

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TOSTADOR DE AIRE CALIENTE CON CAMA DE LECHO A
CHORRO***

Trabajo Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería como requisito para
optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Sebastián Rojas Barrantes

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2025

i

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Sebastián Rojas Barrantes
Postulante



Ing. Guillermo Vargas Elías, D. Sc
Director, Comité Asesor



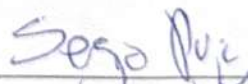
Ing. Fabián Jiménez Rey, M.Sc.
Miembro, Comité Asesor



Ing. José Alberto Miranda, M.B.A.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Alejandra Rojas González, Dra.
Directora, Tribunal Examinador



Ing. Sergio Rojas Montero, M.Sc.
Miembro, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por ser mi apoyo más importante durante este proceso; especialmente a Jenny, a Teresa y a Vivi.

Al profesor Guillermo Vargas, por motivarme a culminar el proyecto gracias a su gran vocación como investigador y profesor. Por su conexión única con los estudiantes y por todas las enseñanzas de vida.

A Fabían y Jose Alberto, por haber demostrado ser un comité asesor excelente y comprometido desde el inicio hasta el final.

A mis compañeras y compañeros del laboratorio, por su disposición a ayudarme cuando lo necesité.

A mis amigas y amigos, por acompañarme durante este periodo.

A Jan, por su empatía, comprensión y respaldo durante esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivo general	5
1.2. Objetivos específicos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Marco conceptual	8
2.2.1. Reacción de Maillard	10
2.2.2. Tipos de tostadores de café	11
2.2.3. Material de construcción del tostador	12
2.2.4. Camas de lecho a chorro y las propiedades de granos de café asociadas	13
2.2.5. Sistemas de control PID	16
2.2.6. Mecanismos de transferencia de calor	20
3. METODOLOGÍA	22
3.1 Características de los lotes a tostar	22
3.2. Establecimiento de los criterios de diseño del tostador	26
3.2.1 Dimensionamiento del tostador	26
3.2.2 Selección de materiales	31
3.2.3 Dimensionamiento de la resistencia eléctrica	31
3.2.4 Dimensionamiento del ventilador	36
3.3. Diseño del tostador y su construcción	39
3.3.1 Diseño preliminar	39
3.3.2 Diseño final del prototipo	41
3.3.3 Construcción en taller	42
3.4. Diseño y calibración del sistema de control	43
3.4.1 Sistema de control de temperatura	43
3.4.2 Sistema de control del flujo de aire	44
3.5. Evaluación del proceso de torrefacción	45
4. RESULTADOS	48
4.1 Características de los lotes a tostar	48
4.2. Establecimiento de los criterios de diseño del tostador	54
4.2.1 Dimensionamiento del tostador	54
4.2.2 Selección de materiales	56
4.2.3 Dimensionamiento de la resistencia eléctrica	57
4.2.4 Dimensionamiento del ventilador	60
4.3. Diseño del tostador y su construcción	68
4.3.1 Diseño preliminar	68

Todos los modelos CAD generados se pueden visualizar en 3D y descargar de manera libre en el Anexo D.	77
4.3.3 Construcción en taller	77
4.4. Diseño y calibración del sistema de control	79
4.4.1 Sistema de control de temperatura	79
4.4.2 Sistema de control del flujo de aire	85
4.5. Evaluación del proceso de torrefacción	87
5. CONCLUSIONES	94
6. RECOMENDACIONES	95
7. BIBLIOGRAFÍA	97
8. ANEXOS	112
Anexo A. Códigos	112
Anexo A1. Dimensionamiento de la resistencia eléctrica	112
Anexo A2. Dimensionamiento del ventilador	115
Anexo A3. Implementación del sistema de control	117
Anexo B. Tablas para coeficientes de pérdidas de presión por accesorios y obstrucciones	119
Anexo B1. Pérdidas de presión por la resistencia eléctrica	119
Anexo B2. Pérdidas de presión por codo radio liso	120
Anexo B3. Pérdidas de presión por tubo pitot	121
Anexo B4. Pérdidas de presión por plenum	122
Anexo C. Fichas técnicas y especificaciones de los equipos	123
Anexo C1. Ventilador 7060 DC 12V/24V	123
Anexo C2. Amplificador MAX6675	124
Anexo C3. Relé de estado sólido SSR-DA	125
Anexo C4. Sensor MPXV7002DP	126
Anexo D. Modelos CAD y planos constructivos	127

GLOSARIO

a,b,c	Ejes ortogonales de los granos de café en Figura 4, m
a,b,c,d	Coefficientes del ajuste de la regresión no lineal de la curva Sigmoide Hill de 4, adimensional.
q, z	Coefficientes de la regresión no lineal para el diámetro equivalente de los granos de café, adimensional.
Ar	Número de Arquímedes = $dp^3 \rho (\rho_p - \rho) g / \mu^2$
A_{sup}	Área de la superficie, m ²
A_t	Área transversal, m ²
β	Coefficiente de expansión térmica, $\beta = \frac{1}{T_{prom}} = \frac{1}{[(T_{superficie} - T_{fluido})/2]}$
c_p aire	Capacidad específica el aire, J/(kg·K)
D	Diámetro, m
D_b	Diámetro de la parte superior de la columna de grano, m
D_i	Diámetro de la entrada de aire, m
D_o	Diámetro de la base del cono, m
$\overline{D}_s$	Diámetro promedio del chorro, m
D_H	Diámetro de la columna de grano estática, m
$d_{obstrucción}$	Diámetro de la tubería de obstrucción, m
d_p	Diámetro de la partícula, m
d_{p0}	Diámetro de la partícula inicial, m
e	Número de Euler, adimensional
ε	Emisividad de la superficie, adimensional
ϵ/D	Rugosidad relativa de la tubería, adimensional
$e(t)$	Error en el tiempo t (diferencia entre el punto de referencia deseado y la variable de proceso real).
F_s	Factor de seguridad, adimensional

g	Aceleración gravitacional, m/s^2
H	Altura de la columna de grano estática, m
H_m	Altura máxima de la columna de grano, m
H_f	Altura de la fuente, m
h	Coefficiente de transferencia de calor, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$
k	Conductividad térmica del material, $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
K_p	Constante proporcional
K_I	Constante integral
K_i	Pérdida de presión local por accesorios, adimensional (37)
K_D	Constante derivativa
L	Longitud de la tubería, m
M	Variación de la masa en porcentaje
$\dot{m}$	Flujo másico, kg/s
m_{ad}	Masa de aceite desplazada, kg
$\dot{m}_a$	Flujo másico de aire, kg/s
m_i	Masa inicial, kg
m_g	Masa de granos, kg
m_s	Masa seca, g
m_f	Masa final, kg
Nu	Número de Nusselt, adimensional
π	Número pi, adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$)
Φ	Factor de forma, $\frac{(a b c)^{1/3}}{a}$ (Khansa & Bintoro, 2021)
θ	Ángulo del cono, $^\circ$
ρ	Densidad del fluido, kg/m^3
$\rho_{\text{aire prom}}$	Densidad promedio del aire, kg/m^3

ρ_a	Densidad del aceite, kg/m ³
ρ_b	Densidad aparente de las partículas, kg/m ³
ρ_p	Densidad real de la partícula, kg/m ³
P_t	Presión total, Pa
P_s	Presión estática, Pa
Pr	Número de Prandtl, adimensional
ΔP_{Total}	Pérdida de presión total, Pa
$\Delta P_{Fricción}$	Pérdida de presión por fricción en las tuberías, Pa
$\Delta P_{Accesorios}$	Pérdida de presión por los accesorios del sistema, Pa
$\Delta P_{Cámara\ de\ tueste}$	Pérdida de presión asociada a la cámara de tueste, Pa
$Q_{entrada}$	Energía de entrada, W
$Q_{generado}$	Energía generada por la resistencia eléctrica, W
Q_{aire}	Energía transferida al aire, W
$Q_{almacenado}$	Energía almacenada en el sistema, W
$Q_{pérdidas}$	Pérdidas de energía hacia el ambiente, W
$Remsi$	Número de Reynolds de la partícula a la entrada del fluido con la cama a chorro mínimo = $dp \, umsi \, \rho / \mu$
$r_{int/ext}$	Radio interno o externo de una tubería, m
Ra	Número de Rayleigh, adimensional
Re	<i>Numero de Reynolds</i> , $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ (Cengel & Ghajar, 2011)
T	Temperatura actual, °C o K
T_0	Temperatura inicial, °C o K
T_{aire}	Temperatura del aire, °C o K
$T_{superficie}$	Temperatura de la superficie, °C o K

T_{fluido}	Temperatura del fluido, °C o K
$T_{ambiente}$	Temperatura del ambiente, °C o K
$T_{infinita}$	Temperatura del fluido ambiente, °C o K
T_{prom}	Temperatura promedio, °C o K
T_{tueste}	Temperatura del tueste, °C o K
ΔT_a	Diferencial de temperatura del aire de entrada a la cámara de tostado, °C
t	Tiempo, s
U	Velocidad del aire superficial de la cama a chorro, m/s
U_{ms}	Velocidad superficial del aire con la cama a chorro mínimo, m/s
u_i	Velocidad del aire, m/s
u_{mis}	Velocidad superficial del aire con la cama a chorro mínimo, basada en D_i , m/s
$u(t)$	Señal de control en el tiempo t
μ	Viscosidad absoluta, Pa s
V_p	Volumen de la partícula, m^3
V	Flujo volumétrico de aire, m^3/s
v	Velocidad del fluido, m/s
ν	Viscosidad cinemática, m^2/s
γ	Ángulo del cono, radianes o grados
X	Contenido de humedad, % base húmeda

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva típica de tueste	9
Figura 2. Geometría básica de una cama de lecho a chorro. Modificado de Epstein y Grace (2011)	15
Figura 3. Mallas de cribado	22
Figura 4. Picnómetro	23
Figura 5. Ejes ortogonales de un grano de café (De Araujo et al., 2021)	25
Figura 6. Medidor de actividad del agua (A), balanza de humedad (B), balanza de masa (C), molidor de café (D)	47
Figura 7. Distribución granulométrica del café a tostar	48
Figura 8. Diámetro equivalente de los granos de café	49
Figura 9. Densidad real de los granos de café respecto a su temperatura de extracción	51
Figura 10. Variación de la velocidad (Ums) respecto a los cambios morfológicos del grano de café	53
Figura 11. Geometrías viables de cono truncado para la cámara de tostado	56
Figura 12. Vista frontal del elemento calefactor dentro de la tubería del tostador	63
Figura 13. Plenum a la entrada de la cámara de tostado	66
Figura 14. Ventilador centrífugo modelo 7060 y su controlador PWM	68
Figura 15. Vista lateral (A) y superior (B) del prototipo preliminar del tostador con los componentes principales	69
Figura 16. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) del acople entre el ventilador y la tubería del tostador	73

Figura 17. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección para la resistencia eléctrica.....	74
Figura 18. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección donde se ubican el sensor de temperatura y el tubo Pitot	75
Figura 19. Vista frontal de la férula y su empaque modificados (A), abrazadera modificada (B) y ensamblaje completo (C)	76
Figura 20. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección de la cámara de tueste	77
Figura 21. Estructura final del tostador entregado por el taller de componentes de acero inoxidable desde distintos ángulos	78
Figura 22. Vista lateral (A) y frontal (B) de las resistencias eléctricas instaladas por el taller...	79
Figura 23. Diagrama del circuito de control de temperatura	80
Figura 24. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante proporcional, mientras las constantes integral y derivativa son cero	82
Figura 25. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante integral, mientras la constante proporcional es 110 y la derivativa es cero	83
Figura 26. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante derivativa, mientras la constante proporcional es 110 y la integral es 10	84
Figura 27. Comportamiento del PID después de realizar el ajuste fino	85
Figura 28. Diagrama del circuito de control de potencia del abanico	87
Figura 29. Contenido de humedad en base húmeda respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste	88
Figura 30. Actividad de agua respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste	90

Figura 31. Pérdida de masa total respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste	91
Figura 32. Pérdida de masa seca respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste	93
Figura C1. Curva de operación presión-caudal del ventilador 7060 DC 12V/24V (AliExpress, s.f.)	123
Figura C2. Extracto de la ficha técnica: Descripción de pines del amplificador MAX6675 (Maxim Integrated, 2002)	123
Figura C3. Extracto de la ficha técnica: Especificaciones del relé de estado sólido SSR-DA (Fotek, s.f.)	125
Figura C4. Extracto de la ficha técnica: Curva de salida vs. presión diferencial del sensor MPXV7002DP (NXP Semiconductors, 2021)	126

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I. Coeficientes ajustados para la curva del diámetro equivalente respecto a la temperatura del tostador	50
Cuadro II. Coeficientes ajustados para la curva de la densidad real respecto a la temperatura ..	52
Cuadro III. Dimensiones de las tuberías utilizadas	71
Cuadro IV. Resumen de los parámetros de los ajustes lineales para la pérdida de masa total a diferentes temperaturas de tueste	91

RESUMEN

La mayoría del café costarricense se exporta sin tostar, reduciendo el valor agregado retenido en el país y subrayando la necesidad de innovar en torrefacción para competir en mercados internacionales. El objetivo general del proyecto fue diseñar un prototipo de tostador de aire caliente con cama de lecho a chorro, orientado a la torrefacción controlada de granos de café a escala familiar. La caracterización de los granos de café incluyó un análisis de granulometría, densidad real y diámetro equivalente en función de la temperatura. La cámara de tueste se dimensionó con base en la caracterización de los granos de café. El dimensionamiento de la resistencia eléctrica y el ventilador se realizó mediante la aplicación de un balance de energía y el cálculo de la pérdida de presión, respectivamente. Además, se incorporó un sistema proporcional, integral y derivativo (PID) para garantizar la estabilidad del proceso de tueste, el cual fue calibrado mediante iteración manual. El prototipo final se construyó en acero inoxidable 304 y en las pruebas experimentales se estabilizaron tres temperaturas de 185, 190 y 195 °C, con tiempos de tueste entre 8 y 14 minutos, se observaron valores menores al 4 % en contenido de humedad base húmeda (b.h.). La pérdida de masa total fue mayor al 8 %, con un comportamiento lineal respecto a la temperatura ($R^2 > 0,93$) y se registró pérdida de masa seca en un rango de 2 a 6 % en las pruebas realizadas. Los cambios medidos en el contenido de humedad, pérdida de masa total y pérdida de masa seca de los granos de café son congruentes con la literatura en cuanto al proceso de torrefacción.

1. INTRODUCCIÓN

El café, originario de los bosques de Etiopía, es hoy una bebida global consumida diariamente por millones de personas y producida comercialmente en cuatro continentes (Morris, 2019). La producción del café se ha extendido por diversas regiones tropicales, impulsado por la demanda de la bebida (Moreira et al., 2020). La adaptabilidad del cultivo a estas zonas junto con la alta demanda del producto han favorecido la aparición de mercados que valoran su procedencia y calidad sensorial.

En Costa Rica, factores como el aumento en el número de cafeterías y la incorporación de nuevas variedades están dinamizando el mercado interno del café tostado, con una tendencia creciente en la calidad (PROCOMER, 2020). El reconocimiento internacional de los granos costarricenses también contribuye a su aceptación mundial. Costa Rica tiene una ventaja competitiva gracias a su buena imagen internacional como productor de café de calidad (Jarvenpa, 2000).

El sector cafetalero de Costa Rica sigue mejorando para mantenerse competitivo en los mercados internacionales. Una de las formas de agregar valor al café es mediante el tostado, un proceso que está poco explorado en el país y a nivel de exportación. La mayoría del café costarricense (99%) se exporta sin tostar (PROCOMER, 2018a), lo que significa que el país no está aprovechando esta parte de la cadena de valor, y, por lo tanto, indica un potencial no explotado. Aumentar el tueste en origen podría proteger al país de los bajos precios del grano (ICAFE, 2020) manteniendo un mayor margen de ganancia en el país (PROCOMER, 2018b).

El mercado de Estados Unidos, el mayor consumidor de café oro y el segundo en café tostado, presenta una tendencia de crecimiento basada en la sofisticación del producto, lo que incluye

nuevos procesos, variedades y sabores (PROCOMER, 2018a). Esto representa un reto y una oportunidad para Costa Rica en cuanto a darle valor agregado a los granos de exportación, y así competir en mercados exigentes. Según PROCOMER (2018a), el tueste es una de las opciones para darle un valor agregado al producto, ya colocaría al país un paso más cerca del consumidor final, y por tanto en una mejor posición en cuanto a márgenes de ganancia. Según Pascucci (2018), la manera de ganar ventajas competitivas en estos mercados es mediante el desarrollo tecnológico.

En este sentido, cabe destacar que para tostar café de manera eficiente y mantener la calidad esperada, es necesario desarrollar conocimientos teóricos y prácticos. Debido a que tanto las características químicas y físicas del grano de café, como sus dimensiones, composición y masa, varían significativamente (Abarca 2017; Vargas 2014), es importante mantener las variables del proceso dentro de los rangos deseados. En los tostadores de café, especialmente en los de aire caliente, la temperatura y la velocidad del aire en el sistema de tueste deben ser controladas con precisión y también ajustadas en función de las propiedades dinámicas de los granos. Estas adaptaciones son necesarias para garantizar un flujo de aire adecuado y un perfil de tueste uniforme, lo que resalta la importancia de desarrollar un sistema de control que pueda responder a estas variaciones.

Este trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de diseñar un prototipo de un equipo de tueste de café a escala familiar, el cual emplea un sistema de convección forzada de aire caliente. Debido a que en el tueste se desarrollan los cambios fisicoquímicos que determinan el perfil de sabores del café (Wang, 2012), el proceso debe realizarse de manera controlada. En el sistema propuesto se implementó un sistema electrónico de control de tipo

Proporcional-Integral-Derivativo (PID) con el objetivo de mantener las variables del tueste dentro de los parámetros deseados. El presente trabajo se enfoca tanto en la construcción de un prototipo, como en la comprensión y ajuste de estas variables para el proceso de tueste.

1.1. Objetivo general

Diseñar un prototipo de tostador de aire caliente para la torrefacción controlada de los granos de café a escala de domicilio familiar.

1.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un prototipo tostador de café con aire caliente a partir de las interacciones de transferencia de calor y masa durante la torrefacción.
2. Construir el tostador de granos de café a partir de la aplicación de los criterios de diseño establecidos.
3. Validar la capacidad del tostador para la torrefacción de granos de café mediante el desarrollo de los perfiles de tueste.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Según Mathur y Gishler (1955), una cama de lecho a chorro es un tipo de lecho fluidizado utilizado en procesos industriales, donde un chorro de gas se introduce a cierta velocidad para mantener en movimiento partículas sólidas dentro de una cámara, permitiendo reacciones químicas o tratamientos térmicos eficientes sobre las partículas. La existencia de las camas de lecho a chorro se publicó por primera vez en 1955 como una nueva técnica para poner en contacto gases con partículas sólidas gruesas. Las camas de lecho a chorro surgieron como una alternativa a los problemas de segregación y comportamientos inestables en las camas fluidizadas. En el año 1957 esta técnica fue patentada gracias a su amplia aplicabilidad en sistemas industriales (Ghisler & Mathur, 1957).

A partir de la primera publicación, se ha generado una gran cantidad de información y trabajos respecto al tema por sus nuevos campos de aplicación. En el año 1973 se creó, de parte de los mismos autores, un nuevo texto que compiló los extensivos avances hasta ese momento que habían robustecido la caracterización del método (Mathur & Epstein, 1973). La recopilación más reciente respecto a este tema fue publicada en el 2011 por Epstein y Grace.

Las camas de lecho a chorro han sido utilizadas de manera efectiva en granos de morfologías que no son esféricas; esto mediante el uso de diámetros equivalentes (Haddou et al., 2013). El régimen de lecho a chorro se ha evaluado con diferentes morfologías de granos como arroz, frijoles, sorgo y maíz. Con base en el secado evaluado para estos distintos granos, Corea-Juárez et al. (2021) concluyó que esta clase de equipos es ideal por su versatilidad cuando se deben trabajar distintos granos en un mismo equipo.

Se han utilizado técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) con el objetivo de describir el flujo aerodinámico dentro de las camas de lecho a chorro. En un estudio se comparó los resultados experimentales, ecuaciones propuestas —como la de Mathur y Gishler (1955) para U_{ms} (ver sección 2.2.2)—, y los resultados de las simulaciones de CFD (Marchelli et al., 2017). Marchelli et al. (2017) señalaron que, aunque la simulación y la aproximación teórica difieren hasta un 22 % respecto a los datos experimentales, ambas permiten estimar con fiabilidad la velocidad de entrada.

El uso de camas de lecho a chorro específicamente para el tueste de granos de café ha sido documentado. La mayor calidad de producto se ha encontrado a una temperatura del aire de entrada a 250° C y un tiempo de tueste de 5 minutos (Nagaraju et al., 1997). Según este mismo estudio, se pueden obtener las tonalidades de color deseadas en los granos dependiendo de la temperatura del aire de entrada, las cuales están asociadas al nivel de tueste del producto final. En este sentido, Nagaraju y Bhattacharya (2010) encontraron que, desde el punto de vista sensorial, se preferían los granos con tonos de café oscuro frente a aquellos con tonalidades negras.

Debido al alto coeficiente de transferencia de calor que se presenta en los tostadores de lecho a chorro, se han presentado modelos que tratan al grano como un producto no homogéneo. Heyd et al. (2007) propusieron un modelo dinámico que consideró la transferencia de calor y masa en la superficie y el interior de los granos. Con este modelo se pudo predecir la temperatura del grano a partir de otras variables, como la temperatura de salida del aire de la cámara.

2.2. Marco conceptual

El tueste del café se puede simplificar como el suministro de calor a los granos de café verde. Sin embargo, la parte importante para llevar a cabo este proceso es el control de las temperaturas durante el tiempo correcto, esto para posteriormente detenerlo cuando el producto esté completamente desarrollado. La dificultad de describir la etapa de tueste radica en los cambios drásticos que ocurren en el grano, como: temperatura, dimensiones, volumen, masa y densidad, entre otras (Illy & Viani, 2005).

En la Figura 1 se ilustran los momentos clave del proceso de tueste de los granos de café. Inicialmente, la temperatura cae hasta cerca de los 160 °C. En esta fase, y como lo mencionan Pereira y Moreira (2021), los granos experimentan principalmente una pérdida de agua en forma de vapor, por lo que se le conoce como etapa de secado (ilustrado en verde). Cabe destacar que, antes de que acabe la etapa de secado, a partir de aproximadamente 150 °C (G. L. Hu et al., 2019), inicia la reacción de Maillard, la cual produce cambios en la estructura química de la matriz del grano y la liberación de compuestos volátiles (ver sección 2.2.1).

La etapa temprana de tueste da inicio a partir de los 160 °C y se termina entre los 180 y 260 °C, según el grado de tueste deseado. Luego, y debido a cambios como la expansión del grano y la liberación de gases desde el interior, los granos se fisuran produciendo un sonido de “pop”. Este punto, conocido como primer crack, indica que el tueste se encuentra en una etapa avanzada (Fadai et al., 2016). Por último, si los granos se siguen calentando, esto lleva el material a un segundo punto donde genera el mismo sonido que en el primer crack. Como lo mencionan Fadai et al. (2016), este segundo crack está asociado a tuestes mucho más oscuros y la posibilidad de

desarrollar sabores indeseados, por lo que, generalmente, el tueste se termina en algún punto entre los dos cracks.

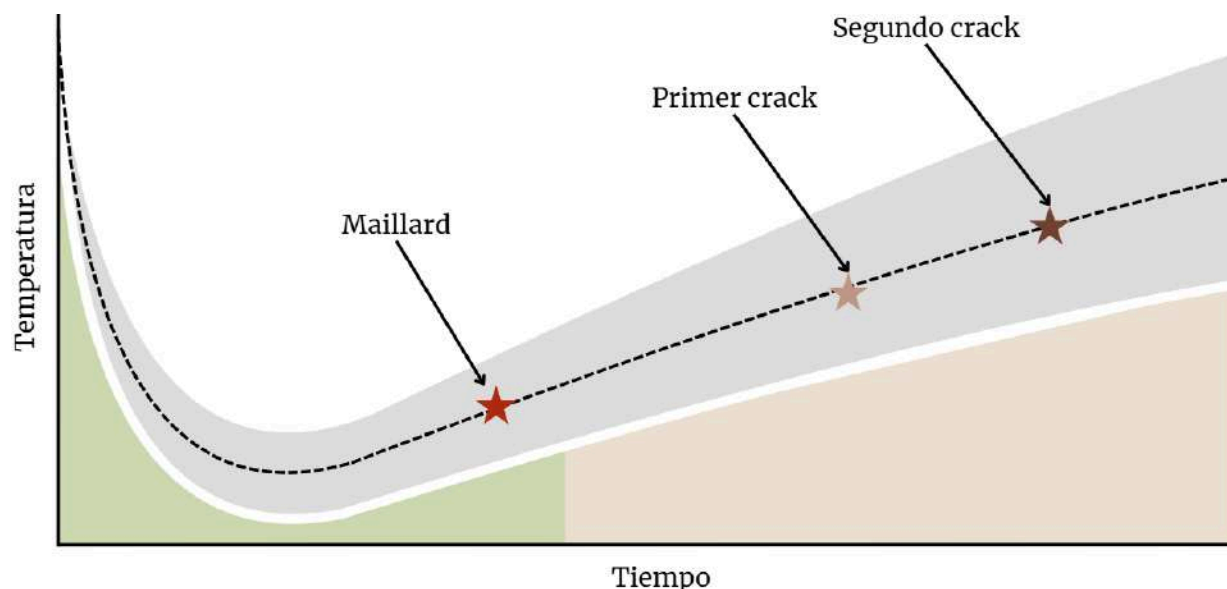


Figura 1. Curva típica de tueste.

Según Schwartzberg (2002), en las fases avanzadas o finales del tueste del café, se requiere de compuestos (detallados en la sección 2.2.1) que son formados al inicio del proceso. Estos compuestos, tanto al inicio como en las fases avanzadas del tueste, se ven afectados por la temperatura del proceso. Esto implica que, para lograr un sabor repetible a partir de una misma muestra de café, es necesario un estricto control de temperatura respecto al tiempo durante todo el tueste. Para que se desarrollen los cambios físicos y químicos impulsados por el incremento en la temperatura, los equipos de tueste ponen en contacto los granos con superficies metálicas calientes, con gases a alta temperatura o una combinación de ambas (Clarke & Vitzthum, 2001).

En el proceso del tueste, el café libera gases como vapor de agua, CO_2 y compuestos orgánicos volátiles (VOC), mientras que recibe calor por convección, radiación y conducción (Clarke & Vitzthum, 2001). Además, es necesario considerar que el grano libera calor a través de

reacciones exotérmicas durante la torrefacción, lo cual debe ser detenido al final con un proceso conclusivo de enfriamiento (Illy & Viani, 2005). Estos cambios en la matriz del grano se pueden ver influenciados por la reacción de Maillard.

2.2.1. Reacción de Maillard

La reacción de Maillard es un proceso multietapa que se inicia con la reacción entre azúcares reductores y grupos amino de proteínas o aminoácidos (Lund & Ray, 2017; van Boekel, 2006). Este fenómeno genera compuestos intermedios, como bases de Schiff y productos de Amadori, que derivan finalmente en la formación de polímeros de coloración parda denominados melanoidinas (Lund & Ray, 2017). Durante la reacción, surgen compuestos volátiles —entre ellos pirazinas, furanos y aldehídos— que aportan distintas notas sensoriales (van Boekel, 2006). En el tueste de café, la elevada temperatura intensifica la reacción de Maillard, lo que favorece la producción de melanoidinas y da lugar a la característica coloración oscura de los granos tostados (Lund & Ray, 2017; Liu et al., 2022). Entre los intermediarios más importantes destacan los α -dicarbonilos, que al combinarse con aminoácidos forman pirazinas y furfurales, influyendo así en los perfiles sensoriales (van Boekel, 2006; Lee et al., 2024). Asimismo, la subsecuente degradación de Strecker produce aldehídos y cetonas que contribuyen a la complejidad aromática (Cardoso et al., 2023). El control de variables como la temperatura, la disponibilidad de reactivos y el tiempo de tueste se ha estudiado con el fin de maximizar la calidad sensorial y mitigar la generación de compuestos no deseados como la acrilamida (Lund & Ray, 2017). De manera resumida, esta reacción afecta de manera significativa el color, sabor y aroma del café tostado.

2.2.2. Tipos de tostadores de café

El método para tostar los granos de café puede tener efectos significativos sobre su sabor en taza. Los resultados para distintos orígenes de café pueden tener calificación variable según el tipo de tostador (Bolka & Emire, 2020). En este contexto, es necesario comprender las características de los diferentes tostadores disponibles, pues cada uno puede influir de manera distinta en el producto final.

Los tostadores de cilindro horizontal se han utilizado para operaciones por lotes y continuas, según Clarke & Macrae (1989). En este tipo de tostador el cilindro rota a una velocidad menor a la cual la fuerza centrífuga haría a los granos adherirse a la pared del equipo (Schwartzberg, 2002). Estos tostadores transmiten el calor a los granos desde la pared del cilindro, además que estos pueden tener paredes perforadas para permitir el paso de aire caliente (Illy & Viani, 2005). Gracias a que se han desarrollado mejores controles de temperatura, este tipo de tostadores pueden producir lotes de manera consistente (Clarke & Vitzthum, 2001).

Los tostadores de cámara fija cuentan con paletas que se encargan de mover los granos de café (Clarke & Macrae, 1989). La entrada de flujo de aire genera capas de 30 a 50 mm para que el tueste sea uniforme y reduzca gradientes de temperatura (Schwartzberg, 2002). Tanto en los tostadores de cilindro giratorio como en los de cilindro estático, el enfriamiento se realiza en un compartimento aparte con aire a temperatura ambiente (Schwartzberg, 2002) para detener el proceso de tueste.

Otro tipo de tostador es el de cama fluidizada, el cual se introdujo desde 1957 (Clarke & Macrae, 1989). Este equipo cuenta con un plenum a través del cual se hace pasar aire a alta temperatura, lo que permite un alto coeficiente de transferencia de calor. La velocidad a la que sale el aire a

este plenum es la característica que permite el movimiento de los granos de café (Clarke & Vitzthum, 2001).

Los tostadores de cama fluidizada no deben confundirse con aquellos que emplean un sistema de lecho a chorro, el cual consta de una cámara cónica vertical donde el aire ingresa por la base angosta (Epstein & Grace, 2011). Según Epstein y Grace (2011) el lecho a chorro se caracteriza por formar una especie de fuente en la parte central y superior de la columna de grano. Según Schwartzberg (2002), estos equipos suministran una gran cantidad de superficie para la transferencia de calor por unidad másica de granos respecto a los otros tipos de tostadores.

Una ventaja de los tostadores de lecho a chorro es su alto control sobre las variables del proceso de tueste, como el tiempo, la temperatura, el enfriamiento y el flujo de aire, lo cual permite consistencia entre procesos (Heyd et al., 2007). La circulación continua de los granos en el reactor evita sobrecalentamientos en puntos específicos, lo cual promueve cambios homogéneos en las características físicas de los lotes de tueste (Virgen-Navarro et al., 2016). Parte de las ventajas que mencionan Nagaraju et al. (1997), es la alta tasa de transferencia de calor que se obtiene en un tostador de lecho a chorro permite procesos de alta temperatura y tiempo corto (HTST) con resultados homogéneos en las propiedades finales del grano.

2.2.3. Material de construcción del tostador

Para la construcción de equipos de tueste de café, es necesario considerar la exigencia térmica en cuanto a la resistencia de los materiales, durabilidad frente a la corrosión y facilidad de limpieza. Dewangan et al. (2015) destacan que el acero inoxidable 304 es el grado más utilizado en aplicaciones generales de la industria alimentaria gracias a su balance entre resistencia, durabilidad y accesibilidad comercial. Según Abbas et al. (2023), aceros como el 316L, por su

contenido de molibdeno, muestran una mayor resistencia a la corrosión en presencia de cloruros o ácidos orgánicos agresivos. Los hallazgos de Novaes et al. (2019) y Yeretizian et al. (2002) muestran que las condiciones operativas del tostador no implican exposición a estos agentes corrosivos; por lo que el uso del acero 304 se considera suficiente para este tipo de aplicación.

Los tostadores de café operan a temperaturas de 250-300 °C, lo que se encuentra dentro del rango de estabilidad térmica y mecánica del acero inoxidable 304 para aplicaciones de procesamiento de alimentos (Ogunjirin et al., 2020; Dewangan et al., 2015). Sun et al. (2021) explican que la estructura austenítica del acero inoxidable contribuye significativamente a su resistencia a deformaciones térmicas, permitiendo su uso en aplicaciones a altas temperaturas sin comprometer sus propiedades. Baddoo (2008) refuerza esta idea al señalar que los aceros inoxidables austeníticos pueden soportar temperaturas de hasta 500 °C, dependiendo de las condiciones operativas y de diseño.

Abbas et al. (2023) mencionan que la estabilidad de la superficie en aceros inoxidables en entornos alimentarios es crítica para mantener la pureza del producto. De manera similar, Jellesen et al. (2015) destacan que los aceros inoxidables son ampliamente utilizados en la industria alimentaria debido a su baja emisión de metales y su capacidad para resistir el desgaste y la corrosión.

2.2.4. Camas de lecho a chorro y las propiedades de granos de café asociadas

Las propiedades aerodinámicas de los granos de café pueden afectar el funcionamiento del tostador. Las propiedades de los granos de café pueden cambiar con su contenido de humedad, ya que, conforme éste aumenta, también aumenta la velocidad terminal y su coeficiente de arrastre (Afonso Júnior et al., 2007). Las propiedades de los granos de café también pueden

cambiar dependiendo de su variedad, por lo que es importante considerarla (Afonso Júnior et al., 2007).

Según la clasificación de Geldart, los granos de café se consideran partículas del grupo D. La clasificación de Geldart es utilizada para segmentar partículas por tamaño en camas fluidizadas (Guatemala et al., 2012). En el grupo D se encuentran partículas grandes (entre 5 y 10 mm en diámetro equivalente), sin embargo, el mismo está asociado a inestabilidades indeseadas en la fluidización, por lo que se recomiendan camas a chorro para esta categoría (Han, 2014).

La mayoría de las correlaciones desarrolladas para las camas de lecho a chorro requieren de ciertas características de las partículas en la fase sólida. Es necesario conocer la esfericidad o diámetro equivalente, la densidad real de las partículas, calor específico y su densidad aparente (Epstein & Grace, 2011). Según Epstein y Grace (2011), los demás parámetros necesarios para describir la transferencia de calor están dadas por las características propias del sistema como: Flujo másico, coeficientes de transferencia de calor y temperaturas.

Las camas de lecho a chorro cónicas (ver Figura 2) están restringidas por ciertas características geométricas que dan forma al sistema. El equipo se conforma por una entrada de aire de diámetro D_i , la cual es más pequeña que el diámetro de la base del cono D_o (Epstein & Grace, 2011). Estas variables guardan una relación D_i/D_o entre 0,5 y 0,833 para mantener un régimen estable de operación. Según Epstein y Grace (2011) el ángulo del cono está definido por la variable γ , la cual se debe encontrar entre 28° y 60° , ya que ángulos menores presentan inestabilidades y los mayores reducen la recirculación. La altura de la cama (H) y la base mayor del cono (D_b) se relacionan entre sí según el volumen de partículas que se desee acomodar en la

cama. Cabe mencionar que, para partículas de diámetros mayores a 5 mm, H tiene un límite superior, H_m (Epstein & Grace, 2011).

Desde la entrada de aire D_i , se forma un chorro a través del cual las partículas viajan hasta la parte superior, donde se forma la fuente, para posteriormente caer en la zona anular de dicho chorro (Epstein & Grace, 2011). Según Epstein y Grace (2011), las partículas bajan verticalmente en la zona anular para llegar nuevamente a la entrada de aire y reiniciar el ciclo. El chorro al desarrollarse a través de la columna de partículas forma un diámetro, para el cual se han desarrollado ecuaciones que lo calculan como un diámetro promedio, $\bar{D}_s$ (Epstein & Grace, 2011). La cámara de lecho a chorro representan en la siguiente figura:

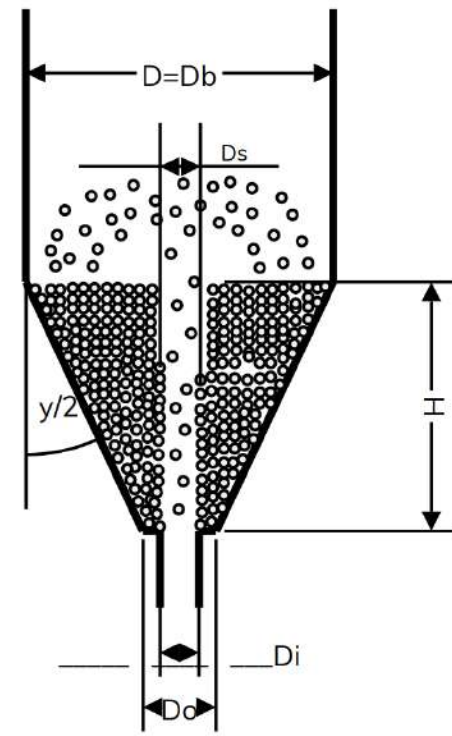


Figura 2. Geometría básica de una cama de lecho a chorro. Modificado de Epstein y Grace (2011).

Para determinar la velocidad mínima (U_{ms}) para alcanzar el régimen de lecho a chorro, según Epstein y Grace (2011), el planteamiento realizado por Mathur y Gishler (1955) sigue siendo el más ampliamente utilizado. Esta relación se puede observar en la ecuación [1] (variables disponibles en el glosario).

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D}\right) \left(\frac{D_i}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{2gH(\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad [1]$$

Para el diámetro promedio ($\bar{D}_s$), dado en la ecuación [2], existe una correlación desarrollada por Li et al. (1996). Epstein y Grace (2011) mencionaron que esta tiene una desviación absoluta de 5% y que es dimensionalmente consistente, por lo que considera las variaciones en la densidad y viscosidad del gas. Las correlaciones para esta ecuación se midieron bajo un estado de operación de $U/U_{ms} = 1,1$, lo cual es un valor recomendado debido a que conforme esta relación aumenta el flujo volumétrico de partículas sólidas en el chorro disminuye (Qiao et al., 2016).

$$\frac{\bar{D}_s}{D} = 5.59 \left(\frac{DU\rho}{\mu}\right)^{0.435} \left(\frac{\rho\rho_p g D}{\mu^2}\right)^{-0.282} \quad [2]$$

2.2.5. Sistemas de control PID

El control de sistemas permite la automatización de procesos en diversas aplicaciones industriales y comerciales. Este campo se enfoca en la monitorización y regulación de variables de proceso, como la temperatura, presión y velocidad, para mantenerlas en niveles deseados a pesar de perturbaciones y cambios en el entorno. La importancia del control automático radica en su capacidad para optimizar la eficiencia operativa, reducir costos y mejorar la seguridad de las operaciones industriales (Hong & YanYing, 2020). La automatización mediante técnicas de

control permite una respuesta rápida y precisa a las variaciones del proceso, lo que es crucial para mantener la calidad y consistencia en la producción (Zermane & Madjour, 2022).

Los sensores y actuadores son componentes clave en cualquier sistema de control. Estos dispositivos detectan y miden variables físicas del entorno, como temperatura, presión, humedad, luz, entre otras. Estos dispositivos convierten las señales físicas en datos que pueden ser procesados por dispositivos electrónicos. La precisión y la fiabilidad de los sensores proporcionan la información necesaria para tomar decisiones informadas y precisas (Lu et al., 2015).

Los actuadores son dispositivos que ejecutan las acciones determinadas por el controlador y que afectan las condiciones del sistema (Lu et al., 2015). Ejemplos incluyen motores eléctricos, válvulas, relés y elementos calefactores. La selección del actuador adecuado depende de la aplicación específica y de los requisitos del sistema. Los actuadores deben ser capaces de responder de manera rápida y precisa a las señales de control para mantener las variables del proceso dentro de los límites deseados (Langeron et al., 2015).

La integración de sensores y actuadores junto con un sistema de control permite una monitorización y regulación continua de las variables del proceso. El sistema de control es el mecanismo encargado de gestionar la interacción entre las lecturas de los sensores y la operación de los actuadores. Este ciclo continuo de medición y ajuste es esencial para mantener un control preciso y eficiente del sistema, garantizando que se mantenga la estabilidad y la eficacia en todo momento (Lu et al., 2015).

Los controladores PID son uno de los métodos más utilizados en el control de sistemas debido a su efectividad. Un controlador PID ajusta la salida de un sistema basado en tres componentes:

proporcional (P), integral (I) y derivativo (D), las cuales se pueden ajustar de manera iterativa. El término proporcional ajusta la respuesta del sistema en función del error actual, el término integral considera la suma acumulada de errores pasados para corregir el error a largo plazo, y el término derivativo predice futuros errores basándose en la tasa de cambio del error. Esta combinación permite que los controladores PID respondan de manera rápida y precisa a las variaciones del proceso, reduciendo las oscilaciones y mejorando la estabilidad del sistema (Haidekker, 2013). Un controlador PID puede representarse matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad [3]$$

Los controladores PID pueden implementarse tanto en modo binario como continuo, dependiendo de los requisitos específicos de la aplicación. El PID binario es adecuado para sistemas de control donde el actuador solo puede estar encendido o apagado. El mecanismo de variación de la intensidad de la salida está dado por la ventana de tiempo que el actuador del sistema se encuentra en la posición encendida o apagada, como en el caso del control de calentadores eléctricos (Rooholahi & Reddy, 2015).

El controlador PID en modo continuo genera una señal de salida que varía dinámicamente dentro de un rango definido. Esta característica de salida modulable facilita la implementación de ajustes al sistema con mayor precisión. Tal configuración es ideal en aplicaciones como el control de velocidad de motores o en sistemas de servocontrol, donde la precisión en la respuesta del sistema es crítica (Haidekker, 2013).

La calibración de los parámetros de un controlador PID es un proceso esencial para optimizar su funcionamiento. Este proceso implica ajustar repetidamente los valores de los parámetros proporcional, integral y derivativo hasta que se logre la respuesta deseada del sistema. La calibración puede realizarse manualmente, iterando mediante prueba y error, o utilizando algoritmos, según sea la complejidad del sistema o hasta obtener un resultado deseado (Rooholahi & Reddy, 2015).

Una de las principales ventajas del control PID es su capacidad para ser ajustado y adaptado en diferentes ambientes operativos. Al ser una función matemática, los PID pueden programarse fácilmente en microcontroladores. Estos dispositivos son adecuados para implementar el PID debido a que pueden manejar la interacción con sensores y actuadores, realizando tareas como la medición de errores, el cálculo de la salida del controlador y su ejecución. Los microcontroladores de la plataforma Arduino son ampliamente utilizados para este tipo de tareas (Sheng, 2019 ; Sheikh et al., 2018).

El Arduino es un microcontrolador reconocido por su versatilidad y facilidad de uso, lo que lo convierte en una opción popular para proyectos de automatización y control (Murillo-Soto, 2015). Sus capacidades incluyen la adquisición de datos de sensores, el procesamiento de señales y la ejecución de algoritmos de control, como los controladores PID (Omar, 2017). Este puede integrarse con una variedad de componentes electrónicos, lo que permite su uso en una amplia gama de aplicaciones que van desde proyectos educativos hasta sistemas industriales complejos (Da Silva et al., 2018).

2.2.6. Mecanismos de transferencia de calor

La primera ley de la termodinámica establece que la energía en un sistema no se pierde, solo se transforma. Esta ley es crucial al analizar cómo el tostador eleva internamente la temperatura del aire e interactúa con las condiciones ambientales. Los mecanismos de transferencia de calor que explican el intercambio energético ante diferencias de temperatura son la conducción, convección y radiación (Cengel & Ghajar, 2011).

La conducción es el proceso mediante el cual el calor se transfiere a través de un medio, como sólidos, líquidos o gases, sin acompañamiento de movimiento de masa. En sólidos, se debe principalmente a la transferencia de energía entre partículas adyacentes. La rapidez de la conducción de calor depende de la conductividad térmica del material (k), la diferencia de temperatura, el espesor del medio y el área a través de la cual se transfiere el calor (Cengel & Ghajar, 2011). Para el caso de la pared de una tubería cilíndrica, el calor de conducción se expresa como:

$$Q_{conducción} = 2\pi kL \frac{(T_{interna} - T_{externa})}{\ln(r_{externo}/r_{interno})} \quad [4]$$

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que involucra el movimiento del fluido, ya sea por medios naturales o forzados. En la convección natural las corrientes de fluido surgen debido a las diferencias de densidad ocasionadas por los gradientes de temperatura. En contraste, la convección forzada las corrientes se logran mediante dispositivos mecánicos como ventiladores o bombas. El coeficiente de transferencia de calor por convección, h , es afectado por distintas propiedades del fluido, como la viscosidad, la conductividad térmica y la capacidad calorífica, así como por la geometría de la superficie y las condiciones del flujo; resaltando la

naturaleza multifactorial de este proceso de transferencia de calor. La razón de transferencia por convección de calor está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{convección} = hA(T_{superficie} - T_{fluido}) \quad [5]$$

La radiación es la transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas o fotones. A diferencia de la conducción y la convección, no requiere un medio material para su propagación, permitiendo que el calor se transfiera a través del vacío. Este es un mecanismo especialmente significativo a altas temperaturas y en espacios donde no hay contacto directo entre las superficies implicadas en la transferencia de calor. La razón de transferencia por radiación de calor está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{radiación} = \epsilon \sigma A (T_{superficie}^4 - T_{ambiente}^4) \quad [6]$$

Al estudiar sistemas termodinámicos donde existen flujos de masa, hacia afuera y hacia adentro, es útil aplicar tanto el concepto de la primera ley de la termodinámica como el principio de conservación de la materia, al modelarlos como volúmenes de control. En esta clase de modelos puede existir un flujo de masa y energía que está en equilibrio dinámico, donde las propiedades del sistema no cambian con el tiempo. Esto se conoce como estado estacionario. Cuando las variaciones en la energía cinética y potencial son insignificantes en un fluido, y no existe interacción de trabajo, la transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control se simplifica como:

$$Q = \dot{m} c_{p\text{ aire}} \Delta T_a \quad [7]$$

3. METODOLOGÍA

3.1 Características de los lotes a tostar

La materia prima que se utilizó en el experimento fue café (*Coffea arábica*) verde u oro, de variedad Catuai rojo. La finca donde se recolectó el grano se encuentra en San Ramón de Alajuela, con una elevación media de 1250 metros sobre el nivel del mar. Los granos fueron cosechados de forma manual, donde solo se seleccionan los granos maduros. A los granos se les retiró el exocarpio únicamente y se secaron sin remover el mucílago (proceso también conocido como *miel*). Los granos fueron secados al sol durante 30 días en mesas elevadas. Las mesas elevadas contaron con un espesor de capa de grano de 3 centímetros con el objetivo de asegurar la circulación de aire por convección natural. La materia prima pertenece a la cosecha 2019 - 2020 y fue almacenada desde su procesamiento hasta el año 2024 en una cámara fría a 5 °C.

Se realizó el perfil granulométrico de la muestra de los granos por medio de mallas de cribado (ver figura 3) de los números 16, 17, 18, 19 y 20. Una vez que la muestra de masa conocida (100g) se hizo pasar por las cribas mediante agitación manual, se obtuvieron las fracciones porcentuales de dicha muestra que quedaron en cada una de las cribas. Las pruebas y los tuestes se realizaron para la fracción predominante en la granulometría del café.

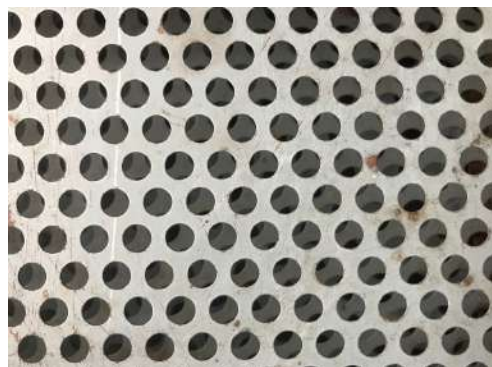


Figura 3. Mallas de cribado (elaboración propia).

De acuerdo con la metodología de Vargas (2011), se calibró un picnómetro para medir la densidad de los granos de café. Según el Instituto Adolfo Lutz (2008), el procedimiento requirió limpiar, secar y pesar el picnómetro vacío. Luego, se llenó hasta la marca con agua destilada a 25 °C y se pesó lleno. La diferencia de masa permitió calcular el volumen del picnómetro, que resultó ser 32,15 mL. Con el instrumento calibrado, se midió la densidad de cinco granos de café seleccionados aleatoriamente y en triplicado, empleando aceite de soya (con una densidad de 918,80 kg m⁻³) para estimar el volumen desplazado.

La siguiente ecuación fue la empleada para calcular la densidad real:

$$\rho_p = \rho_a \left(\frac{m_g}{m_{ad}} \right) \quad [8]$$



Figura 4. Picnómetro (elaboración propia).

Para este trabajo, se midió la densidad real de granos de café para 8 temperaturas distintas entre 25 a 250 °C, con incrementos de 25 °C entre pruebas y con 3 repeticiones para cada punto con tal de obtener mayor precisión en los datos. Una vez obtenidos los datos de densidad real, se aplicaron métodos numéricos para ajustar una curva que representa la relación entre la temperatura y la densidad real.

Con la ecuación obtenida, se determinó cuál es la densidad real que presentan los granos en función de la temperatura. Esto fue de gran importancia para el proceso de tostado mediante aire caliente, ya que parámetros del funcionamiento del tostador, como la velocidad del aire, dependen de este valor.

El experimento se llevó a cabo en un ambiente controlado, utilizando el picnómetro y un tostador convencional para tostar los granos. Es importante resaltar que el análisis realizado fue independiente del tiempo de tostado y enfocado en la temperatura de los granos, por lo que se asume que el resultado es independiente del tipo de tostador utilizado. Para cada punto se reportó información de estadística descriptiva (promedio y desviación estándar), mientras que, para el ajuste, se utilizó el promedio de cada uno de los 8 puntos. El ajuste de los puntos con el modelo se realizó mediante regresión no lineal en el software SIGMAPLOT.

Respecto al diámetro de la partícula, se tomó la fórmula empleada por Tscheuschner (1987) para calcular el diámetro equivalente, ya que los granos de café se aproximan a un semielipsoide. La fórmula se muestra a continuación:

$$d_p = (abc)^{1/3} \quad [9]$$

En esta fórmula, a, b y c representan las dimensiones máximas de los ejes ortogonales en los granos, como se muestra en la figura 5.

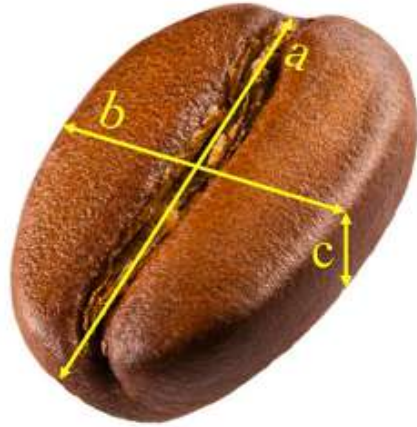


Figura 5. Ejes ortogonales de un grano de café (De Araujo et al., 2021).

La ecuación que describe el volumen de un grano de café está dada por:

$$V_p = \frac{\pi(abc)}{6} \quad [10]$$

se pueden igualar las ecuaciones 10 y 11 en el término (abc) y despejar el diámetro equivalente como:

$$d_p = \left(\frac{\pi V_p}{6}\right)^{1/3} \quad [11]$$

Con los datos obtenidos del procedimiento para la densidad real, se conoce el valor del volumen promedio para 5 granos, por triplicado y en 8 puntos de medición en el rango de temperatura de 25 a 250 °C (en incrementos de 25 °C). Con esta información, se calcula el diámetro equivalente respecto a la temperatura del grano. Esto fue de gran importancia para el proceso de tostado mediante aire caliente, ya que parámetros del funcionamiento del tostador, como la velocidad del aire, dependen de este valor.

Para cada punto se reportó información de estadística descriptiva (promedio y desviación estándar). Para el ajuste se utilizó el promedio de cada uno de los 8 puntos. La metodología se llevó a cabo en un ambiente controlado, donde se utilizó un vernier de marca Carrera Precisión, con precisión de 0,01 mm para medir las dimensiones ortogonales de los granos de café y un tostador convencional para tostar los granos. El ajuste de los puntos con el modelo se realizó mediante regresión no lineal en el software SIGMAPLOT.

3.2. Establecimiento de los criterios de diseño del tostador

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un diseño de tostador que sea aplicable a nivel domiciliario. Para definir las dimensiones finales del diseño, se han utilizado fundamentos tanto teóricos como empíricos, detallados previamente en el marco teórico. Aunque las dimensiones derivadas de estas ecuaciones son analíticamente precisas, resulta crucial lograr un equilibrio entre estas soluciones teóricas y la disponibilidad de componentes comerciales. Por ello, se ha priorizado el uso de elementos estándar del mercado que concuerden con los requisitos teóricos del diseño, garantizando así la reproducibilidad del dispositivo. Esta estrategia es esencial para asegurar que las decisiones tomadas sean tanto prácticas como teóricamente sólidas, tal como lo respaldan distintas investigaciones (Nouri et al., 2014; Le et al., 2020).

3.2.1 Dimensionamiento del tostador

La cámara del tostador de aire caliente se compone de un cono truncado con un diámetro mayor (D) en la parte superior y un diámetro menor (D_o) en la parte inferior. En la parte superior, se une un cilindro del mismo diámetro D . Es importante considerar que, de manera concéntrica al cono truncado, se encuentra la entrada de aire con un diámetro específico (D_i). Para garantizar un flujo de aire estable y una correcta distribución del calor durante el proceso de tueste, las

dimensiones de estos elementos deben mantener ciertas relaciones entre sí, asegurando que el sistema funcione dentro de un régimen controlado de lecho a chorro.

Para definir una geometría operativamente estable de la cámara de tostado, fue necesario respetar las restricciones geométricas y de diseño establecidas en investigaciones previas. Estas restricciones tienen el objetivo de asegurar que el flujo de aire se mantenga dentro de un régimen adecuado para la formación del lecho a chorro. Por ejemplo, según Epstein et al. (2010), el ángulo del cono (γ) de la cámara de tostado debe estar entre 28 y 60 grados para asegurar una recirculación constante de las partículas.

En el caso del tueste de granos de café, previamente se ha determinado que el espesor de la capa de granos no debe superar los 3 cm para evitar gradientes significativos en la masa de granos. Este concepto, conocido como capa fina, se tomó en cuenta con el objetivo de optimizar la transferencia de calor (Epstein et al., 2010). Se estableció que la distancia entre el flujo de aire y la pared del cono no debe exceder los 3 cm, promoviendo así una distribución térmica uniforme dentro de la cámara de tostado y previniendo la formación de puntos calientes o fríos que puedan comprometer la calidad del tueste.

Para evitar caídas de presión y la formación de zonas muertas, se mantuvo la relación entre el diámetro de entrada de aire (D_i) y el diámetro de la base del cono (D_o), D_i/D_o , entre 0,5 y 0,833 (Epstein et al., 2010). Si D_i/D_o es menor a 0,5, pueden ocurrir una caída de presión significativa y la formación de zonas muertas. Por otro lado, un valor superior a 0,833 puede generar una mala definición del chorro de aire y una mayor inestabilidad en el flujo de partículas debido a movimientos rotacionales. La relación entre el diámetro de entrada de aire (D_i) y el diámetro del cilindro (D) debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$\frac{Di}{D} \leq \varepsilon^{n/2} \quad [12]$$

donde ε es la porosidad del lecho y n es el índice de Richardson-Zaki (Epstein et al., 2010). Esta restricción asegura que el flujo de aire tenga la velocidad necesaria para mantener un régimen estable de lecho a chorro, evitando transiciones a otros regímenes, como la fluidización burbujeante. La fluidización burbujeante es la formación no uniforme de burbujas dentro del lecho fluidizado y es indeseado debido a que genera baja uniformidad del producto final, esto por un contacto heterogéneo del fluido con las partículas (Lim et al., 2006). El índice n se calcula a partir del número de Arquímedes (Ar) utilizando la ecuación empírica:

$$4,8 - n = \frac{n-2,4}{0,047Ar^{0.57}} \quad [13]$$

A partir de las restricciones previamente mencionadas, se dedujo la relación entre el diámetro de la base del cono (Do) y el diámetro del cilindro (D). Para esto, se parte al reescribir la relación como:

$$\frac{Di}{D} = \frac{Di}{Do} \cdot \frac{Do}{D} \quad [14]$$

Y, por lo tanto:

$$\frac{Do}{D} = \frac{\frac{Di}{D}}{\frac{Di}{Do}} \quad [15]$$

Al sustituir los valores correspondientes en la fracción, se obtiene:

$$\frac{Do}{D} = \frac{\varepsilon^{n/2}}{\frac{Di}{Do}} \quad [16]$$

Dado que la porosidad ε y el índice de Richardson-Zaki son constantes, se pueden encontrar los límites superior e inferior de la relación Do/D al minimizar y maximizar el denominador de la ecuación [16], respectivamente. Finalmente, se derivó que, con tal de cumplir las relaciones adecuadas entre Di , Do y D , se debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$\frac{\varepsilon^{n/2}}{0,833} \leq \frac{Do}{D} \leq \frac{\varepsilon^{n/2}}{0,5} \quad [17]$$

Para maximizar la practicidad y la comodidad del diseño, se procuró reducir al mínimo la altura total del equipo. Para disminuir la altura del cono truncado, se maximizaron tanto el diámetro menor (Do) como el diámetro mayor (D) del cono. Una vez identificadas las dimensiones máximas teóricas para ambos diámetros, se seleccionaron los diámetros comerciales más cercanos para el diámetro menor del cono y el cilindro de la cámara de tostado, optimizando así el diseño para facilitar su fabricación. Para verificar que la altura establecida pueda trabajar en un régimen estable, se verificó que su valor fuese menor a la profundidad máxima de operación (Hm), el cual se define como:

$$Hm = \frac{D^2}{dp} \left(\frac{D}{Di} \right)^{2/3} \frac{568B^2}{Ar} (\sqrt{1 + 35,9 \times 10^{-6}} - 1) \quad [18]$$

Donde B , según los mejores ajustes observados por Epstein et al. (2010), debe tomar un valor de 1,11.

Respecto a la altura del cilindro de la cámara de tueste, esta se estableció en función de la altura de la fuente (H_f). Esta variable representa la distancia máxima alcanzada por las partículas de café en el flujo de aire. Esta altura se calculó utilizando la fórmula:

$$H_f = 1,01 \times 10^{-2} \gamma^{-0,14} \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^{1,14} \left(\frac{D_i}{dp} \right)^{0,83} \left(\frac{H_o}{D_o} \right)^{0,52} \left(\frac{u_i}{u_{msi}} \right)^{4,80} \rho_p^{-0,12} \Phi^{-1,45} \quad [19]$$

Mediante esta fórmula, que considera factores geométricos del sistema y las propiedades del flujo de aire, se estableció que la altura del cilindro debía ser suficiente para permitir que la fuente del chorro se desarrollara completamente dentro de la cámara de tostado.

El volumen total de la cámara de tostado es un criterio con el cual también se puede delimitar la geometría del equipo. Este parámetro se determinó a partir de la masa de café que se desea tostar. Utilizando la densidad aparente del café, que típicamente varía entre 550 y 700 kg/m³ (Abarca et al, 2026; Odzakovic et al., 2019; Nuraisyah et al., 2024), la masa objetivo se redefinió como un volumen objetivo.

Según estudios como los de (Odzakovic et al., 2019), se ha observado que distintas propiedades geométricas de los granos de café pueden variar significativamente durante el tueste. Debido a los cambios considerables que pueden experimentar los granos de café, fue necesario considerar su efecto dentro de los criterios de diseño. Por este motivo, las verificaciones geométricas, que dependen de características relacionadas con la geometría de los granos, se realizaron tanto para los granos verdes como para los granos tostados.

3.2.2 Selección de materiales

Para el diseño y construcción del tostador, se llevó a cabo un proceso de revisión de bibliografía sobre materiales basado en criterios de resistencia estructural, durabilidad y facilidad de limpieza. Se estudiaron las propiedades de materiales disponibles en el mercado. Se priorizó la selección de materiales que ofrecieran una alta resistencia a la corrosión y deformación bajo diversas condiciones operativas. Se priorizaron las características relacionadas con la facilidad de limpieza para mantener un proceso inocuo durante el tostado.

El proceso de selección de los componentes electrónicos para el sistema de control del tostador se orientó hacia la búsqueda de una plataforma que no solo fuera económica, sino que también cumpliera con los requisitos de funcionalidad, replicabilidad y modularidad necesarios para promover futuras iteraciones y adaptaciones por parte de otros usuarios. Se buscó que los componentes seleccionados estuvieran ampliamente disponibles en el mercado para garantizar la facilidad de adquisición y reemplazo.

3.2.3 Dimensionamiento de la resistencia eléctrica

En el sistema de tostado bajo estudio, el componente crítico es un tubo metálico que transporta aire caliente, siendo la resistencia eléctrica la fuente de calor. Este tubo está diseñado para asegurar una transferencia de calor efectiva desde la resistencia hacia el aire que fluye por su interior, destinado al proceso de tueste. La correcta determinación de las características del sistema es fundamental para mantener una operación adecuada.

Para dimensionar la resistencia eléctrica del sistema, se adoptó un enfoque basado en el balance de energía. Este acercamiento garantiza que la cantidad de energía suministrada por la resistencia eléctrica sea suficiente para alcanzar y mantener la temperatura deseada para el proceso de

tueste, a pesar de las pérdidas de calor hacia el ambiente. El balance general de energía, en términos de razón de transferencia de calor, es como se muestra a continuación:

$$Q_{entrada} + Q_{generado} = Q_{aire} + Q_{almacenado} + Q_{pérdidas} \quad [20]$$

Tanto el valor de $Q_{almacenado}$ como el de $Q_{generado}$, se asumen como despreciables, ya que no existen mecanismos de almacenamiento o generación interna de energía considerables en el volumen de control. Por otro lado, el valor de Q_{aire} está asociado a la energía necesaria para que el aire eleve su temperatura hasta el valor deseado. Por último, la pérdida del sistema $Q_{pérdidas}$ se da por la suma de los mecanismos de transferencia de calor al ambiente. De este modo, el balance de energía se reduce a:

$$Q_{entrada} = Q_{aire} + Q_{pérdidas} \quad [21]$$

Como ya se mencionó, el valor de Q_{aire} esta asociado al cambio en la energía que experimenta el aire al pasar a través del volumen de control. Este cambio en la energía está dado por una ganancia en calor sensible. El aumento en calor sensible se expresa mediante la ecuación [7]. Los valores que aportan individualmente y de manera considerable, a $Q_{pérdidas}$, son la convección y radiación, los cuales están dados por las ecuaciones [5] y [6], respectivamente. Al sustituir esto en la ecuación [22] se obtiene que el balance general se puede expresar como:

$$Q_{entrada} = \dot{m} c_{p_{aire}} \Delta T_a + h A_{sup} (T_{superficie} - T_{fluido}) + \epsilon \sigma A_{sup} (T_{superficie}^4 - T_{ambiente}^4) \quad [22]$$

Mediante valores reportados en literatura, se estimaron las propiedades del aire como la capacidad calorífica específica ($c_{p_{aire}}$) y la densidad del aire ($\rho_{aire\ prom}$). Dado que la temperatura

del aire varía en el proceso de calentamiento, se asumen las propiedades del fluido a una temperatura promedio:

$$T_{prom} = \frac{T_{tueste} + T_{ambiente}}{2} \quad [23]$$

Al conocer las propiedades del aire dentro de la tubería durante el proceso de calentamiento, se puede estimar el flujo másico ($\dot{m}$). El flujo másico depende del flujo volumétrico (V) y la densidad del aire a la temperatura promedio ($\rho_{aire\ prom}$), y se expresa mediante la siguiente relación:

$$\dot{m} = \rho_{aire\ prom} * V \quad [24]$$

La velocidad para la formación de la fuente de granos en la cámara de aire es conocida, así como el diámetro interno de la tubería. Se debe considerar que la condición nominal de operación debe cumplir con la relación $U/U_{ms} = 1,1$. De esta manera, el flujo volumétrico se puede calcular mediante la fórmula [25].

$$V = Di * U_{ms} * 1.1 \quad [25]$$

Para calcular la diferencia de temperatura necesaria que el aire debe experimentar a través de la resistencia, se toma la temperatura ambiente como valor inicial y la temperatura de tueste como valor final. Los tostadores de aire caliente utilizan temperaturas que rondan entre los 190 °C y 250 °C para el fluido, según estudios como los de Heyd et al. (2007), V. Nagaraju et al. (1997). Para el caso crítico, se toma entonces el diferencial de temperatura como:

$$\Delta T_a = T_{tueste} - T_{ambiente} \quad [26]$$

En el cálculo de la convección natural, el aire se consideró como un gas ideal a 1 atmósfera (101 325 Pa) para simplificar el análisis. No obstante, es importante señalar que esta suposición introduce un error en la estimación de las propiedades termofísicas (Cengel & Ghajar, 2011). Para contabilizar los cambios en las propiedades del aire por el gradiente de temperatura desde la superficie externa del tubo al ambiente, se tomaron las propiedades del aire a una temperatura de película ($T_f = \frac{T_{infinita} + T_{superficie}}{2}$). Las propiedades del aire bajo estas condiciones se obtuvieron de valores reportados en Cengel y Ghajar (2011). Para este caso, el coeficiente de transferencia de calor está dado por la siguiente expresión:

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad [27]$$

A su vez (para valores de $Ra \leq 10^{12}$), el número de Nusselt para un cilindro horizontal está dado por la fórmula:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(Ra)^{1/6}}{(1+(0,559/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2 \quad [28]$$

En cuanto al número de Rayleigh, la longitud característica del tubo es su diámetro, por lo que este se calcula de la siguiente manera:

$$Ra = \frac{g\beta(T_{superficie} - T_{infinita})D^3Pr}{\nu^2} \quad [29]$$

Finalmente, los términos del balance de energía tales como la conductividad térmica del acero (k_{acero}), la longitud del conducto (L), el radio interno ($r_{interno}$) y externo ($r_{externo}$), la emisividad del acero (ϵ) y el área superficial externa del conducto (A_{sup}); están dadas por las características

del material y las dimensiones finales del diseño. Bajo estas condiciones, los únicos términos sin conocer son $T_{superficie}$ y $Q_{entrada}$.

Con el objetivo de introducir una ecuación adicional, se analizó de manera aislada la transferencia de calor desde la pared interna de la tubería hacia la pared externa. En esta parte del sistema, al analizar un sólido, el mecanismo principal es la conducción. Debido a que la pared de la tubería es la separación física entre el aire interno y externo en el sistema completo, el calor que fluye a través de esta hacia el exterior, debe ser igual al flujo de calor asociado a las pérdidas a los alrededores. Esto se expresa de manera matemática de la siguiente manera:

$$2\pi kL \frac{(T_{interna} - T_{externa})}{\ln(r_{externo}/r_{interno})} = hA_{sup}(T_{superficie} - T_{fluido}) + \epsilon\sigma A_{sup}(T_{superficie}^4 - T_{ambiente}^4) \quad [30]$$

Al incorporar la ecuación [30], tenemos un sistema de ecuaciones completo para calcular $T_{superficie}$ y, por lo tanto, $Q_{entrada}$. Los flujos de calor se modelaron mediante la ecuación de conducción en estado estacionario para un cilindro, que, al integrarse con los términos de convección y radiación del lado externo, generan una igualdad en función de $T_{superficie}$. Para resolverla, se aplicó un procedimiento iterativo mediante métodos numéricos en Python (ver Anexo A1 para los detalles del código), esto empleando la biblioteca Sympy (Meurer et al., 2017), la cual facilitó la manipulación simbólica y la resolución numérica de ecuaciones. En el código, se aplicó un procedimiento iterativo con la función “*Solve*” en el que, en cada paso, se recalcularon las pérdidas por convección y radiación en la superficie externa, y se ajustaron la temperatura de la tubería hasta que el calor conducido desde la pared interna igualara las pérdidas al ambiente bajo un criterio de convergencia.

El cálculo de la potencia mínima de la resistencia eléctrica para el sistema de tostado se realizó basándose en la evaluación de las pérdidas de calor al ambiente bajo condiciones ideales y de estado estacionario. Si se selecciona una resistencia basándose únicamente en este criterio, diversos factores externos podrían afectar la operación del sistema (Koyuk et al., 2018). Una de las ventajas clave de los sistemas de control PID es su capacidad para ajustar la potencia neta en respuesta a perturbaciones externas (Sun, 2023). Con el objetivo de aprovechar esta característica, se optó por utilizar un margen del 50 % sobre la resistencia mínima calculada. Elegir una resistencia de mayor valor no solo aumenta la adaptabilidad del sistema, sino que también actúa como un factor de seguridad sobre el escenario ideal de operación.

3.2.4 Dimensionamiento del ventilador

En el diseño del sistema de ventilación para la cámara de tostado, se requiere asegurar la velocidad necesaria para la operación estable del flujo a chorro (U) a la entrada de la cámara de tueste. Este parámetro se puede considerar como un flujo volumétrico que debe mantenerse constante a la entrada de la cámara de tueste. El ventilador seleccionado debe generar un caudal suficiente para alcanzar la velocidad deseada en la entrada de la cámara, superando simultáneamente la carga de presión impuesta por las pérdidas en el sistema. En términos generales, la ecuación para la diferencia de presión total que el ventilador debe vencer se compone de tres elementos: las pérdidas por fricción en las tuberías, las pérdidas locales generadas por los accesorios del sistema, y la pérdida de presión asociada a la cámara de tostado. Esta pérdida de presión total se puede expresar como:

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Fricción} + \Delta P_{Accesorios} + \Delta P_{Cámara\ de\ tueste} \quad [31]$$

Dado que el aire, para el alcance de este proyecto, siempre tiene una velocidad menor a 100 m/s, se puede considerar incompresible (Anderson, 2010), lo que permite utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción. Tanto la ecuación de Darcy-Weisbach como la de Colebrook-White han sido ampliamente utilizadas para el cálculo de las pérdidas por fricción en sistemas de ventilación (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1998; Goodfellow & Kosonen, 2020). Esta ecuación establece que la pérdida de presión debido a la fricción en una tubería es proporcional al producto del factor de fricción de Darcy, la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería, y la presión dinámica del flujo. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$\Delta P_{Fricción} = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad [32]$$

donde L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería, ρ es la densidad del aire, y v es la velocidad del fluido. El factor de fricción de Darcy (f) depende tanto de la rugosidad relativa de la tubería, ϵ/D , como del régimen de flujo, caracterizado por el número de Reynolds (Re). Según la clasificación habitual, se establece a los flujos laminares con $Re < 2300$, transicionales para $2300 < Re < 4000$ y turbulentos para $Re > 4000$ (Cengel & Ghajar, 2011). Para determinar f, se utilizó la ecuación implícita de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\epsilon/D_i}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad [33]$$

Dado que esta ecuación es implícita, se calculó de manera iterativa mediante un código en lenguaje Python (Ver Anexo A2 para los detalles del código). El código se encargó de calcular tanto el lado derecho como el lado izquierdo de la ecuación [33] y comparar ambos resultados de

manera iterativa. Finalmente, el código retorna el primer valor que logre satisfacer el criterio de convergencia.

Es necesario considerar las pérdidas por accesorios, causadas por la resistencia adicional introducida por los elementos del sistema, como codos, válvulas y transiciones. Estas pérdidas se calculan sumando las contribuciones de cada accesorio a través de sus respectivos coeficientes de pérdida, K_i . Los valores de K_i se obtuvieron a partir de tablas estándar que correlacionan la geometría y el tipo de accesorio con su respectiva pérdida de energía (Howell et al., 2021). La expresión para las pérdidas locales es:

$$\Delta P_{Accesorios} = \sum K_i \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad [34]$$

Para cámaras de lecho a chorro de geometría cónica, se debe incluir el término adicional que represente la pérdida de presión específica dentro de la cámara. Para este propósito, se utiliza la correlación empírica desarrollada por Gelperin et al. (1961), definida como:

$$\Delta P_{Cámara\ de\ tueste} = \rho_b g H \left[1 + 0.062 \left(\frac{D_H}{D_i} \right)^{2.54} \left(\frac{D_H}{D_i} - 1 \right) \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0.18} \right] \quad [35]$$

En esta ecuación ρ_b es la densidad aparente de las partículas en el lecho, g es la aceleración gravitatoria, H es la altura del lecho, D_H y D_i son los diámetros en la parte superior e inferior de la cámara respectivamente, y θ es el ángulo de inclinación de las paredes cónicas. Este término captura la influencia de la geometría de la cámara en la resistencia total al flujo.

Se integró un factor de seguridad (F_s) en el diseño del ventilador, con el objetivo de cubrir imprecisiones en las estimaciones y cálculos. La combinación de todas estas pérdidas nos lleva a la ecuación final que determina la diferencia de presión total que el ventilador debe vencer:

$$\Delta P_{Total} = F_s \left\{ f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} + \sum K_i \cdot \frac{\rho v^2}{2} + \rho_b g H \left[1 + 0.0062 \left(\frac{D_H}{D_i} \right)^{2.54} \left(\frac{D_H}{D_i} - 1 \right) \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0.18} \right] \right\} \quad [36]$$

Esta ecuación final integra tanto las pérdidas por fricción y locales en las tuberías como la pérdida debida a la geometría de la cámara de tostado. Al calcular cada uno de estos términos, es posible dimensionar un ventilador que, respecto a su curva de operación, garantice el flujo volumétrico necesario y que también supere todas las resistencias al flujo presentes en el sistema.

3.3. Diseño del tostador y su construcción

3.3.1 Diseño preliminar

En esta etapa del proceso de diseño, se llevó a cabo una construcción preliminar del tostador utilizando materiales económicos. El propósito de esta construcción fue obtener un prototipo funcional que permitiera realizar pruebas y experimentos iniciales, así como recopilar información valiosa para la iteración y mejora del diseño final. La metodología para la construcción preliminar del tostador se dividió en los siguientes pasos:

- **Diseño conceptual:** Se realizó un diseño conceptual inicial del tostador, teniendo en cuenta los criterios de diseño teóricos establecidos previamente. Se consideraron aspectos estructurales como el ángulo del cono, el diámetro del tubo de entrada, la ubicación del ventilador, la colocación del tubo Pitot y el soporte de toda la estructura. Además, se consideró la distribución de los componentes electrónicos del sistema de control.

- **Selección de materiales:** Se seleccionaron materiales de bajo costo o reciclados que fueran adecuados para la construcción del prototipo. Se optó por opciones accesibles y disponibles en el mercado local que cumplieran con los requisitos básicos en cuanto a la facilidad para probar distintas geometrías o configuraciones de distribución.
- **Ensamblaje del prototipo:** El ensamblaje se planificó y se ejecutó conforme a las consideraciones del diseño conceptual, integrando todos los componentes estructurales y electrónicos. Inicialmente, se construyó la estructura principal, se aseguraron el cono, el tubo de entrada y los soportes para mantener la estabilidad del sistema y su alineación axial respecto al ventilador. Posteriormente, se colocaron el tubo Pitot y el sensor de diferencial de presión en posiciones estratégicas para optimizar la estabilidad de las mediciones. Además, se programó un Arduino para procesar las señales del sensor de presión y controlar la velocidad del ventilador en tiempo real utilizando un sistema de control PID.
- **Pruebas y ajustes iniciales:** Una vez completado el ensamblaje del prototipo, se llevaron a cabo pruebas iniciales para evaluar su desempeño. Se realizaron ensayos preliminares para asegurar la comunicación efectiva entre los componentes y la respuesta adecuada del sistema de control. Las verificaciones se realizaron mediante la interfaz interactiva y de programación *Arduino IDE*. En esta etapa, se corroboró la estabilidad cualitativa de operación del chorro de aire a temperatura ambiente para granos sin tostar.
- **Iteración y refinamiento del diseño:** Con base en los datos recopilados y los aprendizajes obtenidos de la construcción preliminar, se realizaron modificaciones y ajustes al diseño conceptual final del tostador. Estas iteraciones permitieron optimizar el

diseño del tostador, así como abordar posibles desafíos identificados durante las pruebas iniciales.

Durante la construcción preliminar del tostador, se llevaron a cabo pruebas cualitativas para evaluar el flujo de la cámara de tostado y la funcionalidad general del diseño. El objetivo de esta etapa fue recopilar información valiosa sobre el prototipo en términos de su capacidad para crear un ambiente adecuado para el tostado de los granos de café y conducir a la construcción de un prototipo más robusto. Es importante destacar que esta construcción preliminar se realizó como una fase experimental y de aprendizaje, y que el prototipo resultante no fue el diseño final del tostador. Este paso es un proceso de aproximación al diseño final, etapa necesaria en cualquier tipo de desarrollo tecnológico.

3.3.2 Diseño final del prototipo

El diseño final del prototipo de tostador de café se depuró a partir de integrar los hallazgos obtenidos durante las pruebas del prototipo preliminar y los cálculos teóricos del proceso de lecho a chorro. Este enfoque permitió evaluar la viabilidad del diseño desde un punto de vista teórico y práctico. El diseño final se ajustó según las condiciones operativas observadas con el fin de garantizar un desempeño correcto en el entorno real.

Los cálculos teóricos ayudaron a definir los parámetros críticos como el ángulo del cono y las dimensiones del cilindro, basados en el entendimiento de las propiedades aerodinámicas de los granos y la dinámica del flujo de aire. Estos parámetros fueron posteriormente puestos a prueba en condiciones controladas para verificar su validez en el contexto real del prototipo. Los resultados cualitativos obtenidos de estas pruebas se utilizaron para validar que la geometría final del prototipo permitiera la formación de una fuente de partículas estable.

Durante la evaluación del prototipo preliminar, se examinaron los ajustes en el flujo de aire y la dinámica del lecho de granos. La atención se centró en evaluar cómo los cambios en estas variables influían, de manera cualitativa, en la estabilidad y la dinámica del lecho a chorro. El análisis permitió verificar los rangos mínimos y máximos reales de operación del sistema. Estos ajustes y observaciones permitieron establecer una base sólida de diseño para la construcción final del prototipo.

El diseño final se planteó mediante la modelación asistida por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). El software utilizado fue FreeCAD, el cual es de acceso libre. Los modelos generados funcionaron como referencia para la construcción, orientando el proceso de fabricación en conjunto con el taller.

3.3.3 Construcción en taller

La construcción del prototipo del tostador se realizó en colaboración con un taller especializado con experiencia en la fabricación de equipos en acero inoxidable. Se buscó un taller con la capacidad de trabajar adecuadamente con este tipo de material y que pudiese cumplir con los requerimientos básicos del diseño.

Durante todo el proceso de construcción, se proporcionaron al taller las especificaciones necesarias sobre las medidas y los requerimientos de ensamblaje, manteniendo una comunicación constante para asegurar que el prototipo cumpliera con los objetivos planteados. La construcción abarcó el corte y soldadura de las piezas, la fabricación del cono de la cámara, y la fabricación de un soporte de la estructura. Por último, se especificaron las previstas necesarias para la instalación posterior de los sensores de temperatura y velocidad del aire.

En cuanto a las resistencias eléctricas, se buscó un taller especializado en la fabricación de resistencias comerciales. Debido a que se trabaja con resistencias de alta potencia, se especificó que se debían incluir los conectores adecuados y características de seguridad necesarias para este tipo de aplicación. Estas resistencias fueron construidas para cumplir con los requisitos térmicos y de seguridad del sistema.

3.4. Diseño y calibración del sistema de control

Este sistema se diseñó para manejar de manera eficiente dos variables críticas en el control del funcionamiento del tostador: la temperatura y la potencia del ventilador. Para cada uno de estos sistemas, se utilizó un Arduino como microcontrolador central para gestionar tanto la recolección de datos de los sensores como la ejecución de los algoritmos PID para el control de los actuadores. La calibración iterativa fue esencial para asegurar que los sistemas respondieran adecuadamente a las condiciones dinámicas.

3.4.1 Sistema de control de temperatura

El sensor utilizado para medir la temperatura fue un termopar tipo K, el cual se basa en el voltaje generado por la unión de dos metales diferentes a distintas temperaturas. Debido a que la señal producida por el termopar es analógica, y en el rango de milivoltios, se utilizó el módulo amplificador. Este módulo cumple la función de amplificar y convertir esta señal en una salida digital que el Arduino puede interpretar. La precisión del sensor permite detectar variaciones mínimas de temperatura, críticas para el proceso de control.

El actuador del sistema de control de temperatura es una resistencia eléctrica que opera a 110 V en corriente alterna, a diferencia del Arduino que trabaja a 5 V en corriente directa. Dado que el

circuito de potencia se debe controlar desde el microcontrolador, lo cual supone un riesgo de sobretensión para el mismo, fue necesario utilizar un componente capaz tanto de aislar como de conmutar de manera segura la resistencia. Con tal de lograr este objetivo, se optó por integrar un relé de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés).

El SSR es particularmente eficaz gracias a que el circuito de control (el microcontrolador, específicamente) tiene la capacidad de activar un LED interno en el relé, el cual ilumina un fotodetector que a su vez habilita el circuito de potencia. Este diseño elimina los contactos mecánicos, reduciendo el desgaste y aumentando la durabilidad del sistema. Además, la capacidad de conmutación rápida y precisa del SSR es crucial para mantener un control eficiente de la temperatura y responder adecuadamente a las necesidades del PID.

Dado que la resistencia eléctrica solamente puede encontrarse en estado encendido o apagado, es necesario utilizar un algoritmo de PID binario. Este tipo de controlador es ideal para el control de la resistencia eléctrica del tostador, donde el ajuste fino se realiza variando la proporción de tiempo en que la resistencia está energizada dentro de cada ciclo de control.

3.4.2 Sistema de control del flujo de aire

El sistema de control del flujo de aire en el tostador se diseñó utilizando un Arduino como microcontrolador central, el cual ajusta la potencia del ventilador para regular el flujo de aire necesario durante el proceso de tostado. Se implementó un algoritmo PID para controlar la salida PWM (modulación por ancho de pulsos) que ajusta la potencia del ventilador.

Para medir la velocidad del aire, se utilizó un tubo Pitot en conjunto con un sensor de presión diferencial. Esta configuración permite obtener una lectura asociada a la velocidad del aire al medir la diferencia de presión que el aire en movimiento produce dentro del tubo Pitot. La señal

generada por el sensor de presión diferencial es procesada por el Arduino, que ajusta la salida PWM para controlar la velocidad del ventilador de manera precisa.

El actuador en este sistema es un controlador de motor que ajusta la tensión aplicada al ventilador según la señal PWM generada por el Arduino. Se utilizó un *driver* de motor robusto para manejar las diferencias de voltaje y proteger al sistema de posibles sobretensiones.

La calibración del sistema se llevó a cabo bajo condiciones controladas: el ventilador se operó en un entorno aislado que incluía solo el ventilador, un tubo y los sensores. Para simular condiciones de carga variables, se obstaculizó la salida del tubo mientras el ventilador debía mantener una lectura constante en el tubo Pitot. Durante esta fase, las constantes del PID (K_p , K_i , K_d) fueron ajustadas iterativamente hasta obtener una salida constante, asegurando una regulación precisa bajo diversas condiciones operativas.

3.5. Evaluación del proceso de torrefacción

Los granos con diferentes niveles de tueste generados a partir de diferencias de 10 °C entre sí tuvieron diferencias significativas en la pérdida de masa y color (Vargas, 2014) así como en la densidad aparente (Abarca, 2017). En la investigación de Barrantes (2022) se demostró que solamente se requieren 4 °C para encontrar diferencias significativas en la masa final, densidad aparente y grado de tueste. En esta investigación se propuso obtener tres niveles de tueste con diferencias de 5 °C entre sí.

Según Pereira y Moreira (2021), el rango de tiempo para el tueste de café es, por lo general, de 8 a 15 minutos, aunque dependiendo de las condiciones puede variar incluso entre 3 y 20 minutos. Por esta razón, el tiempo establecido para las pruebas fue de 8, 10, 12 y 14 minutos. Las

temperaturas para las cuales se evaluaron las propiedades físicas fueron de 185, 190 y 195 °C.

Los tuestes se realizaron en lotes de 70 gramos de granos oro por tueste.

Se midieron y reportaron las propiedades físicas asociadas a los cambios que presentan los granos de café al ser tostados. Los resultados se compararon con los obtenidos por otras investigaciones. Las propiedades físicas que se reportaron fueron la pérdida de masa total, pérdida de masa seca, actividad de agua y contenido de humedad en base húmeda. El análisis de los datos fue de estadística descriptiva con el promedio y la desviación estándar de la propiedad física.

Para los análisis de contenido de humedad y actividad de agua, los granos de café tostados fueron molidos con un molinillo de café Cuisinart® Grind Central (ver figura 6.D).

La determinación de humedad se realizó con una balanza de humedad AND MX-50/MF-50 con una precisión de $\pm 0,001\%$ (ver figura 6.B). La humedad se calculó por diferencia de masas que reportó el equipo (Ecuación [37]).

$$X = 100 \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \quad [37]$$

La medición de la masa se determinó en una balanza electrónica BOECO modelo BPS 51 Plus, con una precisión de $\pm 0,01\text{g}$ (ver figura 6.C). La pérdida de masa se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$m_s = m_i * \left(1 - \frac{X}{100} \right) \quad [38]$$

Para medir la actividad de agua, se utilizó un medidor de actividad de agua AQUALAB 4TE con una precisión de $\pm 0,003\text{aw}$ (ver figura 6.A). Se colocó una muestra de café molido en la cámara

de medición, asegurando el sellado del recipiente. El resultado se registró tras alcanzar la estabilidad en la lectura.

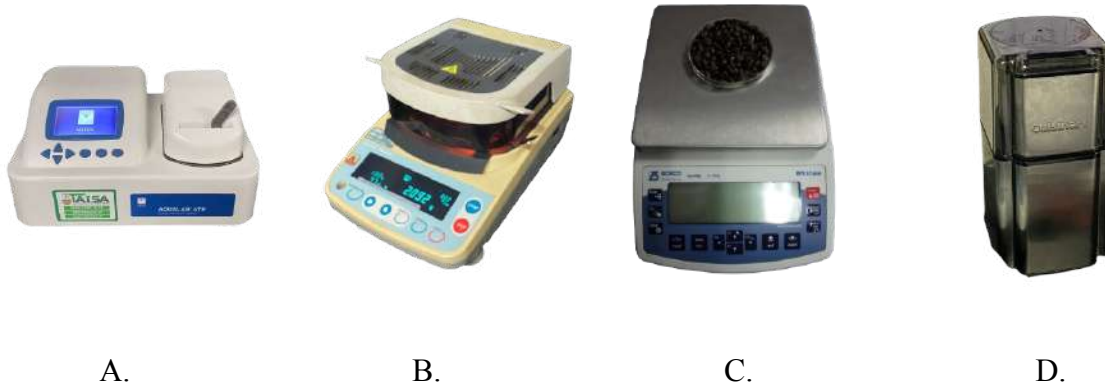


Figura 6. Medidor de actividad del agua (A), balanza de humedad (B), balanza de masa (C), molidor de café (D)

4. RESULTADOS

4.1 Características de los lotes a tostar

Resultados del perfil granulométrico:

El perfil granulométrico de los granos de café tuvo una distribución normal ($W=0,992$ y $p=0,993$). Como se ilustra en la figura 7, de la totalidad de los granos, el 67,1 % se encuentra entre las cribas 17 y 20. Barrantes et al. (2020) obtuvo que para café de la misma finca y de la misma cosecha, pero con un proceso de secado natural, la distribución del 72,8 % de los granos estuvo entre la criba 17 y 20. La criba número 17 es la que muestra la fracción predominante en las muestras analizadas, con un 31,0 %. Debido a lo anterior, y con tal de disminuir la variabilidad, las muestras fueron separadas por tamaño para utilizar únicamente la fracción de granos retenidos en la criba 17 para toda la experimentación posterior.

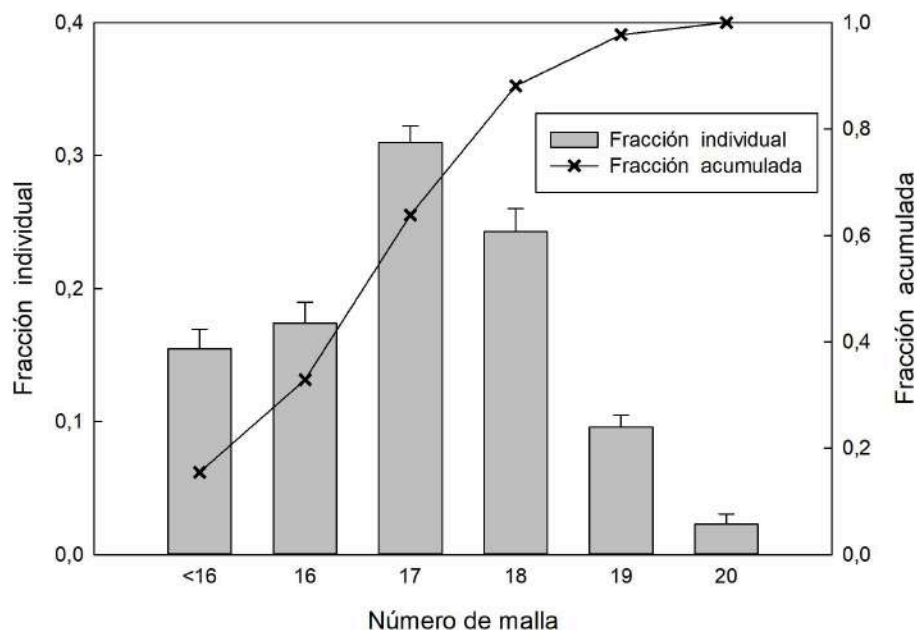


Figura 7. Distribución granulométrica del café a tostar.

Como se muestra en la Figura 8, el diámetro equivalente varía con respecto a la temperatura del interior del tostador de los granos. El diámetro equivalente se mantuvo en un valor constante cercano a los 6,5 mm desde los 25 hasta 125 °C, punto donde comienza un crecimiento exponencial con tendencia tipo sigmoide. El crecimiento de la curva alcanzó un máximo cerca de 7,6 mm, donde se mantiene en un valor constante.

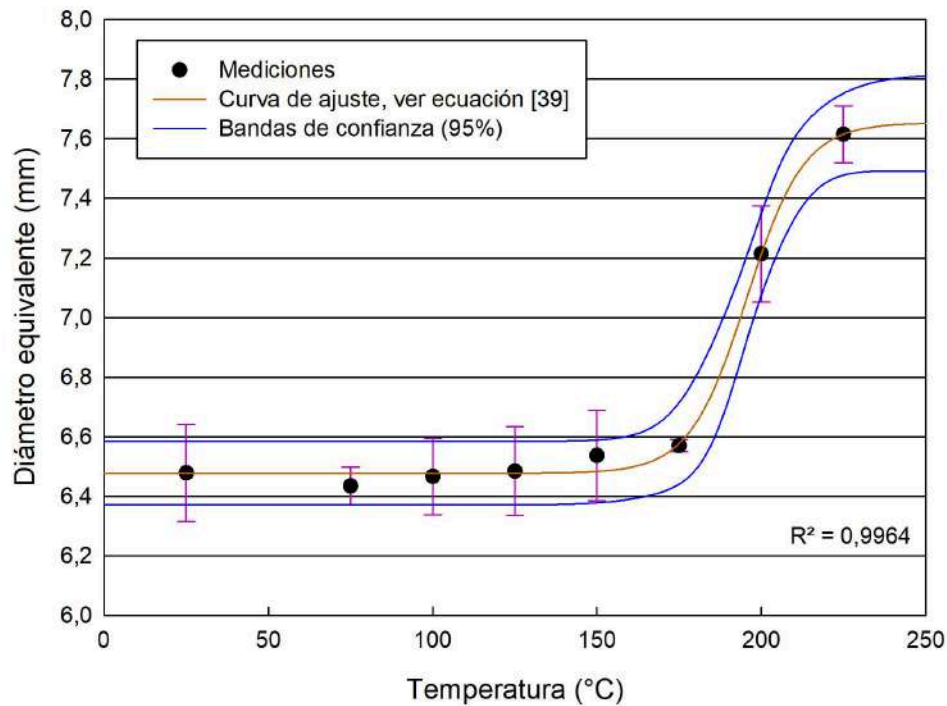


Figura 8. Diámetro equivalente de los granos de café.

La curva de mejor ajuste para describir la variación del diámetro equivalente en función del tiempo se obtuvo mediante una función sigmoide de cuatro parámetros (ver Ecuación 40). Este modelo presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9664 y un error estándar de estimación de 3,5 %, lo que evidencia consistencia entre los valores observados y los calculados (ver Cuadro I). A un nivel de confianza del 95 %, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los residuos de la regresión arrojó un estadístico W de 0,8715 y un valor p de 0,1558

(para un valor de $p > 0,05$, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad de los residuos), lo que indica que la distribución de los residuos fue normal. Este resultado respalda la validez de la regresión no lineal al justificar el supuesto de normalidad de los errores, y refuerza la fiabilidad de los coeficientes estimados.

El modelo se empleó para representar de manera *ad hoc* el comportamiento del diámetro equivalente del material bajo las condiciones específicas de este estudio, por lo que su extrapolación más allá de dicho ámbito no se evaluó. Sin embargo, el ajuste propuesto proporciona un nivel de precisión adecuado para utilizar esta relación en la ecuación de control de la velocidad a la entrada de la cámara (véase ecuación [1]), teniendo en cuenta la dependencia del diámetro equivalente con la temperatura. Los detalles del modelo se muestran a continuación:

$$d_p = d_{p_0} + \frac{q}{1 + e^{-\frac{T-T_0}{z}}} \quad [39]$$

Cuadro I. Coeficientes ajustados para la curva del diámetro equivalente respecto a la temperatura del tostador.

Ajuste	q	z	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$d_{p_0}(\text{mm})$	R^2	E.E.E.*
Sigmoide	1,1756	8,6657	195,5816	6,4778	0,9964	0,0350

*Error Estándar Estimado.

Como se muestra en la Figura 9, la densidad real varía con respecto al valor de la temperatura de extracción de los granos. La densidad real se mantiene en un valor constante cercano a los 1200 kg/m³ desde los 25 hasta 125 °C, punto donde comienza un decrecimiento tipo sigmoide. La disminución de la densidad real no muestra un valor de convergencia, como el caso del diámetro

de la partícula, lo cual concuerda con lo estudiado por Jokanovic et al. (2012) y Rodrigues et al. (2006).

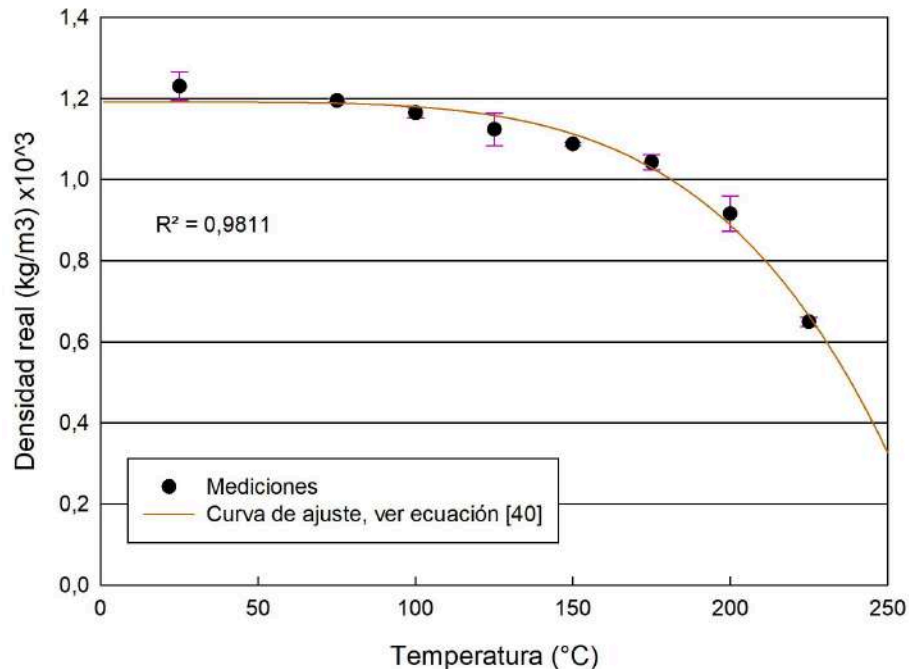


Figura 9. Densidad real de los granos de café respecto a su temperatura de extracción.

Para describir la relación entre la densidad real y la temperatura, se empleó una función sigmoide de tipo Hill con cuatro parámetros (ver Ecuación [40]). El modelo mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9811 y un error estándar de estimación de 3,45 % (ver Cuadro II). Para complementar el estudio del desempeño del modelo, se analizó la distribución de los residuos.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, aplicada a los residuos de la regresión con un 95 % de confianza, arrojó un estadístico $W=0,9482$ y un valor p de 0,6932. Puesto que el valor de p es mayor a 0,05, no se rechazó la hipótesis nula de normalidad de los errores. En consecuencia, la validez estadística del ajuste se refuerza y se considera apropiada para describir la variable

estudiada en las condiciones específicas de este proyecto. Los detalles del ajuste se muestran a continuación:

$$\rho_p = d + \frac{a \cdot T^b}{c^b + T^b} \quad [40]$$

Cuadro II. Coeficientes ajustados para la curva de la densidad real respecto a la temperatura.

Ajuste	a	b	c	d	R^2	E.E.E.*
Sigmoide Hill de 4 parámetros	1884,6491	-4,6903	1287,2312	-1883,4576	0,9811	0,0345

*Error Estándar Estimado.

En la ecuación [1] se describe que la velocidad de entrada a la cámara de tueste depende tanto del diámetro como de la densidad de la partícula. Al sustituir las variables d_p y ρ_p en la ecuación [1], según las regresiones no lineales discutidas en esta sección, se logró modelar la velocidad teórica de entrada (U_{ms}) respecto a la temperatura de los granos de café. Las demás variables, como la aceleración de la gravedad (g) y las dimensiones de la cámara de tueste (D_i , D y H), se mantienen constantes. El valor de la densidad del aire (ρ) también se puede modelar como una constante, ya que la temperatura del mismo a la entrada de la cámara de tueste no varía durante el proceso. Para un escenario de una temperatura del aire para tostar es de 200 °C, la velocidad requerida a la entrada de la cámara de tueste se modeló de la siguiente manera:

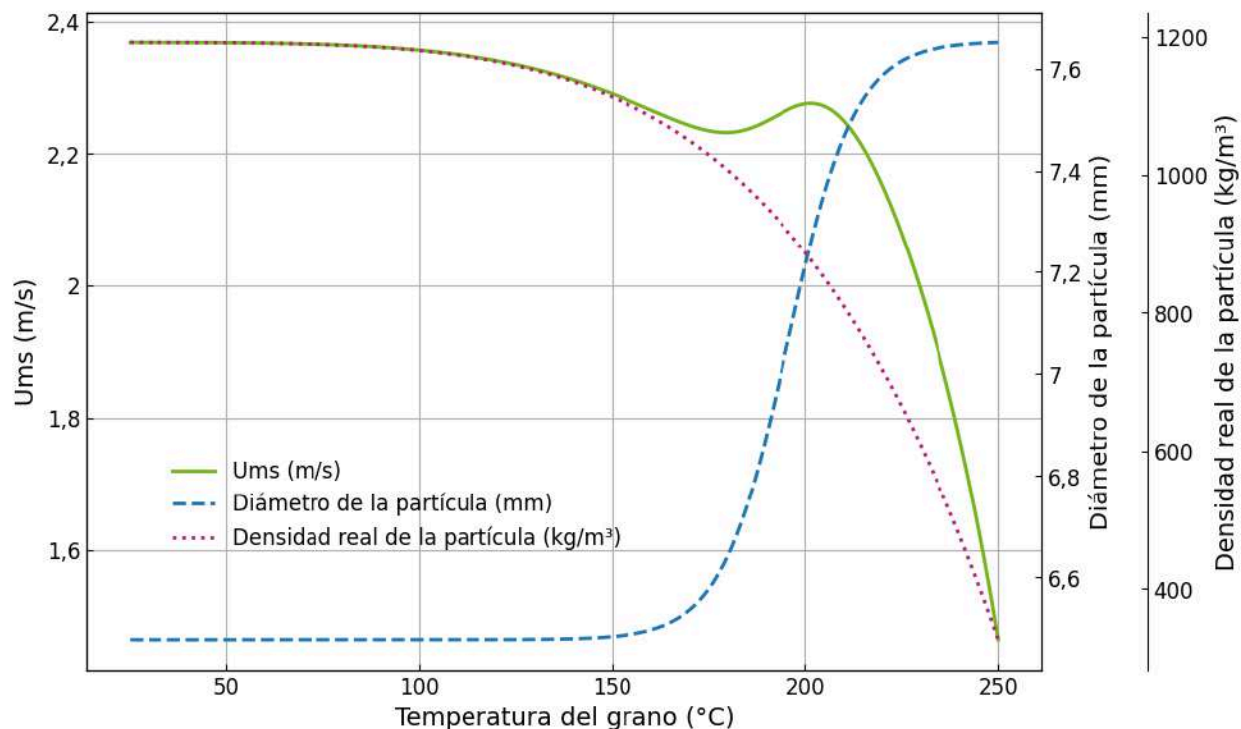


Figura 10. Variación de la velocidad (U_{ms}) respecto a los cambios morfológicos del grano de café.

Los resultados obtenidos indican que las variaciones termodinámicas del café deben ser consideradas al diseñar un tostador de aire caliente de lecho a chorro, ya que las mismas pueden influenciar las condiciones de operación. Como se observa en la Figura 10, la velocidad de operación disminuye conforme la temperatura aumenta. Este comportamiento muestra una excepción en el rango donde, simultáneamente, el diámetro disminuye y la densidad aumenta respecto a la temperatura (entre 175 y 200 °C).

En la práctica, lo anterior implica que la regulación de la velocidad del aire debe ser dinámica para lograr una operación estable durante todo el proceso de torrefacción. Un control estable de U_{ms} —adaptado a los cambios en la morfología de los granos— es necesario para mantener una operación estable para obtener un perfil de tueste uniforme. La modelación conjunta del diámetro

y la densidad real de los granos de café, fue clave para el diseño del sistema de control encargado de regular la velocidad del aire en el tostador.

4.2. Establecimiento de los criterios de diseño del tostador

La implementación de criterios basada en la dinámica de los cambios físicos permitió mantener una base teórica para la posterior selección de componentes comerciales en el diseño final.

4.2.1 Dimensionamiento del tostador

El análisis del cono truncado de la cámara de tueste está definido por un diámetro mayor, diámetro menor y altura. Se generaron todas las geometrías posibles de conos que cumplieren con las restricciones establecidas por Epstein et al. (2010). Para este proceso, el punto de partida fue el cálculo del número de Arquímedes (Ar). Para el valor del diámetro equivalente, se utilizó el valor de 7,6 mm. En cuanto a la densidad del aire, se tomaron condiciones de referencia de 200 °C y 1 atmósfera (101 325 Pa), para las cuales su valor tabulado fue de $0,7459 \text{ kg/m}^3$ (Cengel & Ghajar, 2011). De la misma tabla de propiedades y bajo las mismas condiciones de referencia, la viscosidad dinámica se tomó como $2,577 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Por último, para la densidad real de la partícula, en este caso, los granos de café, se tomó como el valor más alto medido, con el fin de evaluar la condición crítica. Como se mencionó en las características de los lotes a tostar, la máxima densidad real de los granos fue cercana a 1200 kg/m^3 . Con estos datos, el valor del número de Arquímedes se calculó como:

$$Ar = \frac{(0,0076 \text{ m})^3 (0,7459 \text{ kg/m}^3) (1200 \text{ kg/m}^3 - 0,7459 \text{ kg/m}^3) (9,81 \text{ m/s}^2)}{(2,577 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})^2} = 4532377,86$$

Una vez que se calculó el número de Arquímedes, se calculó el índice de Richardson-Zaki, n , mediante la ecuación [13], como:

$$n = \frac{(0,047 \cdot (4532377,86)^{0,57}) \cdot 4,8 + 2,4}{1 + 0,047 \cdot (4532377,86)^{0,57}} = 4,79$$

Considerando que la porosidad, ε , se obtuvo como $1 - \rho_p$, donde la densidad aparente medida de los granos verdes fue de $706,8 \pm 1,26 \text{ kg/m}^3$; se calculó que la relación entre Do y D , a partir de la ecuación [17], tenía que cumplir la siguiente condición:

$$\frac{(1 - 706,8 \text{ kg/m}^3)^{(4,79)/2}}{0,833} \leq \frac{Do}{D} \leq \frac{(1 - 706,8 \text{ kg/m}^3)^{(4,79)/2}}{0,5}$$

La Figura 11 ilustra las geometrías viables al tomar en cuenta las restricciones de diseño para las condiciones de este proyecto y un rango de volumen de entre 200 y 300 mL. Cabe resaltar que la Figura 11 excluye los conos con ángulos fuera del rango aceptado por Epstein et al. (2010), de 28 a 60 grados, como se detalla en la sección 3.2.1.

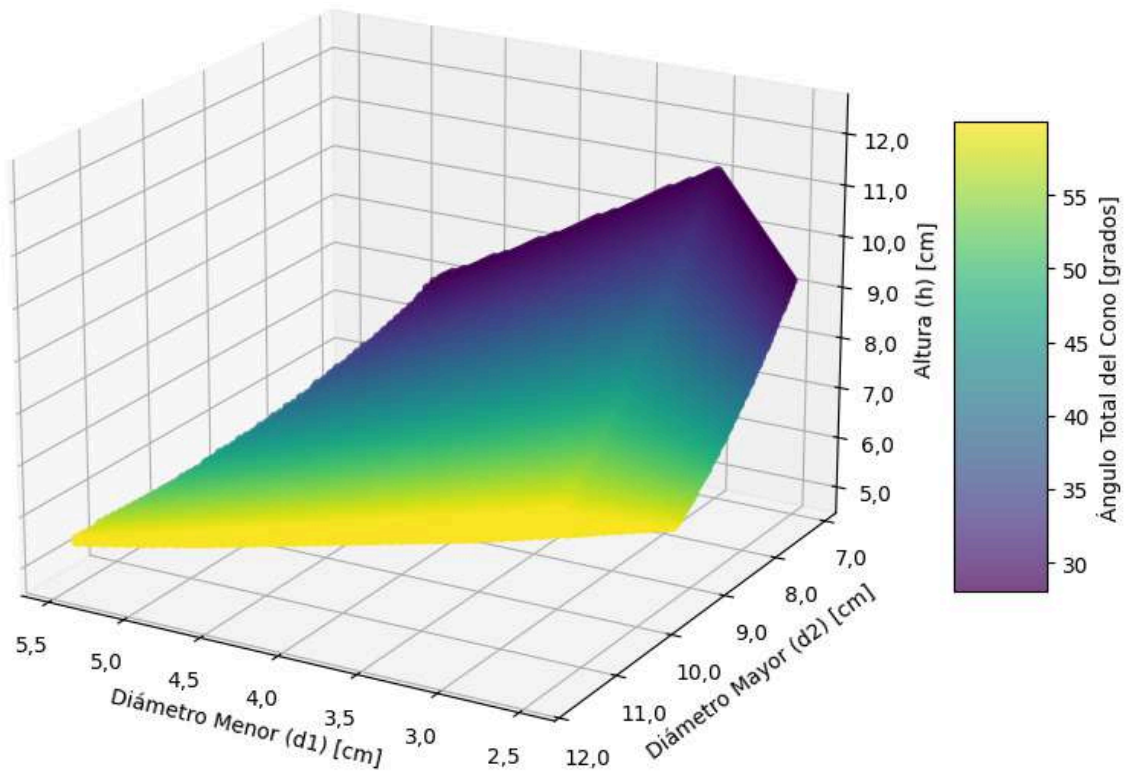


Figura 11. Geometrías viables de cono truncado para la cámara de tostado.

De la figura anterior, se consideró que cualquier combinación de diámetro menor, diámetro mayor y altura, cuya intersección esté dentro del sólido mostrado, cumple las condiciones teóricas establecidas.

4.2.2 Selección de materiales

El acero inoxidable 304 fue seleccionado como el material óptimo para el tostador de café debido a su resistencia a la corrosión, desempeño térmico y facilidad de limpieza. Además de sus propiedades técnicas, la disponibilidad comercial y el costo competitivo del acero inoxidable 304, en comparación con grados como el 316 o los dúplex, refuerzan su elección para aplicaciones generales que no requieren resistencia ante agentes excesivamente corrosivos. Por último, según Baddoo (2008), los aceros inoxidables son una opción sostenible debido a su

reciclabilidad, lo que contribuye a mantener costos competitivos y reduce el impacto ambiental en comparación con otros materiales.

4.2.3 Dimensionamiento de la resistencia eléctrica

Para determinar la potencia necesaria de la resistencia eléctrica en el sistema de tostado, se realizó un balance energético basado en las condiciones de operación del aire a la entrada, la salida y las pérdidas. Para iniciar el cálculo, se consideró que la temperatura del aire durante el tueste podría llegar hasta los 250 °C. Esta temperatura ha sido reportada en otros estudios donde se han utilizado tostadores de aire caliente (Rattanarat et al., 2020; Nagaraju et al., 1997; Schenker et al., 2002). La temperatura y presión del ambiente fue 25 °C y 1 atmósfera (101 325 Pa), respectivamente. A partir de estos valores se definió una temperatura promedio del aire en el proceso como:

$$T_{prom} = \frac{250^{\circ}\text{C} + 25^{\circ}\text{C}}{2} = 137,5^{\circ}\text{C}$$

Esta temperatura promedio se utilizó para extraer las propiedades del aire. A esta temperatura, la densidad del aire es de 0,8542 kg/m³ y su capacidad calorífica específica es de 1013 J/kg K, según tablas termodinámicas (Cengel & Ghajar, 2011). El diámetro interno de la tubería es de 23,4 mm, por lo que el área transversal interna se obtuvo como:

$$A_t = \frac{\pi(0,0234\text{ m})^2}{4} = 4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Se determinó que la velocidad a entrada en la cámara de tueste (U_{ms}) fue de 3 m/s. Para obtener la velocidad de operación (U), se tomó en cuenta la relación $U/U_{ms} = 1,1$. Tomando en cuenta las características geométricas y las propiedades del aire en las condiciones de operación, el flujo másico se estimó como:

$$\dot{m} = 0,8542 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 3 \text{ m/s} \cdot 1,1 = 1,21 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

El diferencial de temperatura requerido del aire, ΔT , se tomó como la diferencia entre la temperatura de tueste y la temperatura ambiente:

$$\Delta T_a = 250 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C} = 225 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con todos estos datos, se calculó la energía necesaria para calentar el aire:

$$Q_{aire} = 1,21 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \cdot 1013 \text{ J/kg K} \cdot 225 \text{ K} = 276,3 \text{ W}$$

Una vez determinado Q_{aire} , se requirió calcular las pérdidas de calor hacia el entorno ($Q_{pérdidas}$).

Estas pérdidas están compuestas por la convección natural y la radiación que tienen lugar en la superficie externa del tubo. Teóricamente, el cálculo de $Q_{pérdidas}$ requiere conocer la temperatura en dicha superficie, $T_{superficie}$, ya que a partir de este valor se pueden evaluar el flujo convectivo y el radiativo hacia el ambiente.

Para obtener $T_{superficie}$, se partió del principio de que, en estado estacionario, el flujo de calor conducido a través de la pared del tubo debe ser igual al calor disipado por convección y radiación en el exterior. Así, se estableció un balance energético en la pared del tubo, igualando el calor que llega desde el interior, a través de la conducción, con la suma de las pérdidas por convección y radiación en la superficie externa.

Tanto el calor disipado por convección y radiación, como el flujo de calor que se conduce desde el interior del tubo a la superficie exterior, dependen del área superficial del cilindro por donde fluye el aire caliente. El área superficial externa del tubo está en función del largo, L (0,66 m) y su radio externo (0,0127 m), tal como se muestra a continuación:

$$A_{superficial} = 2 \pi \cdot 0,0127 \text{ m} \cdot 0,66 \text{ m} = 0,05267 \text{ m}^2$$

En cuanto a los valores de los parámetros constantes, es importante mencionar que tanto la temperatura del fluido como la temperatura del ambiente se consideraron con el mismo valor a las condiciones ambientales estándar, 298,15 K, debido a que son parámetros corresponden al ambiente externo hacia el cual fluye el calor de la tubería. Además, el valor de emisividad (ϵ) se consideró específicamente para el material de la tubería, acero inoxidable, y a la temperatura crítica de 250 °C, como 0,4, según las tablas de Cengel y Ghajar (2011). La constante de Stefan-Boltzmann (σ), tiene el valor de $5,6704 \times 10^{-8}$, según Cengel y Ghajar (2011). Con estos valores en cuenta, la igualdad, correspondiente a la ecuación [30], se substituyó de la siguiente manera:

$$2\pi \cdot 15_{W/mK} \cdot 0,66_m \frac{(250^\circ C - T_{superficie})}{\ln(0,0127 \text{ m}/0,0117 \text{ m})} = 0,05267 \text{ m}^2 (h(T_{superficie} - 298,15) + 0,4 \cdot \sigma (T_{superficie}^4 - 298,15^4))$$

Para lograr establecer la ecuación anterior completamente en términos de $T_{superficie}$, fue necesario definir el número de Nusselt, el cual a su vez depende del número de Rayleigh, y este último depende del coeficiente de expansión térmica, β . Algunas constantes necesarias para este cálculo fueron: el número de Prandtl (Pr), como 0,7041, y la viscosidad cinemática (ν), como $2,745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, que se definieron a la temperatura y presión promedio, como ya se mencionó en pasos anteriores; y el diámetro externo de la tubería (D), como 0,0254 m. Al realizar las substituciones de los valores en las ecuaciones [28] y [29], para el número de Nusselt y Rayleigh, respectivamente, se obtuvo lo siguiente:

$$Nu = (0,6 + \frac{0,387(Ra)^{1/6}}{(1+(0,559/0,7041)^{9/16})^{8/27}})^2 \text{ y } Ra = \frac{g(\frac{1}{T_{superficie} + 298,15 \text{ K}})(T_{superficie} - 298,15 \text{ K})(0,0254 \text{ m})^3 \cdot 0,7041}{(2,745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

Para resolver el valor de la temperatura de la superficie, se utilizó el método iterativo descrito en la sección 3.2.3. Para esto, se partió de un valor inicial de 500 K para $T_{superficie}$ y una tolerancia equivalente a aproximadamente un 0,1% como criterio de convergencia. El proceso solo requirió tres iteraciones para estabilizar la solución a un valor $T_{superficie} = 522,89\text{ K o }249,74\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Al conocer el valor de $T_{superficie}$, se calcularon los flujos de calor en términos de potencia. Al resolver la ecuación [6] con los valores conocidos, se obtuvo un flujo de calor por radiación de 79,85 W. Sustituyendo en la ecuación [5], se obtuvo un flujo de calor por convección de 116,09 W. Por lo tanto, el resultado para el total del flujo de calor por pérdidas, fue de 195,94 W. Al contemplar el flujo de calor necesario para calentar el aire sumado (previamente calculado como 276,3 W) con las pérdidas del sistema, se obtuvo que la potencia teórica para la resistencia eléctrica es de 472,24 W.

Al aplicar el factor de seguridad de 50 % sobre la resistencia mínima calculada, descrito en la sección 3.2.3, la potencia ajustada se calculó como 708,36 W. A nivel comercial, el valor inmediatamente superior disponible fue de 1000 W. Este valor considera tanto condiciones teóricas ambientales, la flexibilidad del sistema antes perturbaciones externas y la disponibilidad comercial del componente calefactor.

4.2.4 Dimensionamiento del ventilador

Se determinó el caudal volumétrico y la diferencia de presión total, ΔP_{Total} , que el ventilador debe suministrar para formar el régimen de lecho a chorro, según lo detallado en la sección 3.2.4. Se calculó el caudal volumétrico (Q) partiendo de la velocidad (U) y el diámetro interno (D_i) de

la tubería que conduce el aire a la cámara de tueste. El diámetro interno de la tubería fue de 23,4 mm, el cual se traduce en un área transversal interna de:

$$A_{ti} = \frac{\pi(0,0234\text{ m})^2}{4} = 4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

A partir del análisis en la sección *4.1 características de los lotes a tostar*, se determinó que U_{ms} es de 3 m/s. Para la velocidad de operación (U) se tomó en cuenta la relación $U/U_{ms} = 1,1$.

Tomando en cuenta las características geométricas y velocidad de operación, el flujo volumétrico se estimó como:

$$V = 4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 3 \text{ m/s} \cdot 1,1 = 1,42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor se adoptó como la capacidad de flujo requerida para el ventilador.

Para entender el régimen de operación del flujo en el sistema, se calculó el número de Reynolds.

Con una viscosidad cinemática (a las condiciones promedio de operación), ν , de $2,745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, la velocidad de operación, U, y el diámetro interno (D_i), el número de Reynolds se obtuvo como:

$$Re = \frac{(3 \text{ m/s} \cdot 1,1) \cdot 0,0234 \text{ m}}{2,745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 2813,11$$

A partir del número de Reynolds calculado ($Re \approx 2813$), se puede observar que el flujo se ubica en un régimen de transición. Este valor intermedio indica que, si bien el flujo no es estrictamente laminar, tampoco ha entrado de lleno en la turbulencia completa; por ello, la aplicación de la ecuación de Colebrook-White resulta apropiada para describir el comportamiento del factor de fricción en estas condiciones de operación (De Araujo et al., 2020).

La rugosidad absoluta (ϵ), se asumió como el de una tubería de acero inoxidable nueva, de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}$. La ecuación de Colebrook-White se completó como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{1,5 \times 10^{-5} \text{ m} / 0,0234 \text{ m}}{3,7} + \frac{2,51}{2813,11 \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Para resolver el valor de f , se utilizó el método iterativo descrito en la sección 3.2.4. Para esto, se partió de un valor inicial de 0,002 y una tolerancia de 1×10^{-6} como criterio de convergencia.

El proceso solo requirió ocho iteraciones para estabilizar la solución a un valor $f = 0,04495$.

Al conocer f , se calculó pérdida por fricción con la ecuación de Darcy-Weisbach. Se consideró la longitud de la tubería, L , según lo establecido en la sección 4.3.2 *Diseño final del prototipo*, como 0,66 m. La densidad del aire se tomó a las condiciones promedio de operación, como $0,8542 \text{ kg/m}^3$. Con la velocidad del aire en las condiciones de operación, U , y el diámetro interno de la tubería (D_i), las pérdidas por fricción se calcularon como:

$$\Delta P_{\text{Fricción}} = 0,04495 \cdot \frac{0,66 \text{ m}}{0,0234 \text{ m}} \cdot \frac{(0,8542 \text{ kg/m}^3) \cdot (3 \text{ m/s} \cdot 1,1)^2}{2} = 5,90 \text{ Pa}$$

En relación con las pérdidas locales por accesorios, $\Delta P_{\text{Accesorios}}$, se utilizó la ecuación [34].

Primeramente, se estimaron y se sumaron los coeficientes de pérdida, K_i , de las pérdidas locales individuales del sistema. Los coeficientes de pérdida se obtuvieron a partir de las ecuaciones avaladas por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE, por sus siglas en inglés (Howell et al., 2021). Como se muestra en la sección 3.3.2 *Diseño final del prototipo*, el diseño contó con los siguientes accesorios que representan pérdidas de presión locales:

- Obstrucción debido a la resistencia eléctrica

- Codo liso de 90 ° de acero inoxidable
- Obstrucción debido al tubo Pitot
- Plenum a la entrada de la cámara de tostado

Para la obstrucción que genera la resistencia eléctrica, al ser un elemento helicoidal ubicado de manera coaxial en la tubería, no se encontraron referencias bibliográficas de ecuaciones para el coeficiente de pérdida. Ante esta situación, se optó por considerar la resistencia eléctrica como una serie de rejillas, cada una representada por una vuelta de la espiral del elemento calentador. A continuación se muestra una imagen frontal del elemento calefactor:

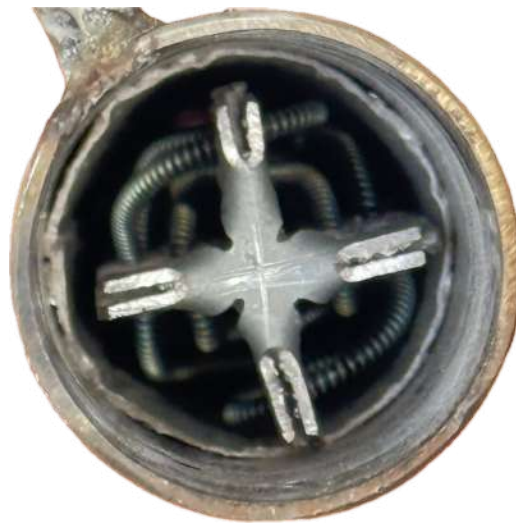


Figura 12. Vista frontal del elemento calefactor dentro de la tubería del tostador.

Se identificaron al soporte de la resistencia, en forma de cruz, y a la proyección frontal del elemento resistivo, como las geometrías correspondientes al área obstruida (n). Al realizar las mediciones de manera digital en el software de acceso libre ImageJ, el soporte de la resistencia resultó en un área de $6,8 \times 10^{-5} m^2$. Por otro lado, una rotación de la resistencia eléctrica mostró un área equivalente de $19,2 \times 10^{-5} m^2$, para un área total obstruida de $26 \times 10^{-5} m^2$. Ya que el área

total interna de la tubería fue de $4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, la relación entre el área libre y el área obstruida, n , fue de 0,6. Debido a que no existe un cambio en el diámetro interno de la tubería, la relación entre el área del ducto y el área donde se encuentra la rejilla fue de 1. Con estos datos, se obtuvo que el factor K_i para la rejilla equivalente es de 0,97, según los valores tabulados por (Howell et al., 2021), como se muestra en la, Anexo B1.

El elemento resistivo de 1000 W tiene una longitud total de 26 cm, con un paso de 2 cm al estar acomodado de manera helicoidal. Como resultado de esta configuración, se aproximó la resistencia a 13 rejillas en serie, cada una con un factor de pérdida de presión de 0,97. Finalmente, el factor de pérdida total para la resistencia eléctrica se calculó como 12,61.

En cuanto al coeficiente de pérdida para el codo liso del sistema, se emplearon los datos tabulados por (Howell et al., 2021), referirse a la Anexo B2. Según se describe en la sección *3.3.2 Diseño final del prototipo*, la relación entre el radio de curvatura del codo y su diámetro, fue aproximadamente de 1. Para un codo de 90° , el coeficiente de pérdida asociado se determinó en 0,22.

En cuanto a las pérdidas locales generadas por la presencia del tubo Pitot en el ducto, se modeló el instrumento como una obstrucción cilíndrica lisa que atraviesa la tubería de manera transversal, de acuerdo con los valores tabulados por (Howell et al., 2021). El diámetro del tubo Pitot es de 6 mm, mientras que el diámetro interno de la tubería es de 23,4 mm, por lo que la longitud de la obstrucción equivalente también es de 23,4 mm, al ubicarse en el centro del ducto. Con estos datos, el área de obstrucción, denotado como S_m por Howell et al. (2021), se obtuvo mediante la multiplicación del diámetro del Pitot (6 mm) por su longitud (23,4 mm), para un

valor $S_m = 140,4 \text{ mm}^2$. Al dividir el área de obstrucción por el área transversal interna de la tubería ($A_t = 4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), se obtuvo un valor para esta relación de 0,33.

En cuanto al cálculo del número de Reynolds requerido por Howell et al. (2021), Re' , se consideraron las condiciones promedio de operación para la viscosidad cinemática, y la velocidad de operación, U . Por lo tanto, el valor de Re' se obtuvo como:

$$Re' = \frac{d_{obstrucción} \cdot U}{\nu} = \frac{(0,006 \text{ m}) \cdot (3 \text{ m/s} \cdot 1,1)}{2,745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 721,3$$

Al conocer el valor de la relación entre el área obstruida por el pitot con el área transversal interna de la tubería, así como Re' , se calculó el valor del coeficiente de pérdida presentado por Howell et al. (2021). Al extrapolar linealmente los valores en la tabla (ver Anexo B3), el valor del coeficiente de pérdida por el tubo pitot se estimó como 0,51.

La pérdida de presión en el plenum de entrada a la cámara de tostado (ver Figura 13) se modeló como una placa perforada en una tubería circular, la cual fue descrita por Howell et al. (2021). Mediante el software ImageJ, se midió un área libre de $200,84 \text{ mm}^2$, equivalente a aproximadamente el 47 % del área interna de la tubería ($4,30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$). Dado que la placa tiene 1 mm de espesor y los orificios del plenum un diámetro de 3,8 mm ($t/d \approx 0,26$), se recurrió a la tabla de Idelchik Howell et al. (2021), disponible en el Anexo B4. Mediante interpolación de los datos tabulados, se obtuvo un coeficiente de pérdida cercano a 4,90.



Figura 13. Plenum a la entrada de la cámara de tostado.

Una vez que se estimaron los coeficientes de todos los accesorios, se calculó la totalidad de la pérdida de presión asociada a los accesorios y obstrucciones del sistema. La suma de los coeficientes, $\sum K_i$, asociados a las pérdidas de presión por accesorios y obstrucciones fue de 18,24. Al considerar las propiedades del aire a las condiciones de operación, con la densidad del aire como $\rho = 0,8542 \text{ kg/m}^3$ y la viscosidad cinemática como $\nu = 2.745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, la pérdida de presión fue:

$$\Delta P_{\text{Accesorios}} = 18,24 \cdot \frac{0,8542 \text{ kg/m}^3 \cdot (2.745 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}{2} = 84,85 \text{ Pa}$$

Posteriormente, se calculó la pérdida de presión debida a la geometría cónica de la cámara, de acuerdo con la correlación de Gelperin et al. (1961), presentada previamente como la ecuación [35]. Como ya se mencionó en la sección 3.1 *Características de los lotes a tostar*, la densidad aparente medida del lecho, ρ_b , es de $706,8 \text{ kg/m}^3$. Por otro lado, la altura de la columna de

grano, H , en función del volumen necesario para la carga de granos, fue previamente establecida con un valor de 0,08m en la sección 3.3.2 *Diseño final del prototipo*. En esta misma sección, se definieron los diámetros del cono de la cama de tueste superior, D_H , e inferior, D_i , en 95 mm y 25,4 mm, respectivamente. Por último, el ángulo final del cono de la cámara de tueste, θ , fue de 33 °.

Con estos datos, la ecuación de Gelperin se resolvió como:

$$\Delta P_{\text{Cámara de tueste}} = 706,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,08 \text{ m} \left[1 + 0,0062 \left(\frac{0,095 \text{ m}}{0,0254 \text{ m}} \right)^{2,54} \left(\frac{0,095 \text{ m}}{0,0254 \text{ m}} - 1 \right) \cdot \tan \frac{33^\circ}{2}^{-0,18} \right] = 889,3 \text{ Pa}$$

Al sumar las pérdidas de presión debido a la fricción (5,90 Pa), los accesorios y obstrucciones (84,85) y la cámara de tueste (889,3 Pa), se obtuvo que el diferencial de presión total fue de 980,01 Pa. Finalmente, con el objetivo de contemplar posibles desviaciones de los valores teóricos, se aplicó un factor de seguridad del 10%, por lo que el valor final fue de 1078.01 Pa. Por último, se estableció que el ventilador debía ser capaz suministrar un caudal 0,0014 m^3/s a una presión de 1078.01 Pa para alcanzar la formación estable del lecho a chorro en la cámara de tueste.

Basado en el requerimiento de presión y caudal, se investigó la oferta de ventiladores a nivel comercial. A partir de esta búsqueda, se optó por utilizar un ventilador centrífugo modelo 7060 del fabricante SuZhao (ver Figura 14), el cual cuenta con una potencia nominal de 168 W, un caudal máximo de 0,0083 m^3/s y una presión estática máxima de 1176,8 Pa. El ventilador opera a 36000 $\pm$ 5 % revoluciones por minuto como máximo. Este equipo incluye su propio *driver* para ajustar la potencia del ventilador. Al analizar la curva de operación de presión y caudal brindada por el fabricante (ver Anexo C1), el equipo opera, para un caudal de 0,0014 m^3/s , a una presión

de aproximadamente 1100 Pa. Basado en los requerimientos del sistema y las características del ventilador, se concluyó que el ventilador es adecuado para la aplicación en el equipo tostador de granos café.

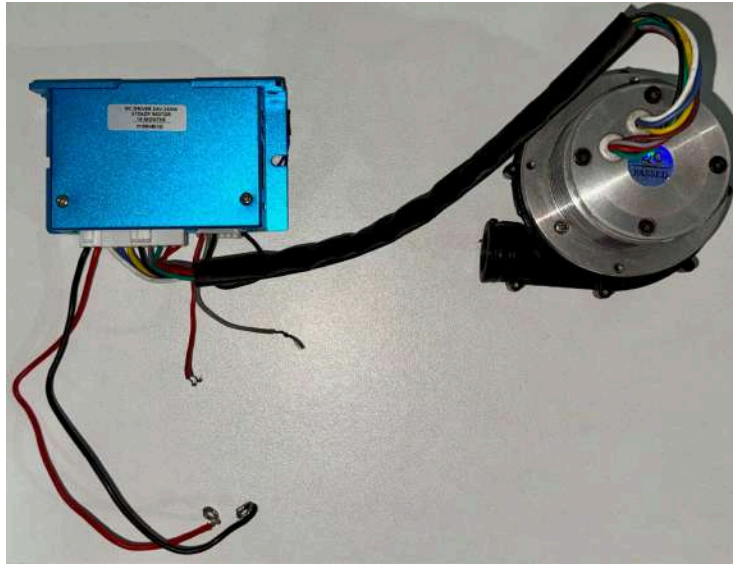


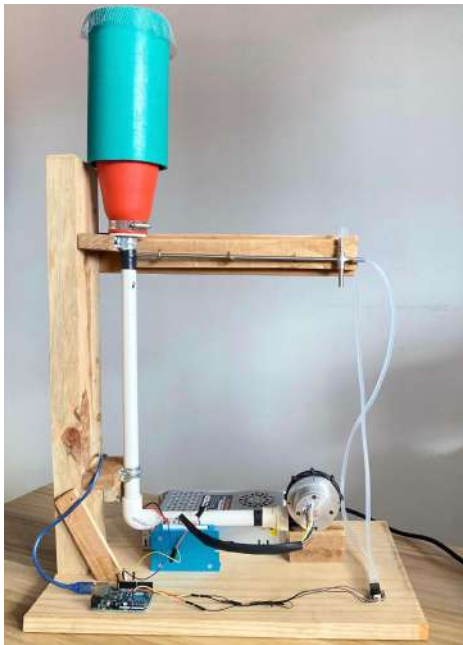
Figura 14. Ventilador centrífugo modelo 7060 y su controlador PWM.

4.3. Diseño del tostador y su construcción

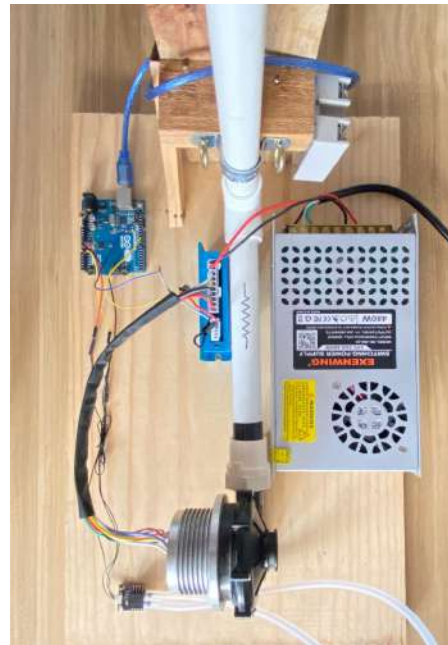
4.3.1 Diseño preliminar

La estructura básica del tostador se construyó con madera, tubos de PVC y hule. Componentes como el abanico, el tubo Pitot, el Arduino, el sensor de diferencial de presión y la fuente de poder fueron incluidos en el diseño final. No se incorporó una resistencia eléctrica debido a las limitaciones de los materiales utilizados, sensibles al calor. En la Figura 15 se presenta el prototipo inicial del tostador, donde se evidencian los materiales utilizados y la disposición de los componentes mencionados.

Las dimensiones del prototipo se seleccionaron de acuerdo con las especificaciones preliminares del diseño final, lo que facilitó una evaluación precisa de su viabilidad antes de avanzar en su desarrollo. Se validó la potencia del abanico, comprobando su capacidad para generar el flujo de aire necesario en la cámara de tostado. Las características del diseño preliminar se conservaron en la versión final, dado que las pruebas iniciales demostraron que el sistema era funcional.



A



B

Figura 15. Vista lateral (A) y superior (B) del prototipo preliminar del tostador con los componentes principales.

Adicionalmente, se verificó el funcionamiento del algoritmo PID del tubo Pitot, junto con el sensor de diferencial de presión y el código del Arduino (Ver Anexo A3 para detalles del código), lo que permitió confirmar la resiliencia del sistema de control del flujo de aire ante perturbaciones externas.

El diseño de los conductos y la disposición de los componentes permitieron un movimiento fluido del aire, lo cual es necesario para garantizar una distribución uniforme del calor y un tostado homogéneo de los granos de café. Esta evaluación inicial del flujo de la cámara de tostado confirmó que el diseño cumplía con los requisitos necesarios para un funcionamiento adecuado. Una de las principales limitaciones de esta fase fue la imposibilidad de validar el flujo de aire caliente debido a la ausencia de una resistencia eléctrica.

A pesar de que no se realizaron tuestes de café, se evaluó cualitativamente la capacidad del diseño de mantener la fuente de granos de manera efectiva. El tostador mostró una fuente de granos típica para una cámara de lecho a chorro tanto para los granos de café verde como para los granos tostados. Lo anterior implica que el diseño preliminar es capaz de crear y mantener un ambiente controlado y estable para el proceso de tostado.

Se identificaron fortalezas en el diseño preliminar, como la capacidad para lograr un flujo de aire óptimo y crear un ambiente adecuado para el tostado de los granos de café. Estos hallazgos respaldaron la toma de decisiones en el proceso de diseño. Las observaciones proporcionaron una base sólida para continuar con la iteración y refinamiento del diseño final del tostador, centrándose en aspectos como la incorporación de aire caliente.

Como aprendizajes de la construcción preliminar, se estableció que la estructura del prototipo se dividiría en tres secciones. La primera sección corresponde al acople entre el ventilador y la tubería donde se encuentran las resistencias eléctricas. La segunda sección, se refiere a la tubería que conecta la primera sección con la cámara de tueste, con el objetivo de aislar el segmento donde se encuentran los sensores tanto de velocidad como el de temperatura. Por último, la tercera sección se refiere a la cámara de tueste.

4.3.2 Diseño final del prototipo

Las tuberías de acero inoxidable se comercializan, generalmente, en unidades de 6 m (GB Standards, s.f.; Eastern Steels, s.f.; Union Steels, s.f.). De manera relativa, adquirir unidades completas de tubería para la fabricación de un tostador con dimensiones pequeñas, hubiese presentado un costo elevado. Por esta razón, se priorizaron materiales previamente disponibles en el taller de construcción. Este enfoque permitió obtener el material de las dimensiones deseadas, a un precio accesible.

Al analizar los valores numéricos tabulados que se resumen en la Figura 11, se obtuvo una combinación de dimensiones, para D_o , D_H y D_i , compatible tanto con las condiciones teóricas como con tuberías disponibles de manera comercial. Dado que las comparaciones son para dimensiones de diámetro interno, se priorizó la compatibilidad en este parámetro en específico. Se obtuvo que la combinación de una tubería de 3 ½ pulgadas para D_H , un diámetro de 1 ½ pulgadas para D_o y, finalmente, un valor de D_i de ¾ de pulgada, satisfizo las condiciones. Las dimensiones de las tuberías comerciales utilizadas se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro III. Dimensiones de las tuberías utilizadas.

Parámetro del tostador	Diámetro interno (mm)*	Grosor de pared (mm)*	Cedula*
D_H	95,504	3.048	10S
D_i	23,368	1,651	5S
D_o	40,894	**	**

*Los valores provienen del estándar ASME/ANSI B36.10/19 (Lawrence Berkeley National Laboratory, s.f.).

** D_o se utilizó para generar una reducción desde la base menor del cono hacia D_i , por lo que no se utilizó una tubería como tal y, por tanto, el grosor de pared y la cédula, no aplican

Para esta combinación específica, según las geometrías viables de la sección 4.2.1 *Dimensionamiento del tostador*, el ángulo del cono mostró factibles entre 30° y 40°, mientras que la altura podía estar de 7 a 9 cm. Finalmente, al ser un rango válido, y no estar sujeto a un componente comercial específico (las reducciones cónicas de tubería de 3 ½ a 2 pulgadas disponibles comercialmente a la hora de la construcción, no cumplían con los rangos de altura, y por tanto, del ángulo), se estableció una altura (H) de 8,5 cm, y, por tanto, un ángulo (γ) de 35°.

Una vez definidas las dimensiones de la cámara de tueste, se establecieron las dimensiones del resto de la estructura. Como se mencionó en la sección 4.3.1 *Diseño preliminar*, el diseño final prototipo se dividió en tres secciones. Por facilidad de acople y desacople de las tres secciones, se estableció que las mismas estarían unidas mediante férulas y abrazaderas de acero inoxidable (ver figuras 19 y 21). Todas las férulas del equipo cuentan un diámetro interno de 22 mm y un diámetro externo de 50,5 mm

El ventilador cuenta con una salida de aire de 15 mm de diámetro interno, mientras que el diámetro interno de la tubería es de 23,4 mm. El acople para la unión de estos dos componentes, en la sección que se introduce en el ventilador, se diseñó con un diámetro externo de 15 mm, por una longitud de 22 mm, y un grosor de pared de 2 mm. Para la sección que se introduce en la tubería, el acople se diseñó con un diámetro externo de 23 mm (con una diferencia de aproximadamente 0,4 mm por tolerancia), una longitud de 22 mm y un grosor de pared de 2 mm.

El acople se muestra a continuación:

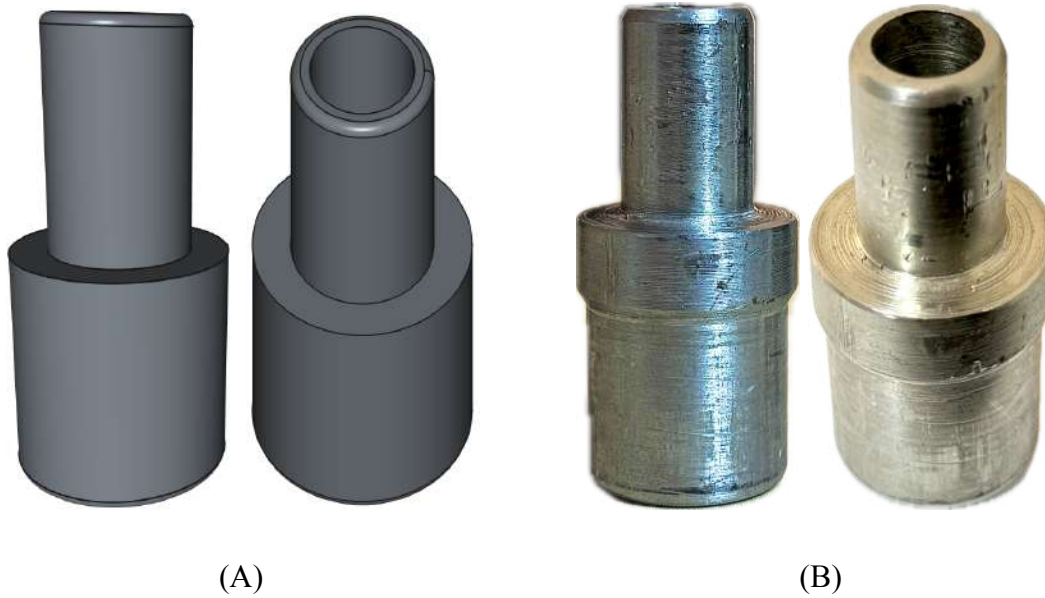


Figura 16. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) del acople entre el ventilador y la tubería del tostador.

Respecto a la sección donde se ubica la resistencia eléctrica, su longitud se basó en la distancia necesaria para colocar dicho elemento. Al conocer la información de la potencia necesaria (1000 W, como se mencionó en la sección 4.2.3 *Dimensionamiento de la resistencia eléctrica*) y el diámetro interno de la tubería, el fabricante de las resistencias solicitó una longitud mínima de 26 cm. Al agregar un margen de 3 cm tanto al inicio como al final la tubería, la longitud total se estableció como 32 cm. Por último, al final del tubo se soldó la férula para su conexión con la siguiente sección, como se muestra a continuación:



Figura 17. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección para la resistencia eléctrica.

A continuación se detalla la unidad encargada de conectar la cámara de tueste con las resistencias eléctricas, donde se ubican tanto el sensor de velocidad del aire como el sensor de temperatura. La conexión a esta sección se realizó mediante una férula de las dimensiones mencionadas. La férula se soldó directamente a un codo de 90 grados, el cual cuenta con la misma dimensión interna que la tubería principal, 23,4 mm.

Inmediatamente después del codo, la tubería principal continúa hasta la siguiente férula, donde se conecta la cámara de tueste. Al final de esta sección se encuentra el punto de medición del tubo Pitot (justo antes de la cámara de tueste). Dado que la distancia mínima entre una perturbación al flujo (en este caso, el codo) y el punto de medición debe ser de 10 veces el diámetro interno (Zhang et al., 2018) , se estableció la distancia entre el codo y la férula de 23,5 cm.



Figura 18. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección donde se ubican el sensor de temperatura y el tubo Pitot.

Para poder colocar y retirar el tubo Pitot de manera sencilla, y sin generar fugas de aire, se modificaron dos férulas junto con su abrazadera. Tanto a la abrazadera como a las férulas y su empaque, se les realizó una perforación de 6 mm de diámetro, de manera que el tubo Pitot calzara correctamente. La perforación se realizó exactamente en el punto donde ambas férulas se encuentran, por lo que el Pitot queda sujetado por la unión. Esta modificación se muestra en la Figura 19.

Antes de conectar a la cámara de tueste, se colocó el sensor de temperatura tipo K. Con el objetivo de no interferir con la colocación del tubo Pitot, el punto de medición para el sensor de temperatura se definió 3,5 cm antes de este (Ver figura 19 - C). Para la fijación del sensor de temperatura, se realizó una perforación de 6 mm en la tubería y se soldó una base roscada compatible con la base del sensor tipo K.

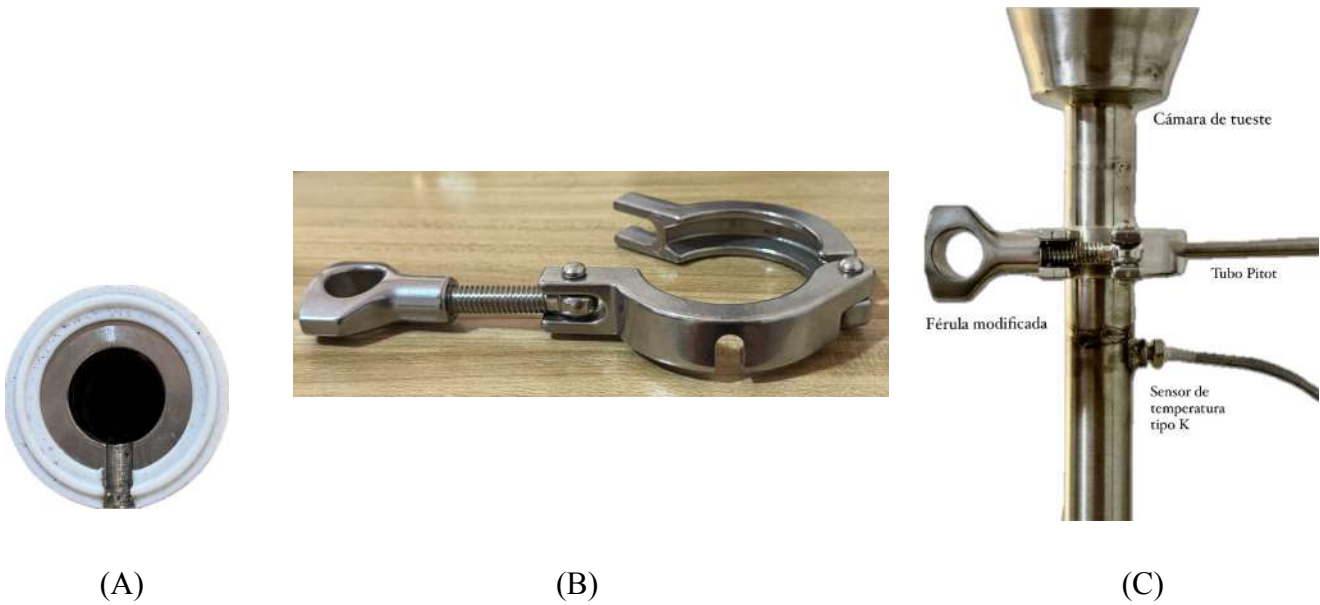


Figura 19. Vista frontal de la férula y su empaque modificados (A), abrazadera modificada (B) y ensamblaje completo (C).

Finalmente, la férula modificada fue la unión entre la cámara de tueste y el resto de la estructura del prototipo. La férula modificada se unió, mediante soldadura, directamente a otra férula, ya que esta segunda cumplió el objetivo de unir la tubería principal (D_i), con la base del cono de la cámara de tueste (D_o). Finalmente, se colocó un plenum con diámetros de perforación de 3,8 mm, con el objetivo de que los granos de café no cayeran dentro de la tubería principal. La cámara de tueste se muestra a continuación:

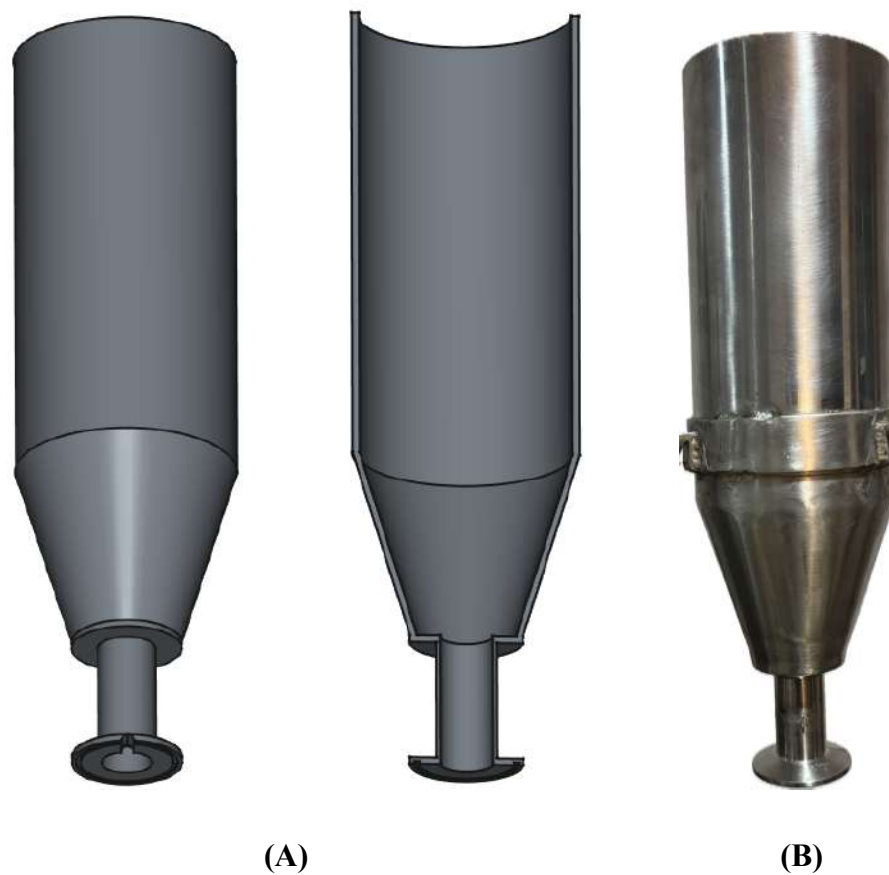


Figura 20. Modelo en CAD (A) y fotografía (B) de la sección de la cámara de tueste.

Todos los modelos CAD generados se pueden visualizar en 3D y descargar de manera libre en el Anexo D.

4.3.3 Construcción en taller

Como se detalló en la sección 4.2.2 de *Selección de Materiales*, el prototipo final del tostador se construyó utilizando acero inoxidable 304. Los modelos CAD (ver Anexo D) se le presentaron al taller encargado de la estructura para su construcción. En la Figura 21 se presenta la estructura del prototipo final del tostador fabricado por el primer taller. Los detalles de las dimensiones de cada componente se especificaron previamente en la sección 4.3.2 *Diseño final del prototipo*.



Figura 21. Estructura final del tostador entregado por el taller de componentes de acero inoxidable desde distintos ángulos.

En cuanto a la construcción de las resistencias, se le comunicó al taller, de manera paralela, (con base en la sección 4.2.3 *Dimensionamiento de la resistencia eléctrica*) el requerimiento en cuanto a potencia y dimensiones de las mismas. Posterior a recibir la estructura en acero inoxidable, se le entregó al taller la sección de dicha estructura que debía incluir las resistencias eléctricas. El taller se encargó de instalar la resistencia dentro de la tubería con las salidas correspondientes a los conectores de fase, neutro y puesta a tierra. La resistencia eléctrica instalada fue de tipo helicoidal. La resistencia instalada en la tubería se muestra a continuación:

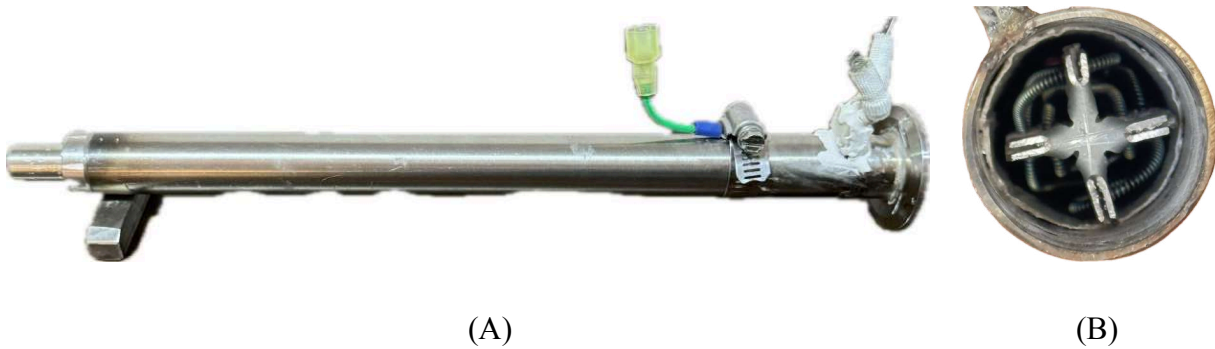


Figura 22. Vista lateral (A) y frontal (B) de las resistencias eléctricas instaladas por el taller.

4.4. Diseño y calibración del sistema de control

El proceso de diseño y calibración del sistema de control del tostador se centró en garantizar una respuesta estable en dos parámetros clave: la temperatura y la potencia del ventilador. A continuación, se detallan los resultados obtenidos durante las pruebas y calibraciones de cada sistema.

4.4.1 Sistema de control de temperatura

El sistema de control de temperatura se conformó por un termopar, el Arduino, el relé de estado sólido y la resistencia eléctrica. El termopar seleccionado fue de tipo K, con un rango de operación entre 0 y 600 °C y una precisión de ± 2 °C. Para transformar la salida analógica del termopar a una salida digital que pueda ser interpretada por el Arduino, se utilizó un amplificador MAX6675.

Los pines de la salida serial (SO), selección de chip (CS) y reloj serial (SCK) del módulo MAX6675 (ver Anexo C2), se conectaron al Arduino mediante los pines digitales 11, 12 y 7, respectivamente (ver Figura 23). Las lecturas en grados Celsius se realizaron mediante la función “readCelsius()” de la librería específica del módulo (llamada “max6675”), creada por la empresa

Adafruit (*MAX31855 Thermocouple*, 2012). La ejecución del código se realizó en el entorno Arduino IDE, en su versión 2.1.2.

Con el objetivo de conmutar la resistencia eléctrica, se utilizó un relé de estado sólido. El relé de estado sólido seleccionado toma como entrada un voltaje entre 3 y 32 Voltios en corriente continua desde el circuito de control. Por otro lado, el dispositivo permite el paso de hasta 60 Amperios en el circuito de corriente alterna, con un rango de voltaje desde 24 hasta 380 V, detallado en Anexo C3. Para el sistema de control de temperatura del tostador, el circuito de control opera a 5 V en corriente directa, y el de potencia a 120 V en corriente alterna. El diagrama ilustrativo del sistema de control de temperatura se muestra a continuación:

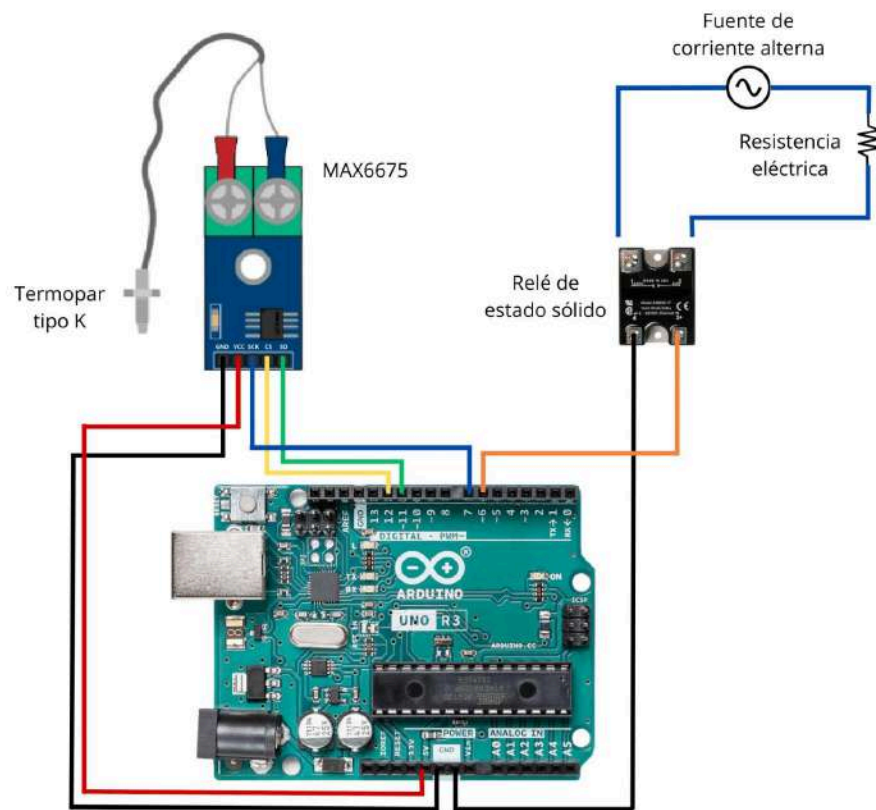


Figura 23. Diagrama del circuito de control de temperatura.

Para el control de temperatura, el Arduino se programó para ejecutar un algoritmo PID de manera indefinida. Para implementar el algoritmo, se utilizó la librería de Arduino llamada “PID_v1”, publicada para su acceso libre por (br3ttb, 2017). Los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa se estimaron de manera progresiva.

Para calibrar los valores del PID, se fijó un valor objetivo de 210 °C. Con tal de prevenir que las resistencias se calentaran de manera abrupta, el ventilador se colocó a su potencia máxima de manera constante. El proceso iterativo se basó en los comportamientos esperados respecto al aumento individual de las constantes, descritos por Li et al. (2006).

Se colocaron la constante integral y derivativa en 0, y se aumentó la constante proporcional de manera paulatina hasta obtener un valor donde la variable de respuesta mantuviese una diferencia constante respecto al valor objetivo, como lo recomiendan Hazza et al. (2018). Un valor de 110 para la constante proporcional mostró una estabilización de la temperatura a los $200,5 \pm 3,7$ °C a partir de los 33 segundos (Ver Figura 24). En las pruebas realizadas, valores superiores a 110 para la constante proporcional no resultaron en una mejora relevante del comportamiento del sistema, donde la temperatura se mantuviera en un punto más cercano al valor objetivo.

La diferencia constante entre el punto de estabilización y el valor objetivo que se observó, se debe a una característica de los controladores proporcionales puros (con valor de la constante integral y derivativa en cero): la presencia de un error de estado estacionario. En estos sistemas, el controlador solamente es capaz de generar la acción de control cuando existe una diferencia entre la variable de respuesta y el valor objetivo. Como resultado, es necesario un error constante para mantener el sistema funcionando en un punto de equilibrio, lo cual provoca que la respuesta

se estabilice en un valor diferente al objetivo, como lo ha señalado Bequette (2007). El aumento de la constante proporcional redujo el error de estado estacionario, sin embargo, no lo eliminó, dado que la acción de control es directamente proporcional al error residual.

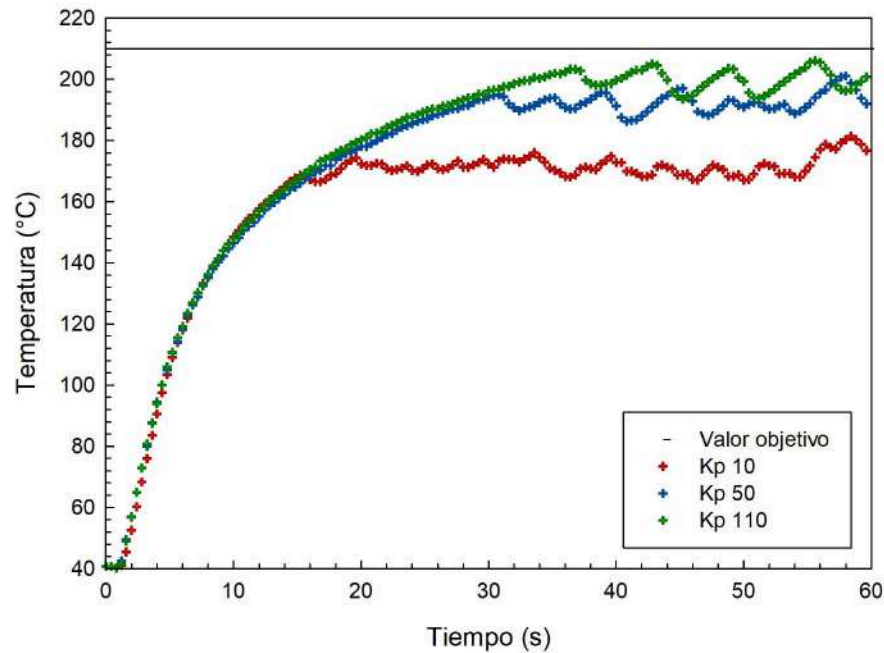


Figura 24. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante proporcional, mientras las constantes integral y derivativa son cero.

La constante proporcional se mantuvo fija en 110 para los siguientes pasos de calibración. Posteriormente, el valor de la constante integral se aumentó paulatinamente hasta lograr que el sistema oscilara cerca de los 210 °C (Ver Figura 25). El valor objetivo no se logró alcanzar para una constante integral de 1, mientras para una constante de 100, este se alcanzó a los 60 segundos, con una oscilación alrededor de $207,6 \pm 5,5$ °C.

El valor de la constante integral que tuvo el comportamiento más estable fue de 10. Para esta condición, el sistema alcanzó el valor objetivo a los 60 segundos y mantuvo una oscilación alrededor de $209,6 \pm 3,6$ °C. Al incorporar el factor de la constante integral, la magnitud del error

de estado estacionario se redujo de 9,5 a 0,4 °C. El comportamiento de este ajuste para diferentes valores de la constante integral, se muestra a continuación:

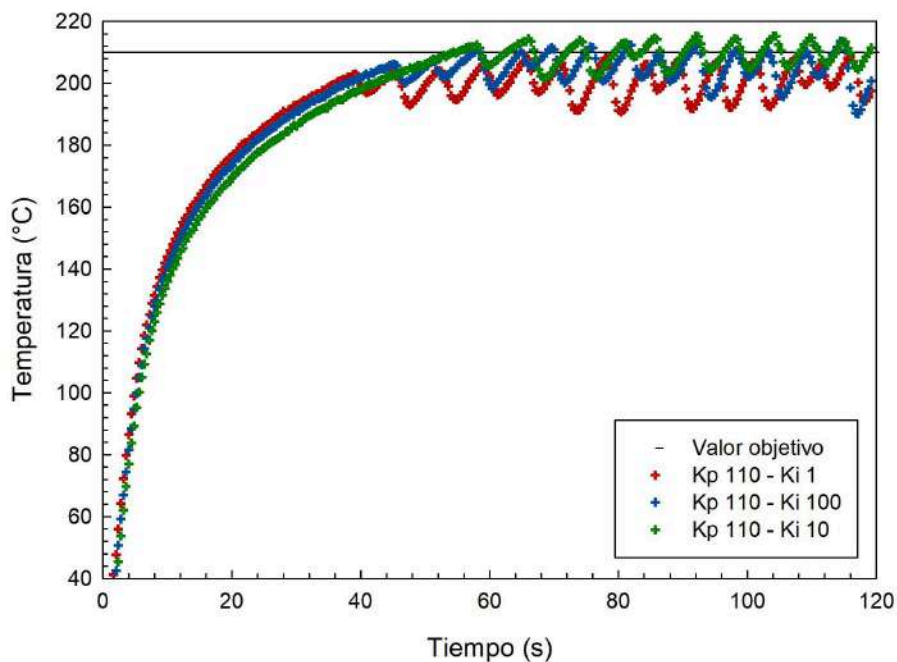


Figura 25. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante integral, mientras la constante proporcional es 110 y la derivativa es cero.

Para los siguientes pasos de calibración, las constantes proporcional e integral se mantuvieron fijas en 110 y 10, respectivamente. Con el objetivo de mantener un comportamiento estable de manera prolongada alrededor del valor objetivo, la constante derivativa se evaluó a diferentes magnitudes (ver Figura 26). Para valores de la constante derivativa de 1 y 10, el comportamiento fue similar, con valores promedio de $204,8 \pm 6,4$ °C y $206,1 \pm 5,1$ °C, respectivamente. Para ambos casos, la temperatura osciló alrededor de temperaturas por debajo del valor objetivo.

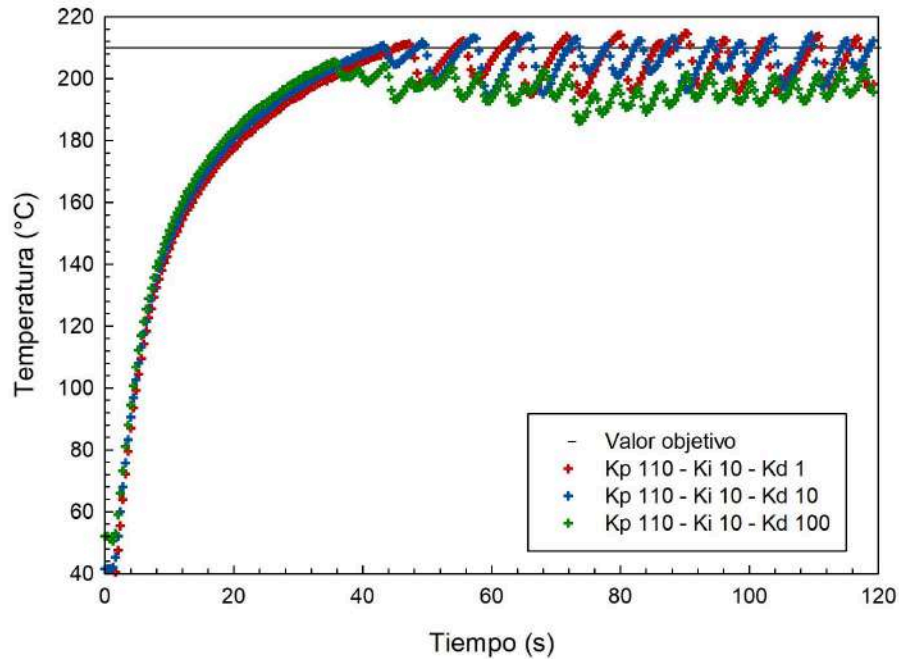


Figura 26. Comportamiento del PID para diferentes valores de la constante derivativa, mientras la constante proporcional es 110 y la integral es 10.

Una vez que se obtuvieron valores iniciales de las tres constantes, se realizó un ajuste fino de las mismas. La calibración se realizó mediante iteración, hasta lograr que el valor medido de temperatura no se desviara del valor objetivo por más de 1 °C durante 1 minuto. Como se muestra en la Figura 27, el valor objetivo se alcanzó cerca de los 55 segundos. Una vez que el valor objetivo se alcanzó, el sistema se mantuvo en $209,9 \pm 0,6$ °C. Los valores finales de las constantes proporcional, integral y derivativa fueron de 50, 15 y 65, respectivamente.

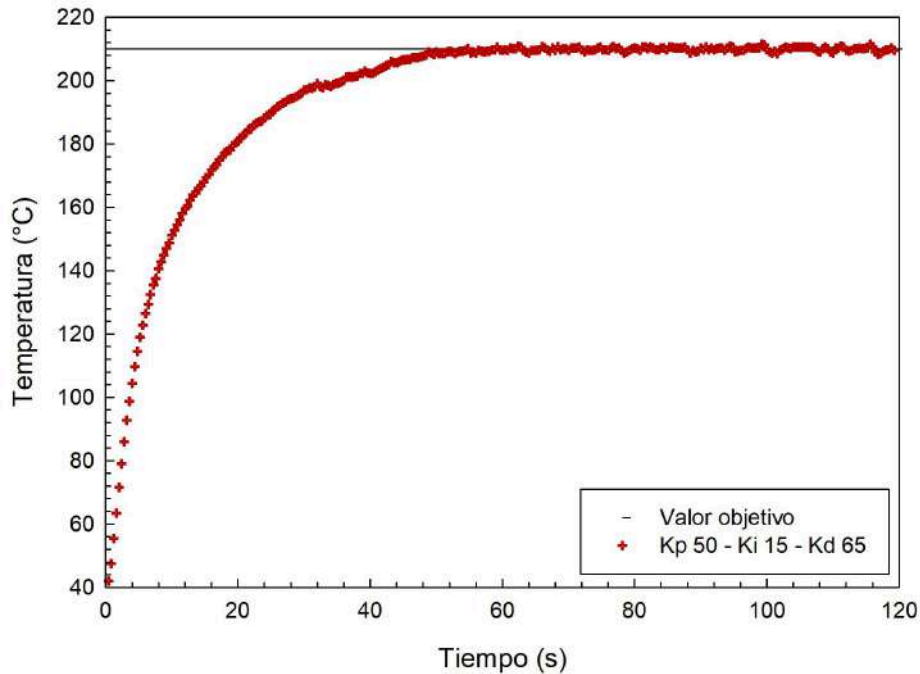


Figura 27. Comportamiento del PID después de realizar el ajuste fino.

4.4.2 Sistema de control del flujo de aire

El sistema de control del flujo de aire se conformó por un tubo Pitot, un sensor de diferencial de presión, el ventilador con su circuito controlador y el Arduino. El Pitot es modelo PT6300, de tipo L y fabricado en acero inoxidable 304. Las dimensiones del tubo son de 300 mm de longitud total y 110 mm de longitud insertada, con un diámetro externo de 6 mm. El error en la medición de la presión es de $\pm 0.1\%$ (PerfectPrime, s. f.).

Para medir el diferencial de presión, que es necesario para el cálculo de la velocidad del aire, se utiliza un sensor de presión diferencial MPXV7002DP . Este sensor mide diferencias de presión en un rango de 0 a ± 2 kPa, con una precisión típica de $\pm 2.5\%$. La señal de presión medida se convierte en una señal eléctrica mediante un transductor AMP2.5, que se alimenta a través de los

pinos de 5V y tierra del Arduino, mientras que su salida se lee a través del pin analógico 0, como se muestra en la Figura 28.

Para convertir la señal eléctrica generada por el sensor MPXV7002DP en un valor de presión en pascales (Pa), se utilizó la función de transferencia proporcionada por el fabricante (ver Anexo C4). Esta función establece que el voltaje de salida (V_{out}) se relaciona con la presión diferencial (P) en kPa mediante la expresión:

$$V_{out} = V_s \times (0.2 \times P(kPa) + 0.5) \quad [41]$$

donde V_s es el voltaje de alimentación, en este caso 5 V. De esta manera, se obtuvo un valor de presión a partir de la señal de voltaje medida por el Arduino. Los datos de presión fueron procesados por el microcontrolador Arduino, donde, utilizando la ecuación de Bernoulli, se calculó la velocidad del fluido en función de las lecturas de diferencial de presión.

$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad [42]$$

Para regular la potencia del ventilador, se utilizó el circuito de control original de fábrica. Este circuito, al ser regulado mediante modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), puede ser controlado mediante los pines PWM de Arduino. En este caso, se utilizó el pin PWM 3, como se muestra en la Figura 28. El diagrama ilustrativo del sistema de control de velocidad del ventilador se muestra a continuación:

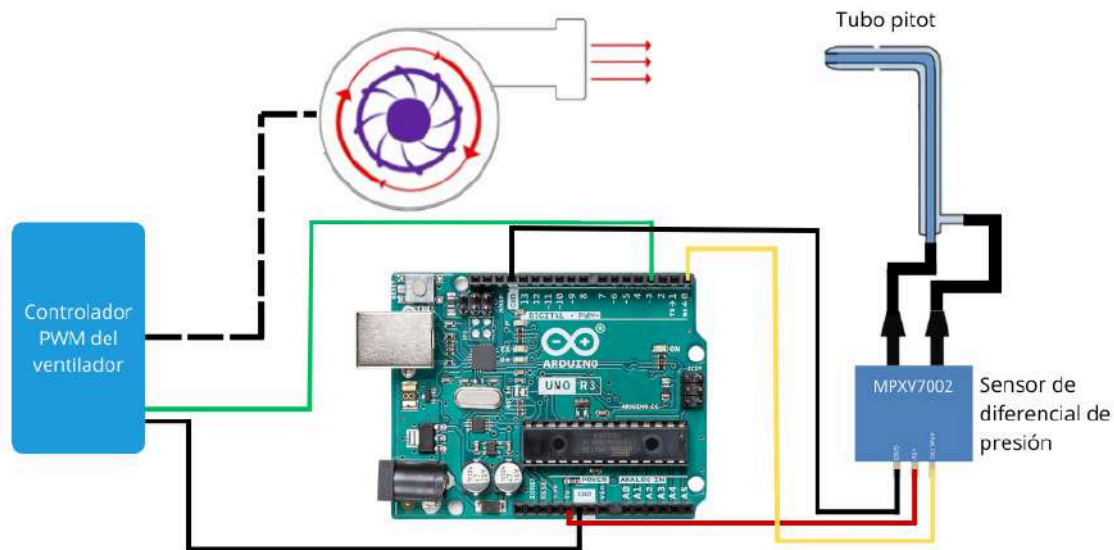


Figura 28. Diagrama del circuito de control de potencia del abanico.

4.5. Evaluación del proceso de torrefacción

Los datos experimentales mostraron la influencia de la temperatura y el tiempo de tueste sobre las propiedades físicas de los granos.

Vargas (2014) describió que, previo a la etapa de tueste (etapa de secado), el contenido de humedad experimental y el calculado muestran una relación directamente proporcional hasta llegar a un valor cercano a 6,4 % b.h. Por debajo de esta magnitud, se da el proceso de tueste. Como se muestra en la Figura 29, los ensayos a todas las temperaturas y todos los tiempos mostraron valores menores al límite experimental observado por Vargas (2014), por lo tanto, los granos se encuentran tostados.

Tanto Vargas (2011) como Illy & Viani (2005) concluyeron que el contenido de humedad en base húmeda tiene una tendencia decreciente respecto al tiempo de tueste. Como se muestra en la Figura 29, se observó una disminución del contenido de humedad con respecto al tiempo para

todas las temperaturas evaluadas, donde, para los procesos a 190 y 195 °C, se observó una tendencia decreciente en todas las pruebas, mientras que para la ejecución a 185 °C, se observó una desaceleración de la pérdida de humedad entre los 12 y 14 min.

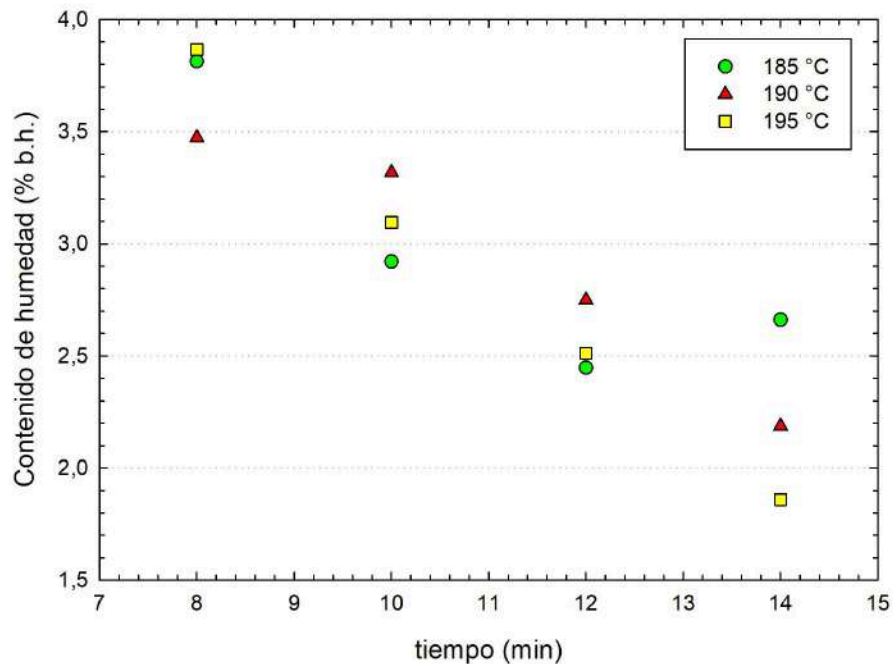


Figura 29. Contenido de humedad en base húmeda respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste.

La desaceleración observada para la prueba a 185 °C, cerca de 2,6 % en contenido de humedad, podría estar asociada a diferentes factores. Por ejemplo, Illy & Vianai (2005) muestran que las microfisuras responsables de la liberación de gases tales como el vapor de agua contenido en las células del grano ocurren a partir de los 190 °C. Por esta razón, y dado que el proceso de tueste es a temperatura constante (ver Figura 27), con 185 °C se estaría llegando a un límite en el cual la extracción de humedad del material se vuelve más lenta. A su vez, estas microfisuras explican

por qué las ejecuciones a 190 y 195 °C sí lograron continuar con la reducción del contenido de humedad en el tiempo evaluado.

En contraste con la tendencia del contenido de humedad, la actividad del agua revela información sobre la fracción de agua no ligada químicamente y cómo esta se ve afectada por las transformaciones estructurales y químicas durante el tueste. Como se observa en la Figura 30, la actividad del agua mostró un decrecimiento en el tiempo para las tres temperaturas evaluadas. Esta tendencia en la actividad del agua es similar a lo observado por Durán (2024).

La actividad del agua se puede ver disminuida mediante dos mecanismos durante el tueste. Por un lado, parte del agua libre inicial puede salir en forma de vapor, y, por tanto, reducir la presión de vapor de la muestra al final del proceso. Por otro lado, el agua libre se puede ligar químicamente a moléculas de la matriz del grano, y, por tanto, también reducir la presión de vapor de la muestra al modificar la relación entre agua de constitución y agua libre. En el segundo caso, es de resaltar que esa disminución en la actividad del agua no está atada, necesariamente, a una disminución en el contenido de humedad.

Cabe destacar que, para la prueba a una temperatura de 185 °C, anteriormente se describió que el contenido de humedad se mantuvo constante cerca de 2,6 % b.h. a partir de los 12 min mientras que, en la Figura 30, se observa que la actividad de agua decrece en todo el rango evaluado. Los cambios en la matriz, inducidos por la misma reacción de Maillard, pueden favorecer un incremento en el agua de constitución atrapada en estas nuevas estructuras formadas (Fadai et al., 2018). Tanto el aumento en la cantidad de agua químicamente ligada en las nuevas estructuras, como la ausencia de microfisuras (ya que se aún no se llega a los 190 °C), sugiere que la

migración de agua hacia la superficie del grano podría estar limitada; disminuyendo así la actividad del agua sin alterar el contenido de humedad total.

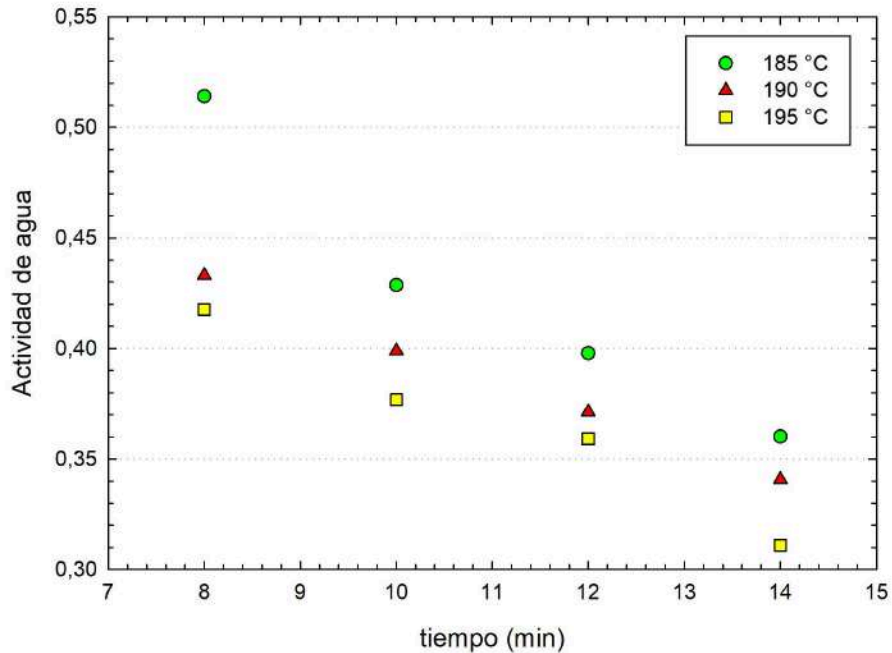


Figura 30. Actividad de agua respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste.

La Figura 31 muestra la pérdida de masa total respecto al tiempo para las tres temperaturas evaluadas. Vargas (2014) separó el proceso de tueste en dos etapas; estableció que antes de un 4,5% de pérdida de masa total se está en un proceso de secado, mientras que para valores mayores, se está en etapa de tueste. Como se muestra en la Figura 31, en todos los ensayos la pérdida de masa total superó el 8,9 %.

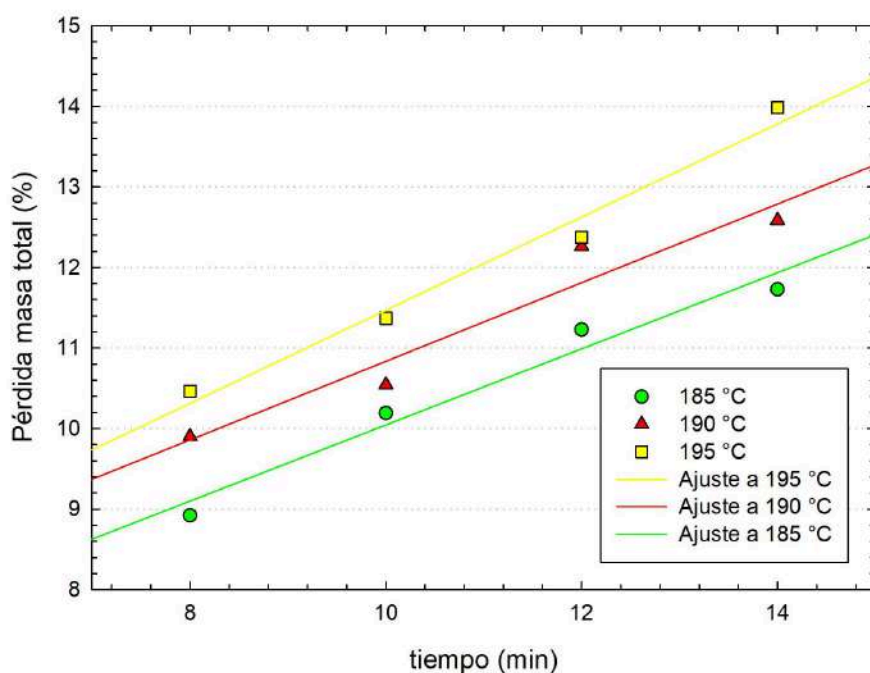


Figura 31. Pérdida de masa total respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste.

En la Figura 31, se observa un incremento de la pérdida de masa tanto en el tiempo como con el aumento de la temperatura del aire de tueste. Según Illy & Viani (2005), la pérdida de masa total se debe a la liberación de humedad en forma de vapor de agua y compuestos volátiles. La pérdida de masa total se asocia en un 90 % al agua y un 10 % al CO_2 liberado al ambiente junto con pequeñas cantidades de compuestos volátiles.

Vargas (2014) encontró que la relación entre la pérdida de masa total y el tiempo es lineal, además de que la pendiente de esta recta aumenta conforme la temperatura del proceso también aumente; este fenómeno también fue observado por Abarca (2017). Para describir cuantitativamente este comportamiento, se realizaron ajustes de regresión lineal, cuyos parámetros se presentan en el Cuadro IV. Los coeficientes de determinación (R^2) fueron superiores a 0,93; indicando concordancia con el ajuste lineal reportado en la literatura.

Las tasas de pérdida de masa total están dadas por el coeficiente m y se expresan en unidades de $\% \min^{-1}$. Vargas (2014) reportó aumentos en la tasa de pérdida de masa total conforme aumentó la temperatura, con valores de 0,62; 1,12; 1,59 y 3,04 $\% \min^{-1}$, asociadas a 255, 284, 305 y 335 °C, respectivamente. En comparación con los valores reportados en el Cuadro IV, las tasas de pérdida de masa total también aumentaron conforme la temperatura del proceso aumentó, desde 0,47 a 0,58 $\% \min^{-1}$ para las temperaturas de 185 a 195 °C. Se observó que el tostador propuesto generó una pérdida de masa total más lenta en los granos. Es importante aclarar que las diferencias en las tasas de pérdida de masa pueden verse afectadas por factores como la temperatura del equipo (Vargas, 2014) o la masa del lote (Abarca, 2017).

Cuadro IV. Resumen de los parámetros de los ajustes lineales para la pérdida de masa total a diferentes temperaturas de tueste.

Temperatura (°C)	Ecuación ($\Delta M = y_0 + m \times t$)	R ²	EEE*
185	$y_0 = 5,3181, a = 0,4727$	0,9670	0,2762
190	$y_0 = 5,9537, a = 0,4881$	0,9351	0,4067
195	$y_0 = 5,6865, a = 0,5783$	0,9799	0,2617

*Error Estándar de Estimación

En la Figura 32 se muestra la tendencia de la pérdida de masa seca durante el proceso de tueste a las tres temperaturas evaluadas, 185, 190 y 195 °C. A partir de los 10 minutos de tueste, en las tres temperaturas se observó un incremento sostenido en la pérdida de masa seca. Tanto Vargas (2011), Abarca (2017) como Durán (2024), observaron valores crecientes en la pérdida de masa respecto a niveles de tueste más oscuros.

Vargas (2011) observó que cambios en la materia seca permitieron separar distintos grados de tueste, de manera independiente a la temperatura del tostador. Posteriormente, Abarca (2017) concluyó que el porcentaje de pérdida de masa seca es un factor significativo a la hora de determinar el grado de tueste. El incremento observado indica una mayor intensidad de la liberación de CO₂ y compuestos volátiles (Illy & Viani, 2005).

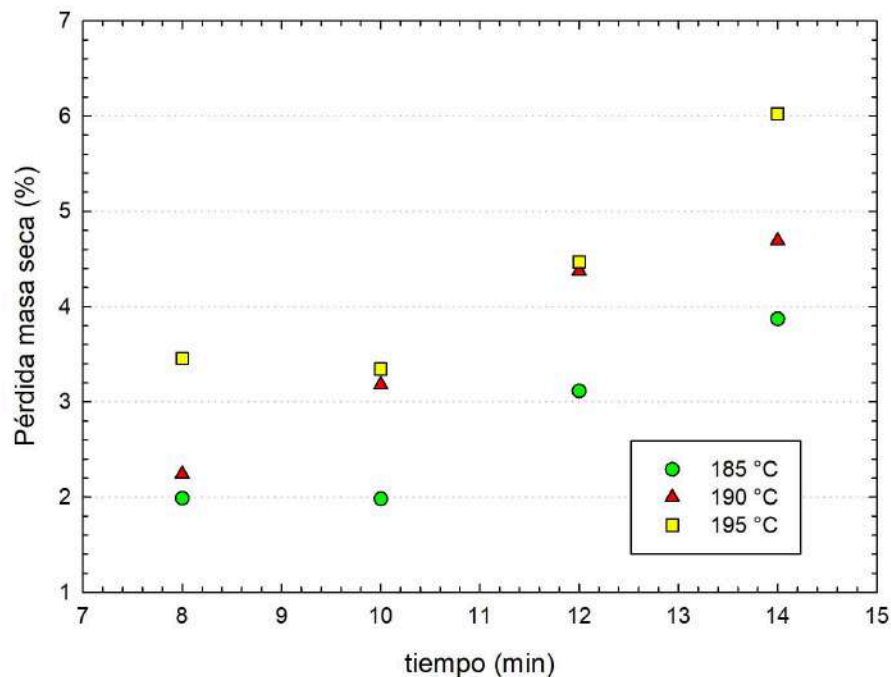


Figura 32. Pérdida de masa seca respecto al tiempo para las tres temperaturas de tueste.

Al comparar las pérdidas de masa seca observadas (ver Figura 32) respecto a la clasificación de Clarke & Macrae (1987) para los grados de tueste con base en su porcentaje de pérdida de masa seca; todos los ensayos a 185 y 190 °C se ubicaron en el rango de tueste claro (1 a 5 %). Por otro lado, para la temperatura de 195 °C, los valores en el rango de 8 a 10 minutos también se clasificaron como tuestes claros, a excepción la prueba de 14 minutos, ya que esta registró un 6,02 % de pérdida de masa seca, y, por tanto, se clasificó como tueste medio (de 5 a 8 %).

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó un prototipo tostador de café con aire caliente a partir de interacciones de transferencia de calor y masa durante la torrefacción.
- Se construyó un prototipo de tostador de granos de café en acero inoxidable a partir de la aplicación de los criterios de diseño establecidos.
- Los cambios medidos en los granos de café, como el contenido de humedad, la pérdida de masa total y la pérdida de masa seca, confirmaron la capacidad del tostador para la torrefacción.
- Los cambios en las propiedades físicas de los granos de café durante el tueste afectan la velocidad mínima del aire requerida para la operación estable del lecho a chorro.
- El dimensionamiento de la resistencia eléctrica garantizó la potencia necesaria para alcanzar las condiciones de tueste evaluadas.
- El dimensionamiento del ventilador permitió la formación estable del lecho a chorro en la cámara de tueste.
- El sistema de control PID implementado para controlar las resistencias eléctricas fue capaz de mantener una temperatura del aire estable en el tiempo.
- La plataforma Arduino permitió la implementación de un sistema de control de bajo costo, el cual fue capaz de monitorear y ajustar en tiempo real la respuesta del PID, garantizando así la estabilidad del proceso.

6. RECOMENDACIONES

- Dado que los cambios en las propiedades físicas de los granos afectan la dinámica del lecho a chorro, se recomienda profundizar en estudios experimentales que permitan modelar de manera más precisa la relación entre la torrefacción y dichos cambios en tostadores de aire caliente, para ajustar mejor los parámetros operativos.
- Se recomienda incorporar sensores adicionales que permitan registrar parámetros como la temperatura dentro y después de la cámara de tueste, con el objetivo de entender mejor la transferencia de calor en esta zona.
- Se sugiere evaluar la adaptabilidad del diseño para masas mayores, de modo que el prototipo pueda evolucionar hacia aplicaciones semi-industriales o de pequeña producción.
- Se sugiere la incorporación de elementos de seguridad adicionales (por ejemplo, sistemas de apagado automático, protección contra sobrecalentamiento y aislantes térmicos en las superficies calientes), que garanticen un uso seguro y prolongado en entornos domésticos.
- Se sugiere incorporar una interfaz de usuario intuitiva capaz de configurar las condiciones deseadas para el tueste, como la temperatura, velocidad y tiempo del proceso, que no requiera de modificar directamente el código del Arduino y que sea fácil de usar.
- Se recomienda realizar estudios sensoriales comparativos que permitan evaluar de forma cualitativa y cuantitativa las diferencias en el perfil de sabor del café tostado a temperatura constante respecto a tostadores convencionales.

- Se recomienda llevar a cabo un estudio experimental sistemático para evaluar la influencia de la presencia de elementos obstructivos en la pérdida de presión del sistema, específicamente de las resistencias eléctricas. Se deben variar los diámetros y largos de la resistencia eléctrica en relación con la tubería, con el objetivo de determinar cómo estas variables afectan la distribución del flujo de aire. Esta aproximación permitirá comprender mejor el impacto de las diferentes configuraciones en diversos escenarios operativos y, de este modo, optimizar el dimensionamiento del ventilador y el diseño general del sistema, extendiendo los resultados a condiciones operativas distintas de la configuración ya diseñada.
- Se recomienda ampliar la investigación mediante ensayos experimentales con diferentes variedades de café, con el fin de evaluar la aplicabilidad y generalización de los resultados obtenidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca Mora, R., Vargas-Eliás, G., Castillo, J., Castro-Castro, I., & Herrera-Quesada, L. (2016). *Efecto de la masa sobre el tiempo de tostado en café*. Trabajo presentado en el XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, Bogotá, Colombia.
- Abarca, R. (2017). *Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Abbas, A., Adesina, A. Y., & Suleiman, R. K. (2023). Influence of Organic Acids and Related Organic Compounds on Corrosion Behavior of Stainless Steel—A Critical Review. *Metals*, 13(8), 1479. <https://doi.org/10.3390/met13081479>
- Afonso Júnior, P., Corrêa, P., Pinto, F., & Queiroz, D. (2007). Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. *Biosystems Engineering*, 98(1), 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.010>
- AliExpress. (s.f.). 7060 DC 12V/24V small high-pressure brushless DC centrifugal blower, air inlet negative pressure 12kpa, high-pressure turbine fan. AliExpress. <https://www.aliexpress.us/item/2251832787734332.html>
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (1998). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice* (23rd ed.). ACGIH.
- Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Education.
- Baddoo, N. (2008). Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal Of Constructional Steel Research*, 64(11), 1199-1206. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.011>

- Barrantes, S. (2022). *Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (Coffea arabica)*. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Barrera, A. (2008). *Turismo Rural Comunitario* (1.^a ed., Vol. 1) [En línea].
<https://sgp.undp.org/publications-188/86-turismo-rural-comunitario.html>
- Bequette, B. W. (2007). Analysis of Algorithms for Intensive Care Unit Blood Glucose Control. *Journal Of Diabetes Science And Technology*, 1(6), 813-824.
<https://doi.org/10.1177/193229680700100604>
- Bolka, M., & Emire, S. (2020). Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans. *Food Science & Nutrition*, 8(11), 6120-6130. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1904>
- Bordiga, M., & Nollet, L. M. L. (2019). *Food Aroma Evolution: During Food Processing, Cooking and Aging*.
- br3ttb. (2017). *Arduino PID Library* [Repositorio en GitHub]. GitHub.
https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/blob/master/PID_v1.h
- Cardoso, W. S., Dias, S. R., Coelho, V. S., Pereira, L. L., Fioresi, D. B., & De Abreu Pinheiro, F. (2023). Maillard reaction precursors and arabica coffee (*Coffea arabica* L.) beverage quality. *Food And Humanity*, 1, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.01.002>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. En *Google Books*. McGraw-Hill.
<https://books.google.co.cr/books?id=vom4zQEACAAJ>
- Clarke, R. J., & Macrae, R. (Eds.). (1987). *Coffee. Coffee Technology*, 2.
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417-7>

- Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (Eds.). (2001). Coffee. *Coffee: Recent Developments*.
<https://doi.org/10.1002/9780470690499>
- Corea-Juárez, J., Vílchez-Herdocia, L., & Espinosa, R. (2021). Comportamiento fluidodinámico de cuatro granos en dos modelos de secadores de lecho fluidizado. *Nexo Revista Científica*, 34(03), 46-57. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i03.11861>
- Da Silva, C. C. A. F., Segundo, A. K. R., & Lage, V. N. (2018). Low Cost Industrial Interface Design and Graphical Programming for Arduino. En *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 37-42). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73204-6_5
- De Araujo, A. C. S., Frizzone, J. A., De Camargo, A. P., De S Pereira, D. J., De Melo, V. G. M. L., & Bombardelli, W. W. A. (2020). Discharge sensitivity of collapsible drip tapes to water temperature. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 25(1), 3-9.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9>
- De Araujo, M. E. V., Corrêa, P. C., Barbosa, E. G., & Martins, M. (2021). Determination and modeling of physical and aerodynamic properties of coffee beans (*Coffea arabica*) during the drying process. *Journal Of Food Processing And Preservation*, 45(9).
<https://doi.org/10.1111/jfpp.15698>
- Dewangan, A. K., Patel, A. D., & Bhadania, A. G. (2015). Stainless steel for dairy and food industry: A review. *Journal of Material Science and Engineering*, 4(5).
<https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000191>
- Durán Gamboa, O. E. (2024). *Análisis de la expansión volumétrica del café (Coffea arabica) durante el proceso de torrefacción en granos con diferente tratamiento térmico, variedad y tipo de beneficiado* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Kérwá

<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/954666bb-1982-4c15-adaa-8e64e5cd552c>

Eastern Steels. (s.f.). What are the standards for the length range of seamless pipes? Recuperado de <https://www.eastern-steels.com/newsdetail/what-are-the-standards-for-the-length-range-of-seamless-pipes.html>

Epstein, N., & Grace, J. R. (2010). *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications* (1.). Cambridge University Press.

Epstein, N., & Mathur, K. B. (1973). *Spouted Beds* (1.^a ed.) <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-480050-2.X5001-2>

Euromonitor International, & Barry, M. (2021, 23 marzo). *Ranked: Top 25 Coffee-Drinking Countries - Fresh vs Instant*. Euromonitor. Recuperado 7 de enero de 2023, de <https://www.euromonitor.com/article/ranked-top-25-coffee-drinking-countries-fresh-vs-instant>

Fadai, N. T., Akram, Z., Guilmineau, F., Melrose, J., Please, C. P., & Van Gorder, R. A. (2018). The influence of distributed chemical reaction groups in a multiphase coffee bean roasting model. *IMA Journal Of Applied Mathematics*, 83(5), 821-848. <https://doi.org/10.1093/imamat/hxy023>

Fadai, N. T., Melrose, J., Please, C. P., Schulman, A., & Van Gorder, R. A. (2016). A heat and mass transfer study of coffee bean roasting. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 104, 787-799. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.083>

Fotek. (s.f.). *SSR-DA: Solid state relay specifications* [Ficha técnica]. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General/SSR40DA.pdf>

- GB Standards. (s.f.). *GB/T 8163-2008 Seamless steel pipes for liquid service*. Recuperado de https://www.gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%208163-2008&id=15961
- Gishler, P. E., & Mathur, K. B. (1957). *Method of contacting solid particles with fluids* (Patent N.º 2786280). Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los Estados. <https://patents.google.com/patent/US2786280>
- Goodfellow, H. D., & Kosonen, R. (2020). *Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 1: Fundamentals*. Academic Press.
- Guatemala, G., Santoyo, F., Virgen, L., Corona, R., & Arriola, E. (2012). Hydrodynamic model for the flow of granular solids in the S-valve. *Powder Technology*, 230, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.06.055>
- Haddou, J. V. H., Ellis, N., Bi, X., & Epstein, N. (2012). Spouting characteristics of spf wood pellets. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(5), 808-813. <https://doi.org/10.1002/cjce.21706>
- Haidekker, M. A. (2013). The PID controller. En *Elsevier eBooks* (pp. 193-208). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-405875-0.00013-9>
- Han, M. (2014). Characterization of fine particle fluidization. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 583-590. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/3073>
- Heyd, B., Broyart, B., Hernandez, J. A., Valdovinos-Tijerino, B., & Trystram, G. (2007). Physical Model of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Coffee Roaster. *Drying Technology*, 25(7-8), 1243-1248. <https://doi.org/10.1080/07373930701438683>

- Hong, W., & YanYing, L. (2020). Application of intelligent control in industrial process control automation. *Journal Of Physics Conference Series*, 1617(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1617/1/012012>
- Howell, R. H., Coad, W. J., & Sauer, H. J. (2021). *Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning: A Textbook with Design Data Based on the 2013 ASHRAE Handbook Fundamentals*.
- Hu, G. L., Wang, X., Zhang, L., & Qiu, M. H. (2019). The sources and mechanisms of bioactive ingredients in coffee. *Food & Function*, 10(6), 3113-3126. <https://doi.org/10.1039/c9fo00288j>
- Hu, G., Hong, D., Wang, X., Wang, Y., Zhou, L., Li, Z., & Qiu, M. (2021). Pyrrolomorpholine Spiroketal Alkaloids Present in Roasted Beans of Yunnan Arabica Coffee. *The Natural Products Journal*, 12(2), 88-91. <https://doi.org/10.2174/2210315511666210604164549>
- ICAFE. (2020). *Propuesta: Política Nacional Cafetalera*. https://www.icafe.cr/wp-content/uploads/politica_cafetalera/Politica+Nacional+Cafetaler a.pdf
- Illy, A., & Viani, R. (2005). *Espresso Coffee: The Science of Quality* (2.^a ed.). <https://www.elsevier.com/books/espresso-coffee/illy/978-0-12-370371-2>
- Inovan, T., Cahyadi, A. I., & Wahyunggoro, O. (2023). Implementation of adaptive-PID based temperature trajectory tracking control to improve repeatability in coffee roasting. *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, 162–167. <https://doi.org/10.1109/IAICT59002.2023.10205885>

- Instituto Adolfo Lutz. (2008). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos - 4a edição* (4.^a ed.). Instituto Adolfo Lutz. <http://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos>
- Jarvenpa, R. (2000). Farmers of the Golden Bean: Costa Rican Households and the Global Coffee Economy. *American Anthropologist*, 102(2), 410-412. <https://doi.org/10.1525/aa.2000.102.2.410>
- Jellesen, M. S., Rasmussen, A. A., & Hilbert, L. R. (2015). A review of metal release in the food industry. *Journal of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark*. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000191>
- Khansa, A. P., & Bintoro, N. (2021). The influence of types and moisture contents of coffee beans (*Coffea* sp) on sphericity and geometric means diameter. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 653(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012017>
- L. Louzada Pereira, T. Rizzo Moreira (eds.), *Quality Determinants in Coffee Production*, Food Engineering Series, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_7
- Langeron, Y., Grall, A., & Barros, A. (2015). A modeling framework for deteriorating control system and predictive maintenance of actuators. *Reliability Engineering & System Safety*, 140, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.028>
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (s.f.). *ASME/ANSI B36.10/19: Welded and seamless wrought steel pipe, stainless steel pipe*. Lawrence Berkeley National Laboratory.

- Lee, S., Choi, E., & Lee, K. (2024). Kinetic modelling of Maillard reaction products and protein content during roasting of coffee beans. *LWT*, 116950. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116950>
- Li, Y., Ang, K. H., & Chong, G. (2006). PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems*, 26(1), 32-41. <https://doi.org/10.1109/mcs.2006.1580152>
- Li, Y., Lim, C. J., & Epstein, N. (1996). Aerodynamic aspects of spouted beds at temperatures up to 580 °C. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 61, 253-266.
- Lim, C., Gilbertson, M., & Harrison, A. (2006). Bubble distribution and behaviour in bubbling fluidised beds. *Chemical Engineering Science*, 62(1-2), 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.034>
- Liu, S., Sun, H., Ma, G., Zhang, T., Wang, L., Pei, H., Li, X., & Gao, L. (2022). Insights into flavor and key influencing factors of Maillard reaction products: A recent update. *Frontiers In Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973677>
- Lu, C., Saifullah, A., Li, B., Sha, M., Gonzalez, H., Gunatilaka, D., Wu, C., Nie, L., & Chen, Y. (2015). Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems. *Proceedings Of The IEEE*, 104(5), 1013-1024. <https://doi.org/10.1109/jproc.2015.2497161>
- Lund, M. N., & Ray, C. A. (2017). Control of Maillard Reactions in Foods: Strategies and Chemical Mechanisms. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 65(23), 4537-4552. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00882>

- Marchelli, F., Bove, D., Moliner, C., Bosio, B., & Arato, E. (2017). Discrete element method for the prediction of the onset velocity in a spouted bed. *Powder Technology*, 321, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.032>
- Mathur, K. B., & Gishler, P. E. (1955). A technique for contacting gases with coarse solid particles. *AIChE Journal*, 1(2), 157-164. <https://doi.org/10.1002/aic.690010205>
- MAX31855 Thermocouple. (2012). Adafruit Learning System. <https://learn.adafruit.com/thermocouple/>
- Maxim Integrated. (2002). MAX6675: Cold-junction-compensated K-thermocouple-to-digital converter (0°C to +1024°C) [Ficha técnica]. Maxim Integrated. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf>
- Meurer, A., Smith, C. P., Paprocki, M., Čertík, O., Kirpichev, S. B., Rocklin, M., Kumar, A., Ivanov, S., Moore, J. K., Singh, S., Rathnayake, T., Vig, S., Granger, B. E., Muller, R. P., Bonazzi, F., Gupta, H., Vats, S., Johansson, F., Pedregosa, F., . . . Scopatz, A. (2017). SymPy: symbolic computing in Python. *PeerJ Computer Science*, 3, e103. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.103>
- Miskon, M. T., Rahiman, M. H. F., & Taib, M. N. (2022). Evaluation of fuzzy PID controller design for coffee roasting temperature regulation. *Proceedings of the 12th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, 61–66. <https://doi.org/10.1109/ICSET57543.2022.10011075>
- Moreira, A. S., Nunes, F. M., Simões, C., Maciel, E., Domingues, P., Domingues, M. R. M., & Coimbra, M. A. (2017). Transglycosylation reactions, a main mechanism of phenolics

- incorporation in coffee melanoidins: Inhibition by Maillard reaction. *Food Chemistry*, 227, 422-431. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.107>
- Moreira, T. R., Da Silva, S. F., Da Silva, N. B., Santos, G. M. A. D. A. D., & Santos, A. R. D. (2020). Global Warming and the Effects of Climate Change on Coffee Production. En Food engineering series (pp. 65-100). https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_2
- Morris, F. J. (2019). *Coffee: A Global History*. Reaktion Books. <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/distributed/C/bo31238025.html>
- Murillo-Soto, L. D. (2015). Automation of small-scale with Open Hardware. *Revista Tecnología En Marcha*, 28(1), 15. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i1.2188>
- Nagaraju, Murthy, C. T., Ramalakshmi, K., & Rao, P. N. S. (1997). Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. *Journal Of Food Engineering*, 31(2), 263-270. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(96\)00026-x](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(96)00026-x)
- Nagaraju, V. D., & Bhattacharya, S. (2010). Roasting green coffee beans using spouted bed roaster: changes in physical characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 674-677. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0088-z>
- Novaes, F. J. M., Da Silva, A. I., Junior, Kulsing, C., Nolvachai, Y., Bizzo, H. R., De Aquino Neto, F. R., Rezende, C. M., & Marriott, P. J. (2019). New approaches to monitor semi-volatile organic compounds released during coffee roasting using flow-through/active sampling and comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Food Research International*, 119, 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.02.009>

- Nuraisyah, A., Juliansyah, A., Pramudianto, P. R., Prayogo, M. M. R. P., Zulisma, E. D., Diana, L. E., & Alwi, A. L. (2024). Pengaruh Metode Pengolahan dan Level Roasting Terhadap Karakteristik Kopi Robusta Argopuro Jember. *AGRITEKNO Jurnal Teknologi Pertanian*, 13(1), 9-14. <https://doi.org/10.30598/jagritekno.2024.13.1.9>
- NXP Semiconductors. (2021). MPXV7002: Integrated silicon pressure sensor, on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated [Ficha técnica]. NXP Semiconductors. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXV7002.pdf>
- Odzakovic, B., Dzinic, N., Jokanovic, M., & Grujic, S. (2019). The influence of roasting temperature on the physical properties of Arabica and Robusta coffee. *Acta Periodica Technologica*, 50, 172-178. <https://doi.org/10.2298/apt1950172o>
- Ogunjirin, O. A., Odeniyi, O. M., Olubo, A. S., Farounbi, A. J., Ola, O. A., & Adeleke, S. A. (2020). Design and construction of an electrically powered coffee roasting machine. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 445(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/445/1/012009>
- Olazar, M., López, G., Altzibar, H., Aguado, R., & Bilbao, J. (2009). Minimum spouting velocity under vacuum and high temperature in conical spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(4), 541-546. <https://doi.org/10.1002/cjce.20183>
- Omar, H. M. (2017). Enhancing automatic control learning through Arduino-based projects. *European Journal Of Engineering Education*, 43(5), 652-663. <https://doi.org/10.1080/03043797.2017.1390548>
- Pascucci, F. (2018). The export competitiveness of Italian coffee roasting industry. *British Food Journal*, 120(7), 1529-1546. <https://doi.org/10.1108/bfj-05-2017-0306>

PerfectPrime. (s. f.). *304 Stainless Steel Pitot-Static Tube 300mm x 110mm | PT6300*.

<https://perfectprime.com/products/pt6300>

PROCOMER. (2018a). *Bajos precios del café afectan a productores internacionales*.

https://www.procomer.com/alertas_comerciales/bajos-precios-del-cafe-afectan-a-productores-internacionales/

PROCOMER. (2018b). *El mercado de café tostado en EEUU*.

http://servicios.procomer.go.cr/aplicacion/civ/documentos/Mercado+caf%C3%A9+tostado+EEUU_web.pdf

PROCOMER. (2020). *Se dinamiza el mercado de cafés de especialidad en Europa del Este*.

Procomer Costa Rica. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/se-dinamiza-el-mercado-de-cafes-de-especialidad-en-europa-del-este/

Puspasari, I., Tasirin, S. M., Pin Pin, N., & Yaakob. (2014). Hydrodynamic Characteristics of

Group D Particles (Paddy Grains) in a Conical-Based Spouted Bed with and Without Draft Tube. *World Applied Sciences Journal*, 29(11).

[https://www.idosi.org/wasj/wasj29\(11\)14/1.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj29(11)14/1.pdf)

Rattanarat, P., Chindapan, N., & Devahastin, S. (2020). Comparative evaluation of acrylamide

and polycyclic aromatic hydrocarbons contents in Robusta coffee beans roasted by hot air and superheated steam. *Food Chemistry*, 341, 128266.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128266>

- Rooholahi, B., & Reddy, P. L. (2015). Concept and Application of PID Control and Implementation of Continuous PID Controller in Siemens PLCs. *Indian Journal Of Science And Technology*, 8(35). <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i35/82262>
- Schenker, S., Heinemann, C., Huber, M., Pompizzi, R., Perren, R., & Escher, R. (2002). Impact of Roasting Conditions on the Formation of Aroma Compounds in Coffee Beans. *Journal Of Food Science*, 67(1), 60-66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11359.x>
- Schwartzberg, H. (2002). Modeling Bean Heating during Batch Roasting of Coffee Beans. *Food Preservation Technology*. <https://doi.org/10.1201/9781420010169.ch52>
- Sheikh, S. S., Javed, A., Anas, M., & Ahmed, F. (2018). Solar based smart irrigation system using PID controller. *IOP Conference Series Materials Science And Engineering*, 414, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/414/1/012040>
- Sheng, J. (2019). Real time DC water tank level control using Arduino Mega 2560. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/isie.2019.8781174>
- Sun, J., Tang, H., Wang, C., Han, Z., & Li, S. (2021). Effects of alloying elements and microstructure on stainless steel corrosion: A review. *Steel Research International*, 93(1). <https://doi.org/10.1002/srin.202100450>
- Traore, T. M., Wilson, N. L., & Fields, D. (2018). What explains specialty coffee quality scores and prices: a case study from the cup of excellence program. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 50(3), 349-368. <https://doi.org/10.1017/aae.2018.5>
- Tscheuschner, H. (1987). N. N. Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr.

- Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York u. a. 1986. Preis: 140.—£. *Nahrung/Food*, 31(7), 702. <https://doi.org/10.1002/food.19870310724>
- Union Steels. (s.f.). What is the standard length of seamless pipe and how to choose? Recuperado de <https://www.union-steels.com/newsdetail/what-is-the-standard-length-of-seamless-pipe-and-how-to-choose.html#:~:text=The%20length%20of%20a%20steel,from%206%20to%2010%20meters>
- Van Boekel, M. (2006). Formation of flavour compounds in the Maillard reaction. *Biotechnology Advances*, 24(2), 230-233. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.11.004>
- Vargas, G. (2011). *Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação* [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3458.3446>
- Vargas, G. (2014). *Cinética Do Aquecimento, Expansão Volumétrica E Perda De Massa Em Grãos De Café Durante A Torrefação* [Tesis de Doctor Scientiae]. Universidade Federal de Viçosa.
- Virgen-Navarro, L., Herrera-López, E. J., Corona-González, R. I., Arriola-Guevara, E., & Guatemala-Morales, G. M. (2016). Neuro-fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed. *Expert Systems With Applications*, 54, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.027>
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control (Advances in Industrial Control) (English Edition)* (2006.^a ed., Vol. 1). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/1-84628-586-0>

- Wang, N. (2012). *Physicochemical Changes of Coffee Beans During Roasting* [Tesis de maestría]. Universidad de Guelph.
- Yeretzian, C., Jordan, A., Badoud, R., & Lindinger, W. (2002). From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. *European Food Research And Technology*, 214(2), 92-104. <https://doi.org/10.1007/s00217-001-0424-7>
- Zermane, H., & Madjour, H. (2022). Intelligent Control System of a Real Industrial Process. *The Eurasia Proceedings Of Science Technology Engineering And Mathematics*, 19, 61-67. <https://doi.org/10.55549/epstem.1219167>
- Zhang, S., Su, B., Liu, J., Liu, X., Qi, G., & Ge, Y. (2018). Analysis of flow characteristics and flow measurement accuracy of elbow under different conditions. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 128, 012070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012070>

8. ANEXOS

Anexo A. Códigos

Anexo A1. Dimensionamiento de la resistencia eléctrica

En este anexo se presenta el código desarrollado en Python, que permitió el dimensionamiento de la resistencia eléctrica, explicado en la sección 4.2.3.

```
# -----
# Importación de librerías
# -----
try:
    from sympy import symbols, Eq, solve, log
except ImportError:
    !pip install sympy
    from sympy import symbols, Eq, solve, log

# -----
# Definición de la variable para la temperatura de la superficie a encontrar
# -----
temperatura_superficie = symbols('T_superficie')

# -----
# Asignación de constantes y parámetros del sistema
# -----
PI = 3.141592653
conductividad_acero = 15 # W/m·K, conductividad térmica del acero
inoxidable
longitud_tubo = 0.66 # m, longitud total del tubo
temperatura_interna = 250 + 273.15 # K, temperatura de la pared interna del tubo
diametro_externo = 0.0254 # m, diámetro externo para un tubo de 1 pulgada
espesor_pared_mm = 1 # mm, espesor de la pared de la tubería
radio_externo = diametro_externo / 2 # m, radio externo del tubo
radio_interno = (diametro_externo / 2) - (espesor_pared_mm/1000) # m, radio interno
estimado (se resta el espesor)
emisividad = 0.4 # Emisividad del acero inoxidable
constante_stefan = 5.67e-8 # W/m²·K⁴, constante de Stefan-Boltzmann
area_superficial_externa = 2 * PI * radio_externo * longitud_tubo # m², área externa
del tubo
print(f"Área superficial externa: {area_superficial_externa:.8f} m²")
temperatura_ambiente = 25 + 273.15 # K, temperatura ambiente
temperatura_fluido = temperatura_ambiente # K, temperatura del fluido (igual a la
ambiente en convección natural)
gravedad = 9.81 # m/s², aceleración de la gravedad
conductividad_aire = 0.03374 # W/m·K, conductividad térmica del aire
numero_Pr = 0.7041 # Número de Prandtl del aire
viscosidad_cinematica = 2.745e-5 # m²/s, viscosidad cinemática del aire
temperatura_infinita = temperatura_ambiente # K, temperatura de referencia (T
infinita)

# Valor inicial para la iteración de la temperatura de la superficie
temperatura_superficie_inicial = 500 # K

# -----
# Valores para el método iterativo
# -----
```

```

tolerancia = 0.001
diferencia = 1      # Diferencia inicial para iniciar el bucle
iteraciones = 0     # Contador de iteraciones

# -----
# Bucle iterativo para determinar la temperatura de la superficie
# -----
while diferencia > tolerancia:
    iteraciones += 1
    temperatura_promedio_externa = (temperatura_superficie_inicial +
temperatura_fluido) / 2
    coeficiente_expansion = 1 / temperatura_promedio_externa # Coeficiente de
expansión térmica

    # Cálculo del número de Rayleigh
    numero_Rayleigh = (gravedad * coeficiente_expansion *
(temperatura_superficie_inicial - temperatura_infinita) *
d diametro_externo**3 * numero_Pr) / (viscosidad_cinematica**2)

    # Cálculo del número de Nusselt
    numero_Nusselt_externo = (0.6 + (0.387 * numero_Rayleigh**(1/6)) /
((1 + (0.559 / numero_Pr)**(9/16))**(8/27)))**2
    coeficiente_convectivo_exterior = (conductividad_aire / diametro_externo) *
numero_Nusselt_externo

    # Ecuación de balance térmico
    ecuacion_balance_termico = Eq(
        2 * PI * conductividad_acero * longitud_tubo *
((temperatura_interna - temperatura_superficie) / log(radio_externo /
radio_interno)),
        emisividad * constante_stefan * area_superficial_externa *
(temperatura_superficie**4 - temperatura_ambiente**4) +
coeficiente_convectivo_exterior * area_superficial_externa *
(temperatura_superficie - temperatura_fluido)
    )

    # Resolver la ecuación para la temperatura de la superficie
    soluciones = solve(ecuacion_balance_termico, temperatura_superficie)
    temperatura_superficie_nueva = min(soluciones, key=lambda x: abs(x -
temperatura_interna))

    # Revisar convergencia
    diferencia = abs(temperatura_superficie_nueva - temperatura_superficie_inicial)
    temperatura_superficie_inicial = temperatura_superficie_nueva

# -----
# Resultados de la iteración y cálculos de flujos de calor
# -----
temperatura_superficie_celsius = temperatura_superficie_inicial - 273.15
print(f"La temperatura de la superficie estabilizada es
{temperatura_superficie_inicial:.3f} K ({temperatura_superficie_celsius:.3f} °C)")
print(f"Número de iteraciones: {iteraciones}")

temperatura_superficie = temperatura_superficie_inicial

# Cálculo del flujo de calor por radiación
flujo_calor_radiacion = emisividad * constante_stefan * area_superficial_externa *
(temperatura_superficie**4 - temperatura_ambiente**4)
# Cálculo del flujo de calor por convección
flujo_calor_conveccion = coeficiente_convectivo_exterior * area_superficial_externa *
(temperatura_superficie - temperatura_fluido)

```

```

print(f"Flujo de calor por radiación: {flujo_calor_radiacion:.2f} W (Watt)")
print(f"Flujo de calor por convección: {flujo_calor_conveccion:.2f} W (Watt)")

# -----
# Cálculos relacionados con el flujo de aire
# -----
# Cálculo del área transversal interna del tubo
area_transversal = PI * (radio_interno)**2

# Cálculo del volumen de flujo de aire
velocidad_aire = 3 # m/s, velocidad del aire
volumen_flujo_aire = area_transversal * velocidad_aire * 1.1

# Cálculo del flujo másico del aire
densidad_promedio_aire = 0.8542 # kg/m³, densidad promedio del aire
flujo_masico_aire = densidad_promedio_aire * volumen_flujo_aire
temperatura_tueste = 250 + 273.15 # K, temperatura del aire en el proceso de
tueste
diferencia_temperatura = temperatura_tueste - temperatura_ambiente
calor_especifico_aire = 1013 # J/kg·K, calor específico a presión constante
del aire

flujo_calor_aire = flujo_masico_aire * calor_especifico_aire * diferencia_temperatura
print(f"Flujo de calor para calentar el aire: {flujo_calor_aire:.2f} W (Watt)")

# Cálculo del flujo total de calor transferido
flujo_calor_total = flujo_calor_aire + flujo_calor_conveccion + flujo_calor_radiacion
print(f"Flujo total de calor transferido: {flujo_calor_total:.2f} W (Watt)")

```


Anexo A2. Dimensionamiento del ventilador

En este anexo se presenta el código desarrollado en Python, que permitió el dimensionamiento del ventilador, explicado en la sección 4.2.4.

```
import math

# -----
# 1) FUNCIONES AUXILIARES
# -----

def colebrook_white(epsilon, D, Re, tol=1e-6, max_iter=50):
    f_guess = 0.02 # Valor aproximado inicial
    it_count = 0
    for i in range(max_iter):
        rhs = -2.0 * math.log10((epsilon/D)/3.7 + 2.51/(Re * math.sqrt(f_guess)))
        f_new = 1.0 / (rhs**2)
        it_count += 1

        if abs(f_new - f_guess) < tol:
            return f_new, it_count
        f_guess = f_new
    return f_guess, it_count # Si no converge en max_iter, retorna último valor

def perdida_friccion(epsilon, D, L, U, rho, nu):
    Re = (U * D) / nu
    f, it_cw = colebrook_white(epsilon, D, Re)
    P_f = f * (L/D) * (rho * (U**2) / 2.0)
    return P_f, f, Re, it_cw

def perdida_accesorios(K_sum, U, rho):
    return K_sum * (rho * (U**2) / 2.0)

def perdida_camara(b, H, DH, Di, theta_cono_deg, g):
    """
    Aplica la correlación de Gelperin et al. (1961) (versión corregida):
    
$$P_c = b * g * H * [1 + 0.0062 * (DH/Di)^{2.54} * ((DH/Di) - 1) * (\tan(\theta/2))^{-0.18}]$$

    """
    theta_rad = math.radians(theta_cono_deg)
    term1 = (DH / Di)**2.54
    term2 = (DH / Di) - 1.0
    term3 = (math.tan(theta_rad / 2.0))**(-0.18)

    P_c = b * g * H * (1.0 + 0.0062 * term1 * term2 * term3)
    return P_c

# -----
# 2) PARÁMETROS DE ENTRADA
# -----

g = 9.81 # m/s^2, Aceleración de la gravedad
rho = 0.854371 # kg/m^3, Densidad del aire(a 1 atm y ~137.5 °C)
nu = 2.745e-5 # m^2/s, Viscosidad cinemática del aire

# Parámetros de la tubería
```

```

epsilon = 1.5e-5      # m, Rugosidad
D        = 0.0234      # m, Diámetro interno
L        = 0.66        # m, Longitud
U        = 3.0 * 1.1   # m/s, Velocidad

# Accesorios
K_sum = 12.61 + 0.22 + 0.51 + 4.90 # Suma de coef. de pérdida: resistencia, codo,
tubo pitot y plenum, respectivamente

# Cámara de tueste
b_lecho = 706.8 # kg/m^3, Densidad aparente del lecho []
H_lecho = 0.08 # m, Altura
DH_camara = 0.095 # m, Diámetro superior
Di_camara = 0.0254 # m, Diámetro inferior
theta_cono_deg = 33 # grados, Ángulo total

# Factor de seguridad
FS = 1.1

# -----
# 3) CÁLCULOS DE CAUDAL, PÉRDIDAS Y PRESIÓN TOTAL
# -----

# 3.1 Cálculo del área de entrada y caudal volumétrico
A_entrada = math.pi * (D**2) / 4.0 # m^2
Q = A_entrada * U # m^3/s, Caudal volumétrico

# 3.2 Pérdida por fricción (Darcy-Weisbach)
P_fric, f, Re, it_cw = perdida_friccion(epsilon, D, L, U, rho, nu)

# 3.3 Pérdidas en accesorios
P_acc = perdida_accesorios(K_sum, U, rho)

# 3.4 Pérdida de presión en la cámara (Gelperin)
P_cam = perdida_camara(b_lecho, H_lecho, DH_camara, Di_camara, theta_cono_deg, g)

# 3.5 Suma de pérdidas y presión total (con factor de seguridad)
P_total = FS * (P_fric + P_acc + P_cam)

# -----
# 4) REPORTE FINAL
# -----

print(f"Caudal volumétrico (Q): {Q:.4f} m³/s")
print(f"Pérdida por fricción (P_fric): {P_fric:.2f} Pa")
print(f"Pérdida en accesorios (P_acc): {P_acc:.2f} Pa")
print(f"Pérdida en cámara (P_cam): {P_cam:.2f} Pa")
print(f"Presión total (P_total): {P_total:.2f} Pa")

```

Anexo A3. Implementación del sistema de control

En este anexo se presenta el código desarrollado en C ++, que permitió la implementación del algoritmo PID como sistema de control en el prototipo propuesto, explicado en las secciones 4.4.1 y 4.4.2.

```
#include "max6675.h"
#include <PID_v1.h>

// -----
// Definición de pines y del termopar MAX6675
// -----
const int PIN_MAX6675_SO = 11; // Pin de datos del termopar (SO)
const int PIN_MAX6675_CS = 12; // Pin de selección de chip (CS)
const int PIN_MAX6675_CLK = 7; // Pin de reloj (CLK)

MAX6675 termopar(PIN_MAX6675_CLK, PIN_MAX6675_CS, PIN_MAX6675_SO);

// -----
// Definición de pines para el relé y el ventilador
// -----
const int PIN_RELE = 6; // Pin de salida para controlar el relé
const int PIN_VENTILADOR = 3; // Pin de salida PWM para el ventilador

// -----
// Parámetros del controlador PID
// -----
double pidKp = 40.0, pidKi = 15.0, pidKd = 65.0; // Constantes del PID
double setpoint; // Temperatura deseada
double inputTemp; // Temperatura medida
double outputPID; // Salida del controlador PID
double lastInput; // Última medición de temperatura

unsigned long tiempoUltimaMedicion;

// Valor de salida PWM para el ventilador (porcentaje: 0 a 100)
int porcentajePWM = 50;

// -----
// Configuración de la ventana de tiempo para el control del PID
// -----
int tamanoVentana = 200; // Duración de la ventana en milisegundos
unsigned long tiempoInicioVentana; // Tiempo al inicio de la ventana

// Inicializar el PID
PID controladorPID(&inputTemp, &outputPID, &setpoint, pidKp, pidKi, pidKd, DIRECT);

void setup() {
    // Espera para estabilizar el sistema y los sensores
    delay(10000);

    // Configuración del ventilador
    pinMode(PIN_VENTILADOR, OUTPUT);
    // Configura la señal PWM del ventilador según el porcentaje definido
    analogWrite(PIN_VENTILADOR, map(porcentajePWM, 0, 100, 0, 255));
}
```

```

// Configuración del relé
pinMode(PIN_RELE, OUTPUT);

// Inicialización de la ventana de control
tiempoInicioVentana = millis();

// Configuración del PID
controladorPID.SetOutputLimits(0, tamanoVentana);
controladorPID.SetMode(AUTOMATIC);

Serial.begin(9600);

// Establecimiento del setpoint de temperatura
setpoint = 210;

// Primera lectura del termopar
lastInput = termopar.readCelsius();
tiempoUltimaMedicion = millis();
}

void loop() {
    unsigned long tiempoActual = millis();

    // Se realiza una medición real cada 400 ms
    if (tiempoActual - tiempoUltimaMedicion >= 400) {
        inputTemp = termopar.readCelsius();    // Lectura real de la temperatura en °C
        tiempoUltimaMedicion = tiempoActual;

        // Envío de datos al monitor serial
        Serial.print(inputTemp);
        Serial.print(",");
        Serial.println(setpoint);
    }
    else {
        // Interpolación lineal cada 200 ms
        if (tiempoActual - tiempoUltimaMedicion >= 200) {
            double fraccionTiempo = (tiempoActual - tiempoUltimaMedicion) / 200.0;
            inputTemp = lastInput + (inputTemp - lastInput) * fraccionTiempo;
        }
    }

    // Cálculo del controlador PID
    controladorPID.Compute();

    // Control del relé en función de la salida del PID y la ventana de tiempo
    if (tiempoActual - tiempoInicioVentana > tamanoVentana) {
        tiempoInicioVentana += tamanoVentana;
    }
    if (outputPID > (tiempoActual - tiempoInicioVentana)) {
        digitalWrite(PIN_RELE, HIGH);
    }
    else {
        digitalWrite(PIN_RELE, LOW);
    }

    lastInput = inputTemp;
}

```

Anexo B. Tablas para coeficientes de pérdidas de presión por accesorios y obstrucciones

Anexo B1. Pérdidas de presión por la resistencia eléctrica

Tabla B1. Coeficientes de obstrucción: rejilla, redonda y rectangular (Adaptada de Howell et al., 2021, p. 51).

A_1/A_o	C_o'							
	n							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0,2	155	75	42	24	15	8	3,5	0
0,3	69	33	19	11	6,4	3,6	1,6	0
0,4	39	19	10	6,1	3,6	2	0,88	0
0,6	17	8,3	4,7	2,7	1,6	0,89	0,39	0
0,8	9,7	4,7	2,7	1,5	0,91	0,5	0,22	0
1	6,2	3	1,7	0,97	0,58	0,32	0,14	0
1,2	4,3	2,1	1,2	0,67	0,4	0,22	0,1	0
1,4	3,2	1,5	0,87	0,49	0,3	0,16	0,07	0
1,6	2,4	1,2	0,66	0,38	0,23	0,12	0,05	0
2	1,6	0,75	0,43	0,24	0,15	0,08	0,04	0
2,5	0,99	0,48	0,27	0,16	0,09	0,05	0,02	0
3	0,69	0,33	0,19	0,11	0,06	0,04	0,02	0
4	0,39	0,19	0,11	0,06	0,04	0,02	0,01	0
6	0,17	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	0	0

Nota: C_o' es el coeficiente de obstrucción, n es la relación de área libre de la pantalla, y A_1/A_o es

la relación entre el área de la sección donde está la pantalla y el área del ducto.

Anexo B2. Pérdidas de presión por codo radio liso

Tabla B2. Coeficientes de pérdidas de presión: Codo radio liso (estampado), redondo (Adaptada de Howell et al., 2021, p. 10).

Coeficientes para Codos de 90°						
r/D	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
C_o'	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12

Nota: Re' indica el número de Reynolds, C_o' es el coeficiente de obstrucción y r/D es la relación entre el radio del codo (r) y el diámetro del conducto (D).

Anexo B3. Pérdidas de presión por tubo pitot

Tabla B3. Coeficientes de obstrucción: cilindro liso en conductos circulares y rectangulares (Adaptada de Howell et al., 2021, p. 52).

Re'	C_o'			
	S_m/A_o			
	0.05	0.10	0.15	0.20
0.1	3.9	8.4	14	19
0.5	1.5	3.2	5.2	7.1
1	0.66	1.4	2.3	3.2
5	0.30	0.64	1.1	1.4
10	0.17	0.38	0.62	0.84
50	0.11	0.24	0.38	0.52
100	0.10	0.21	0.35	0.47
500 to 200 000	0.07	0.15	0.24	0.33
3×10^5	0.07	0.16	0.26	0.35
4×10^5	0.05	0.11	0.19	0.25
5×10^5	0.04	0.09	0.14	0.19
6×10^5 a 10^6	0.02	0.05	0.07	0.10

Nota: C_o' es el coeficiente de obstrucción, S_m/A_o representa la fracción del área bloqueada por la obstrucción, y Re' es el número de Reynolds modificado ($Re' = \frac{dV_o}{\nu}$).

Anexo B4. Pérdidas de presión por plenum

Tabla B4. Coeficientes de obstrucción: placa perforada, gruesa, redonda y rectangular (Adaptada de Howell et al., 2021, p. 52).

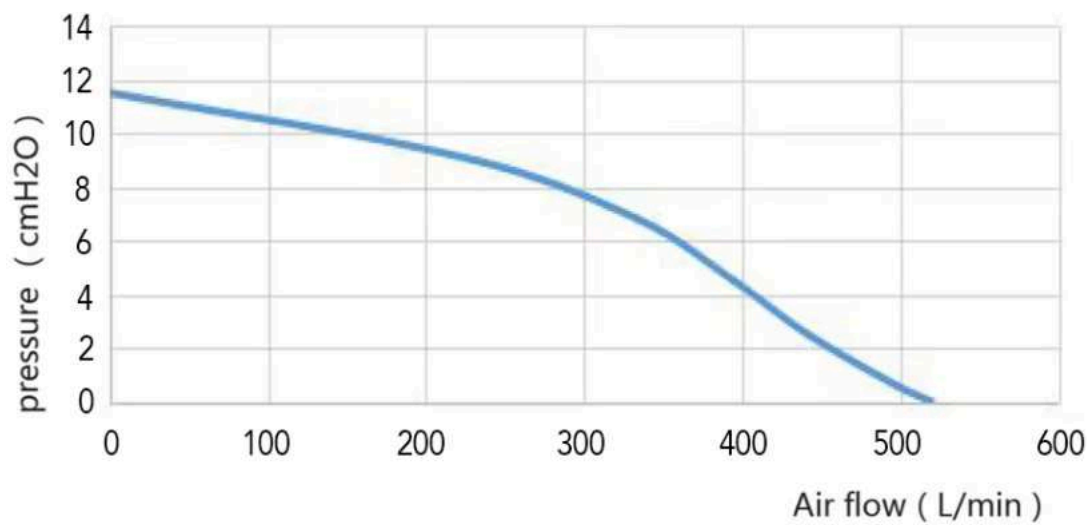
C_o'									
n									
t/d	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0.015	52	30	18	8.3	4.0	2.0	0.97	0.42	0.13
0.2	48	28	17	7.7	3.8	1.9	0.91	0.4	0.13
0.4	46	27	17	7.4	3.6	1.8	0.88	0.39	0.13
0.6	42	24	15	6.6	3.2	1.6	0.8	0.36	0.13

Nota: C_o' es el coeficiente de obstrucción asociado a la pérdida de presión, y n es la relación de área libre de la placa ($n=\Sigma A_{or}/A_o$).

Anexo C. Fichas técnicas y especificaciones de los equipos

Anexo C1. Ventilador 7060 DC 12V/24V

Figura C1. Curva de operación presión-caudal del ventilador 7060 DC 12V/24V (AliExpress, s.f.)



Anexo C2. Amplificador MAX6675

Figura C2. Extracto de la ficha técnica: Descripción de pines del amplificador MAX6675

(Maxim Integrated, 2002).

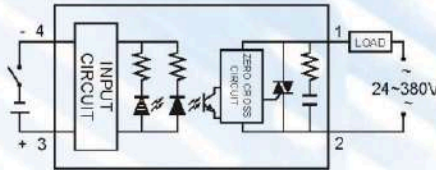
MAX6675

Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	GND	Ground
2	T-	Alumel Lead of Type-K Thermocouple. Should be connected to ground externally.
3	T+	Chromel Lead of Type-K Thermocouple
4	V _{CC}	Positive Supply. Bypass with a 0.1µF capacitor to GND.
5	SCK	Serial Clock Input
6	$\overline{CS}$	Chip Select. Set $\overline{CS}$ low to enable the serial interface.
7	SO	Serial Data Output
8	N.C.	No Connection

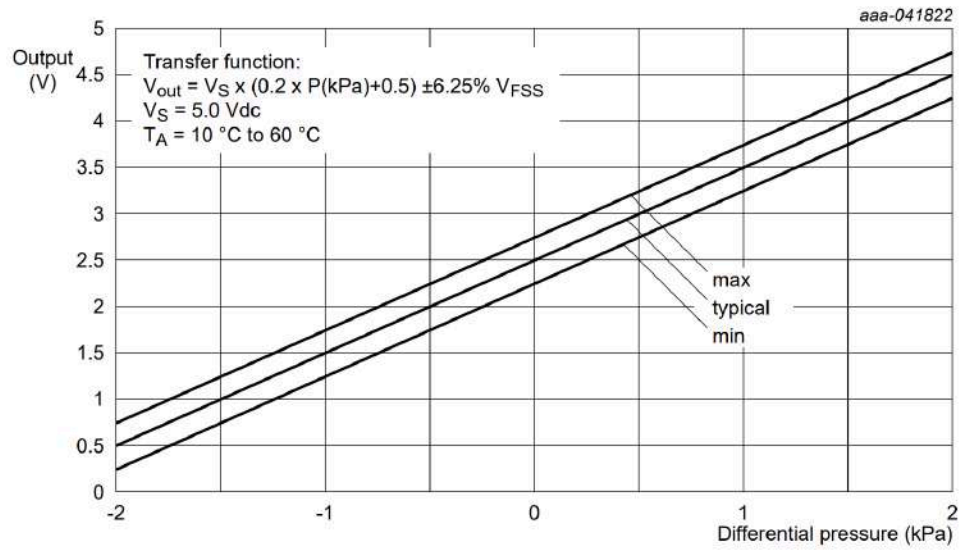
Anexo C3. Relé de estado sólido SSR-DA

Figura C3. Extracto de la ficha técnica: Especificaciones del relé de estado sólido SSR-DA
(Fotek, s.f.).

Type	Terminal Type					PCB Type
Model	SSR-10DA	SSR-25DA	SSR-40DA	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-P03DA
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A	3A
Input Data						
Operating Voltage	3~32VDC					
Min. ON / OFF Voltage	ON > 2.4V , OFF < 1.0V					
Trigger Current	7.5mA / 12V					
Control Method	Zero Cross Trigger					
Output Data						
Operating Voltage	24~380VAC			90~480VAC		24~380VAC
Min. Black Voltage	600 VAC < Repetive >					
Voltage Drop	1.6 V / 25 C					
Max. Durated Current	135A	275A	410A	275A	410A	135A
Leakage Current	3.0mA	3.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA	3.0mA
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms					
General Data						
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.					
Isolation Strength	Over 50M Ω / 500VDC					
Operating Temperature	-20 C ~+80 C					
Housing Material	Intensive ABS					
Weight	Appr. 105g					Appr. 15g
Connection Diagram						
						

Anexo C4. Sensor MPXV7002DP

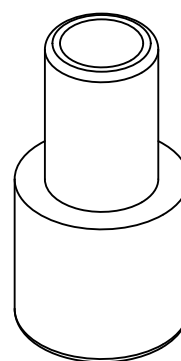
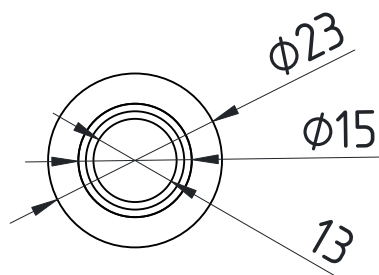
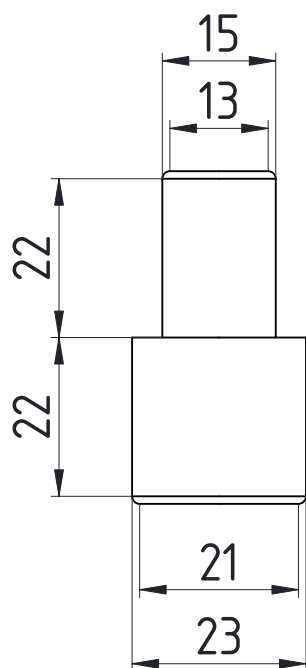
Figura C4. Extracto de la ficha técnica: Curva de salida vs. presión diferencial del sensor MPXV7002DP (NXP Semiconductors, 2021).



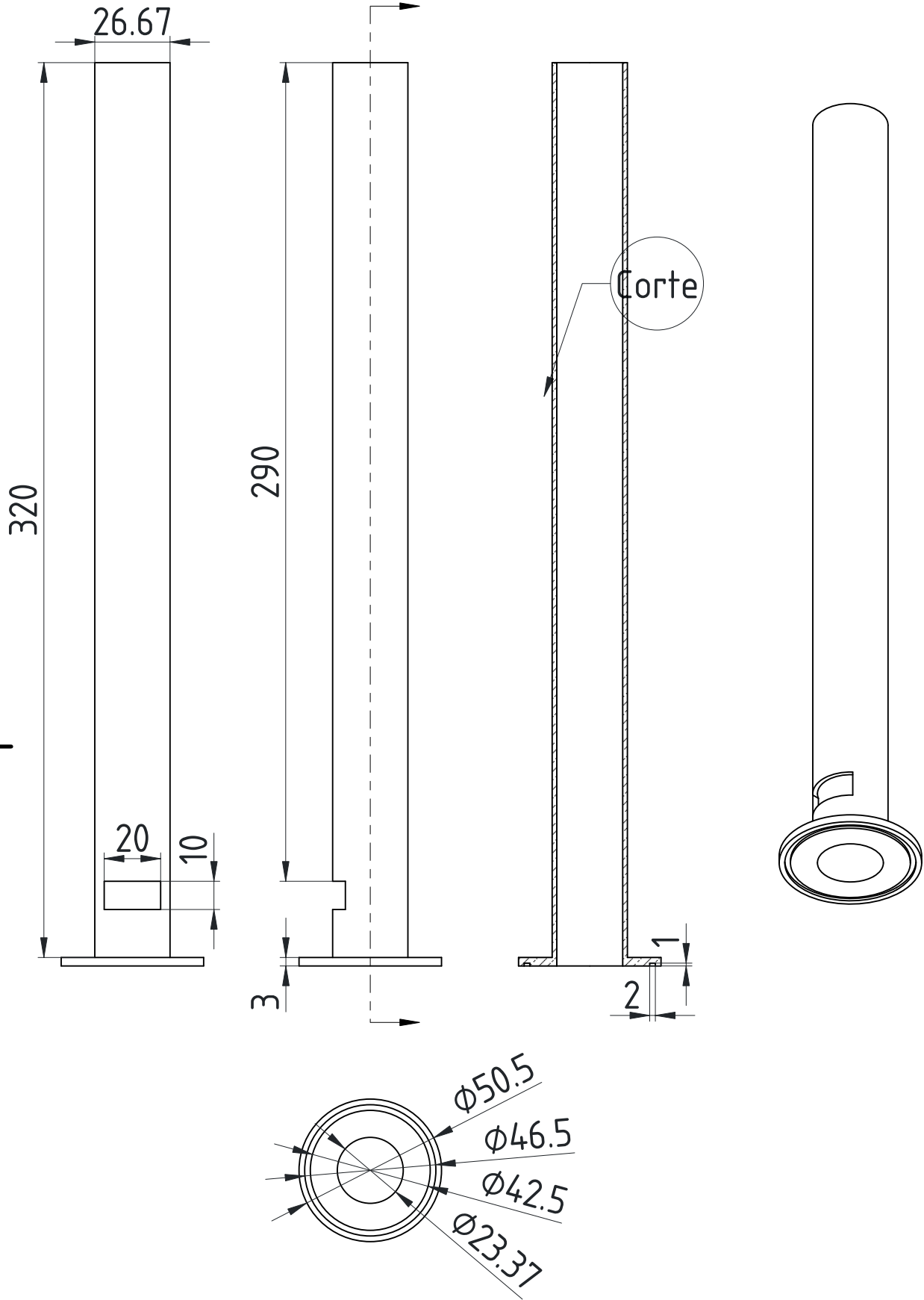
Anexo D. Modelos CAD y planos constructivos

Este anexo proporciona el enlace para visualizar en 3D y descargar los modelos CAD, mencionados en la sección 4.3.2. El enlace se muestra a continuación:

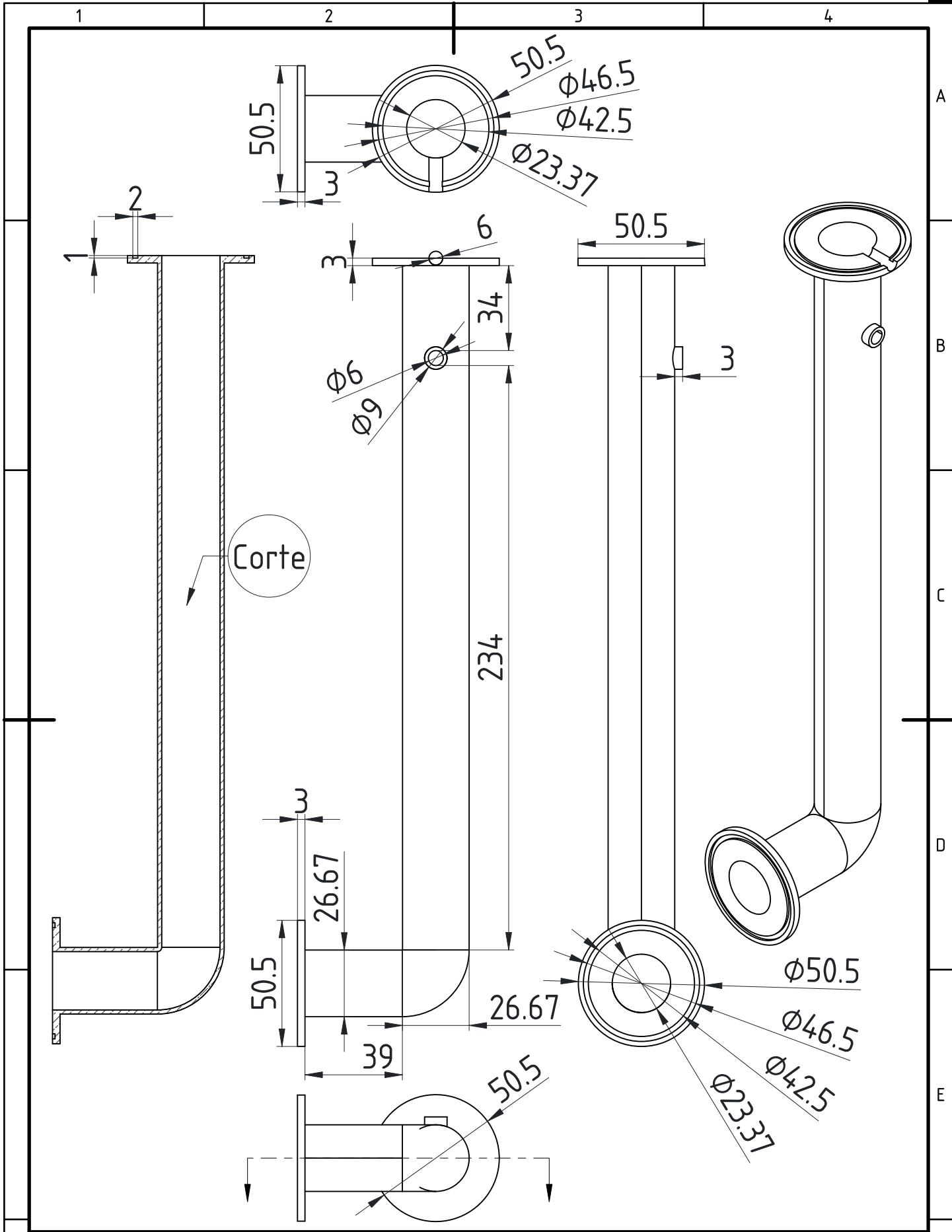
<https://grabcad.com/library/disenio-y-construccion-de-un-tostador-de-aire-caliente-con-cama-de-l-echo-a-chorro-1>



Título: Acople del ventilador		Institucion: Universidad de Costa Rica			
Documento: Planos constructivos		Departamento: Ingeniería de Biosistemas			
Autor: Sebastián Rojas Barrantes		Software: FreeCAD	Fecha: 2025	Escala: 1:1	Unidades: mm

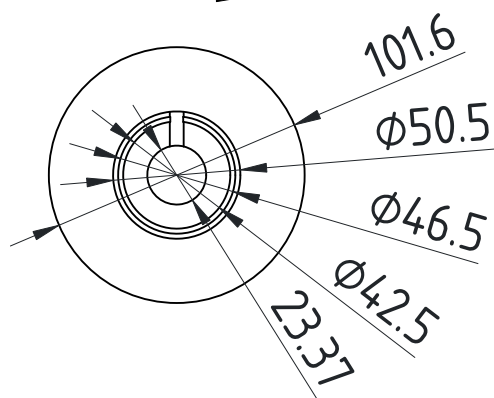
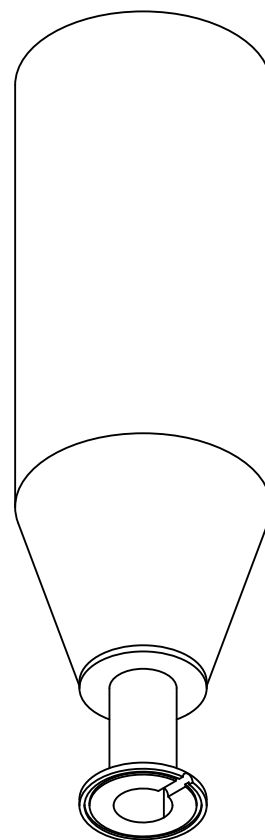
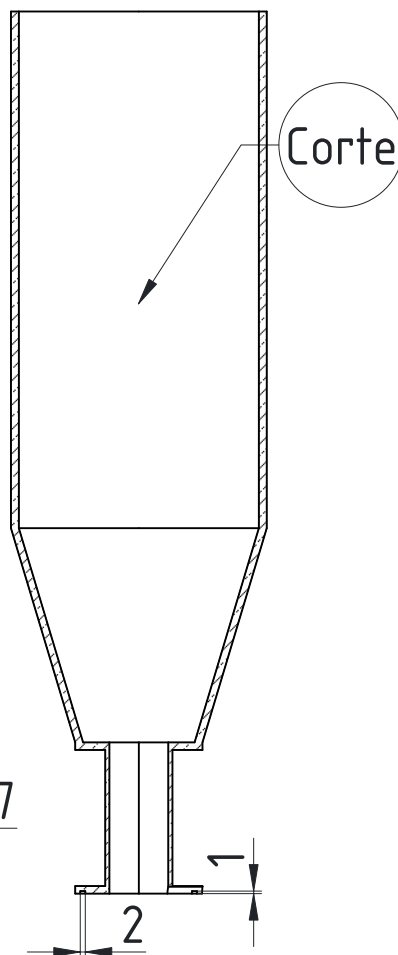
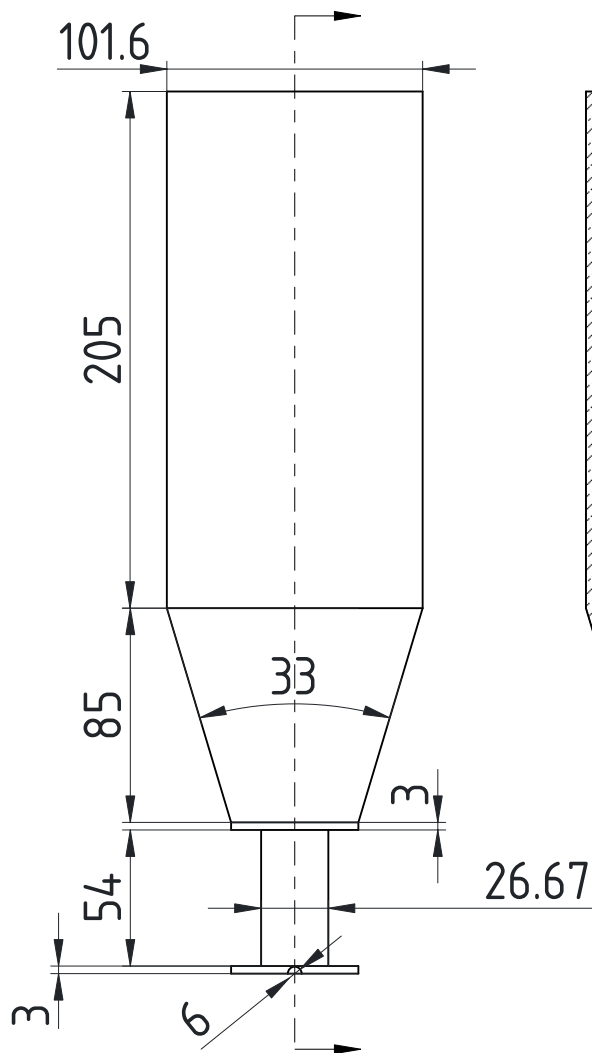
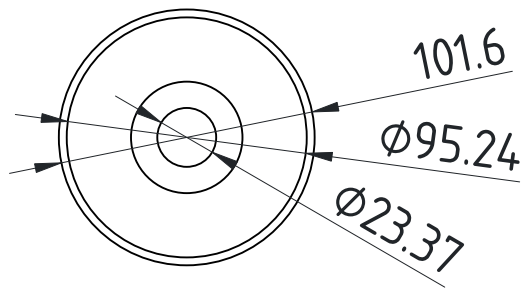


Título: Tubería para resistencia eléctrica		Institucion: Universidad de Costa Rica			
Documento: Planos constructivos		Departamento: Ingeniería de Biosistemas			
Autor: Sebastián Rojas Barrantes		Software: FreeCAD	Fecha: 2025	Escala: 1:2	Unidades: mm



Título: Sección del codo		Institución: Universidad de Costa Rica			
Documento: Planos constructivos		Departamento: Ingeniería de Biosistemas			
Autor: Sebastián Rojas Barrantes		Software: FreeCAD	Fecha: 2025	Escala: 1:2	Unidades: mm

1 2 3 4



A

B

C

D

E

F

Titulo: Cámara de tueste	Institucion: Universidad de Costa Rica			
Documento: Planos constructivos	Departamento: Ingeniería de Biosistemas			
Autor: Sebastián Rojas Barrantes	Software: FreeCAD	Fecha: 2025	Escala: 1:3	Unidades: mm