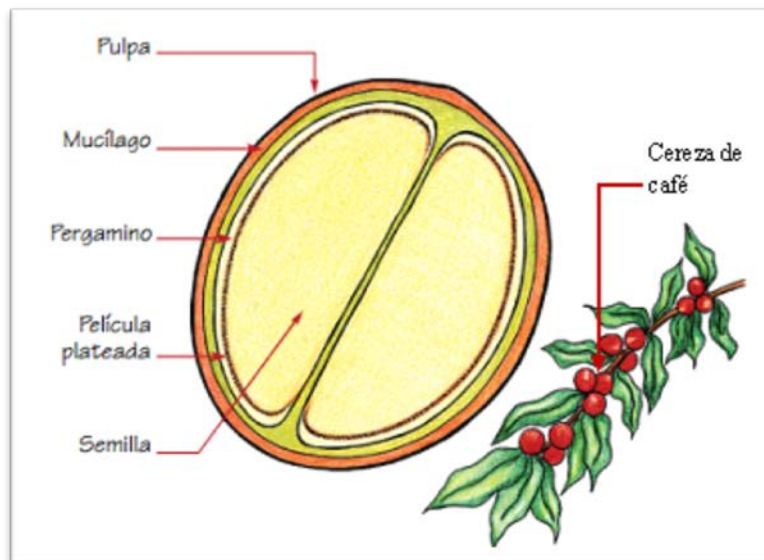
- Típica también llamada arábigo, pajarito o nacional.
- Borbón.
- Tabi que es una variedad de grano grande, tiene una excelente calidad y es ideal para obtención de cafés especiales.
- Caturra.
- Variedad Colombia.

1.2. COMPOSICIÓN Y PROCESAMIENTO DEL CAFÉ

La cereza de café está compuesta por dos o una semilla envuelta en la Pulpa (exocarpio) que al momento de recolectar del cafeto su color debe ser preferiblemente rojo o amarillo (ver Figura 3).

Al retirar la pulpa (despulpado), quedan granos recubiertos por una baba dulce casi translúcida que se conoce como Mucilago (mesocarpio), por tradición en Colombia éste es retirado por fermentación en tanques o medios mecánicos y se le llama Beneficio Húmedo (ver Figura 4), lo contrario es el Beneficio Seco que consiste en dejar secar la cereza para luego ser retirado en la trilladora.

Figura 3. Composición De La Cereza De Café.



Fuente: www.fundesyram.info

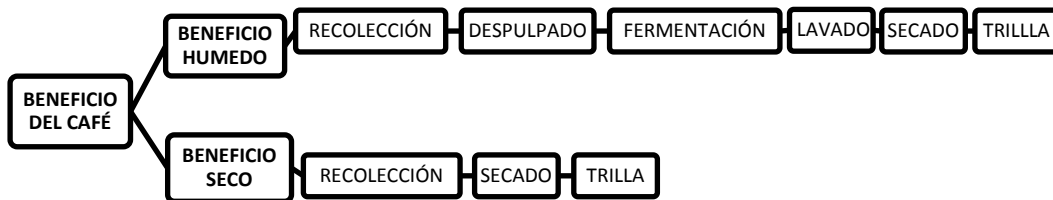
Al terminar la fermentación se lava y se pone a secar el café quedando de este proceso la semilla con una cascara amarilla opaca llamada pergamino, por ello se le llama café pergamino. En esta etapa los productores de café tienen dos

alternativas: trillarlo, tostarlo, molerlo, empacarlo y comercializarlo o simplemente venderlo.

El trillado consiste principalmente en retirar el pergamino por medios mecánicos y dejar la semilla; que es de color verde y está parcial o totalmente envuelta en una película plateada (ver Figura 3), en este punto recibe el nombre de almendra o café verde y debe tener una humedad promedio del 10 al 12% y es el insumo para la elaboración del café tostado, café soluble y de los extractos de café.

Todo el proceso desde la recolección del café hasta la trilla se conoce como Beneficio Del Café (ver Figura 4) y como se había mencionado existen el Beneficio Húmedo y el Beneficio Seco.

Figura 4. Beneficio del café



1.3. TUESTE DEL CAFÉ.

El tueste de café es un proceso en el cual intervienen mecanismos de transferencia de calor y masa simultáneamente. Dependiendo del tiempo y la temperatura, se inducen cambios en el café verde produciéndose los compuestos que originan el aroma característico, sabor, olor y cuerpo del café.

Durante el proceso de tueste, el grano va incrementado su temperatura y se produce los siguientes cambios físicos:

- El grano comienza a perder peso, entre un 15 y 20%, producto de pérdida de humedad y en una menor cuantía por la pirolisis de algunos componentes.

- El grano aumenta de volumen del 100 al 130% para tostados naturales dependiendo del tiempo de tostado y entre el 70 y 80% para torrefactados.
- Su color cambia pasando del amarillo verdoso a un marrón más o menos oscuro dependiendo del tipo de tueste que se desee.
- Debido a las altas temperaturas, sus azucares, grasas proteínas sustancias nitrogenadas no proteicas, ácidos... sufren importantes transformaciones químicas, tanto a nivel cuantitativo como cualitativo. Las transformaciones de los carbohidratos, las grasas y los ácidos, dan al café el sabor y aroma que lo han convertido en el rey de las infusiones y determina una propiedad muy importante que es la solubilidad que este tendrá después de molerse.

Tabla 1. Etapas y cambios físicos en el proceso de tostado

Temperatura	Cambio
100 °C	Coloración verde a amarilla, olor a pan tostado y desprendimiento de vapor de agua.
120-130 °C	Coloración castaño que pasa de pardo claro a oscuro.
150 °C	Despide olor a semillas tostadas sin apreciarse el aroma característico.
180 °C	El aroma característico del café comienza a desarrollarse. Desprendimiento de CO y CO ₂ . Los gases de combustión aparecen en volutas color blanco azuladas. Los granos adquieren una coloración color marrón y el volumen aumenta.
180-270 °C	El aroma es más abundante y el color más oscuro. Hay un aumento mayor en volumen, los granos crepitan y presentan una exudación brillante en la superficie.
270 °C	El desprendimiento del humo aumenta, los granos se ennegrecen y pierden el brillo; el volumen deja de aumentar.
300 °C	Granos negros y desmenuzables bajo ligera presión, desaparece el aroma por completo. El café se carboniza.

Fuente: <http://academic.uprm.edu/mmonroig/id49.htm>

En la Tabla 1, se resumen los cambios físicos a diferentes temperaturas durante el proceso de tostado del café.

La solubilidad del café se da esencialmente por el aumento del volumen y la disminución en la resistencia del grano, para el café arábigo la mayor caída de resistencia se da entre los 170-180°C, más allá de este rango de temperaturas hay poca variación.

1.3.1. Tipos y grados de tueste para el café

Comercialmente existen dos tipos de tueste:

- Tuestes torrefactados.
- Tuestes naturales.

1.3.1.1. Tueste torrefactado

En el mercado existe un tipo de café que es tostado con un 15 % de azúcar, que al fundirse rodea al grano y le da un color negro brillante. Este café se denomina torrefacto.

El café Torrefacto se suele utilizar mezclado con el de Tueste Natural con el fin de dar color negro al café y amargor. Es una adición que no produce ninguna mejora en las características de Aroma y Sabor de un buen café, sino al contrario las enmascara.

Este producto se dio por dos razones: el café una vez tostado, sobre todo si el tipo de tueste es alto; los aceites aromáticos del café en contacto con el oxígeno del aire se oxidan y dan al café un sabor rancio y cuando se llevaba café tostado en viajes de muchos días, el café no aguantaba sin estropearse.

1.3.1.2. Tueste natural

Cuando tostamos el café sin añadirle ningún aditivo, tenemos lo que se llama “café de tueste natural” (no confundir con los cafés tratados en el beneficio por vía seca, denominados así mismo como cafés Naturales). Este tipo de café es el utilizado con mayor frecuencia ya que mantiene intactas las características organolépticas que el maestro tostador ha querido transmitir en el blend¹

De este tueste el mercado ha definido tres grados de tueste:

- **TUESTE CLARO:** El tostado ligero, como el nombre lo implica, es el tono más pálido (color marrón claro) y es utilizado para las variedades más suaves de café muy preferido por los catadores profesionales porque debela más fácilmente las características naturales del grano. El tostado ligero deja un grano de un color marrón claro y no tendrá aceite en su superficie. Esto es porque los grano no se han tostado más que unos pocos minutos, lo que no es tiempo suficiente para que los aceites escapen. El sabor del café utilizado para un tostado ligero será ligeramente ácido y granoso. Contiene mayor concentración de cafeína, con mucho cuerpo y acidez. Se utiliza fundamentalmente en países de Norte y Centro Europa.
- **TUESTE MEDIO:** El tostado mediano tendrá un color chocolate y tendrá un sabor más marcado que el tostado ligero. Tendrán una superficie aceitosa y tendrán un buen balance entre acidez y aroma. El tostado medio suele ser dulce y sabroso, sin granos, tal como el tostado ligero. Este tipo de tostado es el más popular en Estados Unidos. Hay muchas variedades de tostado mediano llamadas americano debido a esta razón.
- **TUESTE OSCURO:** Esté posee un color marrón oscuro, con una cantidad moderada de aceite en su superficie. Estos granos explotarán dos veces antes de

¹ En todo el mundo a la mezcla de café se le llama *Blend*.

que se termine el proceso. Las notas de sabor incluyen las agridulces, chocolate, especiadas, ahumadas y los tonos caramelo. El tostado oscuro es bajo en acidez, pero tienen un cuerpo más fuerte en cuanto a sabor, comparado con los tostados medio y claro. Utilizado fundamentalmente en el área Mediterránea Francia, Italia y Sur de España y Portugal.

Con frecuencia también se habla de tueste intermedios como el tostado medio alto y tueste muy oscuro.

- TUESTE MEDIO ALTO: Tiene un sabor fuerte y aroma marcado y es de color marrón. Utilizado por compañías como The Italian Coffee Company.
- TUESTE MUY OSCURO: Los granos y el café preparado es oscuro, o incluso negro. Los granos se verán casi brillantes, debido al alto contenido de aceite en la superficie. Los sabores incluyen los agridulces, quemados y ahumados. Este tipo de tostado es también el menos ácido. Los tostados oscuros son muy populares en los países europeos y suelen ser utilizados para cafés fuertes, como el expreso.

En la Tabla 2, se muestra los grados generales de tueste y su aspecto característico después del tostado.

Tabla 2. Grados de tueste.

Tueste Claro	Tueste Medio	Tueste Medio Alto	Tueste Oscuro	Tueste Muy Oscuro
				

Fuente: <http://theitaliancoffeecompany.blogspot.com/2010/10/el-tostado-del-cafe.html>

Dentro de estos grados de tostado, debido a los gustos y preferencias de las regiones o países se han estructurado niveles, ver Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de tueste.

NIVEL	ASPECTO	CARACTERÍSTICAS
Tueste Canela	Tostado claro, tono canela claro	Sabor como de nuez pronunciado, alta Nivel de acidez del café
Tueste Americano	Tostado mediano, tono castaño	Sabor como de acaramelado
Tueste de la ciudad	Tostado mediano, marrón mediano sin aceites en la superficie	Sabor completo de café, con algo menos de acidez
Tueste Urbano	Marrón castaño, apenas más oscuro que el tueste de la ciudad	Sabor completo de café, con buen balance de azúcar y acidez
Vienna	Marrón oscuro, con rastros de aceite en la superficie	Sabor de tostado oscuro
Tueste Francés	Marrón oscuro, casi negro, aceitoso en la superficie	Amargo, sabor ahumado y aroma intenso
Italiano	Marrón chocolate amargo, con aceites en la superficie	Sabor quemado
Expreso	Tostado oscuro, de uso específico para máquinas de expreso	Sabor quemado, fuerte y dulce

Fuente: <http://cafeparaíso.tripod.com/tostion.htm>

1.3.2. Variables básicas del tueste

El tueste es un proceso de transferencia de calor y masa, donde la temperatura y el tiempo de tostado son inversamente proporcionales y son las variables básicas en la obtención de un tipo específico de tostado. Pero existen muchas otras variables que deben considerarse para obtener un tostado de café específico, como lo pueden ser: el origen, la humedad y la edad del grano, también puede influir el clima.

Durante el proceso de tostado la temperatura varía y los mecanismos de transferencia de calor (conducción, radiación y convección) marcan el ritmo al que cambian, por ello, la técnica y tecnología a usar define la rapidez con la que se puede variar la temperatura y de su correcta variación dependerá el éxito o fracaso en el tueste. Por ello algunos fabricantes de tostadoras han optado por controles PLC, con los que pueden definir recetas que garantizan el éxito y repetitividad del proceso.

La cantidad de granos a tostar define la capacidad que debe tener una tostadora de café y la eficiencia con que lo realiza define el costo de producir determinada cantidad de café tostado. La capacidad de la máquina debe tener en cuenta lo rápido que se deba cambiar la temperatura para el tipo de tueste.

Entre los 185 - 240°C está comprendida la zona de torrefacción, siendo la zona optima entre los 210 - 230°C con una duración de 12 a 15 minutos. Hay tostadoras de flujo continuo que pueden realizar el tueste en 5 minutos y otras de torrefacción lenta que tardan hasta 25 minutos. ²

² Tomado de <http://academic.uprm.edu/mmonroig/id49.htm>

2. SISTEMAS DE TUESTE

Las máquinas desarrolladas para el proceso de tostado de granos se clasifican en dos grandes grupos: tostadoras por carga y tostadoras continuas, estas últimas se diseñan para producciones rápidas elevadas y continuas, no para el tostado natural del café; por lo tanto, se describirán pero no se tendrán en cuenta para el análisis y selección del modelo de tostado y nos centraremos en las tostadoras por carga.

2.1. TOSTADORAS CONTINUAS

Utilizadas en producciones continuas de un mismo producto y elevada producción, con tiempos cortos en el proceso, entre 5 y 6 minutos para el tostado de café; utiliza grandes caudales y elevadas temperaturas con respecto a tostadoras por tandas. Existen tostadoras rotativas de calentamiento directo, tostadoras rotativas de calentamiento indirecto y las tostadoras de lecho fluidizado.

Las tostadoras continuas por lecho fluidizado son las más utilizadas en la industria por ser un sistema de transferencia de calor por convección; que trae como ventajas: bajo costo operativo al reducir el consumo de energía eléctrica y gas, disminución en los tiempos de tostado, uniformidad en el tueste, estabilidad en el proceso que permite su repetitividad.

2.2. TOSTADORAS POR TANDAS

Son las más apetecidas por medianas y pequeños productoras de café tostado, permiten una capacidad de tueste hasta de 600 [kg] por tanda. Dentro de esta gama encontramos las siguientes clases:

- ✓ Sistema de tambor.
- ✓ Sistema de turbo convección
- ✓ Sistema de lecho fluido.

2.2.1. TOSTADORA DE TAMBOR

Generalmente son tostadoras de conducción y comúnmente llamadas de torrefacción lenta. Son las más utilizadas por ser económicas y se fabrican en Santander (ver Tabla 4); generalmente requiere de un moto-reductor pequeño para hacer rotar el bombo, pero se debe tostar a bajas temperaturas y prolongados tiempos de tostado con el fin evitar sobre-quemar la superficie del grano, esto incrementa los costos de operación y los tiempos de producción.

Tabla 4. Tostadora de tambor o bombo Industrias FIMAR.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
CARACTERÍSTICAS	MODELO
	TG-30
CAPACIDAD	30 Kilos/hora
TIEMPO APR. C/U OPERAC.	25 a 30 minutos
TEMPERATURA PROMEDIO	180 a 250 °C
COMBUSTIBLE	Gas propano o natural
ENCENDIDO	Eléctrico
COLOR DE LA LLAMA	Azul
R.P.M DEL CILINDRO	40-49 RPM
R.P.M DEL ENFRIADOR	17 RPM
POTENCIA MOTORES	1/4 HP
TRANSMISION DE REDUCTOR	Piñón de cadenas
CADENAS REFERENCIA	428 XL Z=13 y 42
VOLTAJE MOTOR	221 ó 110 Voltios
VOLTAJE VÁLVULA SOLENOIDE	111 ó 220 Voltios
PRECIO	18'687 500



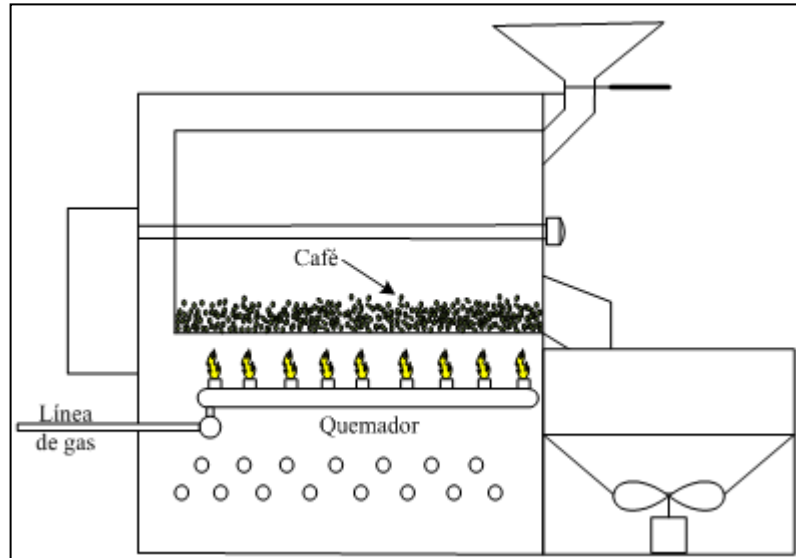
Figura 5. Tostadora de granos con enfriador.

Fuente: Industrias FIMAR.

Utiliza un sistema sencillo para el tueste del café (ver Figura 6), donde el tambor gira revolviendo el producto, mientras unos quemadores ubicados en la parte inferior calientan la superficie lo suficiente para lograr tostar el contenido dentro del bombo.

Realizan un tueste homogéneo, pero debido al contacto entre los granos y la pared caliente del tambor se presenta un sobre-quemado en la superficie de los granos tostados.

Figura 6. Tostadora De Tambor



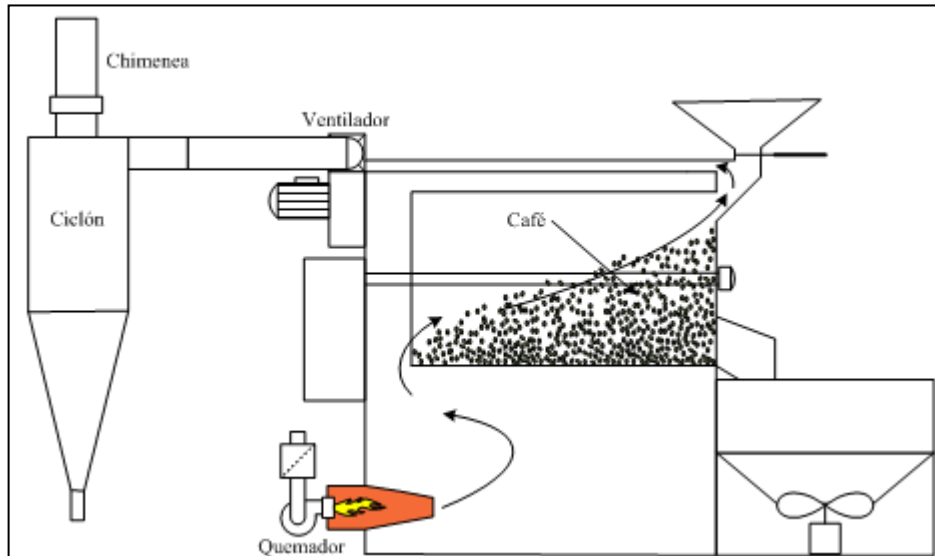
2.2.2. TOSTADORAS POR TURBO CONVECCIÓN

Este tipo de tostadoras es similar al de tambor, solo que se calientan los gases y se hacen entrar al bombo con la velocidad suficiente para fluidizar los granos mientras el tambor se encuentra girando (ver Figura 7).

Aun cuando es un sistema por convección, el calentamiento de la superficie interior del bombo y el contacto de los granos no se pueden evitar, derivando en tueste por conducción, convirtiéndolo en un sistema mixto donde prevalece la convección.

Produce un tostado homogéneo y se reducen considerablemente el sobre-quemado superficial y los tiempos de tostado; pudiéndose tostar café en 5 minutos.

Figura 7. Tostadora de turbo convección.



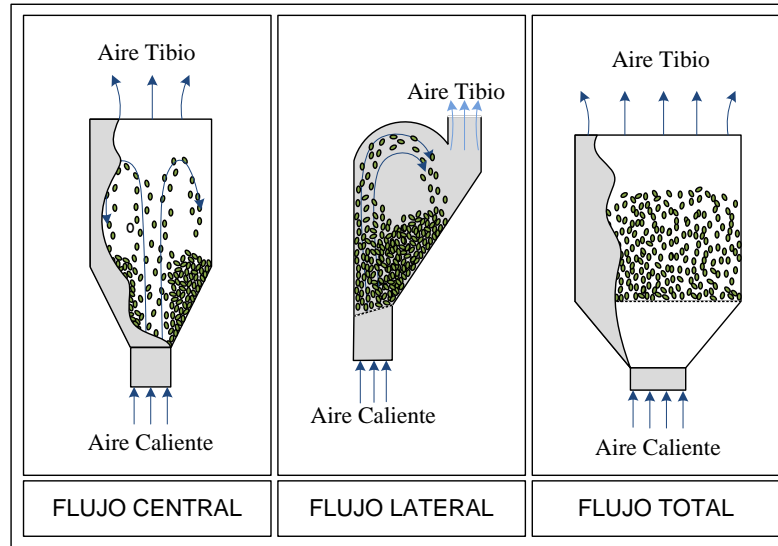
2.2.3. TOSTADORAS POR LECHO FLUIDIZADO

El producto está en una cámara estática, que tiene perforada únicamente la base, por donde se inyecta aire caliente a presión, que provoca que los granos fluidicen y a su vez se tuesten, en el proceso la transferencia de calor del gas hacia las partículas contenidas en el lecho se da por convección forzada.

Las tostadoras de lecho fluido ofrecen flexibilidad para realizar diferentes tipos de tueste, facilidad de control, excelente eficiencia energética, realiza un proceso estable permitiendo su repetitividad. A nivel industrial y de investigación (ver Figura 8) se han desarrollado varios sistemas, entre ellos los más frecuentes y sencillos son:

- Tostadora de flujo centrado.
- Tostadora de flujo lateral.
- Tostadora de flujo total.
- Tostadora de vibro-fluidización.

Figura 8. Esquema de sistemas de lecho fluidizado.



Las tostadoras de flujo lateral y centrado no requieren de un alto flujo de aire como las de flujo total, pero estacionan el producto a un lado del lecho fluido lo que puede constituir una deficiencia que se verá reflejada en un mayor tiempo de tostado y consumo de energía, las tostadoras de flujo total requieren de una mayor superficie de fluidización, esto garantiza que no haya estacionamiento del producto, disminuye los tiempos de tostado y reduce el consumo de potencia al mantener los granos en levitación, las tostadoras de vibro-fluidización utilizan el mismo concepto de las de flujo total solo que agregándole un sistema vibratorio con el fin de obtener mejor fluidización con un menor uso del lecho fluido.

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se requiere que el sistema de tostado sea por convección para que cumpla con actuales requerimientos nacionales e internacionales, se adapte a los tuestes naturales para pequeñas y medianas producciones, ofrezca una mejor eficiencia energética y contribuya al mejoramiento del proceso de tostado.

De la Tabla 5, se puede observar que las tostadoras por lecho fluidizado se acomodan a los requerimientos; por ser un sistema netamente por convección, ofrece un tueste más homogéneo, reduce el sobre-quemado en la superficie del grano, se logra un buena ahorro energético, se reducen los tiempos de producción, son aptas para manejar capacidades muy altas y aceptables para capacidades bajas.

Tabla 5. Criterios de selección para tostadora de café.

CRITERIO	Tostadora de tambor	Tostadora de turbo convección	Tostadoras de lecho fluidizado
Sistema de tueste	Conducción	Conducción + convección	Convección
Capacidades	Altas, medias y bajas	Altas, medias y bajas	Altas, medias y bajas
Tiempo de tostado	Alto	Bajo	Muy bajo
Tueste	Todos	Todos	Todos
Costo de Fabricación	Bajo	Alto	Bajo
Mantenimiento	Bajo	Alto	Bajo

Ahora la atención se concentra en decidir qué modelo de tostadora por lecho fluidizado se nos acomoda más a los requerimientos para el tostado de café, teniendo en cuenta que se busca evitar al máximo el sobre-quemado en la

superficie del grano; disminuyendo de esta forma la concentración de acrilaminada, adicionalmente se busca disminuir los tiempos de producción y el costo de fabricación y mantenimiento.

Tabla 6. Criterio de selección para tostadoras de café por lecho fluidizado

CRITERIO	FLUJO CENTRADO RECIRCULADO	FLUJO LATERAL	FLUJO CENTRADO TOTAL	VIBROFLUIDIZACIÓN
Estacionamiento Del Grano	Si	Si	No	No
Contacto con superficie caliente	Bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo
Costo de operación	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Costo de Fabricación	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Mantenimiento	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Las tostadoras de flujo centrado total y vibrofluidizado son los modelos en los que se evita el estacionamiento de los granos, pero en las tostadoras de vibrofluidizado el producto tiene mayor contacto con las superficies calientes debido a la reducción de la velocidad del lecho para permitir la acción del sistema vibrante, el costo de operación, fabricación y mantenimiento de la tostadora de flujo centrado total es menor.

4. LECHO FLUIDIZADO

La fluidización es una operación en la que las partículas generalmente pequeñas son llevadas a un estado semejante a un fluido por medio de un gas o líquido que lo atraviesa.

Cuando estos fluidos pasan a través de un lecho de partículas a una velocidad suficiente para suspender y/o dispersar a las mismas e impartirles un movimiento turbulento se tiene un lecho fluidizado (Kunii y Levenspiel, 1991).

4.1. PROPIEDADES DEL LECHO FLUIDIZADO

Existen propiedades del lecho y propiedades de las partículas, las cuales son propiedades necesarias para la descripción y cálculo del lecho fluidizado.

4.1.1. DENSIDAD DE PARTÍCULA (ρ_p)

La densidad de partícula se define como la relación de la masa de una muestra con el volumen ocupado por los granos (excluyendo el aire intergranular) de la muestra.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (4.1)$$

Dónde:

m_p , es la masa de una partícula.

V_p , es el volumen de la partícula (excluye el aire intergranular).

4.1.2. DENSIDAD DEL LECHO (ρ_b)

La densidad del lecho se define como la relación de la masa de la muestra m_b , para el volumen ocupado V_b por la muestra a granel y se expresa en las unidades de kg/m^3 . El volumen de la masa incluye el volumen de aire intergranular y grano.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (4.2)$$

4.1.3. POROSIDAD DEL LECHO O FRACCIÓN DE VACIO (ε)

La porosidad se define como la relación entre el volumen ocupado por el aire intergranular al volumen total de la muestra a granel, el volumen intergranular. Por lo general, la porosidad se calcula a partir de las densidades a granel y de partículas de una muestra, por lo tanto puede ser considerado como una cantidad derivada.

$$\varepsilon = \frac{V_b - \sum V_p}{V_b} \quad (4.3)$$

Como V_p es el volumen de la partícula, la expresión $\sum V_p$ representa el volumen del lecho excluyendo los espacios entre partículas. Al suponer un V_p promedio y despejar de las expresiones (4.1) y (4.2) se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho_p = (1 - \varepsilon)\rho_b \quad (4.4)$$

4.1.4. DIAMETRO EQUIVALENTE (d_{eq})

Una esfera cuyo volumen es igual al volumen de un grano se define como una esfera equivalente. El diámetro de la esfera de volumen equivalente se define como el diámetro equivalente del núcleo.

El diámetro equivalente se calcula a partir del volumen medido como:

$$d_{eq} = \frac{6 * V_{uc}}{\pi} \quad (4.5)$$

Dónde: V_{uc} es el volumen unitario del grano.

4.1.5. ESFERICIDAD DE UNA PARTÍCULA (ϕ)

En un lecho, por facilidad se supone que las partículas son redondas, pero no es la realidad, las partículas son de irregular geometría y un parámetro que nos permite definir dicha geometría es la esfericidad (ϕ) la cual se define de la siguiente forma:

$$\phi = \left(\frac{\text{Superficie de una esfera}}{\text{Superficie de la partícula}} \right)_{\text{Igual Volumen}} \quad (4.6)$$

La forma práctica de calcular la esfericidad de una partícula, sería asumiendo que es una elipsoide de longitud (a), ancho (b) y alto (c), que se asumen como las dimensiones del grano y con la expresión (Mohsenin, 1970):

$$\phi = \frac{(abc)^{(1/3)}}{a} \quad (4.7)$$

4.1.6. TAMAÑO DE PARTÍCULA (d_p)

Si la partícula es esférica se emplea su diámetro, para partículas no esféricas, el tamaño viene expresado por:

$$d_p = \phi d_{eq} \quad (4.8)$$

4.1.7. POROSIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN (ϵ_{mf})

La porosidad del lecho cuando comienza la fluidización, recibe el nombre de porosidad mínima de fluidización (ϵ_{mf}). Esta porosidad depende de la forma y el

tamaño de las partículas. Para partículas esféricas ε_{mf} está comprendida entre 0,4 y 0,5, aumentando ligeramente al disminuir el tamaño de las partículas. En ausencia de datos para materiales específicos, se puede estimar ε_{mf} , mediante las siguientes ecuaciones empíricas sugeridas por Wen y Yung:

$$\frac{1}{\phi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad \text{y} \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (4.9)$$

Experimentalmente se puede medir la altura inicial del lecho (L) y la altura en condiciones de mínima fluidización (L_{mf}) y determinar con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - [L * (1 - \varepsilon) / L_{mf}] \quad (4.10)$$

4.2. CAIDA DE PRESIÓN DEL LECHO FLUIDIZADO

Un gas que se mueve en sentido ascendente a través de un lecho fijo de partículas experimenta una pérdida de carga, debida a la resistencia por fricción, que aumenta con el incremento de su velocidad. No obstante, se alcanza un punto donde el empuje que el gas ejerce sobre las partículas se iguala con el peso aparente de éstas en el lecho. En este punto las partículas se encuentran sustentadas por el gas, de modo que la separación entre ellas aumenta y el lecho comienza a fluidizar.

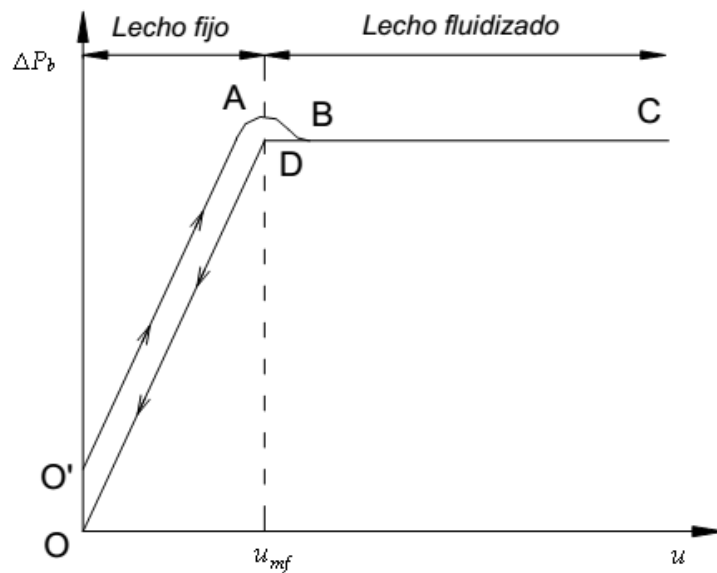
Por lo tanto, el comienzo de la fluidización está asociado a una pérdida de carga del gas a lo largo del lecho que es igual al peso aparente de todas sus partículas, por unidad de área de lecho perpendicular a la dirección del peso. En general se puede escribir:

$$\Delta P = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad (4.11)$$

Generalmente, la pérdida de carga medida a través del lecho evoluciona con la velocidad superficial del gas de forma muy similar a la mostrada en la gráfica de la Figura 9, la curva tiene diferente forma según si se varía la velocidad del gas en sentido ascendente (O'ABC) o descendente (ODC), presentando una pequeña histéresis.

El hecho de existir mayor pérdida de carga en el tramo O'AB de la curva tomada en sentido ascendente se debe a la necesidad de vencer las fuerzas de atracción entre las partículas del lecho, cuando se incrementa paulatinamente la velocidad del gas desde cero. En la curva de sentido descendente no se da este comportamiento pues se parte del estado de lecho fluidizado, habiéndose vencido por tanto esas fuerzas entre partículas.

Figura 9. Evolución de la pérdida de carga en el lecho ΔP_b con respecto de la velocidad superficial del gas u .



Fuente: BARREIRA MORENO, Víctor Manuel y SOBRINO FERNÁNDEZ, Celia.
Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado.

Como se ha dicho, los tramos BC/DC definen el comportamiento del lecho en estado fluidizado y en ellos es aplicable la Ecuación (4.11). Por otra parte, los tramos O'A/OD corresponden al lecho fijo, donde el movimiento relativo entre las partículas es nulo y su separación permanece constante. En este tramo, la relación entre la pérdida de carga y la velocidad del gas se determina mediante la expresión propuesta por Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu_g u_o (1 - \varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho_g u_o^2 (1 - \varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (4.12)$$

[Componente laminar] [Componente turbulento]

Siendo u_o la velocidad superficial del gas, μ_g su viscosidad dinámica y d_p el diámetro de partícula en un lecho con fracción de vacío en estado fijo, ε . La ecuación de Ergun se obtuvo de manera experimental en un amplio rango de tamaños y formas de partícula, reflejando las componentes laminar y turbulenta del gradiente de presión. En condiciones de flujo laminar domina el primer término de la ecuación y, entonces, la pérdida de carga aumenta de forma lineal con la velocidad superficial del gas y es independiente de su densidad. En condiciones de flujo turbulento domina el segundo término y la pérdida de carga aumenta con el cuadrado de la velocidad, siendo ahora independiente de la viscosidad del gas. En términos del número de Reynolds (Ecuación (4.13)) se considera flujo completamente laminar cuando $Re < 20$ y flujo completamente turbulento para $Re > 1000$. Pero en la práctica, se utiliza generalmente la expresión de Ergun para determinar la pérdida de carga en el lecho fijo para todo el rango de condiciones de flujo, sin atender al régimen en que se esté evaluando.

$$Re_p = \frac{u_o d_p \rho_g}{(1 - \varepsilon) \mu_g} \quad (4.13)$$

4.3. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

La velocidad de mínima fluidización, u_{mf} , es la velocidad superficial del gas a la que el lecho comienza a fluidizar. Experimentalmente, se ha comprobado que esta velocidad es dependiente del tamaño y la densidad de las partículas del lecho, de las propiedades del gas fluidizante y de las condiciones de presión y temperatura en las que se lleva a cabo el proceso.

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado. De este modo, es posible obtener una expresión para su cálculo igualando la expresión de pérdida de carga en el lecho fijo (Ecuación (4.11)), con la expresión de pérdida de carga en el lecho fluidizado (Ecuación (4.12)). Así, se obtiene:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g = 150 \frac{\mu_g u_o}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} + 1,75 \frac{\rho_g u_o^2}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \quad (4.14)$$

[Componente laminar]

[Componente turbulento]

En la expresión anterior se determinan la velocidad de mínima fluidización, conocidas las propiedades de las partículas y del fluido, además de la fracción de vacío del lecho fluidizado. Cuando no se pueden realizar pruebas de fluidización para obtener ε_{mf} , se puede aproximar a la fracción de vacío de (ε).

Teniendo en cuenta si el flujo es laminar o turbulento, podemos discriminar y despreciar los efectos ya sean del flujo laminar o turbulento, por lo tanto:

Flujo laminar

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{150 \mu_g} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) \quad Re_p < 20 \quad (4.15)$$

Flujo turbulento

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p}{1.75} \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \cdot g \cdot \varepsilon_{mf}^3 \quad Re_p > 1000 \quad (4.16)$$

4.4. VELOCIDAD DE SUSTENTACIÓN TOTAL

También conocida como velocidad superficial de operación (u), es la velocidad a la cual el lecho de partículas está totalmente soportado por el fluido y generalmente se toma como tres veces el valor de la velocidad mínima de fluidización para garantizar que la cantidad de partículas arrastradas sea mínima

$$u = 3 \cdot u_{mf} \quad (4.17)$$

Durante el proceso de tostado se producen cambios en las propiedades físicas e hidrodinámicas del producto que pueden causar cambios significativos en los requerimientos de velocidades del lecho y se requiera cambiar durante el proceso.

4.5. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN

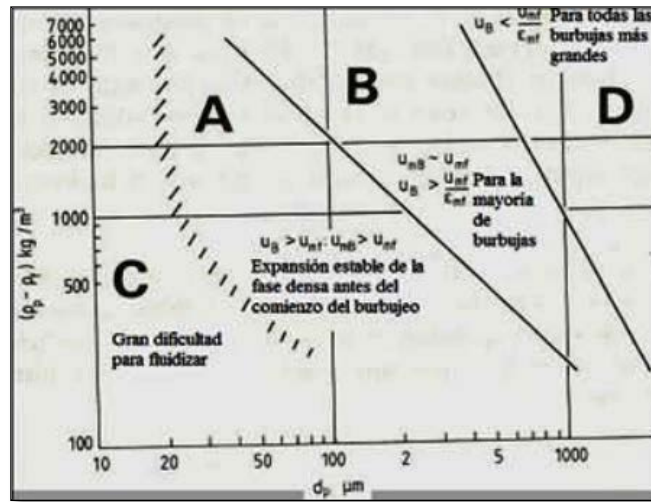
La capacidad y el modo en que las diferentes partículas fluidizan varían según su naturaleza, Geldart clasifica las partículas en cuatro grupos distintos, atendiendo a sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. La clasificación de Geldart (ver Figura 10 y Tabla 7) es la referencia que actualmente más se utiliza en todos los campos de la tecnología de partículas.³

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante, a la velocidad de mínima fluidización, seguido de un estado burbujeante a medida que la velocidad de fluidización

³ D. Geldart, Types of Gas Fluidization, Powder Technology, (1973)

aumenta, se clasifican dentro del Grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones muestran únicamente fluidización burbujeante forman el Grupo B. El Grupo C, lo constituyen partículas muy finas y cohesivas, que son incapaces de fluidizar en sentido estricto. Finalmente, en el Grupo D; se incluyen aquellas partículas de gran tamaño que se caracterizan por formar lechos de chorro.

Figura 10. Diagrama de clasificación de partículas según Geldart.



Fuente: Kunii y Levenspiel. Fluidization Engineering.

Las propiedades de fluidización de una partícula en aire se pueden predecir si se clasifica en uno de los cuatro grupos. No obstante, se debe tener en cuenta que la operación a temperaturas y presiones por encima de la ambiente puede suponer que una partícula, en concreto, muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece. El estado de fluidización burbujeante es el que más comúnmente se encuentra en los sistemas de uso comercial, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del Grupo A es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo (u_{mb}).

Tabla 7. Clasificación de Geldart, de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización. Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a u_{mf}	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, Cemento	Graba, Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de des aireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbuja sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Fuente: Víctor B. Cecilia S., Estudio Hidrodinámico de un Lecho Fluidizado.

En las partículas del Grupo A, donde $u_{mb} > u_{mf}$, las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja alcanzado. De ahí que la fluidización sea suave y de buena calidad.

En las partículas de los Grupos B y D, con $u_{mb} = u_{mf}$, las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado (sólo el definido por el diámetro del lecho). Por ello la fluidización es de peor calidad y lleva asociada grandes fluctuaciones de presión.

En el Grupo C, las fuerzas entre partículas son grandes comparadas con las fuerzas de inercia debidas al gas de fluidización. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y la fluidización como tal no se produce. No aparecen burbujas sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

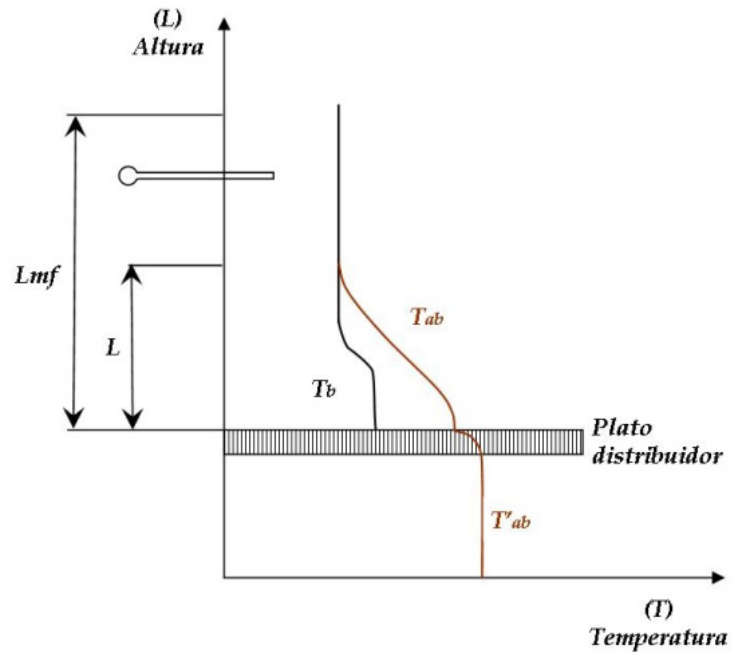
4.6. TEMPERATURA DEL LECHO PARA EL TOSTADO DEL CAFÉ

En lechos fluidizados la transferencia de calor ocurre entre las partículas y el medio fluidizante, las temperaturas de las partículas y el fluido no son la misma, siendo difícil poder determinar una medición de la temperatura por separado para la partícula y el fluido dentro de un lecho fluidizado, esto hace que se recurra a determinar una temperatura promedio entre el fluido y la partícula. Este valor se puede obtener insertando un termómetro en el lecho en la sección ($L_{mf} - L$), ver Figura 11), cuya lectura indica la temperatura de lecho o temperatura de tueste, la cual es utilizada como parámetro de diseño.

La temperatura de tueste, se decide según el grado de tueste que se desee, en general se establece una temperatura tueste, al entrar el café la temperatura desciende y se debe aumentar lo más rápido posible y, mantener por el tiempo que se requiera para el tueste.

En la Tabla 1, se muestra las etapas y cambios que sufre el grano de café a medida que se le incrementa la temperatura, a partir de los 130°C comienzan a surgir los cambios más significativos en el color y el volumen; pero a 250°C se a carbonizado el grano, es factible tomarla como temperatura de diseño, siendo más conservativos se agregaran diez grados (10°C), por tanto la temperatura de diseño en el lecho fluido para el café es $T_b = 260^\circ\text{C}$.

Figura 11. Comportamiento de la temperatura del fluido



Dónde:

T'_{ab} , Temperatura de entrada del aire a la cámara tostado.

T_{ab} , Temperatura del aire dentro del lecho fluidizado.

T_b , Temperatura del lecho fluidizado.

L , longitud del lecho

L_{mf} , longitud del lecho fluidizado

5. DISEÑO CONCEPTUAL

Este proyecto busca obtener la mayor información posible sobre el diseño y construcción de tostadoras de café, para permitir el desarrollo de esta tecnología en pequeñas y medianas producciones, por lo tanto y para ser más amplios; se diseña la tostadora de café por lecho fluidizado con un circuito cerrado que permitirá aprovechar los gases de escape, ahorrándose una parte de esta energía que se desecha normalmente.

Al evaluar máquinas similares se llegó al diseño conceptual condensado en la Figura 2, el cual nos sugiere el diseño y construcción de los siguientes elementos.

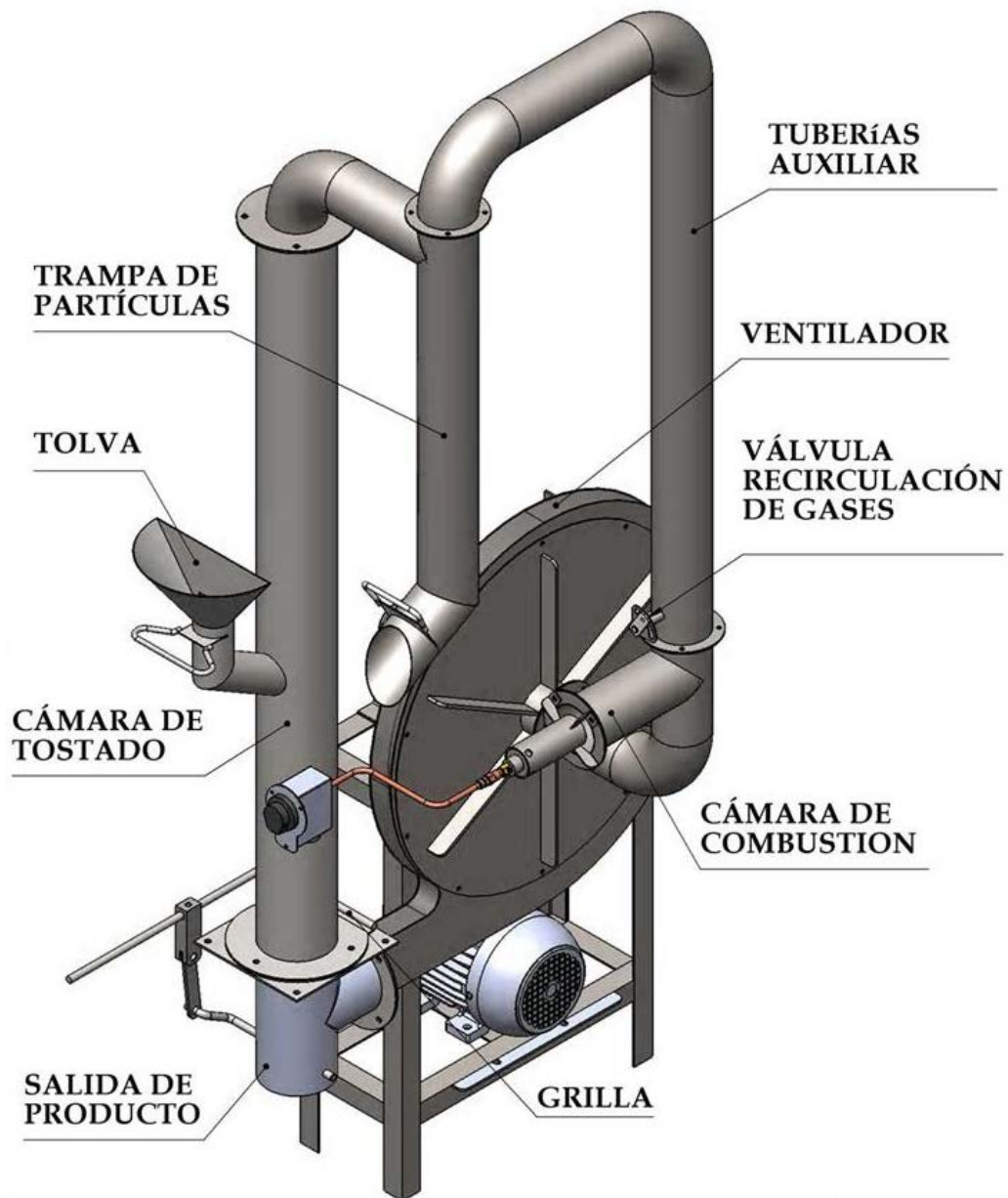
- 1) **Cámara de tostado:** Es el lugar donde se deposita el producto a tostar, que proviene de una tolva que se ubicará en la parte superior, el lecho fluidizado entrara por la parte inferior atravesara el plato distribuidor (grilla), elevara los granos y los mantendrá levitando, para salir por la parte superior y dirigirse al sistema de filtrado de partículas para re-circular por el sistema. El producto ya tostado saldrá por una compuerta que se ubicará estratégicamente para que con ayuda del lecho fluidizado desocupe la cámara de tostado.
- 2) **Plato distribuidor:** Su función es distribuir homogéneamente el fluido o gas fluidizante en la cámara de tostado, para ello debe causar una caída de presión suficiente para retener y distribuir el flujo.
- 3) **Filtro de partículas:** Generalmente se usan los ciclones, en este prototipo el objetivo del filtro se puede simplificar a retener las partículas grandes en especial los granos de café que por su tamaño y peso es suficiente con un cambio de dirección para quitarle a la partícula la energía cinética y producir su caída a un deposito.

- 4) **Válvula de recirculación de gases:** Esta válvula estrangula los gases provenientes de la cámara de tostado para permite la entrada del aire necesario para la combustión y ayuda a regular el aire que circula en el lecho.
- 5) **Ventilador:** Se requiere para incrementar y mantener la velocidad del lecho fluido y proporcionar la energía cinética que mantendrá levitando los granos contenidos en la cámara de tostado, con un diseño especial.
- 6) **Cámara de combustión:** Sistema que se encarga de realizar la mezcla aire combustible para una posterior combustión. Será ubicado después de la válvula de recirculación de gases y antes del ventilador para garantizar la succión de los gases de combustión.
- 7) **Sistema de control:** Constará esencialmente de un sensor de temperatura (termo-cupla) ubicado en la cámara de tostado, conectado al sistema digital para el monitoreo de la temperatura del lecho y una válvula manual para el controlar del flujo de gas.

6. DISEÑO DETALLADO

En esta fase se realizó inicialmente los cálculos previos partiendo de los datos de entrada tomados de los objetivos; se propuso un diseño inicial y se le efectuaron mejoras hasta llegar al diseño mostrado en la Figura 12.

Figura 12. Esquema máquina de tostado de café por lecho fluidizado.



6.1. ELEMENTOS DE ENTRADA

Teniendo en cuenta los objetivos propuestos, los elementos de entrada son:

- Producto a tostar: café.
- Su capacidad debe ser mayor o igual a los 60[g] por tanda.
- Tiempo de tostado debe ser menor a los 18[min].
- Combustible: gas natural.

Consideraciones de diseño:

- La temperatura de diseño máxima es de 260°C
- Como los gases que se encuentra re-circulando son en su mayoría aire, Se despreciarán los gases de combustión que entran al sistema y se asumirá que el gas del lecho es aire.

6.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL LECHO

Aun cuando las propiedades físicas e hidrodinámicas se pueden calcular, es mejor realizar pruebas que permitan corroborar los resultados y observar el comportamiento del lecho a medida que el proceso de tostado avanza para estudiar la posibilidad de variar la velocidad de flujo durante el proceso; esto implica tener una tostadora por lecho fluidizado de pruebas.

En nuestro caso, hay un estudio preliminar, Realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana (México D.F.) titulado: **Propiedades Físicas e Hidrodinámica de la Fluidización del Café Verde y Tostado (Coffea Arábica L. variedad typica)**⁴. Teniendo en cuenta que en Colombia uno de los cafés que se mejor, las propiedades físicas e hidrodinámicas son bastante similares, por lo tanto

⁴ Sánchez Ramirez, JULIO, y otros. Propiedades Físicas e hidrodinámica de la fluidización del café verde y tostado (Coffea arábica L. var. typica). EN: Naturaleza y desarrollo. Enero-Junio, 2003, vol. 1 no. 1, p. 41 - 49.

tomamos como base de cálculo el resumen de propiedades extraídas de este estudio (ver Tabla 8).

Tabla 8. Características físicas e hidrodinámicas café variedad Typica.

CARACTERISTICAS FÍSICAS FISICAS DEL CAFÉ		
Peso unitario [kg]	Wu	0,00016
Volumen medio unitario [m ³]	Vu	0,00013
Densidad de partícula [kg/m ³]	ρp	1222
CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DEL CAFÉ		
Densidad del lecho [kg/m ³]	ρb	640,12
Esfericidad	φ	0,67
Diámetro equivalente [m]	deq	0,0064
Porosidad del lecho empacado	ε	0,51
Porosidad en condiciones de mínima fluidización	εmf	0,63
Velocidad mínima de fluidización experimental a 26°C [m/s]	u _{mf@26°C}	2

Fuente: Propiedades Físicas e Hidrodinámica de la Fluidización del Café Verde y Tostado (Coffea arábica L. var. typica). Universidad Autónoma Metropolitana (México D.F.).

Según la caracterización física e hidrodinámica (Tabla 8), el café clasifica en el tipo D (Figura 10); son eruptivas y tienen una fluidización errática en lechos muy profundos, por lo tanto y siguiendo las sugerencias realizadas durante el estudio hidrodinámico del café , se tomará la relación $L/D = 0,3$ (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

6.3. DISEÑO CÁMARA DE TOSTADO

La cámara de tostado es el sistema que está en continuo contacto con el producto, en este caso el café, por ser para el consumo humano debe cumplir ciertos requerimientos sanitarios, lo cual obliga a fabricar en materiales inertes a las

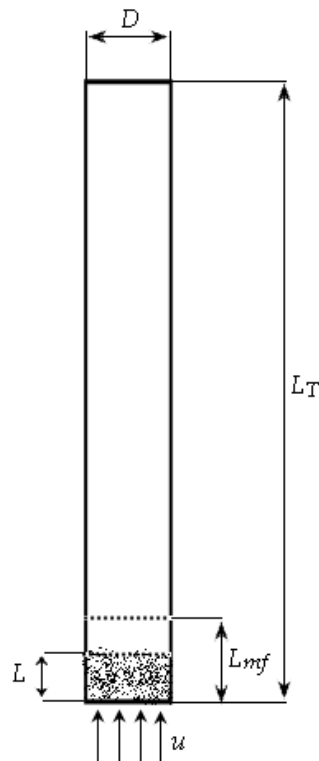
reacciones químicas dadas durante el proceso, por ello se construye totalmente en acero inoxidable AISI 304 que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 9. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304.

Límite de fluencia	235MPa
Resistencia última	568 MPa
Módulo de elasticidad	189 GPa
Porcentaje de alargamiento en 2"	55%

Fuente: <http://www.imporinox.com>

Figura 13. Dimensiones principales de cámara de tostado.



6.3.1. ESFUERZOS MECÁNICOS CÁMARA DE TOSTADO

Se calcula para soportar la presión máxima del sistema $P_{max} = 2800[\text{Pa}]$ (ver sección 6.5), teniendo en cuenta que la cámara de tostado se fabricara de un tramo de tubo

de Ø4" calibre 15 (espesor de 1,9mm), por tanto el diámetro de lecho es $D = 0,0978\text{m}$.

Considerando la cámara como un cilindro de pared delgada tenemos que el esfuerzo circunferencial es:

$$\sigma_c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \quad (6.1)$$

$$\sigma_c = \frac{2800[\text{Pa}] * 0,0978[\text{m}]}{2 * 0,0019[\text{m}]}$$

$$\sigma_c = 72,063 [\text{MPa}]$$

El esfuerzo longitudinal es la mitad del esfuerzo circunferencial, por lo tanto, se puede decir que el tubo con material AISI 304 de 1,9mm de espesor soporta ampliamente los requerimientos de diseño.

6.3.2. ESFUERZOS TERMICOS CÁMARA DE TOSTADO

Las paredes de las tuberías se calientan por el flujo de los gases, pero debido a la diferencia de temperatura entre la pared interna y la externa (ver Figura 14), se producen esfuerzos térmicos que se pueden determinar con la ecuación (6.2).

$$\sigma_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (6.2)$$

El cambio de temperatura $\Delta T = 0,042[^\circ\text{C}]$, lo determinamos por medio de las ecuaciones de la sección 6.3.5; el coeficiente de dilatación térmica (α) para el acero AISI 304 a 100°C es $17,3 \times 10^{-6}[^\circ\text{C}^{-1}]$,⁵ y el modulo de elasticidad (E), lo podemos encontrar en la Tabla 9.

$$\sigma_T = 189 \times 10^9 [\text{Pa}] \cdot 17,3 \times 10^{-6} [^\circ\text{C}^{-1}] \cdot 0,042 [^\circ\text{C}]$$

⁵ Tomado del catalogo de propiedades del Acero Inoxidable: <http://www.irestal.com>

$$\sigma_T = 137,33 \text{ [Pa]}$$

Este esfuerzo está en la dirección radial y es muy inferior al esfuerzo de fluencia, por lo tanto no existe ningún riesgo que falle por dilatación térmica.

6.3.3. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES DE LA CÁMARA DE TOSTADO

Altura del lecho (L)

$$L = 0,3 \cdot D \quad (6.3)$$

Volumen de lecho (V_b)

$$V_b = \frac{0,3 \cdot \pi}{4} \cdot D^3 \quad (6.4)$$

Masa del lecho (m_b)

$$m_b = \frac{0,3 \cdot \pi}{4} \cdot D^3 \cdot \rho_b \quad (6.5)$$

En la expresión (6.5), al saber la cantidad de producto se despeja el diámetro del lecho (D), en este caso el diámetro ya está definido por lo tanto se determina la capacidad de la tostadora de café será $m_b = 141$ [g], que es mayor de los 60g propuestos como tope mínimo.

Por la relación L/D , la altura del lecho es $L = 0,02934$ [m] (aproximadamente 3[cm]).

Para calcular la altura de mínima fluidización (L_{mf}), se despeja de la ecuación (4.10) y se toma el valor ε_{mf} de la Tabla 8; obteniendo que $L_{mf} = 0,0389$ [m] (aproximadamente 3,9[cm]).

En general a los lechos se les deja un 1[m] de más a partir de la altura de mínima fluidización, para asegurarse que no vayan a ser arrastrados partículas de menor tamaño, por tanto, la altura total de la cámara de tostado es $L_T = 1,039$ [m].

6.3.4. CALCULO DE VELOCIDAD DEL LECHO FLUIDIZADO

En la determinación de las velocidades, vamos a suponer que el flujo que llega al lecho es aire, esto solo para simplificar el cálculo; en realidad como se están recirculando los gases y calentándolos con los gases de combustión la mezcla irá aumentando la proporción de CO₂ y humedad.

- Velocidad mínima de fluidización (u_{mf})

Realizamos los cálculos de las velocidades suponiendo flujo turbulento, por ser lo preferible en esta aplicación; con la expresión (4.16) determinamos la velocidad mínima de fluidización (u_{mf}) y con la ecuación (4.13) comprobamos que el flujo es turbulento si $Re_p > 1000$ (Ver los resultados en la en la Tabla 10.

Tabla 10).

- Velocidad mínima de sustentación (u)

La velocidad de sustentación en un lecho se toma generalmente como tres veces la velocidad de mínima fluidización, pero en el proceso de tostado la velocidad mínima de fluidización se reduce debido a que durante el tostado de café, el grano aumenta de tamaño entre el 100 y 130%, pierde contenido de humedad reduciendo su peso entre un 15% y el 20%, causando la disminución de la densidad del grano hasta un 50%. Para evitar cambios drásticos en la velocidad de mínima fluidización y la pérdida excesiva de peso del grano se toma la velocidad de sustentación como:

$$u = 2 * u_{mf} \quad (6.6)$$

En la Tabla 10, se observan los cálculos de la velocidad mínima de sustentación sin tener en cuenta los cambios físicos del grano.

- Flujo del lecho (\dot{V}_b)

Se debe calcular para que satisfaga los requisitos del lecho. Por definición el flujo es el producto entre la velocidad y área transversal, al despejar obtenemos la siguiente expresión:

$$\dot{V}_b = u \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \quad (6.7)$$

Los resultados para diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados cálculo de velocidades y flujo a temperaturas significativas (Pat = 90,7 [kpa]).

T [°C]	u_{mf} [m/s]	u [m/s]	Re_p	\dot{V}_b [m ³ /s]
20	1,90	3,80	42161,44	0,0286
30	1,93	3,87	41807,52	0,0290
50	2,00	3,99	41156,45	0,0300
80	2,09	4,17	40296,38	0,0313
100	2,14	4,29	39809,13	0,0322
120	2,20	4,40	39362,80	0,0331
130	2,23	4,46	39153,13	0,0335
150	2,28	4,57	38766,45	0,0343
180	2,36	4,73	38258,84	0,0355
200	2,41	4,83	37939,40	0,0363
230	2,49	4,98	37511,00	0,0374
250	2,54	5,08	37251,56	0,0382
260	2,56	5,13	37134,25	0,0385
280	2,61	5,22	36899,55	0,0392
300	2,66	5,32	36679,82	0,0399

Para la determinación de las propiedades del fluido se supondrá que es aire a 260°C, esta temperatura es la temperatura máxima de la cámara de tostado, por lo tanto se toman las velocidades correspondientes para el diseño (ver Tabla 11)

Tabla 11. Resultado de propiedades para el diseño

T_{max}	260	[°C]
ρ_g	0,5927	[kg/m ³]
μ_g	0,00002795	[kg/m-s]
umf	2,56	[m/s]
u	5,13	[m/s]
m_{cafe}	0,141	[kg]
Pr	0,6942	

6.3.5. AISLAMIENTO CÁMARA DE TOSTADO

Para calcular el espesor del aislamiento utilizamos las ecuaciones de resistencia térmica por conducción y convección en cilindros:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (6.8)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi LK} \quad (6.9)$$

Dónde:

R_{conv} : resistencia térmica por convección.

h : coeficiente de transferencia de calor por convección.

A : área transversal al flujo de calor.

R_{cond} : resistencia térmica por conducción.

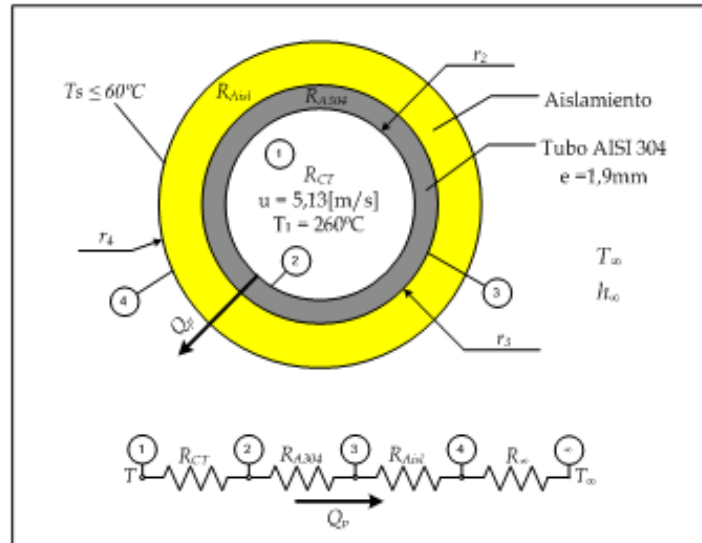
r_{ext} : es el radio externo del cilindro.

r_{int} : es el radio interno del cilindro.

L : longitud del cilindro.

K : coeficiente de conducción térmica del material del cilindro.

Figura 14. Red de resistencia térmica para un tubo aislado.



Fuente: autor.

El calor transferido desde el interior hasta el exterior es igual a:

$$Q_p = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{total}} \quad (6.10)$$

$$R_{total} = R_{ct} + R_{A304} + R_{Aisl} + R_\infty \quad (6.11)$$

Dónde:

$$R_{ct} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1}$$

$$R_{A304} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \cdot L_T \cdot K_{A304}}$$

$$R_{Aisl} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi \cdot L_T \cdot K_{Aisl}}$$

$$R_{\infty} = \frac{1}{h_{\infty} \cdot A_4}$$

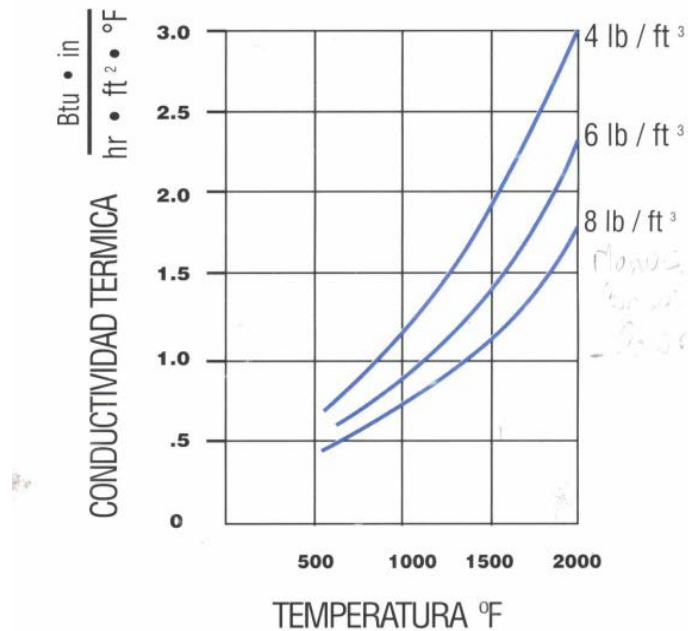
La temperatura superficial (T_s) se determina mediante la expresión:

$$Q_p = \frac{T_1 - T_s}{R_{1-4}} \quad (6.12)$$

$$R_{1-4} = R_{ct} + R_{A304} + R_{Aisl} \quad (6.13)$$

Según tabla A-3 (Transferencia de calor, segunda edición, Yunus Cengel), el AISI 304 a 260°C la conductividad térmica $K_{A304} = 18,73$ [W/m · K]; par el aislamiento, se determina por la Figura 15, a la temperatura de 260°C (500°F) y densidad de 6[lb/ft³], $K_{Aisl} = 0,5$ [Btu · in /hr · ft² · °F] = 0,0721 [W/m °C].

Figura 15. Conductividad térmica aislamiento



Fuente: www.fibratec.com

En la cámara de tostado el flujo interno es forzado y se mantendrá a una temperatura de tueste determinada por el control del sistema y monitoreada por una termocupla que censará la temperatura promedio de la cámara.

Determinamos el número de Reynolds para la cámara de tostado

$$Re_1 = \frac{D \cdot u \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (6.14)$$

Se obtiene un número de Reynolds de 10639, el cual es mayor a 10000 y se considera flujo turbulento. El número de Nusselt se determina con muy buena exactitud usando la segunda ecuación de Petukhov modificada⁶:

$$Nu_1 = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_1 - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (6.15)$$

Esta expresión exige que se cumpla las siguientes dos condiciones:

$$0,5 \leq Pr \leq 2000$$

$$3 \times 10^3 < Re_1 < 5 \times 10^6$$

El coeficiente de fricción (f) es igual a:

$$f = (0,790 \cdot \ln(Re_1) - 1,64)^{-2} \quad (10^4 < Re_1 < 10^6) \quad (6.16)$$

Nusselt también es igual a:

$$Nu_1 = \frac{h_1 \cdot D}{K_1} \quad (6.17)$$

⁶ Transferencia de calor, Yunus A. Cengel, pág. 441

Donde K_1 es el coeficiente de transferencia de calor por conducción en el interior de la cámara a la temperatura media de la masa de fluido la cual la tomaremos como la temperatura de tostado máxima que es 260°C.

La expresión (6.15) permite determinar Nusselt y con este valor se hace el cálculo del coeficiente de convección interno (h_1) por medio de la ecuación (6.17).

Externamente tenemos convección natural en un cilindro, se determina Nusselt por medio de la expresión:

$$Nu_{\infty} = \left\{ 0,825 \cdot \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6.18)$$

Esta es la expresión para calcular Nusselt para una pared vertical y se puede utilizar para un tubo vertical si se cumple:

$$D_4 \geq \frac{35 \cdot L_T}{Gr^{1/4}} \quad (6.19)$$

Donde Gr es el número de Grashof

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} \quad (6.20)$$

Se halla el coeficiente de transferencia de calor del ambiente (h_{∞}) por medio de la siguiente expresión:

$$Nu_{\infty} = \frac{h_{\infty} \cdot D_4}{K_{\infty}} \quad (6.21)$$

Tabla 12. Resultados calculo aislamiento térmico cámara de tostado.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	SIGLA	RESULTADO
Conductividad térmica del lecho	[W/m*°C]	k1	0,04167
Reynolds interior cámara de tostado	N/A	Re1	10846
factor de fricción del tubo	N/A	f	0,0309
Prandtl	N/A	Pr1	0,6942
Nusselt interno	N/A	Nu1	31,20
Coefficiente transferencia de calor del lecho	[W/m² °C]	h1	31,20
Conductividad térmica A304 a T1	[W/m*°C]	kA304	18,73
Conductividad térmica aislante	[W/m*°C]	kAisl	0,07211
Temperatura cámara de tostado	[°C]	T1	260
Temperatura superficial	[°C]	Ts	32,1
Temperatura del ambiente	[°C]	T∞	20
Longitud característica	[m]	Lc	1,1
Diámetro cámara de tostado	[m]	D2	0,0978
Diámetro tubería	[m]	D3	0,1016
Espesor aislamiento	[m]	e	0,0508
Diámetro con aislamiento	[m]	D4	0,2032
Temperatura de la película	[°C]	Tp	26,048
Coefficiente de expansión volumétrica	[1/K]	β	0,003342268
Viscosidad cinemática del fluido ambiente (Tp)	[m²/s]	ν	0,00001729
Conductividad térmica ambiente	[W/m°C]	ka	0,0254
Gravedad	[m/s²]	g	9,81
Grashof	N/A	Gr	1765794534,8
Prandtl	N/A	Pr	0,7255
Rayleigh	N/A	Ra	1281083935,0
Nusselt	N/A	Nu	113,020
Coefficiente de transferencia de calor convección natural	[W/m² °C]	h	16,6283
Resistencia cámara de tostado	[°C/ W]	RCT	0,2226
Resistencia paredes cámara de A304	[°C/ W]	RA304	0,000294
Resistencia paredes cámara de aislamiento	[°C/ W]	RAisl	1,390774
Resistencia del ambiente	[°C/ W]	R∞	0,085642
Resistencia total	[°C/ W]	RT	1,699271
Resistencia 1-4	[°C/ W]	R1-4	1,61
Calor perdido entre la superficie externa y el ambiente	[W]	Qp	141,24
Calor perdido entre el lecho y el ambiente	[W]	Qp	141,24
Temperatura interna del tubo	[°C]	T2	228,566
Temperatura externa del tubo	[°C]	T3	228,525

La conductividad K_{∞} , se determina a la temperatura media entre la superficie T_s y la temperatura ambiental $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$. La temperatura superficial se supone inicialmente como $T_s = 60^{\circ}\text{C}$, se define el espesor del aislamiento, se determina la temperatura media y la conductividad del ambiente, calculamos h_{∞} , y con las expresiones (6.10) y (6.12) se calcula las pérdidas de calor (Q_p) y la temperatura (T_s), ver Tabla 12.

De la Tabla 12, se observa que con un aislamiento de espesor 2" (0,0508[m]), el diámetro $D_4 = 0,2032$ [m] y al determinar la parte izquierda de la expresión (6.19) da un valor de 0,1878[m], cumpliéndose la condición para validar el huso de la ecuación (6.18).

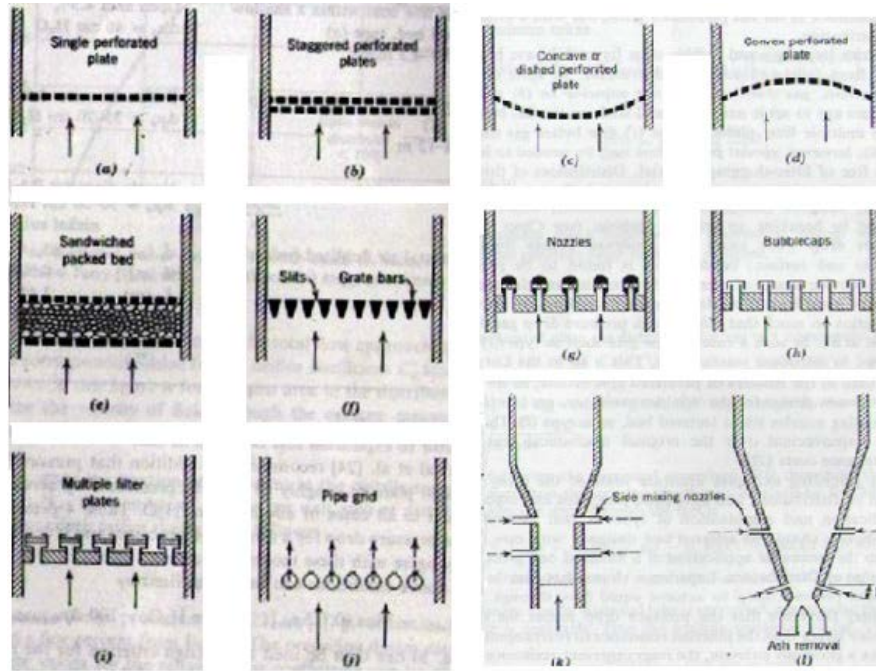
6.4. DISEÑO PLATO DISTRIBUIDOR

A continuación se definirán los conceptos y ecuaciones necesarias para determinar y calcular el plato distribuidor y al final se encuentran tabulados los resultados.

En un lecho fluidizado el plato distribuidor es uno de los elementos más importantes, se tiene una gran diversidad de diseños como se muestra en la Figura 16. Si bien, en algunos casos resultan más adecuados otros diseños (como el plato de campanas), los distribuidores de plato perforado son el tipo más sencillo y más utilizado por que ofrecen buena uniformidad en el lecho, producen pocas burbujas y no suelen crear zonas muertas.

La pérdida de carga a través del distribuidor se establece considerando que una elevada carga favorece la distribución del fluido, pero incrementa la potencia del ventilador y causa el aumento de la velocidad en los chorros del distribuidor que puede atravesarlo si es de poca profundidad.

Figura 16. Tipos de distribuidor.



Fuente: Kunii y Levenspiel (1991), pág. 84

El valor de la pérdida de carga a través del distribuidor ΔP_d , se calcula teniendo en cuenta diversos criterios el criterio de Kunii y Levenspiel, donde la pérdida de carga en el distribuidor debe ser igual al máximo de estos valores.

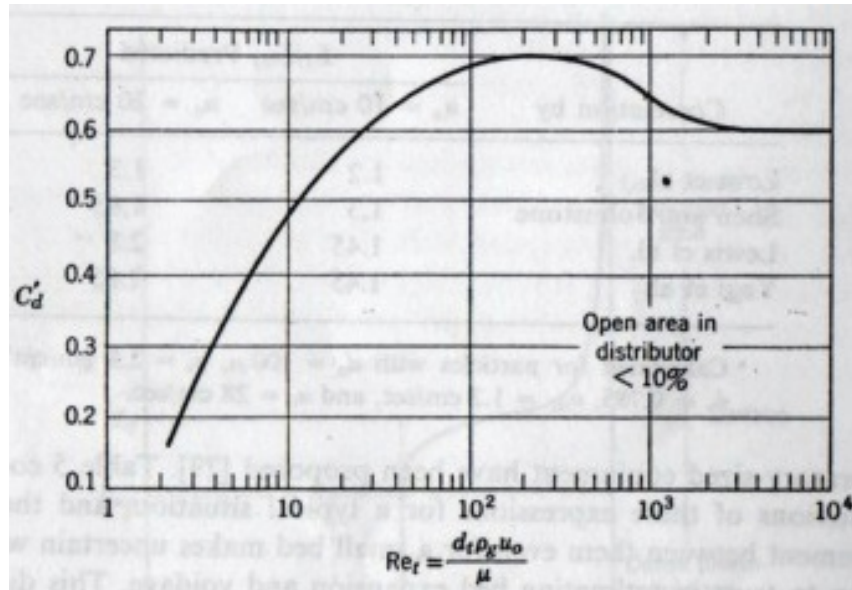
$$\Delta P_{d,min} = \text{MAX}(0,1 \cdot \Delta P; 35\text{mm } H_2O) \quad (6.22)$$

La pérdida de carga en el lecho (ΔP), se calcula por medio de la ecuación (4.12). La velocidad del aire en los orificios del distribuidor se determina a partir de la siguiente expresión:

$$u_{or} = C'_d \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho_g}} \quad (6.23)$$

El coeficiente C'_d se puede determinar mediante el diagrama de la Figura 17, en función del número de Reynolds (Re_t) para la cámara de tostado.

Figura 17. Coeficiente de orificio en función del número de Reynolds



Fuente: Kunii y Levenspiel (1991), pág. 88.

La relación entre el número y tamaño de orificios es expresado por la ecuación:

$$N_{or} = \frac{4u}{\pi \cdot d_{or}^2 \cdot u_{or}} \quad (6.24)$$

Dónde:

N_{or} : Número de orificios.

d_{or} : Diámetro de orificios.

A partir del valor de la velocidad del aire en los orificios (u_{or}), obtenido con la Ecuación (6.23), se asume un valor para el diámetro de orificios (d_{or}) y se calcula el número de orificios (N_{or}) manteniendo una relación de (u/u_{or}) de 1% a 10%. Los orificios se sitúan sobre los nudos de una malla hexagonal centrada, formada por triángulo equilátero de lado X (ver Figura 18). La superficie del triángulo corresponde, a la mitad del orificio, por tanto:

$$\frac{N_{or}}{A_b} \cdot A_{\Delta} = \frac{1}{2} \quad (6.25)$$

$$\frac{N_{or}}{A_b} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot X^2}{4} = \frac{1}{2} \quad (6.26)$$

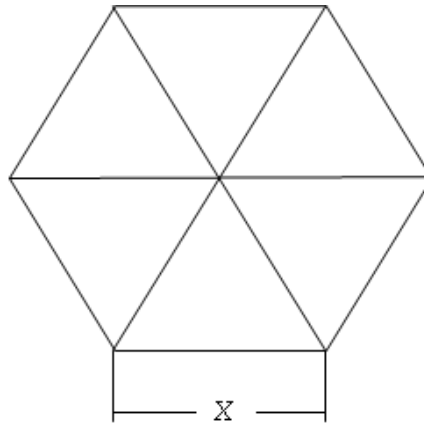
$$X = \sqrt{\frac{2 \cdot A_b}{\sqrt{3} \cdot N_{or}}} \quad (6.27)$$

Dónde:

X , Distancia entre agujeros, m.

A_b , Área del lecho, m².

Figura 18. Geometría orificios plato distribuidor.



Fuente: autor

Teniendo en cuenta el procedimiento descrito, se efectúan las operaciones en tablas de Excel para facilitar el cálculo, ver Tabla 13.

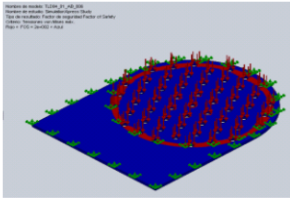
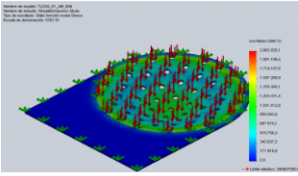
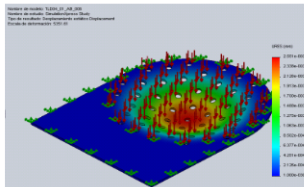
Tabla 13. Calculo plato distribuidor

PLATO DISTRIBUIDOR			
DESCRIPCIÓN	SIGLA	REFERENCIA	VALOR
CAIDA DE PRESION LECHO FLUIDIZADO [Pa]	ΔP	Ecuación (4.16)	102,15
CAIDA DE PRESION MINIMA EN LA GRILLA [Pa] ⁷	$\Delta P_{d,min}$	Ecuación (6.22)	10,21
CAIDA DE PRESION MINIMA EN LA GRILLA CORREGIDA [Pa]	$\Delta P_{d,min}$	CORREGIDO	2200,00
REINOLDS CÁMARA DE TOSTADO	Re_b	Ecuación (6.14)	6301,46
COEFICIENTE DESCARGA PLATOS PERFORADOS	C'_d	Ver Figura 17	0,6
VELOCIDAD ORIFICIOS [m/s ²]	u_{or}	Ecuación (6.23)	51,7
FRACCIÓN DE AREA LIBRE		10 >	9,9
NUMERO DE ORIFICIOS	N_{or}	Ecuación (6.24)	38
DIAMETRO ORIFICIO[m]	d_{or}	Ecuación (6.24)	0,005
ESPACIAMIENTO DE ORIFICIOS [m]	X	Ecuación (6.27)	0,0166

El plato distribuidor está en contacto con el café; se construye en acero inoxidable AISI 304 calibre 14 (1,9mm); normalmente es redondo, pero en este caso cumple una doble función, al servir de compuerta para permitir la salida del producto. Se diseña y se comprueba su resistencia mecánica mediante el Análisis CAE por elementos finitos (ver Anexo A), arrojando un factor de seguridad de (FOS) 100,245, un esfuerzo Von Misses de 263030[Pa] y un desplazamiento máximo de 00255[mm], valores que indican que la pieza resiste.

⁷ El valor debe ser mayor a 35mmca (343 [Pa]), de lo contrario se empieza a tomar valores iguales o mayores a 343 [Pa] en la siguiente casilla.

Tabla 14. Resumen del análisis CAE por elemento finitos (ver Anexo A).

Factor seguridad	100,245
	
Stress Von Misses (Maximo)	2063030,0 [Pa]
	
Desplazamiento (Maximo)	0,00255 [mm]
	

6.5. PÉRDIDAS EN TUBERIAS Y ACCESORIOS

La Figura 12, muestra el esquema final de la tostadora de café por lecho fluidizado desarrollado en un CAD, y por medio de éste se determina los accesorios y las longitudes de las tuberías.

6.5.1. PÉRDIDAS EN TUBERIAS

En las tuberías el cálculo de pérdidas se realiza mediante la ecuación (6.28) y se realizan los cálculos en Excel. La cámara de tostado es un tubo de Ø4" con diámetro interno $D = 0,0978[m]$ y una longitud $L_T = 1,0389[m]$ que aproximaremos a 1,1[m]. Las propiedades y el cálculo de pérdidas a la temperatura de diseño se encuentran tabulados en la Tabla 15.

Buscando evitar un proceso de prueba y error, utilizaremos la ecuación propuestas por Swant y Jain (1976) para determinar la caída de presión en el tubo:

$$h_L = 1,07 \cdot \frac{\dot{V}^2 \cdot L}{g \cdot D^5} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{e}{3,7 \cdot D} + 4,62 \cdot \left(\frac{v \cdot D}{\dot{V}} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} \quad (6.28)$$

Se debe cumplir: $10^{-6} < e/D < 10^{-2}$ y $3000 < Re < 3 \times 10^8$

Tabla 15. Determinación de las pérdidas en la cámara de tostado

PÉRDIDAS CÁMARA DE TOSTADO DE Ø4in		
Material: Tubo de Acero inoxidable calibre 14		
DESCRIPCIÓN	SIMBOLO	VALOR
Diámetro interno tubería [m]	D	0,0978
Velocidad en cámara tostado [m/s]	u	5,1267
Caudal de gases [m ³ /s]	\dot{V}_g	0,0385
Aspereza [m]	e	0,0000015
Aspereza relativa	e/D	0,00001534
Reynolds	Re	10631,8
Factor de fricción	f	0,0303
Pérdidas por metro de longitud [m]	h_L	0,4159
Pérdidas en tubería de Ø4" [Pa]	ΔP_T	2,7

Para las tuberías auxiliares, se toma la decisión de hacerlas en tubo de Ø3" y se estima que se requieren 2[m].

Tabla 16. Determinación perdida en tuberías auxiliares.

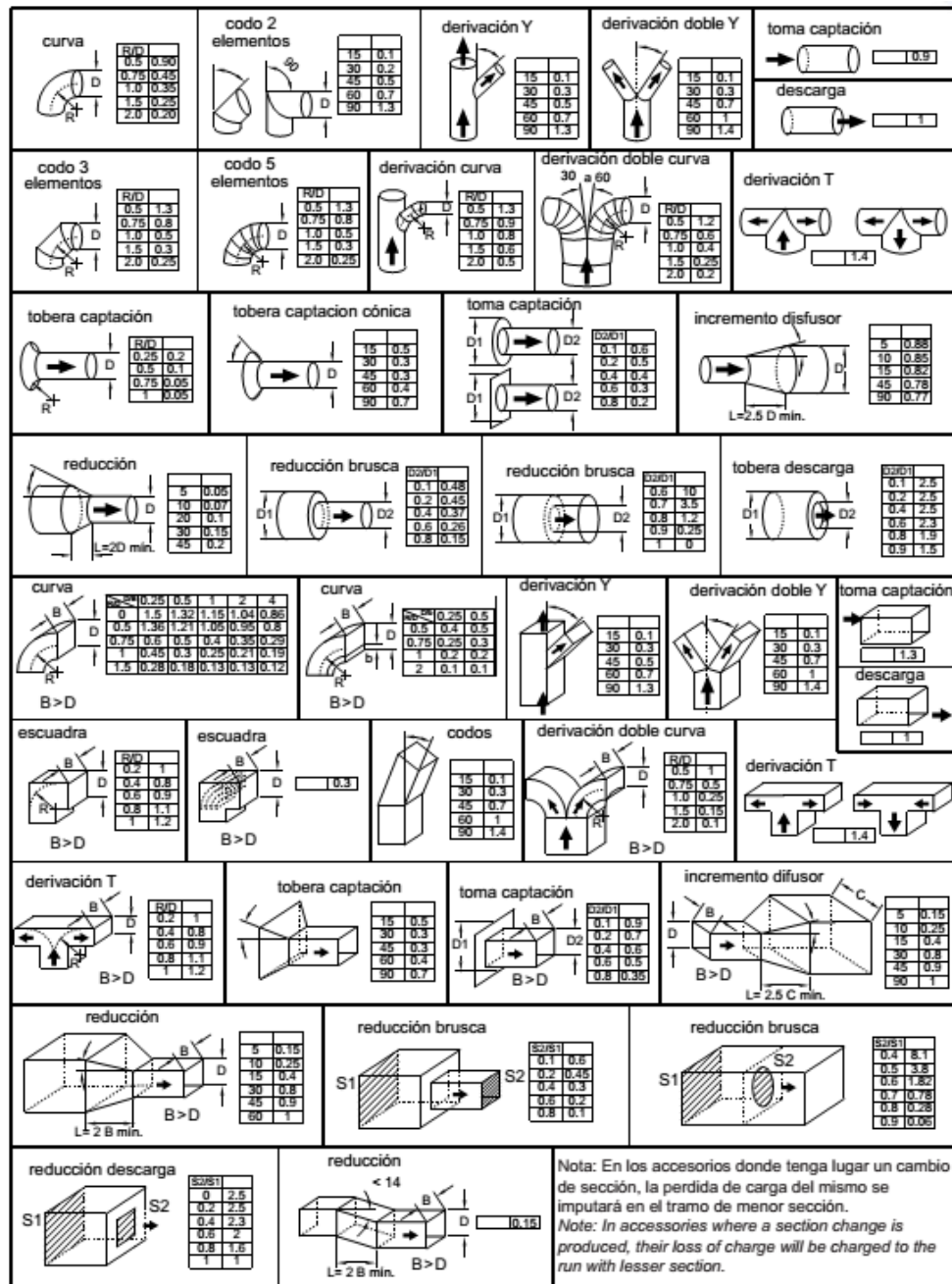
PÉRDIDAS TUBERIAS AUXILIARES DE 3in		
Material: Tubería cold rolled, calibre 18		
Diámetro interno tubería [m]	d_t	0,0738
Velocidad de flujo [m/s]	u_t	6,8356475
Aspereza [m]	e	0,0000015
Aspereza relativa	e/D	0,00002033
Reynolds	Re	10697,006
Pérdidas por metro de longitud [m]	h_L	1,5773158
Pérdidas en tubería de Ø3" [Pa]	ΔP_t	18,3

6.5.2. PÉRDIDAS EN ACCESORIOS

Se determina por medio de la ecuación (6.29) y la Figura 19.

$$\Delta P_{ac} = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (6.29)$$

Figura 19. Coeficiente de pérdidas (ζ) para accesorios



Fuente: www.casals.tv/files/brochures/perdidas.pdf

Tabla 17. Determinación pérdida en accesorios

PÉRDIDAS EN ACCESORIOS			
ACCESORIO	COEFICIENTE DE FRICCIÓN (ζ)	CANTIDAD	PÉRDIDAS [Pa]
REDUCCIÓN BRUSCA 4-3	0,19	1	2,63
CODOS 3"	0,35	4	19,39
DERIVACIÓN EN T Ø3"	1,4	2	38,77
DERIVACIÓN EN T Ø4"	1,4	1	10,91

6.5.3. VÁLVULA CONTROL DE FLUJO

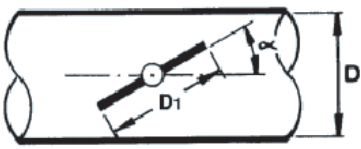
Las válvulas son accesorios, e igualmente la caída de presión es proporcional a la presión dinámica:

$$\Delta P_V = n \cdot \Delta P_d [mmca] \quad (6.30)$$

Esta expresión la vamos a conservar de esta forma, para utilizar los valores proporcionados en el Manual Práctico De Ventilación (Manuel Escoda) y lo expresaremos en unidades del sistema internacional:

$$\Delta P_V = 9,81 \cdot n \cdot \Delta P_d [Pa] \quad (6.31)$$

Tabla 18. Valores de n para una válvula tipo mariposa.

	Valores de n				
	D1/D	α			
		0°	20°	40°	60°
Figura 20. Válvula mariposa.	0,5	0,2	0,37	0,61	0,86
	0,6	0,2	0,48	0,94	1,5
	0,8	0,2	0,87	2,6	6,1
	1	0,2	1,8	11	115

Fuente: <http://www.salvadorescoda.com/tecnico/ve/Manual-Ventilacion.pdf>

La válvula está situada sobre la tubería de Ø3", tomando la relación de diámetros como 1 y una apertura de 20°, se obtiene en base a la Tabla 18 que $n = 1,8$. Las pérdidas en la válvula se calculan con la ecuación (6.31) y es igual:

$$\Delta P_{valv} = 9,81 \cdot n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot u_t^2$$

$$\Delta P_{valv} = 9,81 \cdot 1,8 \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,5927) \cdot (5,1267)^2$$

$$\Delta P_{valv} = 137,5[\text{Pa}]$$

6.6. VENTILADOR

El ventilador transporta gases a temperaturas altas, se debe evitar el acople directo de la unidad motriz e implementar el acople indirecto.

Para los cálculos del ventilador, es necesario conocer las condiciones de operación, el flujo, la caída de presión y las revoluciones del ventilador.

- Las condiciones de operación se determinan a la presión atmosférica local (90,7 [kPa]) y temperatura de diseño (260°C), el más relevante es la densidad del gas, de la Tabla 11; $\rho_g = 0,5927[\text{kg}/\text{m}^3]$.
- El flujo a 260°C según Tabla 11, es $\dot{V}_b = 0,04[\text{m}^3/\text{s}]$
- Caída de presión; según la Tabla 19, el total de las pérdidas por presión es de 2532,35 [Pa]. Se desea dejar el ventilador con una buena capacidad que nos permita efectuar cambios o modificaciones; por lo tanto se calcula el ventilador para una caída de presión de $\Delta P_{vent} = 2800 [\text{Pa}]$

Tabla 19. Cuantificación de pérdidas

ACCESORIO	PÉRDIDAS [Pa]
LECHO FLUIDIZADO	102,15
GRILLA	2200
TUBERIA Ø4in [m]	2,7
TUBOS Ø3in [m]	18,3
REDUCCIÓN BRUSCA 4-3	2,63
CODOS 3in	19,39
DERIVACIÓN EN T 3	38,77
DERIVACIÓN EN T 4	10,91
VALVULAS DE MARIPOSA 3in	137,5
TOTAL	2532,35

6.6.1. DISEÑO VENTILADOR

Por facilidad de construcción y la capacidad de manejo de partículas sólidas, se diseña un ventilador centrífugo de alabes radiales. En la Tabla 20 se presentan el cálculo y las fórmulas para determinar la geometría (ver Figura 21) y las velocidades significativas.

Figura 21. Geometría ventiladores centrífugos

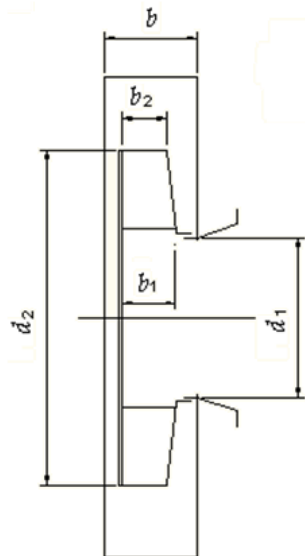


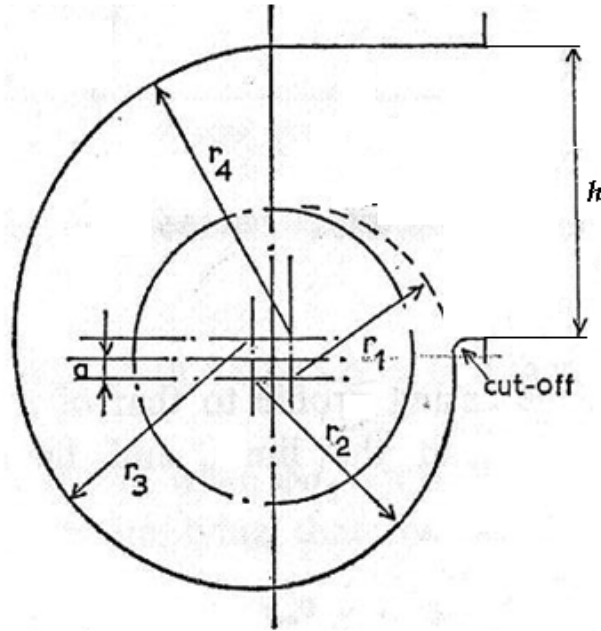
Tabla 20: Calculo dimensional de ventiladores radiales.

VARIABLE	FORMULACIÓN	VALOR	UNIDADES
u_2	$u_2 = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}}$	68,80	[m/s]
d_2	$d_2 = 2 \cdot u_2 / \omega$	0,48	[m]
u_1	$u_1 = 0,45 \cdot u_2$	30,96	[m/s]
d_1	$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_b}{\pi \cdot u_1}}$	0,04	[m]
u_m	$u_m = 0,2 \cdot u_2$	13,76	[m/s]
b_2	$b_2 = \frac{\dot{V}_b}{\pi \cdot d_2 \cdot u_m}$	0,002	[m]
b_1	$b_1 = \frac{\dot{V}_b}{\pi \cdot d_1 \cdot u_m}$	0,023	[m]
u_3	$u_3 = 0,4 \cdot u_2$	27,52	[m/s]
b	$1,2 \cdot b_1$	0,0274	[m]
h	$h = \frac{\dot{V}}{u_3 \cdot b}$	0,0531	[m]
<i>Cut-Off</i>	$Cut-Off = 0,1 \cdot d_2$	0,048	[m]

Determinar el número de alabes (Z) y el desplazamiento envolvente de la carcasa (a), ver Figura 22, se hace mediante la expresión:

$$a = \frac{\pi \cdot d_2 \sin \beta_2}{2 \cdot Z} \quad (6.32)$$

Figura 22. Número de alabes (Z) vs Desplazamiento de la envolvente (a)



Fuente: FANS; William C. Osborne; pag.132.

En ventiladores radiales $\sin \beta_2 = 1$, y la expresión queda:

$$a = \frac{\pi \cdot d_2}{2 \cdot Z}$$

De los datos de la Tabla 21, se decide $Z = 8$ aletas con un desplazamiento de la envolvente de $a = 8,38[\text{cm}]$

Tabla 21. Número de alabes (Z) vs Desplazamiento de la envolvente (a)

Z	a	Z	a
2	0,3750	8	0,0838
3	0,2500	9	0,0937
4	0,1875	10	0,0833
5	0,1500	11	0,0750
6	0,1250	12	0,0682
7	0,1071	13	0,0625

6.6.2. POTENCIA HIDRÁULICA DEL VENTILADOR

Se determina por medio de la ecuación (6.33), donde \dot{V} es el flujo de gases y ΔP es la carga de presión del sistema.

$$P_H = \dot{V} * \Delta P \quad (6.33)$$

Suponiendo una eficiencia de $\eta = 0,72$ se obtiene que la potencia necesaria para la operación del ventilador es:

$$P_H = \frac{\dot{V} * \Delta P}{\eta} = \frac{0,04[\text{m}^3/\text{s}] * 2800[\text{N}/\text{m}^2]}{0,72} \quad (6.34)$$

$$P_H = 149,3[\text{W}] = 0,2 [\text{Hp}]$$

6.6.3. POTENCIA DE ARRANQUE VENTILADOR

Al arrancar se debe tener en cuenta la inercia del rotor del ventilador y sumársela con la potencia de operación por tanto la potencia de arranque es igual:

$$P_{AV} = P + P_I \quad (6.35)$$

Con las dimensiones del ventilador, se diseñar el rodete y se determinó que la inercia es de 0,1227 [kg/m²], los motores generalmente arrancan de inmediato, por tanto es necesario prolonga el arranque para no excederse en el tamaño del motor, se considera un arranque en 18[s], usando un motor de alta a 3450 [rpm] y una reducción de 4/5 la velocidad del rodetes es de 2752[rpm] (288,2[rad/s]).

$$P_I = I \frac{\omega^2}{t} \quad (6.36)$$

$$P_I = 566,19[\text{W}] = 0,76[\text{Hp}]$$

$$P_{AV} = 715,4[\text{W}] = 0,96[\text{Hp}]$$

6.7. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

6.7.1. ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN

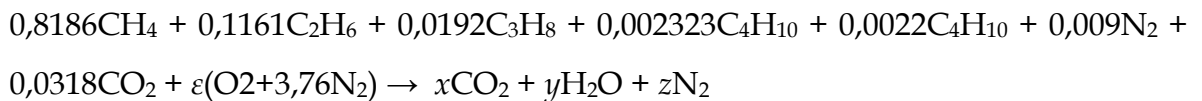
El combustible utilizado es el gas natural, cuya composición volumétrica es:

Tabla 22. Composición volumétrica del gas natural.

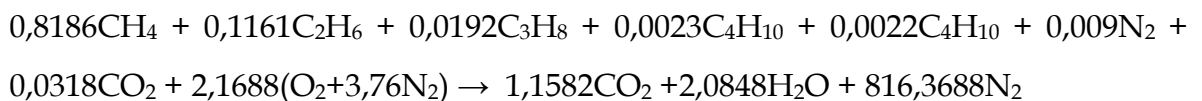
Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH ₄	81,86
Etano	C ₂ H ₆	11,61
Propano	C ₃ H ₈	1,92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0,23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0,22
Nitrógeno	N ₂	0,90
Dióxido de carbono	CO ₂	3,18

Fuente: www.gasnaturalfenosa.com.co/co

Su ecuación estequiométrica queda:



Al resolver se obtiene:



La relación aire - combustible (AC) se define como:

$$AC = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} \quad (6.37)$$

Donde la masa de aire y la masa de combustible se determina mediante las siguientes expresiones:

$$m_{\text{aire}} = 137,8972 \text{ } \epsilon$$

$$m_{\text{comb}} = \sum N_{\text{comb } i} \cdot M_{\text{comb } i}$$

N es el número de moles y M es la masa molar del componente i .

Remplazando en las expresiones anteriores se obtiene:

$$m_{\text{aire}} = 299 \text{ [kg]}.$$

$$m_{\text{comb}} = 0,8186 \cdot 16,043 + 0,1161 \cdot 30,07 + 0,0192 \cdot 44,097 + 0,0023 \cdot 58,124 + 0,0022 \cdot 58,124 + 0,009 \cdot 28,013 + 0,0318 \cdot 44,011$$

$$m_{\text{comb}} = 19,4 \text{ [kg]}$$

$$AC = 15,4 \text{ [kg aire/kg combustible]}$$

Los quemadores industriales normalmente operan con un exceso de aire entre el 5% y el 35%, se tomara el valor medio, $\alpha = 20\%$.

$$AC_E = AC \cdot (1 + \alpha)$$

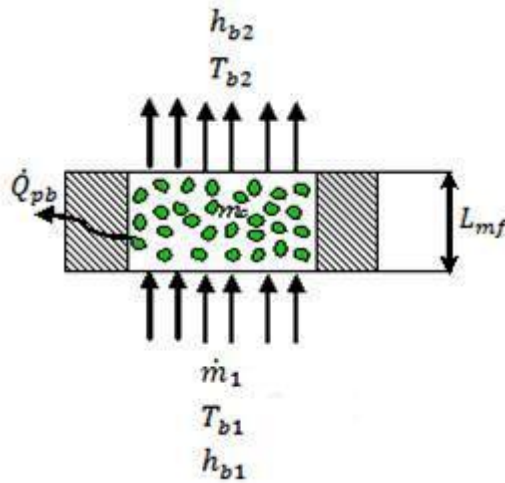
$$AC_E = 18,48 \text{ [kg aire/kg combustible]}$$

6.7.2. BALANCE DE ENERGÍA DEL LECHO

Del balance de energía del lecho fluidizado se encontró que el cambio de energía es igual a la energía que entra con el fluido menos la energía que sale con el fluido y las pérdidas de calor (ver Figura 23).

$$\Delta E_b = \dot{m}_1(h_{b1} - h_{b2}) - Q_{pb} \quad (6.38)$$

Figura 23. Balance de energía cámara de tostado



El cambio en la energía es producida por las partículas que se alojan en el lecho, y es utilizada para subir la temperatura a los granos desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de tueste, durante este proceso las partículas liberan agua, que es evaporada por el lecho, por tanto el cambio de energía en la cámara de tostado es:

$$\Delta E_b = \frac{m_c \cdot C_p (T_f - T_i) + m_w (u_{wf} - u_{wi})}{\Delta t} \quad (6.39)$$

Donde el subíndice (w) indica que es agua, (f) e (i) es para indicar las condiciones final e inicial respectivamente, (u) es la energía interna y Δt es el tiempo en el que se espera que suceda sucedan las reacciones, m_w es el agua del grano que se evapora debido al incremento de la temperatura y está comprendido entre el 12% y 20% del peso. Igualando las ecuaciones (6.38) y (6.39) se obtiene:

$$\frac{m_c \cdot C_p (T_f - T_i) + m_w (u_{wf} - u_{wi})}{\Delta t} = \dot{m}_1 (h_{b2} - h_{b1}) \quad (6.40)$$

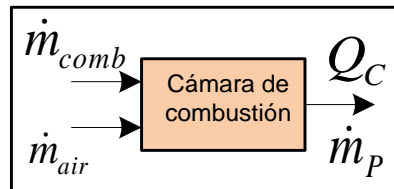
Con ayuda de las propiedades de las sustancias, determinamos la temperatura a la entrada del lecho suponiendo que a la salida alcanza la temperatura de operación ver resultados en la **Tabla 23**.

6.7.3. BALANCE DE ENERGÍA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La energía liberada por la combustión es:

$$Q_C = \dot{m}_{comb} \cdot PC \quad (6.41)$$

Figura 24. Cámara de combustión



Balance de masa:

$$\dot{m}_P = \dot{m}_{comb} + \dot{m}_{air} \quad (6.42)$$

Teniendo en cuenta la relación aire-combustible con un exceso del 20% (AC_E), la expresión anterior cambia a:

$$\dot{m}_P = \dot{m}_{comb}(1 + AC_E) \quad (6.43)$$

El poder calorífico del gas natural (PC), en la ciudad de Bucaramanga según la empresa distribuidora es igual a $41,45[\text{MJ}/\text{m}^3]$. El quemador de combustible es tipo atmosférico de pre-mezcla, por tanto la densidad del gas se puede determinar por medio de la ecuación de estado de gas ideal, tomando sus propiedades a las condiciones ambientales.

$$\rho_{comb} = \frac{M_{comb} \cdot P}{R_u \cdot T} \quad (6.44)$$

Donde la masa molar del combustible es $M_{comb} = 19,31[\text{kg}/\text{kmol}]$, la presión atmosférica en Bucaramanga es aproximadamente $P = 90,7[\text{kPa}]$, la temperatura del ambiente se toma como $T = 20[^\circ\text{C}]$ y la constante universal de los gases es $R_u = 8,31434 [\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$.

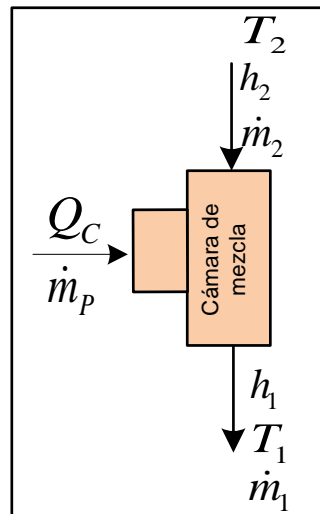
$$\rho_{comb} = 0,71857 [\text{Kg}/\text{m}^3]$$

Como el poder calorífico está dado por unidad de volumen se divide en su densidad y se obtiene $PC = 57683,64[\text{kJ}/\text{kg}]$.

6.7.4. BALANCE DE ENERGÍA DE LA CÁMARA DE MEZCLA

El calentamiento del aire se da en la cámara de mezcla (ver Figura 25), donde ingresa la energía de los gases de combustión para calentar los gases provenientes de la cámara de tostado y enviarlos de nuevo al lecho.

Figura 25. Cámara de mezcla.



Del balance de masa:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_p \quad (6.45)$$

Del balance de energías:

$$Q_C = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2 \quad (6.46)$$

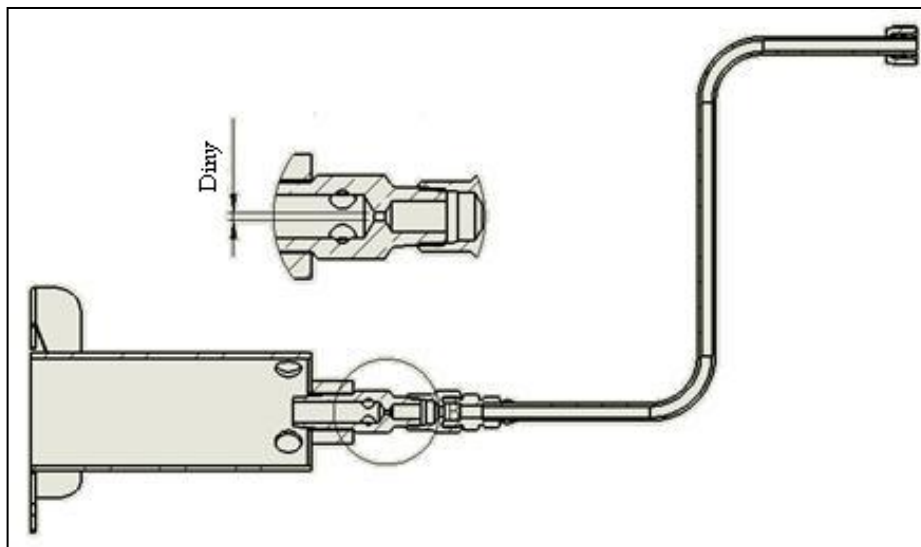
Determinamos h_2 mediante el balance de energía entre el lecho y la cámara de mezcla y h_1 entre la salida de la cámara de mezcla y la entrada al lecho.

$$Q_{pT3} + Q_p = \dot{m}_2 \cdot (h_{b2} - h_2) \quad (6.47)$$

$$Q_{pV} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{b1}) - W_{vent} \quad (6.48)$$

Solo se tienen en cuenta las pérdidas significativas de energía. Las pérdidas en la cámara de tostado (Q_p) que se determinaron en la sección 6.3.5, las pérdidas en la tubería de $\text{Ø}3''$ (Q_{pT3}) y el ventilador (Q_{pV}); estas se calcula de la misma forma que se determinó (Q_p), solo que en el ventilador se supone que la temperatura de la superficie interna se encuentra a la temperatura del aire a la entrada del lecho.

Figura 26. Quemador con inyector.



Con $Q_C = 5880$ [kcal/h] (ver Tabla 23), de la tabla de inyectores (Anexo D), encontramos que con un inyector de diámetro 2,05[mm] (ver Tabla 24); podemos suplir las necesidades para el tostado del café.

Tabla 23. Resultados cálculo cámara de combustión.

VARIABLE	REFERENCIA	RESULTADO	UNIDADES
C_{pc}	Ver Anexo C	1,25604	[kJ/kg °C]
T_i	Temperatura inicial del producto	18	[°C]
T_f	Temperatura final del producto	260	[°C]
m_w	$m_w = 0,2 m_c$	0,0282	[kg]
u_{wi}	Propiedades del agua a T_i	75,46	[kJ/kg]
u_{wf}	Propiedades del agua T_f	2749	[kJ/kg]
T_{b1}	Propiedades del aire	392,8	[°C]
h_{b1}	Propiedades del aire	676,935	[kJ/kg]
T_{b2}	Propiedades del aire	260	[°C]
h_{b2}	Propiedades del aire	537,3	[kJ/kg]
Q_p	Hoja de cálculo	70,16	[W]
Q_{pT3}	Hoja de cálculo	88,18	[W]
Q_{pV}	Hoja de cálculo	91,99	[W]
Q_{pb}	$Q_{pb} = L_{mf} * Q_p / L_T$	2,69	[kW]
\dot{m}_1	$\dot{m}_1 = \dot{V}_b * \rho_g$	0,02282	[kg/s]
\dot{m}_2	Iteración	0,02051	[kg/s]
Δt	N/A	240	[s]
h_2	$h_2 = h_{b2} - \frac{Q_{pT3} + Q_p}{\dot{m}_2}$	530,3077	[kJ/kg]
T_2	Propiedades del aire	253,2	[°C]
h_1	$h_1 = \frac{Q_{pV} - W_{vent}}{\dot{m}_1} + h_{b1}$	776,3232	[kJ/kg]
T_1	Propiedades del aire	390,5	[°C]
Q_C	$Q_C = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2$	6,8	[kW]
		5880	[cal/h]
\dot{m}_{comb}	$\dot{m}_{comb} = \frac{Q_C}{PC}$	0,0001186	[kg/s]
\dot{m}_{air}	$\dot{m}_{air} = AC_E \cdot \dot{m}_{comb}$	0,000097	[kg/s]

Tabla 24. Diámetros de inyectores Sobre coeficiente 0.9 y Presión de suministro normal.

Diámetro Inyector	kcal/h	kcal/h
	Gas Licuado	Gas Natural
1,90	10189	5271
1,95	10732	5552
2	11290	5840
2,05	11861	6136
2,1	12447	6439
2,15	13047	6749
2,2	13660	7067
2,25	14288	7392

Fuente: www.glama.com.ar/downloads/Tabla%20de%20inyectores.pdf

7. PUESTA EN OPERACIÓN

Es necesario para poner en operación la máquina, conectarla a la línea de gas natural y una toma de energía a 110[VA].

7.1. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

- 1) Disponer de un cronometro para contabilizar el tiempo de tostado.
- 2) Encender el pirómetro por medio del interruptor ubicado debajo de éste, para visualizar la temperatura de la cámara de tostado (ver Figura 27).
- 3) Cerciórese que la grilla esté correctamente ubicada; tirando de esta hacia adelante (ver Figura 28).
- 4) Abrir la válvula de control de gas (Figura 29) y pulsar el botón rojo del tablero de control hasta que prenda el quemador (ver Figura 27).
- 5) Encender el ventilador pulsando el push botón verde del tablero de control (ver Figura 27).
- 6) Dejar calentar hasta que alcance la temperatura de tueste.
- 7) Se debe ubicar un recipiente para la recepción del producto en la parte inferior de la cámara de tostado (ver Figura 28).
- 8) Se agregan los 141[g] de café trillado en la tolva (ver Figura 30) y permitimos que caiga a la cámara de tostado retirando el baffle ubicado en la parte posterior, iniciar el conteo del cronometro.
- 9) Al caer el café a la cámara de tostado la temperatura desciende y después comienza aumentar hasta alcanzar la temperatura de operación, en este momento se apaga el quemador y se vuelve a encender cuando la temperatura descienda más de dos grado Celsius (tenga a la mano un encendedor).
- 10) Cuando haya transcurrido el tiempo de tostado, se cierra la válvula de control de gas; seguidamente se empuja la palanca de la grilla, está apaga el

ventilador y permite la salida de los granos por la parte inferior de la cámara de tostado.

11) Regresar la palanca de la grilla, para dejarla lista para la siguiente tanda.

Figura 27. Tablero de control



Figura 28. Sistema de compuerta salida de producto.

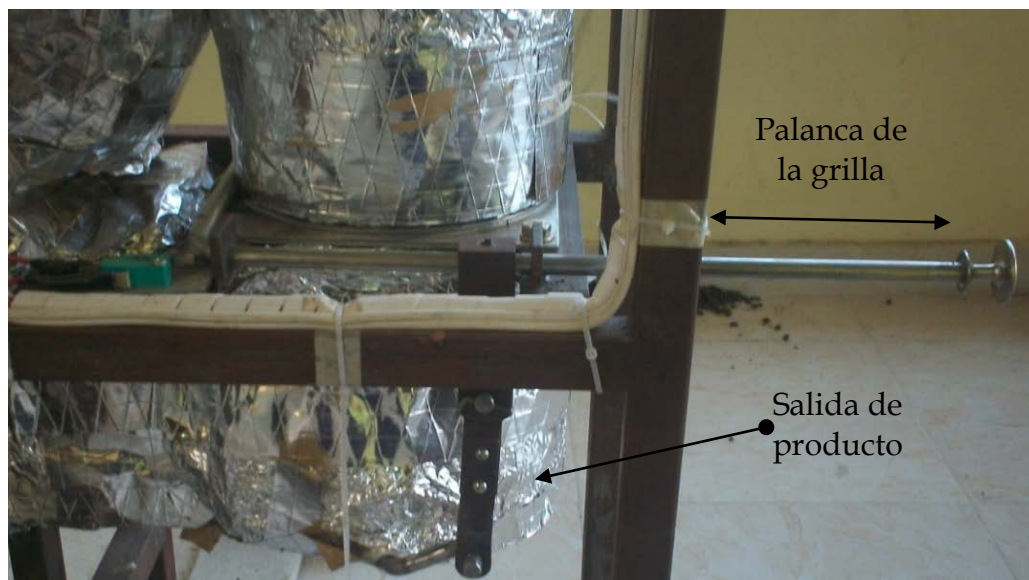


Figura 29. Válvula y quemador atmosférico.

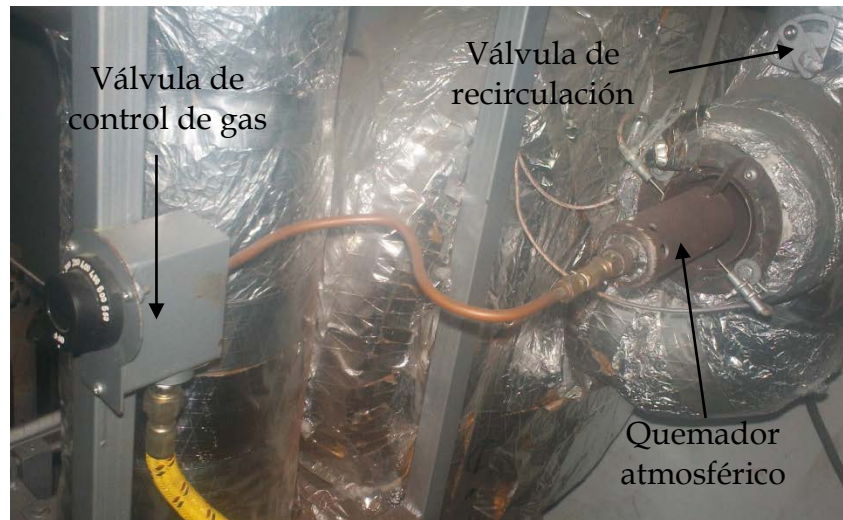


Figura 30. Tolva.



7.2. CALIBRACIÓN VELOCIDAD DEL LECHO FLUIDIZADO

Se realiza para garantizar que la velocidad de flujo dentro del lecho sea suficiente para fluidizar y evitar que los granos de café sean arrastrados.

- 1) Ubicar la válvula de recirculación de gases (ver Figura 29), apuntando hacia arriba para garantizar que la válvula este totalmente abierta.
- 2) Encender y dejar que la temperatura llegue al menos a 180°C.
- 3) Vertir 141[g] de café a la tolva y permitir que caiga a la cámara de tostado.
- 4) Revisar la trampa de partículas retirando la compuerta (Figura 31), está debe contener granos de café y nos indica que hay demasiado flujo de aire en el lecho.
- 5) Cerrar la válvula de recirculación de gases unos grados.
- 6) Reintroducir los granos a la cámara de tostado y revisar la trampa de partículas de nuevo. Este proceso se repite hasta que no hayan granos de café en la trampa.

Figura 31. Compuerta trampa de partículas



8. PRUEBAS

8.1. PRUEBA DE CALENTAMIENTO HASTA LOS 250°C

El objeto de esta prueba es documentar el proceso de calentamiento y determinar el consumo energético para un calentamiento hasta los 250°C. Para ello se contabilizarán los consumos por medio de los contadores de Luz y Gas, y se registra la temperatura cada dos minutos. Para realizar esta prueba la máquina debe estar completamente fría, los contadores de Luz y Gas solo deben registrar el consumo de la máquina, también se debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Registrar la lectura de los contadores de luz y gas.
- 2) Energizar la máquina y encender.
- 3) Iniciar el conteo del cronometro y registrar la temperatura que muestra el pirómetro.
- 4) Estar cada dos minutos apuntando la temperatura.
- 5) Cuando se alcance la temperatura de 250°C se registra el tiempo.
- 6) Cerrar la válvula de gas y apagar el ventilador oprimiendo el push botón rojo (ver Figura 27).
- 7) Se toman las lecturas de los contadores de Luz y Gas.

En la Figura 32 se graficaron los resultados y en la Tabla 25 se registraron los consumos de Luz y Gas, se determinó el consumo de potencia y se calculó el costo energético del calentamiento.

Figura 32. Curva de calentamiento tostadora por lecho fluidizado.

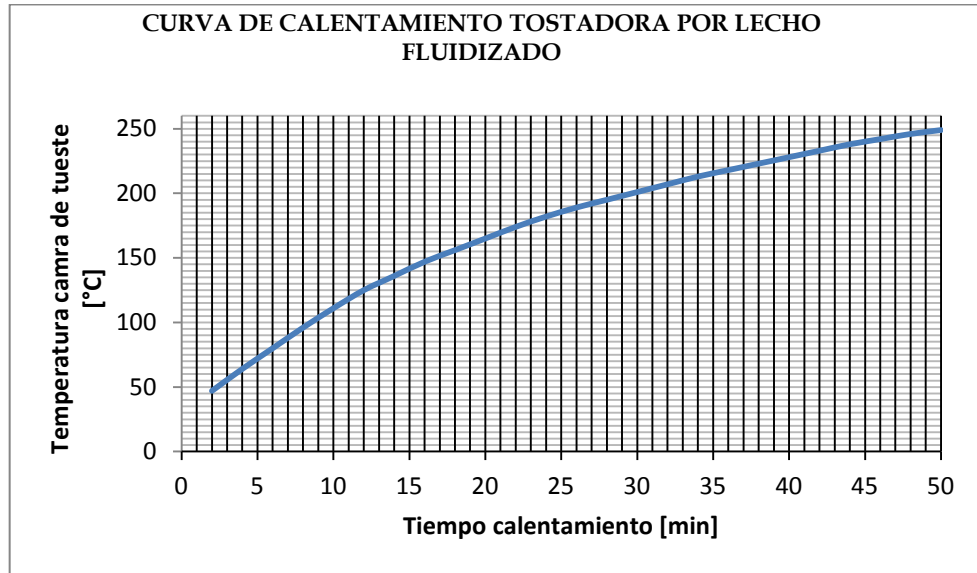


Tabla 25. Calentamiento tostadora por lecho fluidizado

CALENTAMIENTO DE TOSTADORA DE Ø4		
TEMPERATURA INICIAL CÁMARA TOSTADO	31	[°C]
TEMPERATURA FINAL CÁMARA TOSTADO	250	[°C]
CAMBIO DE TEMPERATURA	219	[°C]
TIEMPO DE CALENTAMIENTO	50,22	[min]
CONSUMO DE GAS	0,2875	[m³]
CONSUMO DE LUZ ELECTRICA	0,70	[kW · H]
POTENCIA PROMEDIO DE GAS CONSUMIDA	231,13	[kW]
POTENCIA DE LUZ ELECTRICA CONSUMIDAD	0,5859	[kW]
COSTO DEL CONSUMO DE GAS	337,4244	[COP]
COSTO DEL CONSUMO DE LUZ	235,5	[COP]
COSTO TOTAL DE CALENTAR LA MÁQUINA	573,0	[COP]

8.2. PRUEBA DE TUESTE A 230°C POR 6,5 MINUTOS DE 141[g] DE CAFE.

Esta prueba tiene como objeto tostar 141[g] de café a 230°C por 6,5 minutos, para evaluar el consumo energético por kilogramo de café. A igual que en el proceso

anterior los contadores de Luz y Gas solo deben registrar el consumo de la máquina y seguir los siguientes pasos:

- 1) Llevar a cabo el proceso de calentamiento hasta una temperatura superior a 230°C.
- 2) Registrar la lectura de los contadores de luz y gas.
- 3) Verter en la tolva 141[g] de café.
- 4) Cuando la temperatura descienda a 230°C, se enciende el quemador y el ventilador, seguidamente se retira el bafle de la tolva para permitir al café entrar a la cámara de tostado y se inicia el cronómetro.
- 5) La temperatura desciende y debe recuperarse en un tiempo alrededor de cuatro minutos.
- 6) Alcanzada la temperatura de 230°C, se debe mantener apagando y prendiendo el quemador según sea necesario.
- 7) Transcurridos los 6,5 minutos, empujamos la palanca de la grilla (**Figura 28**) cerciorándonos que en la parte inferior halla un recipiente que reciba el producto.
- 8) Tomar las lecturas de los contadores de Luz y Gas.

La pérdida de peso del café ya tostado lo podemos calcular haciendo la resta entre el peso al inicio del tueste y el peso al final como lo indica la expresión (8.1); y debe estar entre el 12% y 20%. En esta prueba presento una pérdida de peso del 18%, lo cual indica un buen tueste.

$$\%Perdida\ de\ peso = \frac{m_c - m_{cf}}{m_c} \quad (8.1)$$

Los resultados de esta prueba se pueden ver en la Tabla 26, donde se observa que el costo de tostar 141[g] de café es de 62,4\$ y se obtuvo un Tueste Muy Oscuro.

Tabla 26. Tostado de café a 230°C por 6,5 minutos.

RESULTADOS TOSTADO DE CAFÉ A 230°C POR 6,5min		
CONSUMO DE GAS	0,0245	[m ³]
CONSUMO DE LUZ ELECTRICA	0,10	[KW · H]
POTENCIA DE GAS CONSUMIDA	2,54	[KW]
PONTECIA DE LUZ ELECTRICA CONSUMIDAD	0,92	[KW]
COSTO DEL CONSUMO DE GAS	28,75	[\$]
COSTO DEL CONSUMO DE LUZ	33,649	[\$]
COSTO TOTAL TOSTADO DE CAFÉ	62,40	[\$]


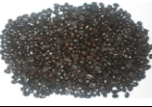

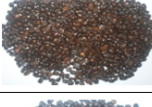
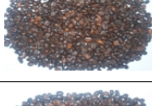
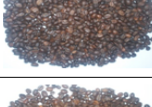
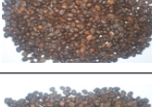
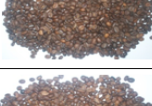
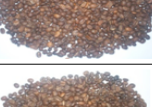



8.3. PRUEBAS DE TOSTADO DE CAFÉ

Consiste en tostar café a temperaturas desde 180°C hasta 230°C, por tiempos entre 5 y 18 minutos, tiene como objetivo lograr obtener los diferentes tipos de tueste (Claro, Medio, Medio Alto, Oscuro y Muy Oscuro) y determinar de forma cualitativa la relación que existen entre el tiempo y la temperatura de tueste (ver **Tabla 27**). Los pasos a seguir son:

- 1) Definir la temperatura y tiempo de tueste.
- 2) Seguir los pasos de la sección 7.1.
- 3) Tomar nota de la temperatura mínima alcanzada después de que el café cae a la cámara de tostado.
- 4) Cronometrar el tiempo que tarda en recuperar la temperatura de tueste.

Tabla 27. Tostado de café

FICHA TT01. (TOSTADO DE CAFÉ)						
TUESTE	Temperatura de tueste [°C]	Tiempo de tueste [min]	Temperatura mínima [°C]	Tiempo de recuperación [min]	observaciones	Calificación
	230	12	N.D.	N.D	El café salió totalmente quemado, con brillo suave	QUEMADO
	230	6,5	N.D.	N.D	Color oscuro con leve tendencia al marrón	QUEMADO
	210	12	198	4	Color marrón oscuro con capa aceitosa	MUY OSCURO
	210	8	197	04:06	Color marrón oscuro con capa aceitosa suave.	MUY OSCURO
	210	6	197	04:01	Color marrón oscuro con algunos granos aceitosos.	OSCURO
	205	8	194	03:42	Color marrón oscuro con algunos granos casi totalmente aceitosos.	OSCURO
	210	5	197	03:46	Se saca el café, hay crepitación con mas intensidad. Color marrón oscuro con algunos granos casi totalmente aceitosos y el resto totalmente aceitosos.	OSCURO
	200	12	189	04:18	Color marrón oscuro algunos granos parcialmente aceitosos.	OSCURO
	205	6	N.D.	N.D	Color marrón , la mayoría de granos parcialmente aceitosos.	OSCURO
	200	06:20	188	04:12	Color marrón y algunos granos presentan una insipiente salida de aceitosa.	MEDIO ALTO
	190	12	179	4	Color marrón, con una insipiente capa de aceite.	MEDIO
	190	8	180	04:16	Color marrón oscuro con unos cauntos granos con leve sudoración de aceite	MEDIO
	180	12	171	03:15	Color marrón claro con granos opacos.	CLARO

9. COSTOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

El diseño de este prototipo implicó aproximadamente 3 meses en investigación, desarrollo y modelamiento CAD-CAE. Un ingeniero con menos de 3 años de experiencia, ACIEM sugiere un sueldo de 5 veces el salario mínimo (3'080.000COP), esto determina una producción intelectual de 9'240.000COP. Se contó con la asesoría del Ingeniero Omar Armando Gélvez; que significa un costo aproximado de 4'000.000COP. Esto determina un costo total de diseño e ingeniería de 13'240.000COP.

La fabricación tuvo un costo de 2'814000COP (ver Tabla 28), siendo el costo más significativo la mano de obra.

Tabla 28. Costos de fabricación.

DESCRIPCIÓN	COSTO (COP)
VENTILADOR	380.000
QUEMADOR ATMOSFÉRICO DE GAS	72.000
TUBO INOXIDABLE CALIBRE 16 DE Ø4 (1,1m)	92.000
LAMINA INOXIDABLE CALIBRE 18 (30X40cm)	25.000
LAMINA INOXIDABLE CALIBRE 16 (60x60cm)	40.000
LAMINA INOXIDABLE DE 4,5 (30X30cm)	15.000
TUBO COLD ROLLED CALIBRE 18	28.000
SISTEMA ELECTRICO	180.000
TORNILLERIA	30.000
MANO DE OBRA	1'200.000
PAPELERIA	100.000
AISLAMIENTO	300.000
TUBO CUADRADO CALIBRE 18 DE 1"	48.000
ANGULO DE 1-1/4"	25.000
SOLDADURA	105.000
CAFÉ VERDE (6 KILOS)	24.000
VARIOS	1500.00
TOTAL	2'814.000

10. CONCLUSIONES.

- ✓ Se diseñó y construyó una tostadora de café por lecho fluidizado a gas natural, con capacidad de 141[g] por ciclo (ver Figura 33).

Figura 33. Diseño y construcción tostadora de 141[g] de café



- ✓ Los procedimientos de diseño y selección de los diferentes elementos de la máquina: Cámara de tostado, Ventilador, Cámara de combustión, Válvula para recirculación de gases calientes, Filtro de partículas, Sensores de temperatura y Válvula para control de flujo del gas; fueron apropiados y se logra cumplir con las especificaciones establecidas.
- ✓ La tostadora por lecho fluidizado permite un control manual de la temperatura apagando y prendiendo el quemador de gas.

- ✓ El prototipo de tostado de café por lecho fluidizado con sistema de recirculación de gases puede llevar a cabo los diversos grados de tueste (claro medio oscuro y muy oscuro) en tiempos que oscilan entre los 5 y 12 minutos, sin que los gases causen efectos nocivos al producto.
- ✓ El costo energético de tostar 141 [g] de café es 62,4\$, dando un costo aproximado de 443\$ por kilogramo de café.
- ✓ Para lograr un mismo tueste lo podemos hacer dejando una temperatura alta y un tiempo corto o viceversa, esto indica que la temperatura y el tiempo de tostado son inversamente proporcionales.
- ✓ Al re-circular los gases, se ahorran 9,9[kW] (8576[cal/h]) de energía calorífica, esto es 56% de la energía requerida.

OBSERVACIONES

- ✓ La principal carga hidráulica en un lecho pequeño, es la carga producida por el plato distribuidor, ya que se debe causar una caída de presión mínima para garantizar la homogeneidad del lecho, se recomienda utilizar un difusor en la cámara posterior a la grilla para homogenizar las presiones y reducir la caída de presión en el distribuidor.
- ✓ El sistema de re-circulación, obliga a pasarlos los gases calientes por el ventilador, forzando a diseños especiales, e incrementando los costos de mantenimiento.
- ✓ Para mejorar el proceso de calentamiento se recomienda: reducir la velocidad de rotación del ventilador durante este proceso, o ubicar el quemador después del ventilador.
- ✓ Hay un comportamiento estable que permite la repetitividad del proceso.
- ✓ El flujo del lecho fluidizado se puede hacer variar por medio de la válvula de re-circulación de gases.

BIBLIOGRAFIA

BARREIRA MORENO, Víctor Manuel y SOBRINO FERNÁNDEZ, Celia. Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. MADRID : Universidad Carlos III de madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. ABRIL 2007. 118p.

ÇENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. 7 edición. Mexico: Mc Graw Hill, 2012.

ÇENGEL, Yunus A. Transferencia de calor. 2 edición. Mexico: Mc Graw Hill, 2004.

COLOMBIA. EL PRESIDENTE DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Decreto 3075. (1997). Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 09 de 1979 y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C., 1997.

KUNII, LEVENSPIEL. Fluidization Engineering. New York : John Wiley, 1969.

LIZARAZO JAIME, Luis Fernando y VERA GONZALEZ, Henry. Diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 1990.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Café tostado, en grano o molido. NTC 3534, Bogotá, D.C. El instituto, 2007.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Café tostado en grano y/o molido. Determinación del grado de tosti3n. NTC 2442. Bogot3, D.C. El instituto, 2004.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Caf3 tostado y molido. Determinaci3n del contenido de humedad. M3todo por determinaci3n de la p3rdida en masa a 103 3C (m3todo de rutina). NTC 2558. Bogot3, D.C. El instituto, 2000.

OSBORNE, Willian C. Fans. Oxford : Pergamon Press Ltd., 1966.

S3nchez Ramirez, JULIO, y otros. Propiedades F3sicas e hidrodin3mica de la fluidizaci3n del caf3 verde y tostado (*Coffea ar3bica* L. var. *typica*). EN: Naturaleza y desarrollo. Enero-Junio, 2003, vol. 1 no. 1, p. 41 - 49.

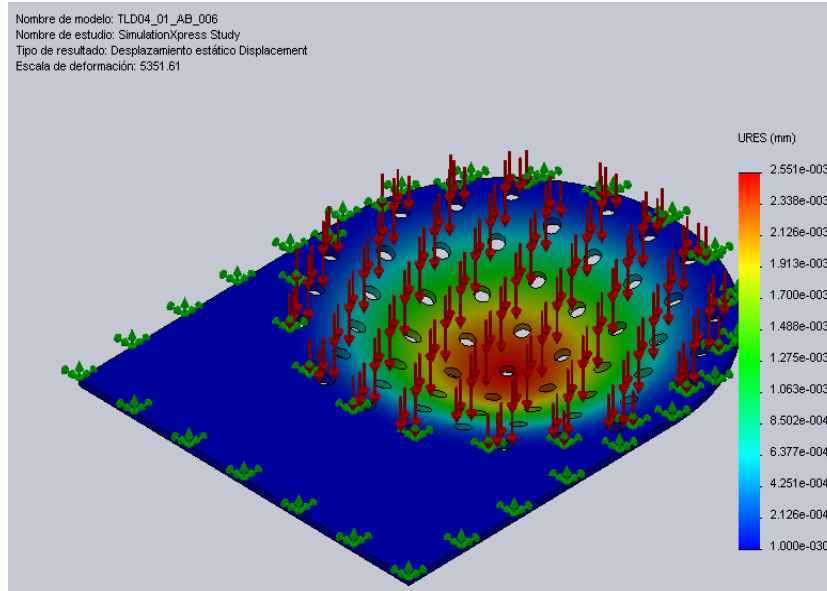
ANEXOS

**Anexo A. ANALISIS CAE, POR ELEMENTOS FINITOS DEL PLATO
DISTRIBUIDOR**

1. Materiales					
Material	Masa		Volumen		
AISI 304	0.188925	kg	2,36E-05	m ³	
2. Información de cargas y restricciones					
Sujeción					
Fijo-2 <TLD04_01_AB_006>			1 caras fija		
Cargas					
Presión		activar 1 Cara(s) con presión 2800 N/m ² a lo largo de la dirección normal a la cara seleccionada			
3. Propiedad del estudio					
Información Malla					
Tipo malla		Malla sólida			
Mallador utilizado		Malla estándar			
Verificación Jacobiana		4 points			
Tamaño elementos		1.6365 mm			
Tolerancia		0.081825 mm			
Calidad		Alta			
Número elementos		50133			
Número nodos		88058			
Información del solver					
Calidad		Alta			
Tipo Solver		Solver tipo FFEPlus			
4. Resultados					
4a. Tensiones					
Nombre	Tipo	Mín. (MPa)	Ubicación (mm)	Máx. (Pa)	Ubicación (mm)
Stress	VON: Von Misses	0,000007372	(51.6797mm, -1.9 mm, 83.1826 mm)	2063030,0	(33.8756mm, -2.0842 mm, 32.3475 mm)
Simulación Tensiones					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="font-size: small;"> <p>Nombre de modelo: TLD04_01_AB_006 Nombre de estudio: SimulationXpress Study Tipo de resultado: Static tensión nodal Stress Escala de deformación: 6351,61</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>von Mises (N/m²)</p> <p>2.063.025,1 1.891.106,4 1.719.187,6 1.547.268,9 1.375.350,1 1.203.431,4 1.031.512,6 859.593,8 687.675,1 515.756,3 343.837,5 171.918,8 0,0</p> <p>→ Límite elástico: 206807000,0</p> </div> </div>					

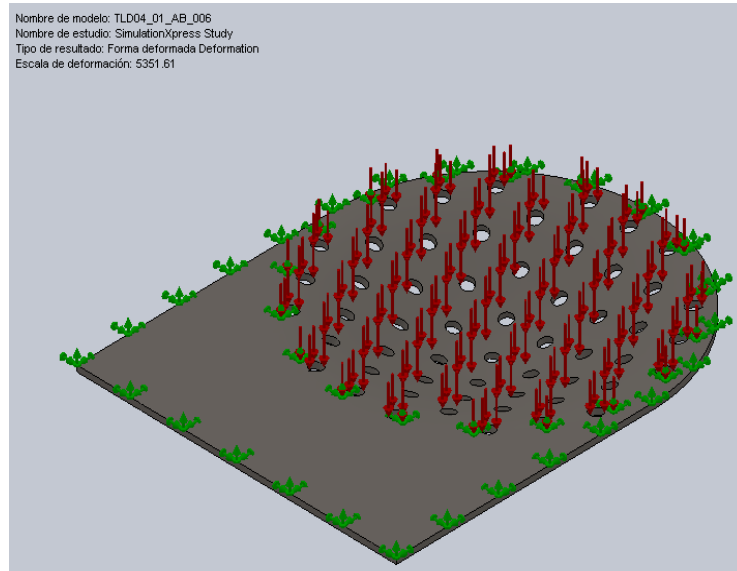
4b. Desplazamientos					
Nombre	Tipo	Mín. (mm)	Ubicación (mm)	Máx. (mm)	Ubicación (mm)
Displacement	URES: Desplazamiento Resultante	0	(42.6518 mm, -0.01 mm, -24.625 mm)	0,00255063	(0.00148358 mm, -14.6 mm, -2.0036 mm)

Simulación desplazamientos



4c. Deformación

Simulación Deformación

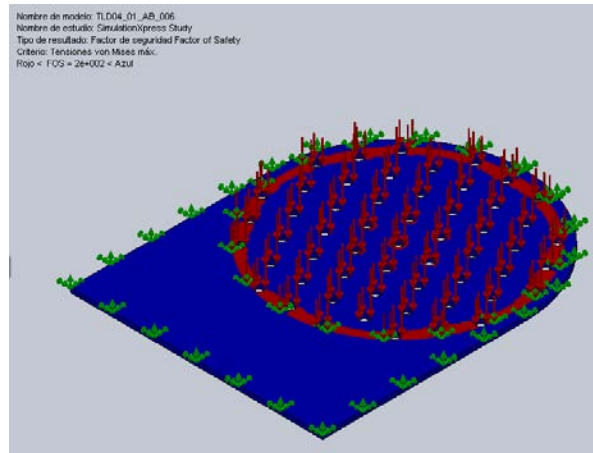


4d. Factor de seguridad

Factor seguridad

100,245

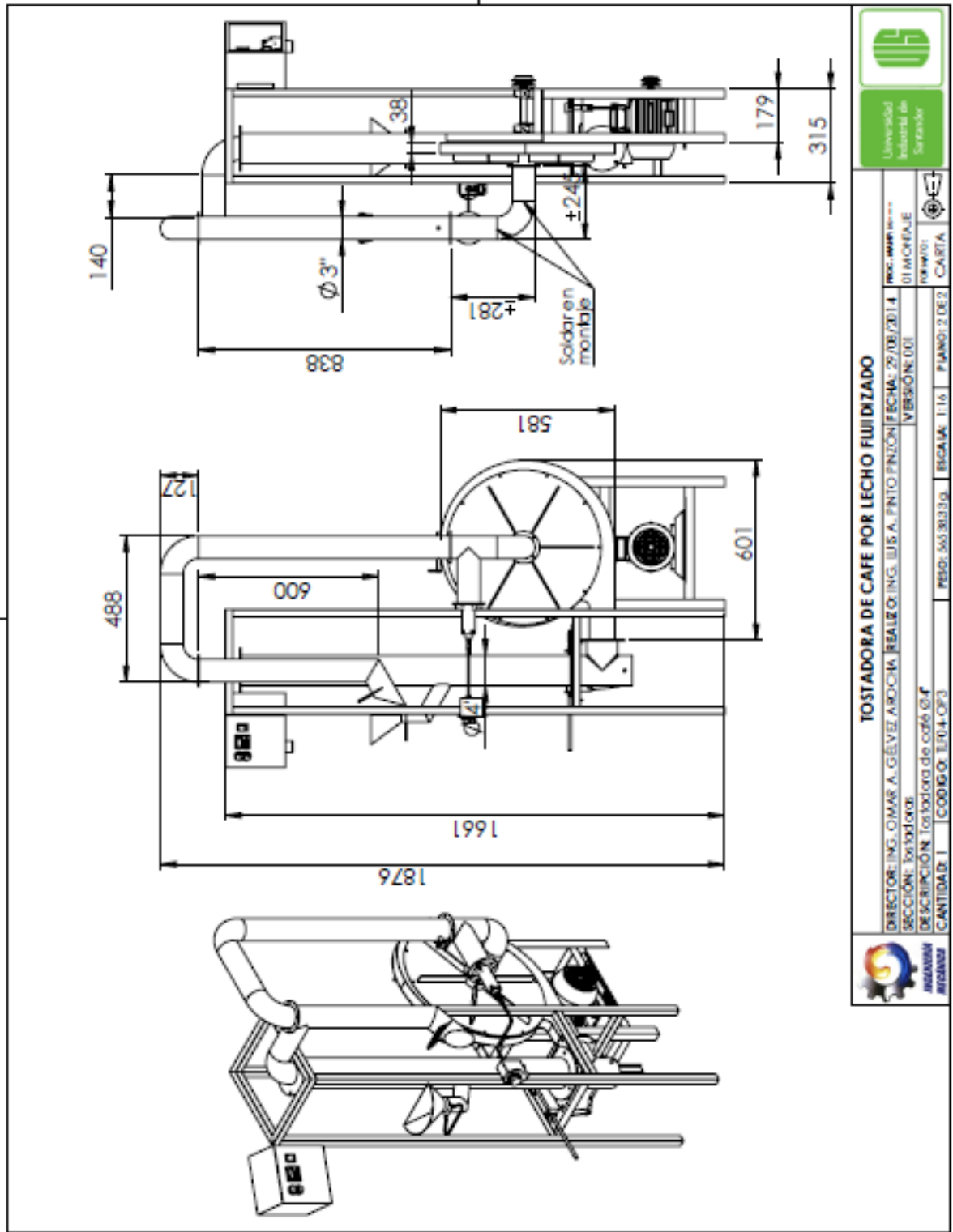
Simulación factor seguridad



6. Apéndice

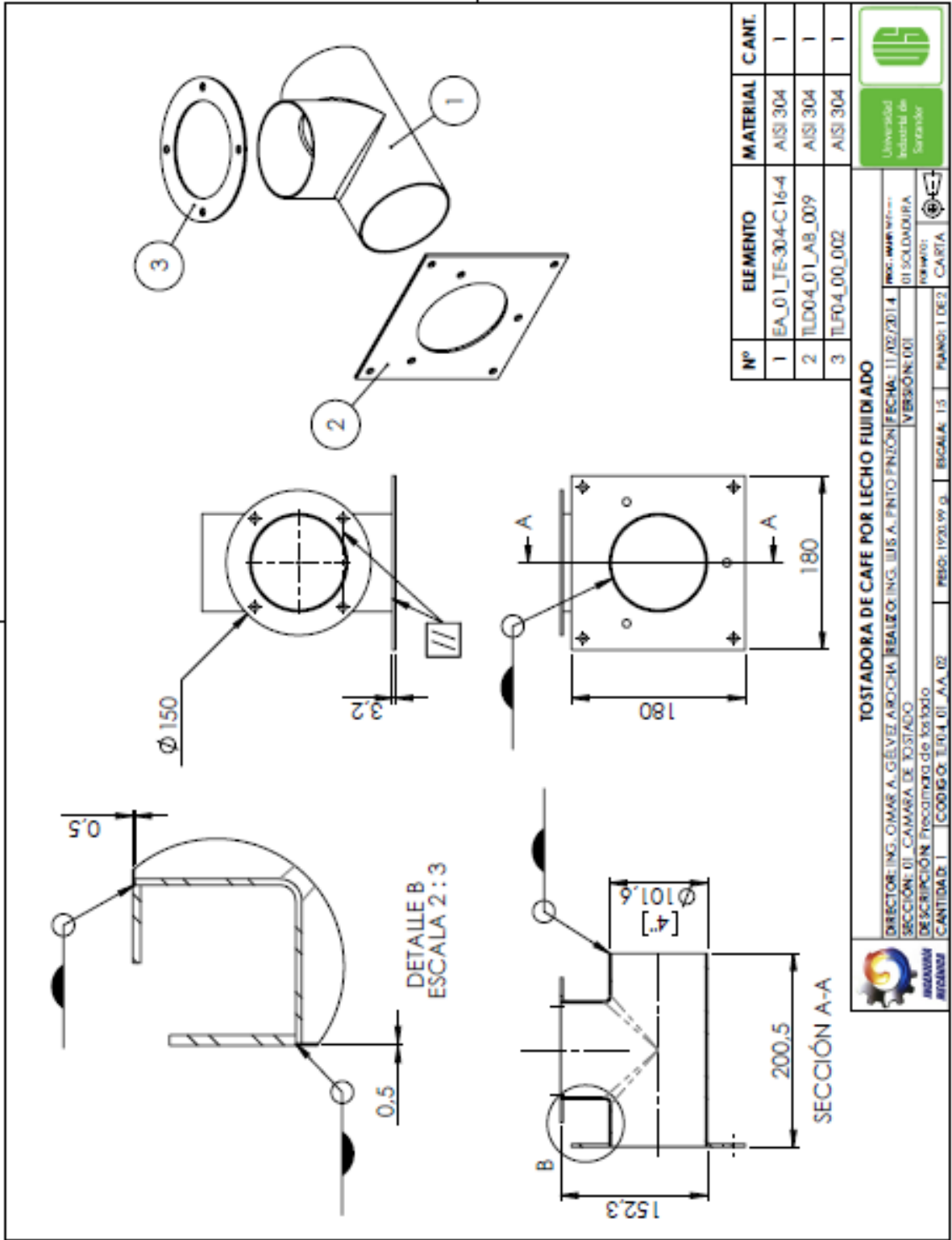
Nombre material	AISI 304	
Tipo modelo material	Isotrópico elástico lineal	
Criterio de error predeterminado	Tensión máxima de von Mises	
Nombre Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	1,90E+11	N/m ²
Coeficiente Poisson	0,29	NA
Módulo Cortante	7.5e+010	N/m ²
Densidad	8000	kg/m ³
Limite tracción	5,17E+12	N/m ²
Límite elástico	2,07E+12	N/m ²
Conductividad térmica	16	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)

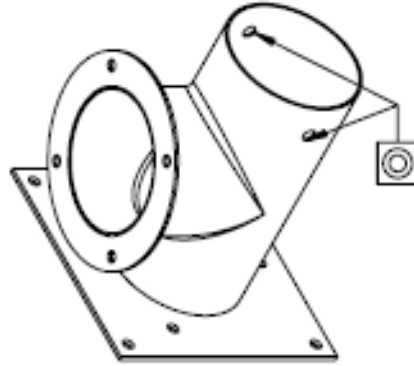
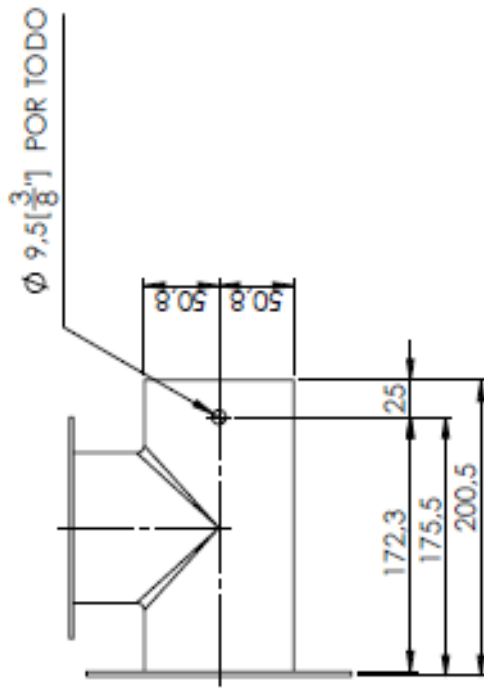
Anexo B. PLANOS





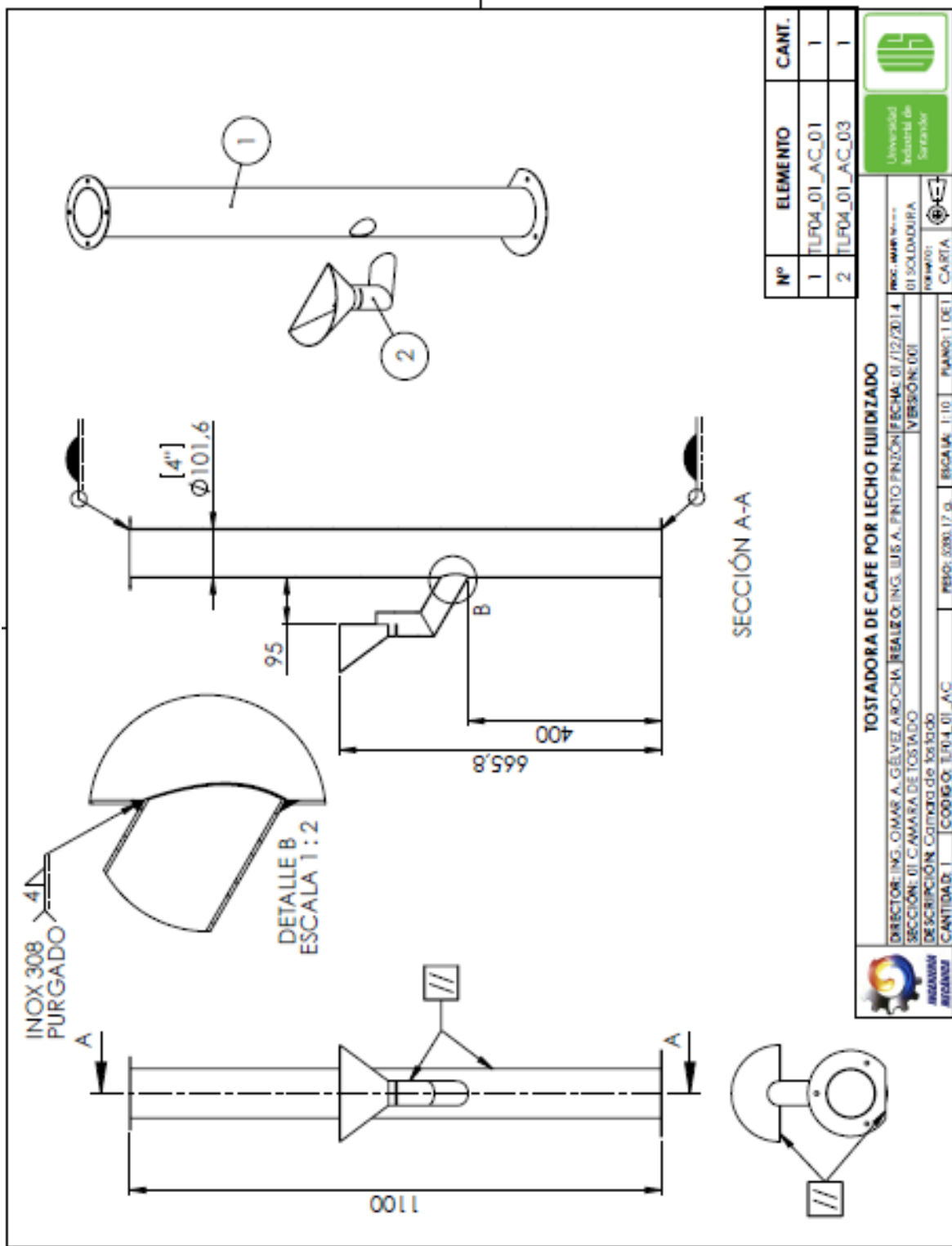
TOSTADORA DE CAFÉ POR LECHO FLUIDIZADO	
DIRECTOR: ING. OMAR A. GÉVEZ ABOCÍA REBALO, ING. LIS A. PINTO FINÓN	FECHA: 29/08/2014
SECCIÓN: Tostadora	VERSIÓN: 1.001
DESCRIPCIÓN: Tostadora de café 0.4'	PIANO: 2 DE 2
CANTIDAD: 1	CODIGO: T.014-073
PESO: 663,803 kg	ESCALA: 1:16
PROYECTO: 01 MCHFAUE	CARTA:







 Universidad Industrial de Santander		 INGENIERIA AVANZADA	
TOSTADORA DE CAFE POR LECHO FLUIDIZADO			
DIRECTOR: ING. OMAR A. GÓMEZ AROCHA	REALIZO: ING. LIS A. PINTO PINZÓN	FECHA: 11/02/2014	PROG. INGENIERIA
SECCIÓN: 01 - CÁMARA DE TOSTADO	VERSIÓN: 001		021 ALABRADO
DESCRIPCIÓN: Precomida de 3a. Soja			004/001
CANTIDAD: 1	CODIGO: E.P.4. 01. A.A. 02	ESCALA: 1:4	PLANO: 2 DE 2
			CAJETA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

PROYECTO: 01 SOLDADURA
FECHA: 2014

TÍTULO: TOSTADORA DE CAFE POR LECHO FLUIDIZADO
VERSION: 001

DIRECTOR: ING. OMAR A. GÉLVEZ AROCHA
REALIZÓ: ING. LIS A. FINZO

FECHA: 01/12/2014

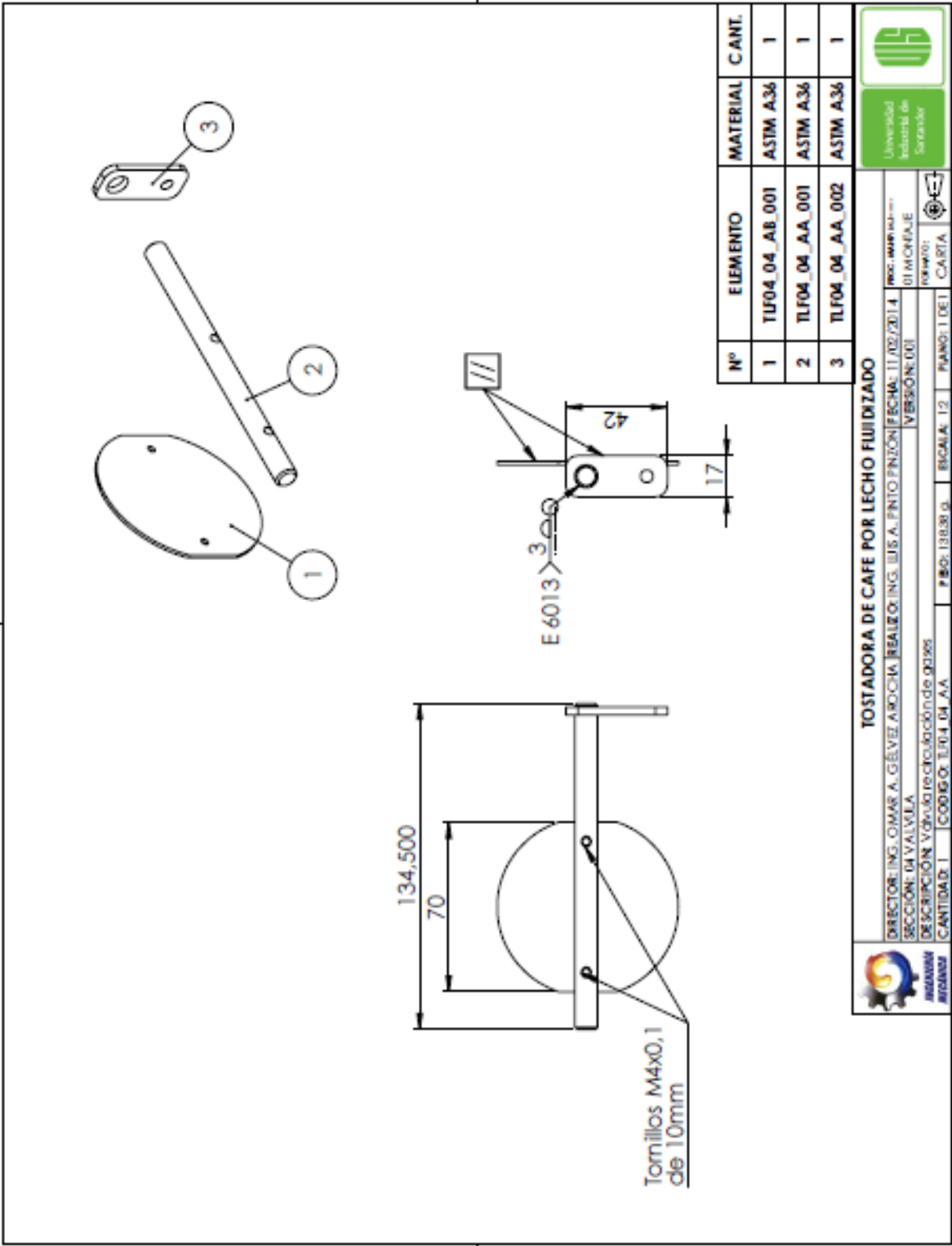
DESCRIPCIÓN: Cómputo de los lados

CANTIDAD: 1 CODIGO: TLF04_01_AC

PESO: 330.17 g ESCALA: 1:10 PLANO: 1 DE 1

INGENIERÍA





Anexo C. TABLA 7-1. PROPIEDADES DE ALGUNOS ALIMENTOS. DE
ASHRAE, 1971, Y U.S.D.A. HANBOOK

ALIMENTOS	T, °F	Q, Btu/ lb	Cp, Btu/ lb/°F	Cp, Btu/ lb/°F	K, Btu/ hr/ft²/°F	K, Btu/ hr/ft²/°F
ACEITE VEGETAL						
ACEITUNAS	29.40	108	0.80	0.42	0.28	1.10
ACHICORIA (ENVEDIA)			0.96			
AGUACATE	31.50	94	0.72	0.40	0.26	0.97
AGUATURMA, ALCACHOFA	27.50	114	0.84	0.44	0.28	1.15
JERUSALEM						
AJO SECCO	30.50	89	0.69	0.40	0.25	0.92
ALBARICOQUE	30.10	112	0.87	0.46	0.29	1.22
ALCACHOFA	29.90	120	0.87	0.45	0.29	1.20
ALCACHOFA TUBEROSA						
CHINA						
ALFALFA-MARINA	---	---	---	---	---	---
ALIMENTO ENLATADO	---	---	---	---	---	---
ALIMENTOS SECOS	---	---	---	---	---	---
APIO	30.00	122	0.88	0.45	0.29	1.22
APIO ESPAÑA, CELERY	31.10	135	0.95	0.48	0.31	1.33
APIO NABO	30.30	126	0.92	0.46	0.30	1.26
ARANDANO-AMERICANO	30.40	124	0.90	0.46	0.29	1.25
ARANDANO-AZUL/MIRTILO	29.70	118	0.86	0.45	0.29	1.22
ARANDAJO-ROJO	17-33	21-38	42-71	---	125-200	---
ARTOCARPA, JAQUEIRA						
AVES	---	---	---	0.42	0.41	1.61
CONGELADAS, EVICERADAS						
AVES FRESCAS	30.90	111	0.82	0.43	0.28	1.13
BANANA CAVENDISH MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.27	1.10
BANANA CAVENDISH/ ENANA/GIENANA VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA GROS MICHEL	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LACATAN MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LACATAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LATUNDAN MADURA	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA LATUNDAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BANANA POOVAN VERDE	30.60	108	0.80	0.42	0.28	1.10
BATATA, BONIATO	30.60	129	0.92	---	0.30	1.28
BERENJENA	30.60	132	0.94	0.48	0.31	1.32
BROCOLI	30.90	130	0.92	0.47	0.30	1.28
CACAO	---	---	---	---	---	---
CACTUS, HIGO CHUMBO			0.89			
CAFE-VERDE		14-21	0.30	0.24	0.17	0.34
CALABACIN INVIERNO	30.30	127	0.91	---	0.17	1.26
CALABACIN VERANO	31.50	132	0.94	0.48	0.3	1.32
CALABACIN, BELLOTA	---	16	0.29	0.23	0.17	0.34
CALABAZA, AUYAMA	30.50	130	0.92	0.47	0.27	1.08
CANTARELA			0.94			

**Anexo D. TABLA DE INYECTORES SOBRE COEFICIENTE 0.9 Y PRESIÓN DE
SUMINISTRO NORMAL**

Tecnomsm S.A.

Av. M. de Alegria 2494 B (B1618BQZ) El Talar Prov. de Bs. As. Argentina

T.E. (54-11) 4726-7772 L.R. FAX directo (54-11) 4726-7773

www.glama.com.ar E-MAIL: info@glama.com.ar

Glama 

CALEFONES-CALEFACTORES-COCINAS

Diámetros de inyectores Sobre coeficiente 0.9 y Presión de suministro normal

Diámetro Inyector	Kcal/h Gas Licuado	Kcal/h Gas Natural	Diámetro Inyector	Kcal/h Gas Licuado	Kcal/h Gas Natural
0,10	28	15	2,00	11290	5840
0,15	64	33	2,05	11851	6136
0,20	113	58	2,10	12447	6439
0,25	176	91	2,15	13047	6749
0,30	254	131	2,20	13660	7067
0,35	346	179	2,25	14288	7392
0,40	452	234	2,30	14930	7724
0,45	572	296	2,35	15587	8063
0,50	706	365	2,40	16257	8410
0,55	854	442	2,45	16941	8764
0,60	1016	526	2,50	17640	9126
0,65	1192	617	2,55	18353	9494
0,70	1383	715	2,60	19079	9870
0,75	1588	821	2,65	19820	10254
0,80	1806	934	2,70	20575	10644
0,85	2039	1055	2,75	21344	11042
0,90	2286	1183	2,80	22128	11447
0,95	2547	1318	2,85	22925	11860
1,00	2822	1460	2,90	23736	12279
1,05	3112	1610	2,95	24562	12707
1,10	3415	1767	3,00	25402	13141
1,15	3733	1931	3,05	26255	13583
1,20	4064	2103	3,10	27123	14032
1,25	4410	2281	3,15	28005	14488
1,30	4770	2468	3,20	28901	14951
1,35	5144	2661	3,25	29812	15422
1,40	5532	2862	3,30	30736	15900
1,45	5934	3070	3,35	31674	16386
1,50	6350	3285	3,40	32627	16879
1,55	6781	3508	3,45	33594	17379
1,60	7225	3738	3,50	34574	17886
1,65	7684	3975	3,55	35569	18401
1,70	8157	4220	3,60	36578	18923
1,75	8644	4472	3,65	37601	19452
1,80	9145	4731	3,70	38639	19989
1,85	9660	4997	3,75	39690	20533
1,90	10189	5271	3,80	40755	21084
1,95	10732	5552	3,85	41835	21642