



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

**“MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL
SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA”**

Proyecto de titulación presentado previo a la obtención del título de Magíster en
Electromecánica

Autor:

Jaramillo Rubio Diego Fernando.

Tutor:

PhD. Ing. Torres Tamayo Enrique

LATACUNGA- ECUADOR

2022

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada”, presentado por Jaramillo Rubio Diego Fernando, para optar por el título de magister en Electromecánica.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, octubre,13, 2022



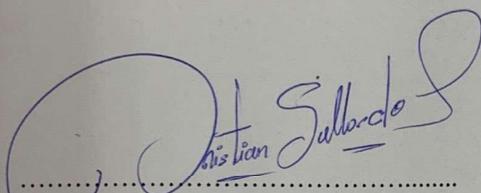
PHD. Enrique Torres Tamayo

CC: 1757121940

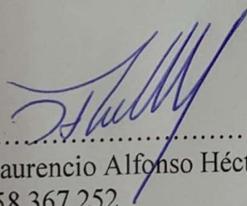
AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magister en Electromecánica; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, 13 de octubre de 2022



.....
Ms.C. Gallardo Molina Cristian Fabián
CC:0502847692
Presidente del tribunal



.....
PhD. Laurencio Alfonso Héctor Luis
CC: 1758 367 252
Lector 2



AVAL DEL TRIBUNAL

.....
Ms.C. Corrales Bastidas Byron Paúl
CC: 0502347768
Lector 3

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a:

De manera en especial a mi hija, que con su sincero amor me inspira a seguir creciendo para nunca defraudarla.

A mis padres que siempre han cuidado de mí y con su amor incondicional y bendiciones me han forjado como hombre de bien.

A mi esposa por ser mi apoyo, que con su amor y cuidados han colaborado en cada paso que doy.

A mis hermanas por estar siempre presentes y pendientes de las etapas de mi vida.

A mis ángeles en el cielo que desde ahí me cuidan y protegen siempre.

Diego Jaramillo

AGRADECIMIENTO

Al concluir esta etapa maravillosa de mi vida quiero extender un profundo agradecimiento, a quienes hicieron posible este logro, aquellos que junto a mí caminaron en todo momento y siempre fueron inspiración, apoyo y fortaleza. Esta mención en especial para DIOS, mis abuelitos, mis padres, mis hermanas, mi esposa y mi hija. Muchas gracias a ustedes por demostrarme que “El verdadero amor no es otra cosa que el deseo inevitable de ayudar al otro para que este se supere”.

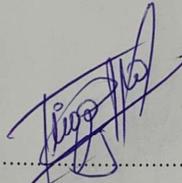
Mi gratitud, también a la Universidad Técnica de Cotopaxi, mi agradecimiento sincero a mi director de tesis, PHD Ing. Enrique Torres Tamayo, gracias a cada docente quienes con su apoyo y enseñanzas constituyen la base para seguir creciendo profesionalmente.

Diego Jaramillo

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, octubre, 13, 2022

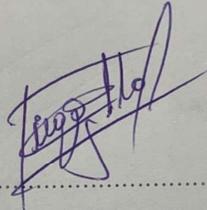


.....
Ing. Diego Fernando Jaramillo Rubio
CC: 0502874431

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, octubre, 13,2022



.....
Ing. Diego Fernando Jaramillo Rubio
CC: 0502874431

Mx.C. *[Faint signature]*
CC: 0502874431

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DIRECCIÓN DE POSGRADO

INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA

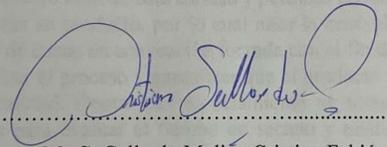
Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: "Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada", contiene las correcciones y observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Autor: Jaramilla Raúl Diego Fernando

Tutor: PhD. Enrique Yáñez Tamayo

RESUMEN

Latacunga, octubre, 13, 2022



Ms.C. Gallardo Molina Cristian Fabián

CC: 0502847692

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Título: MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA

Autor: Jaramillo Rubio Diego Fernando

Tutor: PHD. Enrique Torres Tamayo

RESUMEN

El uso de técnicas naturales de secado del cacao generan un excesivo tiempo del proceso con un pobre rendimiento térmico ya que generalmente dependen del clima, causan un producto final de baja calidad y pérdidas económicas al productor al momento de vender su producto, por lo cual nace la necesidad de modelar un secador rectangular de cacao en convección forzada con el fin de reducir el tiempo de secado, automatizar el proceso y garantizar que el producto final mantenga sus características de calidad. Dentro del modelamiento se tomaron en cuenta las siguientes variables para evaluar el tiempo de secado y análisis de rendimiento térmico: flujo masico de aire, contenido de humedad, temperatura a la que se realiza el secado y cantidad de material a secar; además se desarrolló el procedimiento de cálculo para el diseño y construcción de un secador rectangular, con lo cual se seleccionaron los diferentes sensores y equipos electrónicos que permitieron el correcto control del proceso mediante el algoritmo de control PID. Dentro del modelamiento se definió mediante pruebas experimentales con y sin carga que es necesario el uso de dispersores de gas ya que ayudan al mejoramiento del rendimiento térmico del proceso. Luego del modelamiento del secador rectangular se presentan los resultados obtenidos en pruebas experimentales que muestran la calidad y porcentaje de humedad final del 7% del cacao, un ahorro de tiempo de secado del 97% comparado con el natural. En la parte final se describen las conclusiones y recomendaciones en base a la implementación del secador rectangular.

PALABRAS CLAVE: cacao; temperatura; humedad; secador; calidad; control

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCION DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Title: MODELING OF A RECTANGULAR DRYER FOR FORCED CONVECTION COCOA DRYING

ABSTRACT

The use of natural cocoa drying techniques generates an excessive process time with a poor thermal performance since they generally depend on the climate, cause a low quality final product and economic losses to the producer at the moment of selling his product. Therefore, the need to model a rectangular forced convection cocoa dryer in order to reduce the drying time, automate the process and guarantee that the final product maintains its quality characteristics was born. Within the modeling, the following variables were taken into account to evaluate the drying time and thermal performance analysis: mass air flow, moisture content, temperature at which drying is performed and amount of material to be dried; in addition, the calculation procedure for the design and construction of a rectangular dryer was developed, with which the different sensors and electronic equipment that allowed the correct control of the process by means of the PID control algorithm were selected. Within the modeling it was defined by means of experimental tests with and without load that the use of gas dispersers is necessary since they help to improve the thermal performance of the process. After the modeling of the rectangular dryer, the results obtained in experimental tests are presented, which show the quality and final moisture percentage of 7% of the cocoa, a drying time saving of 97% compared to the natural one. The final part describes the conclusions and recommendations based on the implementation of the rectangular dryer.

KEYWORDS: cocoa; temperature; humidity; dryer; quality; control; control.

Yo, Marco Paul Beltrán Semblantes con cédula de identidad número:0502666514 Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA" de: Jaramillo Rubio Diego Fernando, aspirante a Magister en Electromecánica.



Mg. Marco Paul Beltrán Semblantes
0502666514



CENTRO
DE IDIOMAS

Latacunga, octubre, 2022

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
Título del proyecto:	1
Antecedentes:	1
Objetivo general:	2
Objetivos específicos:	2
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:	3
Justificación y/o importancia de la investigación:	4
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA RELACIONADA CON EL PROCESO DE SECADO DEL CACAO	5
1.1 Introducción	5
1.2 Antecedentes de la investigación.	5
1.3 Fundamentación Teórica.	7
1.4 Procesos del cacao.....	11
1.5 Métodos del secado	14
1.5.1 Métodos tradicionales de secado.....	14
1.5.2 Métodos artificiales de secado	17
1.6 Principales tipos de secadores:	19
1.6.1 Ventajas y desventajas de las principales secadoras de cacao	24
1.7 Tipos de circulación de aire en los secadores.....	25
1.8 Medición de las variables del proceso.....	27
1.9 Conclusiones del capítulo I	27
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS PARA EL SECADO DE CACAO EN EQUIPO RECTANGULAR	28
2.1 Introducción	28
2.2 Análisis termodinámico y consideraciones técnicas para el diseño de la cámara de secado.....	28
2.3 Propiedades del grano de cacao	29
2.4 Dimensionamiento de la cámara de secado.....	29
2.5 Cálculo de tiempo de secado	32
2.6 Balance de energía calorífica	33
2.7 Cálculos para la selección de ventilador	38

2.8	Dispositivos para el secador rectangular	41
	Cámara de secado:.....	50
	Aislante:	50
	Quemador:	50
	Blower Eléctrico:.....	50
2.9	Sistema de control	54
2.10	Sintonización de controladores	57
2.10.1	Método Lambda	58
2.11	Procedimiento para la Sintonía	59
2.12	Tunning proceso	60
2.13	Simulación del controlador usando simulink	68
2.14	Conclusiones del capítulo II.....	70
	CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS RELACIONADOS CON EL SECADO DE CACAO EN EQUIPO RECTANGULAR.....	71
3.1	Introducción	71
3.2	Análisis de distribución de temperatura en la secadora.	74
3.3	Resultados del proceso de secado de cacao usando dispersor de gas con una masa de 57kg	76
3.4	Análisis de consumo energético de operación.	80
3.5	Consumo GLP	81
3.6	Valoración Económica.	83
3.7	Conclusiones del capítulo III.....	85
	CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
	CONCLUSIONES	86
	RECOMENDACIONES	86
	ANEXOS.....	94

INDICE DE TABLAS

Tabla.1 Tareas objetivos específicos.....	3
Tabla 2. Fermentación en función del tipo de cacao.....	13
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los secadores naturales.....	17
Tabla 4. Ventajas y desventajas secadoras de cacao.....	24
Tabla 5. Características técnicas a considerar en el proceso de secado.....	29
Tabla 6. Propiedades físicas y térmicas del cacao CCN51.....	29
Tabla 7. Propiedades psicométricas del aire en Latacunga.....	31
Tabla 8. Características motor Blower eléctrico.....	51
Tabla 9. Comparación cálculos Manual Vs Software.....	64
Tabla 10. Constantes de sintonización obtenidas.....	68
Tabla 11. Valores de tiempo de secado a velocidad constante con 100 kg.....	71
Tabla 12. Resultado de los cálculos para el secado de cacao- peso de 57kg.....	72
Tabla 13. Resultado diseño cámara de secado.....	72
Tabla 14. Balance de energía calorífica.....	73
Tabla 15. Balance de Pérdida de calor por convección en el exterior.....	73
Tabla 16. Resultados para selección del ventilador.....	73
Tabla 17. Parámetros obtenidos del proceso de secado.....	79
Tabla 18. Potencia instalada.....	80
Tabla 19. Consumo energético.....	81
Tabla 20. Costo de GLP.....	81
Tabla 21. Costo de mano de obra.....	82
Tabla 22. Costo total proceso.....	82
Tabla 23. Costo total proceso.....	82
Tabla 24. Costo elementos mecánicos.....	83
Tabla 25. Costo sistema de control-eléctrico.....	84
Tabla 26. Costos indirectos.....	85
Tabla 27. Costo total.....	85
Tabla 28. Mantenimiento preventivo del secador.....	100
Tabla 29 Falla-solución en el proceso.....	101

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Problema – Diagrama Ishikawa.....	1
Figura 2. Cacao Criollo.....	8
Figura 3. Cacao Forastero	8
Figura 4. Cacao Trinitario.....	9
Figura 5. Cacao CCN51	10
Figura 6. Cacao Nacional.....	10
Figura 7. Recolección	12
Figura 8. Desgrane	12
Figura 9. Fermentación	13
Figura 10: Secado Rohan.....	14
Figura 11: Secado tendales	15
Figura 12: Secado Elba.....	15
Figura 13: Secado piso cemento	16
Figura 14: Secado marquesinas y túneles.....	16
Figura 15: Secado marquesinas y túneles.....	16
Figura 16: Secador rotatorio	19
Figura 17: Vista en planta de una secadora de flujo cruzado de 4 columnas	20
Figura 18: Secador GLP	20
Figura 19: Secado con ayuda de energía solar.....	21
Figura 20: Secador híbrido compuesto de los (1) colectores solares (2) Quemador de biomasa (3) Secador	21
Figura 21: Secado por colección solar.....	22
Figura 22: Secadora de bandeja de flujo paralelo y esquema.....	22
Figura 23: Secadora de cacao tipo cilíndrica vertical.....	23
Figura 24: Secador rectangular	23
Figura 25: Secador rectangular.....	26
Figura 26: Software cartapsy, psicrometría de Latacunga.....	31
Figura 27. Circuito de resistencias térmicas	37
Figura 28. Variador de frecuencia Sinamics V20 trifásico.....	41
Figura 29. RTD -Cableado.....	42
Figura 30. TOPINCN RTD PT100.	43
Figura 31. Uxcell Temperature sensor transmitter.	44
Figura 32. MAF 22204-0C20.	45
Figura 33. Uxcell Temperature sensor transmitter	46
Figura 34. CALT DYLY103 100KG Pull Pressure Compression and Tension Force S Beam Load Cell Sensor.	46
Figura 35. Esquema conexión caja sumadora.....	47
Figura 36. Uxcell Temperature sensor transmitter	48
Figura 37. Load Cell Amplifier with Digit Display, Output 4-20mA/0-10V/RS485.....	48
Figura 38. Tarjeta NI USB-6009.	49
Figura 39. Disposición de bornes Tarjeta NI USB-6009.....	50

Figura 40. Disposición de bornes Tarjeta NI USB-6009.....	51
Figura 41. Set up pines de entrada de señales.....	52
Figura 42. Gráfica de linealización.....	53
Figura 43. Gráfica de calibración.....	54
Figura 44. Sistema de control en lazo abierto.....	55
Figura 45. Sistema de control en lazo cerrado.....	55
Figura 46. Sistema de control PID.....	56
Figura 47. Curva de respuesta a escalón unitario.	57
Figura 48. Equivalencias	59
Figura 49. Ecuaciones Sintonización Lambda.....	59
Figura 50. Procedimiento para la Sintonía.....	60
Figura 51. Cálculo manual.....	61
Figura 52. Visualización data importada.	62
Figura 53. Visualización data importada.	62
Figura 54. Visualización data importada.	63
Figura 55. Estimación Modelo Proceso.	63
Figura 56. Salida del Modelo del Proceso.	64
Figura 57. Data original.	65
Figura 58. Data filtrada.	65
Figura 59. Visualización data importada.	66
Figura 60. Estimación -Modelo Proceso.....	66
Figura 61. Función de transferencia obtenida del proceso (a).....	67
Figura 62. Función de transferencia obtenida del proceso (b).....	67
Figura 63 Modelo del proceso con y sin PID	68
Figura 64. Ingreso de constantes en el PID.	69
Figura 65. Resultado sintonización del proceso.	69
Figura 66. Tiempo secado vs Velocidad de secado	72
Figura 67. Distribución de temperatura en la secadora con dispersor de gas.	74
Figura 68. Distribución de temperatura en la secadora.	75
Figura 69. Distribución de temperatura en la secadora.	75
Figura 70. Gráfica HMI de Labview del proceso de secado.....	76
Figura 71. Gráfica HMI de Labview del proceso de secado.....	77
Figura 72. Proceso de secado del cacao.....	78
Figura 73. Gráfica análisis Peso Vs humedad.	78
Figura 74. Muestra final de cacao al 7% de humedad.	80

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Propiedades del aire a presión de 1 atm.....	95
ANEXO B. Propiedades en los puntos de ebullición y de congelación	96
ANEXO C. Manual de operación y mantenimiento.....	97
ANEXO D. Estructura de menú del variador	102
ANEXO E. Macro de conexión del variador, Regulación PID.....	103
ANEXO F. Configuración del regulador PID.....	104
ANEXO G. Propiedades de los materiales aislantes.....	105
ANEXO H. Características técnicas del acero inoxidable	106
ANEXO I. Circuito de conexiones y planos de estructura.....	107

INTRODUCCIÓN

Título del proyecto:

Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada.

Antecedentes:

El cacao es uno de los productos apetecidos por el mercado agrícola internacional; en los últimos tiempos se han desarrollado técnicas de secado del cacao que han dado un impulso notable en busca de mejores y más eficientes métodos de secado. Dentro del proceso de secado del cacao existen algunos factores que causan que se generen gastos extras, se lo realiza de manera artesanal, esto conlleva a que sea rudimentario, generando un alto tiempo del proceso, sumado a esto depende de las condiciones climatológicas durante el año.

La cantidad de energía necesaria para el secado debe ser disminuida con procesos de control con el fin de automatizar el proceso, optimizar el consumo de la misma y garantizar que el producto mantenga sus características de calidad.

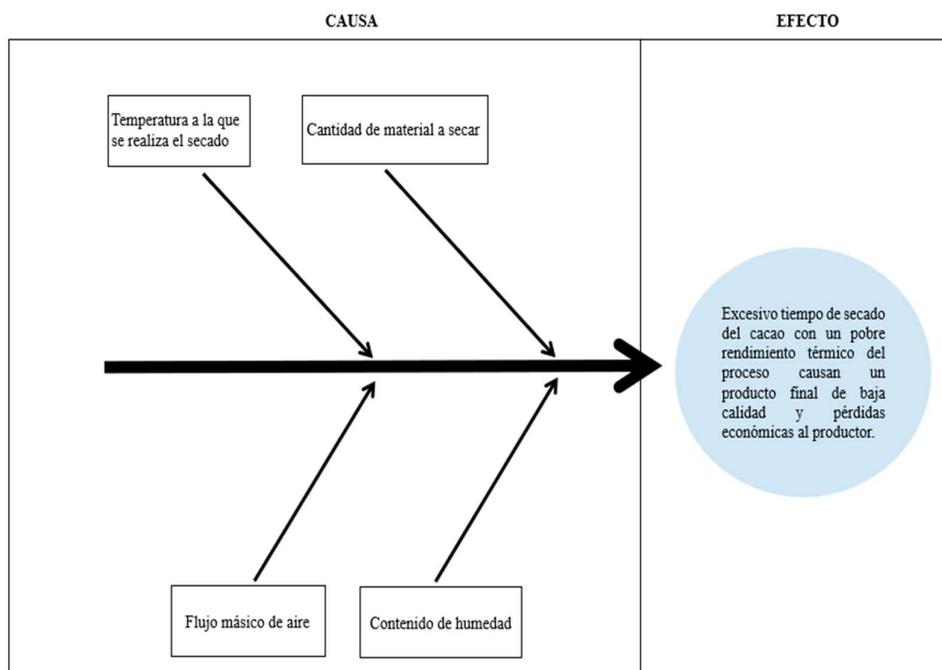


Figura 1. Problema – Diagrama Ishikawa

Sobre la temática expuesta se plantea como problema:

Excesivo tiempo de secado del cacao con un pobre rendimiento térmico del proceso causan un producto final de baja calidad y pérdidas económicas al productor.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

Mejorar el proceso de secado de cacao realizado de manera tradicional en los pequeños agricultores.

Y su **campo de acción** es:

La eficiencia térmica del proceso de secado de cacao.

En base al problema científico expuesto se define como:

Objetivo general:

Modelar un secador rectangular para el secado del cacao en convección forzada a fin de reducir tiempo de secado y el consumo de GLP para el incremento del rendimiento térmico del proceso.

Objetivos específicos:

- Desarrollar el procedimiento de cálculo para el diseño y construcción de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada.
- Evaluar el tiempo de secado y análisis de rendimiento en función de las principales variables tales como: flujo masico de aire, contenido de humedad, temperatura a la que se realiza el secado y cantidad de material a secar.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Tabla.1 Tareas objetivos específicos

Objetivo específico	Actividades (tareas)	Resultado de la actividad	Medio de verificación
Desarrollar el procedimiento de cálculo para el diseño y construcción de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada.	Establecimiento de los fundamentos teóricos relacionados con el secado de cacao.	Establecimiento de las diferentes técnicas de secado	Documentos de archivo
	Ecuaciones principales relacionadas con el diseño y construcción del secador rectangular	Diseño técnico para la construcción del secador rectangular	Documentos de archivo
	Construcción del secador utilizando parámetros de diseño y normas nacionales e internacionales	Construcción del secador rectangular	Existencia física del secador
Evaluar el tiempo de secado y análisis de rendimiento en función de las principales variables tales como: flujo masico de aire, contenido de humedad, temperatura a la que se realiza el secado y cantidad de material a secar.	Establecimiento del diseño de experimentos para el control de las variables involucradas en el proceso de secado del cacao	Controlar las variables involucradas en el proceso de secado del cacao	Documentos de archivo
	Evaluación de las principales variables relacionadas con el proceso de secado de cacao	Evaluar las variables relacionadas con el proceso de secado del cacao	Documentos de archivo
	Análisis de rendimiento térmico del proceso	Evaluación del rendimiento térmico del proceso	Documentos de archivo
	Valoración económica de la propuesta	Inversión económica en la construcción del secador rectangular	Documentos de inversiones realizadas

Justificación y/o importancia de la investigación:

El secado natural en los patios ha ido disminuyendo progresivamente a favor del secado artificial que utiliza energía convencional, dado fundamentalmente por la disminución del tiempo de secado, lo que conlleva a eliminar la posibilidad de daño al producto por secado lento y la disminución del costo de la mano de obra.

La premisa conceptual en el diseño del secador rectangular de cacao es el abaratamiento de su costo y la sencillez de su operación sumado a la calidad del producto final ya que conlleva un proceso de automatización que ayuda a la calidad del producto final, todo esto sumado al uso de energías renovables nos garantizan ahorro de combustibles derivados del petróleo y por lo tanto contribuir con el cuidado del medio ambiente.

Además, en base a la posición que tiene el Ecuador a nivel global y al soporte que se brindará al pequeño agricultor se ve la importancia del proyecto enfocado al ahorro de recursos que siempre será la prioridad mientras la calidad del producto sea de alta calidad.

Acorde al problema científico y el objetivo general se define la siguiente **Hipótesis:**

Es posible la reducción del tiempo de secado y el consumo de GLP para el incremento del rendimiento térmico del proceso a partir del análisis experimental de un secador rectangular en convección forzada mediante el análisis de la incidencia del flujo másico de aire, contenido de humedad, temperatura a la que se realiza el secado y cantidad de material a secar.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA RELACIONADA CON EL PROCESO DE SECADO DEL CACAO

1.1 Introducción

Las generalidades del cacao y su historia conllevan una amplia información que debe ser sintetizada en este capítulo, su amplio espectro de datos tiene una serie de procesos especialmente en el del secado y en este caso el de realizarlo con la ayuda de mecanismos no convencionales. Es por esta razón que se precisa el estudio de las diferentes formas de secado y sus respectivas características.

El **objetivo** del presente capítulo es: mostrar la historia, tipos de cacao, así como las diferentes etapas del proceso de secado que están involucrados en este proyecto.

1.2 Antecedentes de la investigación.

El proceso del secado en la mayoría de los pequeños productores es realizado de manera tradicional, sin el uso de energías renovables y con técnicas que muchas veces hacen que el cacao pierda ciertas características que causan que se genere menor rédito económico además con un elevado consumo de GLP y tiempos de secado prolongados.

En base a estas causas es necesario mencionar a ciertos autores de análisis previos que mencionan algunos procesos y características específicas que debe mantener el cacao durante el proceso de secado.

Se han tomado las siguientes citas que son base para garantizar las cualidades del proceso de secado:

- El objetivo principal del proceso de secado es que el cacao termine de desarrollar el sabor a chocolate que inició durante la fermentación y las almendras adquieren el color marrón o pardo típico del cacao correctamente fermentado y secado [1].

- De nada sirve que se haya realizado una buena fermentación si el secado no se hace de una forma adecuada ya que el cacao mal secado no alcanzará el aroma y sabor adecuados, durante el secado se eliminará el exceso de humedad y de acidez de las almendras recién fermentadas desde un aproximado del 55% hasta el 7%, valor de humedad que garantiza su posterior almacenaje y comercialización[1]:
- En la etapa de secado continúa el proceso de oxidación iniciado en la fermentación y se completa la formación de aquellos compuestos que determinan las cualidades organolépticas, como el aroma y el sabor del cacao. En esta etapa además se desarrolla la pigmentación de color marrón a partir de los compuestos fenólicos[1].
- Un exitoso proceso de secado permite alcanzar al cacao un pH óptimo de 5.1 a 5.4, cualquier muestra de almendras con un pH inferior a 5.0 revela la presencia de ácidos no volátiles, lo cual genera aromas desagradables, disminuyendo la calidad del chocolate[1].
- El secado debe hacerse de forma lenta y gradual, el proceso de secado violento no permite lograr un secado homogéneo e interrumpe la hidrólisis enzimática, generando almendras de color púrpura con sabor astringente. El secado violento además produce un endurecimiento rápido de la testa o cascarilla, lo cual impide la salida o difusión de los ácidos volátiles generando almendras con sabor ácido[1].
- Realmente no existe un consenso en la bibliografía revisada sobre el tiempo que dura el secado de cacao (de 3 a 15 días), esto se debe a que, al tratarse de un proceso empírico y además fuertemente dependiente de las condiciones climáticas ambientales, el tiempo de exposición del grano no está determinado de forma precisa[1].
- El linalol es un compuesto clave que permite la clasificación de los cacaos en función de su origen. Las almendras de cacaos "finos" que provienen del Ecuador, de Trinidad y de Venezuela contienen más de linalol que los cacaos corrientes (Ghana, Costa de Marfil y Brasil). Este contenido de linalol, puede

ser hasta ocho veces más elevado, contribuyendo con la calidad aromática de estos orígenes de cacao y sería responsable de sus notas florales [2].

1.3 Fundamentación Teórica.

Historia del cacao.

Su nombre científico es *Theobroma cacao* L. y Carlos Linneo clasificó la planta. *Theobroma cacao* es un árbol de 4-8 m de alto de la familia Sterculiaceae, nativo de las regiones tropicales de América, las semillas contienen una cantidad significativa de grasas (40-50 %) y polifenoles (alrededor del 10 % del peso del grano seco). Las etapas críticas en el procesamiento son: el secado y la fermentación, procesos que ocasionan que las paredes celulares se destruyan, permitiendo que los contenidos de la semilla queden expuestos a otros constituyentes químicos que afectan sus propiedades organolépticas .[3]

No fue hasta el siglo XVI que el cacao salió de América Latina. Lo exportaron por primera vez los españoles por medio de una bebida de chocolate tradicional, conocida como "xocolatl" [4]. En 1830, se declara la fundación del Ecuador. Muchas familias adineradas dedican sus tierras a este producto, en haciendas denominadas Grandes Cacao. Ubicadas preferentemente en Vinces y otros cantones de Los Ríos. La producción se duplica hacia 1880 (15.000 TM), y de ahí se triplica (40.000 TM). Durante la década de 1890, Ecuador es el mayor exportador mundial de cacao. Hoy en día el cacao ecuatoriano ha vuelto a su antiguo esplendor y es reconocido como líder en producción de cacao fino, con 65% del mercado mundial.

Cultivo

La planta de cacao inicia su producción aproximadamente a partir del tercero al quinto año de sembrado (dependiendo de la variedad), alcanzando el máximo rendimiento entre el octavo y el décimo año. La vida útil es 45 años. Se requiere de cinco a seis meses entre la fertilización y la cosecha. Las enfermedades más frecuentes son: la pudrición parda o cáncer del tronco y ramas, antracnosis, las agallas o bubas, la pudrición negra o cáncer de tronco, la escoba de bruja, etc. Así mismo, entre las principales plagas se encuentran: perforadores del tronco, los ácaros, la gota, la vaquita y perforadores de frutos. Todas estas enfermedades y

plagas se señalan como las causantes de pérdidas de las cosechas (que pueden alcanzar hasta un 20% de acuerdo con las estimaciones de los especialistas), así como de la disminución de la calidad del grano de cacao.

Clasificación botánica del cacao.

Desde el punto de vista botánico o genético, la especie *Theobroma cacao* L. puede clasificarse tradicionalmente como sigue:

Cacao Criollo: corresponde a una planta de poco vigor y bajo rendimiento, destacándose la alta calidad de sus semillas. Ejemplos de cacao Criollo son algunos tipos de cacao cultivados en Venezuela, en el Caribe y Nueva Guinea Papua, como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Cacao Criollo Fuente: [5]

Cacao Forastero: se caracteriza por ser de mayor tolerancia a las enfermedades que el cacao Criollo. Esta es la variedad más común, pero también la más robusta y la que da más cantidad de frutos. Produce el grano menos aromático. Este cacao tiene un sabor fuerte y amargo, ligeramente ácido. Con mucho tanino y astringencia. Tienen una gran potencia aromática, pero sin finura ni diversidad de sabores, en la figura 3 se muestra la planta de cacao forastero.



Figura 3. Cacao Forastero Fuente: [5]

Cacao Trinitario (mejorado): es más resistente y productivo que el cacao Criollo pero de inferior calidad. Es el resultado del cruce entre el cacao Forastero y el Criollo. Es producido en Granada, Jamaica, Trinidad y Tobago, Colombia, Venezuela y América Central. Como se puede ver en la figura 4 se observa el cacao trinitario.



Figura 4. Cacao Trinitario **Fuente:**[5]

De estos principales tipos de cacao han surgido híbridos, productos de la mezcla entre criollo y forastero, de estos existen una gran variedad, una de las cuales es el CCN, variedad registrada por el científico ecuatoriano Homero Castro Zurita, es el cacao de mayor productividad según el Ministerio de Agricultura de Ecuador.

Cacao CCN-51

Homero Castro logra en 1960 en su finca “Teobroma” localizada en Naranjal seleccionar varios híbridos con las características deseadas, procediendo luego a clonar algunos de ellos a los que los denominó con las siglas CCN-51 cuyo significado es “Colección Castro Naranjal”. El CCN-51 tiene un mayor potencial de rendimiento y resistencia a las enfermedades fungosas comunes. Este clon puede alcanzar a un rendimiento de 4,000 kg de semillas secas/hectárea bajo exposición solar y alta densidad. Esta variedad de cacao tiene un rendimiento más alto comparado con el criollo; con un manejo adecuado desde la siembra hasta el secado del grano, este clon puede ser utilizado como cacao de calidad para la elaboración de chocolate. El CCN-51 (figura 5) resulta altamente rentable para producción y comercialización. [6]



Figura 5. Cacao CCN51 **Fuente:** [7]

Clasificación comercial del cacao.

Desde el punto de vista comercial e industrial, en el mercado mundial generalmente se clasifican los granos de cacao en dos categorías:

- **Cacao ordinario:** granos producidos por los cacaos tipo Forastero; éstos son utilizados en la fabricación de manteca de cacao y de productos que tengan una elevada proporción de chocolate.
- **Cacao fino o de aroma (Nacional):** granos producidos por los cacaos tipo Criollo y Trinitario. Éste es utilizado usualmente en mezclas con granos ordinarios o Forastero para producir sabores específicos en los productos terminados. Los granos correspondientes a esta categoría dan características específicas de aroma o color en chocolates finos de revestimientos o capas de cobertura. A continuación, en la figura 6 se observa el cacao nacional.



Figura 6. Cacao Nacional **Fuente:**[5]

Calidad

Debido a la competitividad mundial se evidencia la necesidad de mejorar la calidad del producto, con esto una de las aristas de la competitividad se vincula con una mejor calidad del producto.

La calidad está determinada principalmente por tres factores [8]:

- Factores de herencia: Parte de la calidad del cacao se hereda: peso de la almendra, porcentaje de testa o cascarilla, contenido de grasa entre 48 a 60%, dureza de la manteca y sabor (aroma y gusto) del cacao.
- Factor ambiente: Zonas de cultivo, precipitaciones, las temperaturas, fertilidad del suelo, entre otros.
- Factor fermentación del cacao: La importancia de la fermentación radica en que permite o favorece el desarrollo del aroma y sabor característico del verdadero chocolate, los cuales se desarrollan completamente cuando las almendras una vez fermentadas y secas son tostadas.

Los estándares internacionales para cacao requieren que el grano de calidad negociable sea fermentado, completamente seco, libre de olores extraños y de cualquier evidencia de adulteración, así como razonablemente libre de insectos vivos, de granos partidos, fragmentos y partes de cáscara, así como uniforme en tamaño. La calidad del producto final está estrechamente vinculada con las características de la materia prima utilizada. El proceso de fermentación desarrolla los llamados precursores del aroma y disminuye la astringencia y la acidez de los granos de cacao. Por el contrario, si no se lleva un adecuado tratamiento postcosecha, el potencial aromático de los cacaos finos o de aroma no se manifiesta

1.4 Procesos del cacao

Cosecha o recolección

Consiste en recolectar y abrir las mazorcas maduras y sanas, sacar los granos de cacao y colocarlos a fermentar, en la figura 7 se observa el proceso de recolección del cacao.



Figura 7. Recolección Fuente: [9]

Desgrane de las mazorcas

El desgrane consiste en partir las mazorcas, lo que por regla general se hace a mano, extrayendo los granos separándolos de la placenta para llevarlos luego a fermentar. La importancia de separar la placenta de los granos se debe a que ella tiene efectos adversos durante el secado, da lugar a granos aglomerados (múltiples) que dificultan el secado. En la figura 8 se observa las pepas de cacao en la masorca.



Figura 8. Desgrane Fuente: [10]

Fermentación del cacao

La fermentación es un paso fundamental en el proceso postcosecha de las almendras, produciéndose cambios físicos químicos que conducen al desarrollo de precursores de aroma y sabor, se da inicio a las reacciones bioquímicas, llevando a la formación de moléculas precursoras para el desarrollo de un color, sabor y olor [11].

En la figura 9 se observa el proceso de fermentación del cacao.



Figura 9. Fermentación Fuente: [12]

Es difícil precisar el fin de la fermentación e iniciar el secado, ya que la desecación es una continuación del fermentado. No hay una regla fija en cuanto al número de días, eso puede hacerse: por fijación del tiempo, determinando un tiempo para normalizar el proceso para que dé resultados iguales en todas las partidas, por el color interior que muestre el grano al realizar el corte transversal de los mismos, por el color externo de la cáscara, por el olor característico de la masa fermentante, la disminución de la temperatura y por el hinchamiento de los cotiledones.

En la tabla 2 se muestra el tiempo de fermentación en función del tipo de cacao.

Tabla 2. Fermentación en función del tipo de cacao Fuente: [12]

Cacao criollo	1 a 5 días
Cacao trinitario	4 a 6 días
Cacao forastero	5 a 8 días

Secado del grano

El proceso de secado en descripción general es la eliminación de sustancias volátiles (humedad) que nos servirá para producir un producto ya sea sólido bien seco. La humedad se presenta como una solución líquida, dentro del sólido, es decir, en la microestructura del mismo[5]. El proceso de secado tiene como finalidad fundamental: bajar el % de humedad de 56-60% a 6-7%, siempre por debajo del 8% para asegurar buenas condiciones de almacenamiento, evitándose el crecimiento de hongos y el ataque de los insectos.

Un factor crítico es la humedad del aire, ya que a medida que va eliminando el agua de los sólidos, el aire aumenta el contenido de humedad, por esta razón se puede decir que no es recomendable remover grandes cantidades de vapor de agua en el aire, ya que este aire seco va a deshidratar la superficie de los granos y esto expone la superficie a quemaduras. Por lo tanto si no hay un debido control con respecto a la humedad, no será posible mantener la velocidad de secado simultáneamente; es decir constante, con el objetivo primordial de disminuir el tiempo de secado en una etapa del proceso.[5]

1.5 Métodos del secado

1.5.1 Métodos tradicionales de secado

Secado natural

El simple secado al sol es el método más usado por la mayoría de agricultores, consiste en tender la fruta ya sea en parcelas, en los caminos y dejar que los rayos del sol eliminen el agua presente en las frutas es una de las formas más baratas que existen, aunque requiere tiempo, dedicación y se está a merced de las condiciones. De este tipo se citan los siguientes:

Método de secado natural Rohan

Este método puede cumplirse en camillas o bandejas Rohan, donde se extiende el cacao allí mismo y se pone al sol sobre largueros acomodados a una altura aproximada de 50 centímetros para que no haya influencia de la humedad del suelo. A continuación, en la figura 10 se observa el secado Rohan.



Figura 10: Secado Rohan **Fuente:** [13]

Uso de esterillas o tendales

En pequeñas plantaciones, es el uso de tendales o esterillas hechas de bambú convenientemente arreglado, de modo que se puede envolver y desenvolver para secar o guardar, como se muestra en la figura 11.



Figura 11: Secado tendales **Fuente:**[13]

Secadero tipo Elba

Usado en plantaciones relativamente grandes, que consiste en varios carros o camillas de madera corredizos mediante rieles, protegidos con techo fijo o rodante como se muestra en la figura 12.



Figura 12: Secado Elba **Fuente:**[13]

Secado en pisos de cemento

Usado en patios de cemento, ladrillos o ladrillos con techos rodantes. El cacao obtenido y llamado “de sol”, es aquel que se seca cuidadosamente con un buen tiempo temperatura que no pase de 50 °C, removiéndolo constantemente, resultando de mejor calidad, de aroma más fino y de un color más bello y claro. Ejemplo citado en la figura 13.



Figura 13: Secado piso cemento **Fuente:**[13]

Marquesinas y túneles de secado

Son estructuras en madera o metal con cubierta de plástico especial o policarbonato que permite el paso de la radiación solar, en aquellas zonas productoras donde las precipitaciones son continuas durante el periodo de cosecha del cacao. Se citan los ejemplos en las figuras 14 y figura 15.



Figura 14: Secado marquesinas y túneles **Fuente:**[13]



Figura 15: Secado marquesinas y túneles **Fuente:**[13]

Ventajas y desventajas

Estos métodos simples de secado presentan algunas ventajas y desventajas que se detallan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los secadores naturales

No utilizan combustibles ya que su principal elemento es el clima
No se requiere estructuras especializadas ni muy costosas
Depende del clima para el secado.
Son demasiado lentas pudiendo generar hongos en los productos
El producto está expuesto al polvo y a insectos
El nivel de humedad que se obtiene no es uniforme ni óptimo lo que trae que el producto no se pueda vender correctamente

1.5.2 Métodos artificiales de secado

Los clasificaremos en secadoras solares o las que trabajan con combustibles y otros elementos ya sea quemadores, estas son llamadas como secadora artificial o mecánica, aunque se pueden ser un híbrido utilizando las dos tecnologías.

Secadoras solares

Presentan temperaturas más elevadas lo que nos da un secado más rápido y con consecuencia una humedad menor. Las secadoras solares están formadas básicamente por el colector solar y la cámara de secado, en el colector solar es donde el aire se calienta debido a la radiación solar y la cámara de secado donde es puesto el producto a deshidratar, el aire que circula del colector solar a la cámara de secado se hace por circulación forzada y circulación natural.

Clasificación de las secadoras solares: Directas, Indirectas, Mixtas

Secadoras solares directas

Las secadoras solares directas poseen la cámara de secado y el colector solar unidas haciendo que la cámara de secado también sea de colector solar recibiendo la

radiación solar, en estos tipos de secadores la radiación solar es absorbida por el producto que se encuentra en la cámara de secado, este método aprovecha la energía del sol más eficientemente para secar la humedad existente en el producto. Estos modelos son más económicos debido a que combina la cámara de secado y el colector solar en una sola estructura, en lo que refieren al tipo de sistema de circulación de aire por lo general es de circulación natural.

Características:

- El secado se lo realiza por la transferencia de calor entre los gases calientes generados por el colector solar y el producto húmedo, en donde los gases calientes extraen el líquido y separa el vapor en el producto.
- Un secador directo es muy eficiente ya que consume más combustible por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad en el sólido.
- Los gases o aire que pueden ser utilizados en secador directo como elemento secante puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado o vapor de agua sobrecalentado.
- La eficiencia de secador directo mejora ya que incrementa la temperatura del ambiente logrando un secado más rápido.

Secadoras solares indirectas

La principal característica de las secadoras solares indirectas es que el colector y la cámara de secado forman dos unidades independientes entre sí, es decir la cámara de secado no recibe radiación solar y el colector solar es el encargado de producir el aire caliente.

Características:

- El calor generado se pasa al producto a través de una lámina de metal.
- Las temperaturas que se obtienen van desde 0 grados a 350 grados en secadoras que utilizan algún tipo de combustible.
- Para aumentar la eficiencia del traspaso de calor se necesita un medio para agitar o remover el producto de la superficie metálica.

Secadora mixta

Presenta un colector y una cámara de secado y la recolección de la radiación se hace en las dos partes, se puede fácilmente integrar un sistema auxiliar de energía para construir un sistema híbrido, se puede manipular el producto y descargarlo, los costos aumentan comparado con el sistema directo debido a que se tiene que añadir un colector solar.

1.6 Principales tipos de secadores:

Secador rotatorio

El secador rotatorio (figura 16) tipo Guardiola se hace un pre-secado del cacao (en baba) por un día en patios de cemento, con la finalidad de evitar que el mucílago obstruya las aberturas del cilindro giratorio. En el secado artificial la temperatura no debe exceder de los 80 °C; todo el proceso puede durar unas 24 horas.



Figura 16: Secador rotatorio Fuente:[13]

Secador de flujos cruzados.

Los secadores de flujo cruzados se los puede montar sobre otros, depende de la cantidad que se requiere secar. Existe módulos que lo podemos utilizar a la misma temperatura o a diferentes temperaturas, algunos módulos podemos utilizar como zona de reposo como son las de la mitad. La recirculación del aire de escape es un avance en los secadores, cabe mencionar que la circulación del aire es cerca del 50% del total del aire en los secadores que se utiliza esta técnica, se lo realiza con aire saturado que proviene del primer módulo, se esparce en el medio ambiente, el aire del siguiente módulo de secado se mezcla con el aire de la zona de enfriamiento y esto hace que se dirija a la fuente de calentamiento por su posterior utilización. En la figura 17 se muestra la vista en planta de una secadora de flujo cruzado.

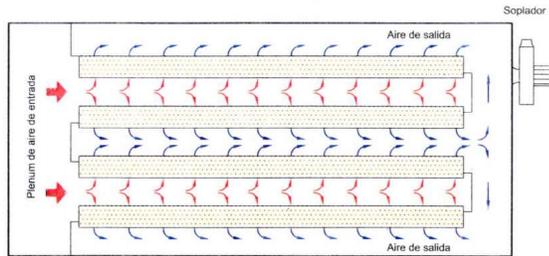


Figura 17: Vista en planta de una secadora de flujo cruzado de 4 columnas

Fuente: [14]

Secador artificial

Los secadores artificiales son aquellos que utilizan madera, bagazo, GLP y otros derivados del petróleo como combustible. La transferencia de calor se realiza por medio de conducción y convección principalmente. En los secadores artificiales se realiza la convección en forma natural y forzada ya que está constituida por un ventilador el cual impulsa un aire que pasa a través de un calentador donde aumenta la temperatura, mediante una sección de transición el aire es guiado a la cámara de secado, el cacao se prevé colocar en las partes superiores de la cámara de secado sobre una bandeja perforada por donde circulará el aire caliente el cual se encargará de realizar la función del secado. En la figura 18 se muestra un secador artificial usando GLP como combustible.



Figura 18: Secador GLP Fuente:[15]

Secador con ayuda de energía solar

El secador solar utiliza aire caliente para hacerlo pasar sobre el cacao, esto permite controlar las variables de secado del producto. El aire caliente que se utiliza se obtiene de un colector solar que capta los rayos del sol y transfiere ese calor al aire

que se introduce a la cámara de secado. El secador solar reduce hasta en 40- 60% el tiempo de secado respecto al secado tradicional. También la humedad relativa del aire de secado es un factor crítico para controlar la velocidad de secado del producto. Cuanto menor sea la humedad relativa, mayor es la capacidad de absorción de aire de secado. Se cita un ejemplo de este secador en la figura 19.



Figura 19: Secado con ayuda de energía solar **Fuente:**[16]

Secador Híbrido (GLP y Energía solar)

El secador híbrido Solar-GLP obtiene aire caliente de dos fuentes: 1) de la combustión de gas-LP y 2) de la radiación solar; cuando la radiación solar incidente en el colector es óptima, suministra suficiente calor al aire y no es necesario accionar el quemador de gas LP, en cambio cuando el clima es desfavorable y el colector solar no suministra suficiente energía al sistema, el quemador de GLP se acciona hasta que en el interior de la cámara de logra la temperatura requerida para el proceso de secado, de tal manera que la temperatura dentro del secador sea constante. En la figura 20 se cita un ejemplo de este secador.



Figura 20: Secador híbrido compuesto de los (1) colectores solares (2) Quemador de biomasa (3) Secador **Fuente:**[17]

Secador por Colección Solar

La parte principal del sistema es el colector, el artefacto que capta energía solar y convierte en energía útil, sea en forma calórica o eléctrica. Para la conversión de energía solar en energía eléctrica se utilizan las celdas solares proveniente de los materiales semiconductores, tipo silicio principalmente. Por otro lado, la energía solar puede ser transferida en calor empleando captadores sencillos.

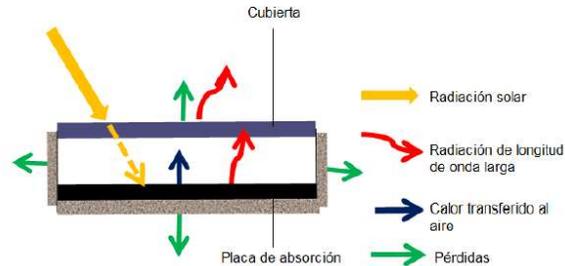


Figura 21: Secado por colección solar **Fuente:**[18]

Secadora de bandeja.

Los secadores de bandeja de flujo paralelo poseen una alta velocidad de deshidratación, son económicos en adquisición y funcionamiento y como desventaja el producto final no es homogéneo en humedad, propiedades físicas y químicas. En la figura 22 se cita un ejemplo de esta secadora.

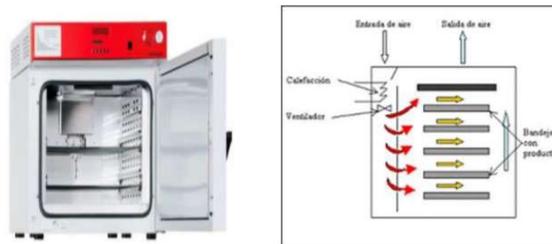


Figura 22: Secadora de bandeja de flujo paralelo y esquema **Fuente:**[19]

Secadora de cacao cilíndrica vertical.

Este tipo de máquina permite obtener el secado de cacao en el menor tiempo posible y se diferencia de las rectangulares en la manipulación del grano con la utilización de elementos y mecanismos en una forma mecánica. Su diseño para el proceso de secado da como resultado un equipo de elevada productividad sin variar su calidad. La secadora cuenta con: plataforma propia para aprovechamiento del calor, diseño

ensamblado con materiales de acero inoxidable alimenticio o galvanizado, puede ser opcional; su temperatura se regula electrónicamente, consta también con puertas de descarga para el vaciado del producto. Un ejemplo de este secador se muestra en la figura 23.



Figura 23: Secadora de cacao tipo cilíndrica vertical **Fuente:** [20]

Secadora de cacao rectangular.

Este tipo de máquina es muy utilizado por los productores de cacao debido a su tiempo de secado y ahorro de energía, la remoción del grano se lo realiza de forma manual, sea por medio de palas de madera o metal, el diseño de la secadora da un buen resultado de productividad, la máquina consta de una cámara de secado en la parte inferior, el material para su ensamble puede ser de acero inoxidable o galvanizado por tratarse de un producto alimenticio, hay un control de llama para regular la temperatura, el combustible para el equipo que se suele utilizar es el GLP o el diésel, además consta de compuertas para la descarga y limpieza del producto como se observa en la figura 24.



Figura 24: Secador rectangular **Fuente:** [21]

1.6.1 Ventajas y desventajas de las principales secadoras de cacao

En la tabla 4 se citan las principales ventajas y desventajas de las principales secadoras de cacao.

Tabla 4. Ventajas y desventajas secadoras de cacao

Tipos de secadores de cacao	Características
Secador de flujos cruzados	Fácil instalación
	Módulos a igual o diferente temperatura
	Circulación del aire es cerca del 50% del total del aire
Secador Solar	Proceso técnicamente sencillo
	Muy bajo coste de implementación y mantenimiento
	No Requiere mano de obra especializada
	No consume combustible
Secador Rotatorio	Exceso de combustible GLP (gas licuado de petróleo) daña la capa de ozono
	Alto rendimiento de temperatura excesiva.
	Es una máquina de gran dimensión de forma giratoria para el secado.
	Alto costo de implementación
	Temperaturas elevadas de 70 °C
Secador de Bandejas	Alta velocidad de deshidratación
	Económicos
	Producto final no homogéneo en humedad y propiedades físicas
Secador Rectangular	Tiempo de secado
	Ahorro de energía
	Remoción de grano de forma manual
	Buen resultado de productividad

	Combustible Híbrido (GLP / Solar)
Secador Híbrido	Máquina extremadamente costosa.
	Alta eficiencia en el producto de cacao.
	Genera energía por radiación solar para el secado de cacao.
	Lleva implementado un colector solar de fuente primaria.
	Mejor Garantía electrónica para el secado de manera rápida.
	Elevado grado de automatización.
	Circulación de aire forzada.
Secadora cilíndrica vertical	Obtiene el secado en menor tiempo posible
	Manipulación del grano con la utilización de elementos y mecanismos en una forma mecánica
	Elevada productividad sin variar su calidad
	Su temperatura se regula electrónicamente

1.7 Tipos de circulación de aire en los secadores

El aire que circula dentro de la cámara de secado se lo realiza de dos maneras, ya sea por circulación natural o forzada.

Circulación forzada:

El aire que circula hacia la cámara de secado es generado por un ventilador, este modelo de circulación se implementa en los diseños de gran capacidad de secado y a su vez podemos controlar la velocidad del proceso de secado, la velocidad de circulación usando este modelo se obtiene entre 0.5 y 1 m/s, la desventaja de este modelo es que el ventilador debe de disponer de una fuente eléctrica para la generación del aire.

Circulación natural:

El aire es generado por la diferencia de temperatura que se genera en el colector solar y de la entrada de aire provista, este tipo de sistema se emplea en modelos

pequeños ya que las velocidades que se logran en la cámara de secado va de 0.4 a 1 m/ s, pero en equipos grandes las mismas son 0.1 a 0.3 m/s en la cámara de secado.

Descripción del objeto de estudio:

Para el caso de estudio se utilizó el secador rectangular en convección forzada ya que muestra ventajas relacionadas con la reducción del tiempo de secado de cacao y la calidad del producto comparado con el secado en tendales y reducción de los consumos energéticos comparados con el secador cilíndrico.

Principio de funcionamiento.

El aire del exterior es obligado a pasar por la parte inferior del sistema por medio de un intercambiador de calor, el cual es un quemador y un ventilador. El aire circula en la parte baja de la cámara de secado, la temperatura interior es controlada por un variador de frecuencia que este a su vez comanda al blower para aumentar o disminuir el flujo de aire controlando de esta manera la temperatura. Se usa un sistema de control PID para este proceso. El tiempo de secado dependerá de las variables ya antes mencionadas. En la figura 25 se detallan las partes fundamentales del secador rectangular de cacao en convección forzada.

Partes fundamentales:

Nº	Componente
1	Motor del blower
2	Soplador del blower
3	Quemador
4	Contenedor rectangular
5	Malla
6	Difusor

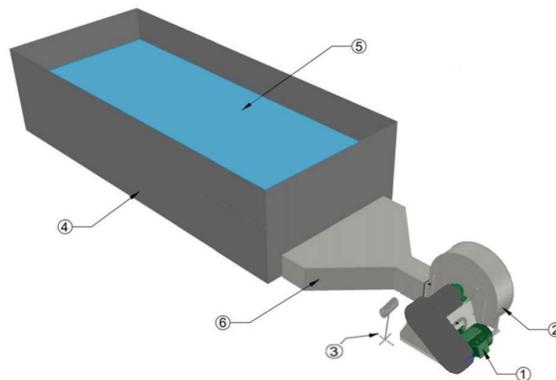


Figura 25: Secador rectangular

1.8 **Medición de las variables del proceso.**

Para el proceso de secado de los granos de cacao con flujo de aire forzado se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Flujo masico de aire
- Contenido de humedad
- Temperatura a la que se realiza el secado
- Cantidad de material a secar.

Estos parámetros influyen en el tiempo que dura el proceso de secado y se relacionan con los siguientes factores:

- Transferencia de calor
- Condiciones externas
- Atmósfera de secado
- Equilibrio vapor-líquido.

Se debe considerar la temperatura y la humedad relativa del aire porque podemos determinar la cantidad de energía que debemos utilizar para alcanzar la temperatura de secado ideal para el proceso. La relación de temperatura ambiente con la energía necesaria es inversamente proporcional. Todo esto depende de la zona donde se realizará el proceso del secado.

1.9 **Conclusiones del capítulo I**

- La literatura revisada muestra suficiente información relacionada con el secado de cacao y los diferentes equipos utilizados para el régimen controlado.
- El secado en equipos rectangulares muestra ventajas relacionadas con la reducción del tiempo de secado de cacao y la calidad del producto comparado con el secado en tendales y reducción de los consumos energéticos comparados con el secador cilíndrico.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS PARA EL SECADO DE CACAO EN EQUIPO RECTANGULAR

2.1 Introducción

Los cálculos necesarios para el diseño del secador conllevan un análisis técnico que debe sintetizarse en este capítulo. Se mencionarán las distintas variables que están involucradas en el proceso de secado del cacao, también se realizará el diseño de los componentes del secador rectangular.

El **objetivo** del presente capítulo es:

Diseñar los componentes y calcular las variables que interfieren en el proceso del secado de cacao en el secador rectangular en convección forzada.

2.2 Análisis termodinámico y consideraciones técnicas para el diseño de la cámara de secado.

Es necesario modelar el fenómeno psicrométrico, ya que el objetivo principal de realizar un análisis termodinámico global del secador es encontrar el flujo másico de aire necesario y sus propiedades, para las condiciones de secado dadas. Además, otros parámetros como la cantidad de agua a evaporar, el calor total de vaporización, la energía requerida para calentar el aire y el consumo de combustible en el calentador.

Para ello, se debe partir de los siguientes datos, necesarios para el diseño o dimensionamiento:

- condiciones ambientales: presión, temperatura y humedad relativa del aire;
- flujo másico de producto a la entrada o a la salida del secador;
- humedad inicial y final del producto;
- temperatura del aire después del calentador;
- humedad relativa del aire a la salida del secador

Para el diseño se han tomado los siguientes datos en base a referencias bibliográficas sobre la misma temática.

- Temperatura del aire en base al secado máxima 60 °C.[22]
- El porcentaje máximo de humedad del cacao será de 7%, [23]
- La humedad relativa del aire según con las condiciones ambientales donde se pretende tomar medidas del secador es la ciudad de Latacunga y su nivel es del 75%
- Velocidad del aire del ventilador 3m/s. [24]
- Humedad inicial del producto 60% [25]

Tabla 5. Características técnicas a considerar en el proceso de secado.

Nº	CRÍTERIO	VALOR
1	Temperatura de aire de secado	Max 70 °C
2	Humedad inicial del producto	Aprox. 60%
3	Humedad final del producto	7% con $\pm 1\%$
4	Velocidad del aire	3m/s
5	Material anticorrosivo	Mayor a 70%

2.3 Propiedades del grano de cacao

En la tabla 6 se citan las principales propiedades físicas y térmicas del cacao CCN51.

Tabla 6. Propiedades físicas y térmicas del cacao CCN51.[26][27][28]

Descripción	Porosidad	Densidad aparente [kg/m ³]	Calor específico [J/kg. K]	Conductividad térmica [W/m.K]	Difusividad térmica [m ² /h]
Cacao	0,56	775	1728	0,18	0,000721

2.4 Dimensionamiento de la cámara de secado

Se procederá con los cálculos necesarios para diseño.

Se define por requerimiento las siguientes dimensiones de la cámara de secado.

a = 1.6 Largo de la cámara, [m].

b = 0.8 Ancho de la cámara, [m].

c = 0.3 Altura de la cámara, [m].

Cálculo de volumen de cacao.

$$V = a * b * c \tag{2.1}$$

Cálculo de masa de cacao.

Para conocer la masa de cacao se usa la siguiente fórmula.

$$m = V * p \tag{2.2}$$

Donde:

V= Volumen a ocupar (m³)

m=masa del cacao (kg)

p = densidad del cacao ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

Cálculo de la masa seca de cacao

$$m_s = m_c(1 - \%_{\text{humid}}) \tag{2.3}$$

Donde:

m_c= Masa total de cacao en el contenedor, [kg]

%_{humid}=porcentaje de humedad inicial, [%]

Cálculo de la masa con la humedad deseada (7%)

Acorde a los requisitos de NTE INEN 176 granos de cacao.

$$m_{7\%} = \left(\frac{m_s}{1-0.07} \right) \tag{2.4}$$

Psicométrica de Latacunga

- Ubicación: Latacunga
- Temperatura ambiente: 19 °C
- Altitud: 2750
- Humedad relativa: 82°

Para obtener los datos se usa un software en línea cartapsy.[29] el cual permite ingresar los valores promedio y arroja la carta psicrométrica como se observa en la figura 26 y tabla 7.

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	19	C
Temp. b. húmedo:	16.72202713357	C
Humedad relativa:	82	%
Punto de rocío	15.88883547412	C
Altitud SNM	2750	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	0.717302389430	bar
Pv sat	21.97790783348	mbar
Pv	18.02188442345	mbar
Humedad absoluta	0.016030208237	kg/kg
Entalpía	59.74627463859	kJ/kg
Volumen específico	1.197974832878	m3/kg

Figura 26: Software cartapsy, psicrometría de Latacunga **Fuente:**[29]

Tabla 7. Propiedades psicrométricas del aire en Latacunga

Detalle	Valor	Unidad
Presión atmosférica	71.73	kPa
Humedad relativa (ϕ)	82	%
Presión del vapor de saturación (Pv sat.)	2.197	kPa
Presión de vapor de agua (Pv)	1.802	kPa
Humedad absoluta (W)	0.016	Kg/kg
Entalpía (h)	59.74	kJ/kg
Volumen específico (Vesp)	1.197	m ³ /Kg

Cálculo de la densidad del aire seco en el sitio de estudio

$$P_{\text{sec}} = \frac{1}{V_{\text{esp}}} \quad (2.5)$$

Donde:

V_{esp} = Volumen específico del aire en el sitio de estudio, [m³]

ρ_{sec} = Densidad del aire de secado, [kg/m³]

2.5 Cálculo de tiempo de secado

Para calcular el tiempo de secado es necesario obtener las siguientes variables:

Cálculo de la velocidad másica del aire de secado

El aire se usa como medio de transporte de energía (aporte de calor al producto) y como medio de extracción de humedad. Esto hace que las velocidades del aire deban ser mucho mayores que los sistemas rotativos-convectivos; del orden de 0.4 a 3 (m/s) [30]. Por lo tanto se asume la velocidad para el diseño de 3m/s.

Con la velocidad lineal del aire y la densidad del aire de secado obtenido se tiene:

$$G = 3600s \cdot V_s \cdot \rho_{sec} \quad (2.6)$$

Donde:

$G_{m\acute{a}sica}$ = Velocidad másica del aire de secado, [kg/m²]

3600s= factor de transformación de unidades de tiempo a horas.

V_s = Velocidad de secado, [m/s]

ρ_{sec} = Densidad del aire de secado, [kg/m³]

Coefficiente de convección para un flujo de aire paralelo a la superficie de contacto con el cacao

$$h_{conv} = 0.0735 \cdot G^{0.8} \quad (2.7)$$

Donde:

h_{conv} = Coeficiente de convección para flujo de aire de secado paralelo,[KJ/m². h]

G = Velocidad másica del aire de secado, [kg/m²]

Cálculo de la velocidad de secado por unidad de tiempo de manera constante

$$R_c = h_{cov} \cdot \frac{T_{sec} - T_g}{H_{fg}} \quad (2.8)$$

Donde:

R_c : Velocidad de secado por unidad de tiempo de manera constante, [kg/m²*s]

T_{sec} = temperatura de secado, [K]

T_g = Temperatura de los granos de cacao en el bulbo húmedo, [K]

H_{fg} = Calor latente de evaporación a temperatura de bulbo húmedo, [kcal/kg]

Se define el área de secado por el área de la cámara de secado:

$$t_c = \frac{m_s \cdot (X_i - X_c)}{A_s \cdot R_c} \quad (2.9)$$

Donde:

t_c = Tiempo de secado a velocidad constante, [h]

m_s = Masa sea de cacao, [kg]

X_c = Humedad crítica del material en base seca, [%]

X_i = Humedad inicial del cacao, [%]

A_s = Área de secado, [m²]

R_c = Velocidad de secado por unidad de tiempo de manera constante, [kg/m²*s]

2.6 Balance de energía calorífica

Hay que analizar el sistema energético para saber el calor necesario que necesita el proceso de secado de cacao, para lo cual se detalla a continuación los siguientes cálculos:

Cálculo del calor sensible del cacao

Calor suministrado en los granos de cacao el cual variará la temperatura y humedad hasta alcanzar los parámetros deseados.

$$Q_c = m_s \cdot c_{p_c} \cdot \Delta T_c \quad (3.0)$$

Donde:

Q_c = Calor sensible del cacao, [kJ]

m_s = Masa seca de cacao, [kg]

c_{p_c} = Calor específico del cacao, [J/kg. K]

ΔT_c = Diferencia entre la temperatura inicial del cacao y la de secado, [K]

Cálculo del calor sensible del agua

Para el siguiente cálculo se determinará el calor específico del agua, la masa de agua seca, el cual se determina tomando el peso total del cacao a secar y restando la masa seca de cacao logrando así obtener la masa de agua, la diferencia de temperatura se toma dependiendo la temperatura de agua del cacao al ingresar y salir de la cámara de secado.

$$Q_{H2O} = m_{H2O} * c_{p_c} * \Delta T_c \quad (3.1)$$

Donde:

Q_{H2O} = Calor sensible del agua [kJ]

m_{H2O} = Masa seca de agua, [kg]

c_{p_c} = Calor específico del cacao, [J/kg. K]

ΔT_c = Diferencia entre la temperatura inicial del cacao y la de secado, [K]

Cálculo del calor latente

Calor latente necesario para que el agua cambie de estado líquido a vapor, para ello se tomará la masa seca de agua a vapor.

$$Q_L = m_{vapor} * H_l \quad (3.2)$$

Donde:

Q_L = Calor latente del agua, [kJ]

m_{vapor} = Masa de agua transformada en vapor, [kg]

H_l = Calor latente de vaporización de agua, [kJ/kg]

Cálculo de la masa de la plancha perforada de acero inoxidable

En esta ecuación se calculará la masa de la plancha perforado de acero inoxidable 304, el cual va a estar en contacto con el grano de cacao, lo que va a provocar un cambio de temperatura, los datos necesarios que se va a utilizar en la ecuación se encuentran en el “libro de transferencia de calor y masa de Cengel 3th” en la tabla A-3, donde se encuentra el acero inoxidable 304 (ASI 304).

$$D = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2(a + b)} = \frac{4 \cdot 0.8m \cdot 1.6m}{2(0.8m + 1.6m)} = 1.07m$$

$$m_{base\ cam} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P_{inox} \cdot e_p \quad (3.3)$$

Donde:

$m_{\text{base cam}}$ = Masa de la plancha perforada de acero inoxidable 304, [kg]

D = Diámetro del plato, [m]

P_{inox} = Densidad del acero inoxidable, [kg/m³]

e_p = Espesor de la base de la cámara, [m] = 0.008m (acorde datos hoja técnica)

Cálculo del calor sensible de la cámara

El calor sensible que se calculará va a estar en contacto con los granos de cacao, lo que provocara un cambio de temperatura.

$$Q_{\text{plancha}} = m_{\text{base cam}} \cdot c_{p_{\text{inox}}} \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

Donde:

Q_{plancha} = Calor sensible en la plancha base de acero inoxidable, [kJ]

$m_{\text{base cam}}$ = Masa de la plancha perforada de acero inoxidable 304, [kg]

$c_{p_{\text{inox}}}$ = Calor específico del acero inoxidable, [J/kg. K]

ΔT = variación de temperatura, [K]

Cálculo del calor total

$$Q_{\text{util}} = Q_{\text{plancha}} + Q_L + Q_{H_2O} + Q_C \quad (3.5)$$

Donde:

Q_{util} = Calor útil en el proceso de secado, [kJ]

Q_{plancha} = Calor sensible en el plato base de acero inoxidable, [kJ]

Q_L = Calor latente del agua, [kJ]

Q_{H_2O} = Calor sensible del agua, [kJ]

Q_C = Calor sensible del cacao, [kJ]

Cálculo de la potencia por calor útil en el proceso de secado

Potencia necesaria para producir el calor útil para el proceso de secado en el tiempo establecido.

$$\dot{Q}_{\text{util}} = \frac{Q_{\text{util}}}{t_c} \quad (3.6)$$

Donde:

\dot{Q}_{util} = Potencia necesaria para generar calor, [kW]

Q_{util} = Calor útil en el proceso de secado, [kJ]

t_c = Tiempo de secado a velocidad constante, [s]

Cálculo de pérdidas de calor por convección en el exterior (20°C)

Con los siguientes cálculos se encontrará el calor perdido en el exterior de la máquina.

Cálculo del número de Reynolds

$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (3.7)$$

Donde:

Re= Reynolds, [Adimensional]

ρ = Densidad de flujo, [kg/m³]

D= Diámetro interior, [m]

v= Velocidad del fluido, [m³/s]

De la tabla de A-15 del libro de "transferencia de calor y masa" a 20 grados centígrados

μ = Viscosidad dinámica del fluido, [kg/m*s] $\mu=1.825 \cdot 10^{-5}$

Cálculo del número de Nusselt

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{[1+(\frac{0.4}{Pr})^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (3.8)$$

Donde:

Nu= Nusselt, [Adimensional]

D= Diámetro interior, [m]

k= Conductividad térmica, [W/m. K]

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m². K]

Re= Reynolds, [Adimensional]

Pr= Numero de Prandtl, [Adimensional]

Cálculo del coeficiente de convección en el exterior

$$h_{conv} = \frac{k}{D} * Nu \quad (3.9)$$

Donde:

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m². K]

Nu= Nusselt, [Adimensional]

k= Conductividad térmica, [W/m. K]

Cálculo del calor sensible

El calor sensible que se calculará va a depender de la temperatura interna de la cámara de secado y la temperatura externa de la máquina, lo que provocará un cambio de temperatura.

$$Q = hA(T_{s_{prom}} - T_{\infty}) \quad (4.0)$$

Donde:

Q= Calor sensible, [W]

h= Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m². K]

A= Área de la superficie de la plancha, [m²]

T_{s_{prom}}= Temperatura promedio de la superficie, [K]

T_∞= Temperatura ambiente, [K]

Cálculo de la resistencia total

La resistencia total es la suma de la resistencia de las 4 paredes y la parte inferior del ducto de secado.

N°	Componente
1	Motor del blower
2	Soplador del blower
3	Quemador
4	Contenedor rectangular
5	Malla
6	Difusor

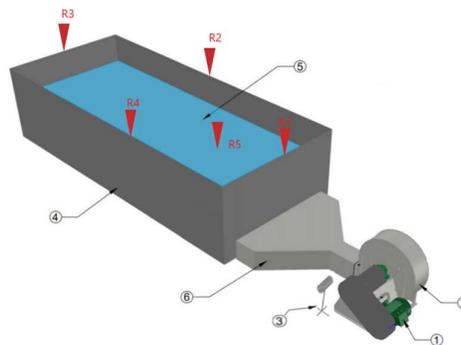


Figura 27. Circuito de resistencias térmicas

Cálculo de la resistencia total de la estructura

$$R_T = R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4} + R_{T5} \quad (4.1)$$

Donde:

R_T = Resistencia total de las paredes del secador, [W/m². K]

Razón de la transferencia de calor

Calor perdido en la parte externa de la máquina.

$$Q = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_T} \quad (4.2)$$

Donde:

Q = Razón de la transferencia de calor, [W]

$T_{\infty 1}$ = Temperatura interior, [°C]

$T_{\infty 2}$ = Temperatura exterior, [°C]

R_T = Resistencia total de las paredes del secador, [W/m². K]

2.7 Cálculos para la selección de ventilador

Se determinará el flujo másico adecuado para el secado de cacao, el cual permitirá buscar un ventilador que permita generar un flujo idóneo para nuestra máquina, para ello se realizará los siguientes cálculos.

Flujo másico de entrada del cacao húmedo

$$\dot{m}_{\text{cacao-humedo}} = \frac{\text{masa de cacao}}{\text{tiempo}} \quad (4.3)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{cacao-humedo}}$ = Flujo de cacao que ingresa a la cámara, [kg/s]

masa de cacao = Masa de cacao a secar, [kg]

tiempo = Tiempo estimado, [s]

Flujo sólido

$$\dot{m}_{\text{sin}} = (1 - X_{\text{in}}) * \dot{m}_{\text{cacao-humedo}} \quad (4.4)$$

Donde:

\dot{m}_{sin} = Flujo sólido, [kg/s]

$\dot{m}_{cacao-humedo}$ = Flujo de cacao que ingresa a la cámara, [kg/s]

X_{in} = Porcentaje de humedad con la que el cacao entra a la cámara, [%]

Porcentaje de agua a desprender

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{cacao-humedo} - \dot{m}_{sin} \quad (4.5)$$

Donde:

\dot{m}_g = Flujo de vapor, [kg/s]

$\dot{m}_{cacao-humedo}$ = Flujo de cacao que ingresa a la cámara, [kg/s]

\dot{m}_{sin} = Flujo sólido, [kg/s]

Flujo másico a la entrada de humedad

$$\dot{m}_{cin} = X_{in} * \dot{m}_{cacao-humedo} \quad (4.6)$$

Donde:

\dot{m}_{cin} = Flujo de entrada de cacao húmedo, [kg/s]

X_{in} = Humedad inicial presente en el cacao, [%]

$\dot{m}_{cacao-humedo}$ = Flujo de cacao que ingresa a la cámara, [kg/s]

Flujo másico de agua a la salida del secador

$$\dot{m}_{w\ in} = \frac{\dot{m}_{sin} * X_{out}}{1 - X_{out}} \quad (4.7)$$

Donde:

$\dot{m}_{w\ in}$ = Flujo másico de agua a la salida del secador, [kg/s]

X_{out} = Humedad final presente en el cacao, [%]

\dot{m}_{sin} = Flujo sólido, [kg/s]

Tasa de evaporación de agua

La tasa de evaporación esta definida de la siguiente manera:

$$\Delta \dot{m}_{in} = \dot{m}_{cin} - \dot{m}_{win} = \frac{\dot{m}_{sin} * X_{out}}{1 - X_{out}} \quad (4.8)$$

Donde:

$\Delta \dot{m}_{in}$ = Tasa de evaporación de agua, [kg/s]

\dot{m}_{win} = Flujo másico de agua a la salida del secador, [kg/s]

X_{out} = Humedad final presente en el cacao, [%]

\dot{m}_{cin} = Flujo de entrada de cacao húmedo, [kg/s]

\dot{m}_{sin} = Flujo sólido, [kg/s]

Flujo másico de aire para el secado de cacao

$$\dot{m}_a = \frac{\Delta \dot{m}_{in} * h_{fg} * \dot{m}_{cacao-humedo} * C_{p,cacao} * (T_{out} - T_{in})}{h_2 - h_1} \quad (4.9)$$

Donde:

\dot{m}_a = Flujo másico de aire, [kg/s]

$\Delta \dot{m}_{in}$ = Tasa de evaporación de agua, [kg/s]

$\dot{m}_{cacao-humedo}$ = Flujo de cacao que ingresa a la cámara, [kg/s]

h_{fg} = Entalpia, [kJ/kg]

T_{out} = Temperatura salida, [K]

T_{in} = Temperatura entrada, [K]

$C_{p,cacao}$ = Calor específico del cacao, [kJ/kg. K]

h_2 = Humedad final del cacao, [%]

h_1 = Humedad inicial del cacao, [%]

Volumen específico

$$v_1 = \frac{Ra * T_1}{Pa} \quad (5.0)$$

Donde:

Ra = Constante del Gas 0.287 [kJ/kg. K]

T_1 = Temperatura ambiente [K]

P_a = Presión atmosférica [kJ]

v_1 = Volumen específico, [m^3/kg]

Flujo volumétrico

Este cálculo permitirá encontrar el flujo necesario que se debe entregar a la cámara de secado.

$$\dot{V} = \dot{m}_a * v_1 \quad (5.1)$$

Donde:

\dot{V} = Flujo volumétrico, [m^3/s]

\dot{m} = Flujo másico, [kg/s]

v_1 = Volumen específico, [m^3/kg]

2.8 Dispositivos para el secador rectangular

Variador de frecuencia

Para el control de la velocidad del motor del blower se usó un variador de frecuencia provisto por la universidad. El modelo es el siguiente el cual se observa en la figura 28.



Figura 28. Variador de frecuencia Sinamics V20 trifásico. **Fuente:** [31]

El variador SINAMICS V20 está diseñado principalmente para la mayor parte de las aplicaciones industriales básicas de velocidad variable como por ej. Bombas, fajas transportadoras y ventiladores.

Características:

- Control V/F, V2/f y FCC.
- Grado de protección IP20, 4DI, 2DO, 2AI, 1AO
- Rango de potencias de 0.37kW (0.5HP) hasta 30kW (40HP).

RTD

El sensor de temperatura PT100 es un tipo específico de RTD. Un RTD (del inglés: Resistance Temperature Detector) es un detector de temperatura resistivo, es decir, un sensor de temperatura cuyo principio de medición es la variación de la resistencia de un conductor en función de su temperatura. Los sensores PT100 consisten en un alambre de platino encapsulado con una resistencia de 100 Ohm a 0°C (característica principal que da nombre al sensor). Existen sensores PT100 de dos, tres y cuatro hilos de conexión. La configuración de dos hilos es la más sencilla pero no es tan confiable como la de tres/cuatro hilos. En la figura 29 se observa la configuración acorde al número de hilos.

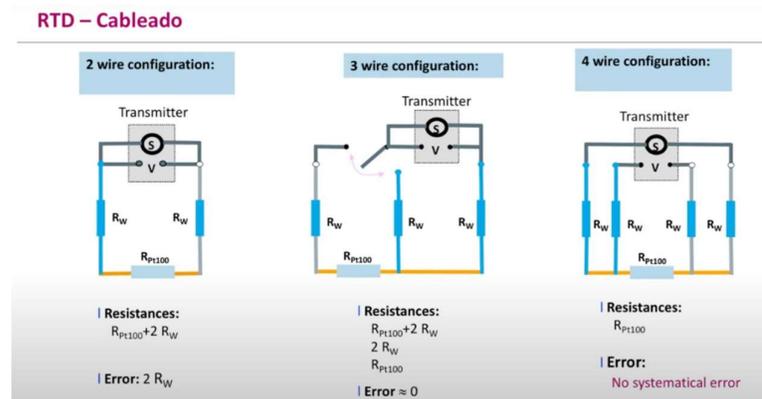


Figura 29. RTD -Cableado. Fuente: [32]

De los diversos sensores disponibles en el mercado se eligió el siguiente modelo de 3 hilos TOPINCN RTD PT100 por facilidad de uso y accesibilidad al producto.



Figura 30. TOPINCN RTD PT100. Fuente: [33]

Descripción:

Este sensor de temperatura Pt100, usa una resistencia de película fina, tiene un rendimiento estable y alta precisión.

Especificaciones:

- Tipo: RTD PT100 (membrana) Clase A.
- Temperatura de funcionamiento: 0 a 200 °C.
- Longitud de la sonda: 1.969 in.
- Diámetro: 0.236 in.
- Tamaño de la rosca: 0.5 in.
- Diámetro exterior nominal: 0.3 in.
- Material de la sonda: acero inoxidable.
- Alambre: alambre de cobre chapado en estaño.
- Longitud del cable: 6.6 ft.
- Peso: 3.53 oz (aprox.)
- Nota: 1/2" NPT

NPT (acrónimo del inglés National Pipe Thread, ‘rosca nacional de tuberías’), es una norma técnica estadounidense también conocida como American National Standard Pipe Thread que se aplica a la estandarización del roscado (paso de rosca) de las conexiones empleadas en los sistemas e instalaciones hidráulicas.

Transmisor de temperatura

Los transmisores de temperatura permiten conocer el valor de una temperatura medida como una señal analógica de 4–20 mA, se utilizan para evitar pérdidas de tensión o cuando un regulador o PLC no puede medir directamente la señal desde un sensor de resistencia (Termopar o PT100). Las funciones que cumple un transmisor de temperatura son aislar, amplificar, filtrar sonido, linealizar y convertir la señal de entrada a una señal estandarizada de control. La salida más común es la de corriente 4 – 20 mA, por ejemplo 4 mA puede representar 0 °C y 20 mA 100 °C [34].

Se eligió el siguiente modelo que sirve técnicamente para el proyecto por la accesibilidad al producto y temas económicos.

Uxcell Transmisor de sensor de temperatura PT100



Figura 31. Uxcell Temperature sensor transmitter. Fuente: [35]

Características:

- Rango de temperatura: -50 a 200 °C. Corriente de salida: 4-20 mA
- Fuente de alimentación: 24 V CC. Tamaño total: 1.7 x 0.9 in
- Material: plástico y metal. Color: azul

Sensor de flujo

Un medidor de flujo de aire es un dispositivo que mide el flujo de aire, es decir, la cantidad de aire que fluye a través de un tubo. No mide el volumen del aire que pasa a través del tubo, mide la masa del aire que fluye a través del dispositivo por unidad

de tiempo. Por lo tanto, los caudalímetros de aire son simplemente una aplicación de caudalímetros de masa para un medio especial. Normalmente, las medidas de flujo de aire en masa se expresan en unidades de kilogramos por segundo (kg/s).

Se eligió el siguiente modelo: MAF. (Mass Air Flow) 22204-0C020 (figura 32) por la factibilidad de obtener datos ya linealizados a partir de una calibración previa.



Figura 32. MAF 22204-0C20. Fuente: [36]

Celda de carga

Las celdas de carga son equipos destinados a medir el peso de objetos ú productos sólidos. Suministran una señal eléctrica que es directamente proporcional al peso del objeto. La fuerza que ejerce el peso del producto que queremos pesar, produce una deformación (inapreciable a la vista) en la celda de Carga. Como consecuencia de esa deformación se obtiene una variación de la señal eléctrica que está suministrando. Esta variación de señal (son mili-voltios: mV) es captada por el equipo electrónico correspondiente y traducida a su equivalente en gramos, Kilogramos ó Toneladas. La variación de señal eléctrica por la deformación se debe a una Galga Extensiométrica que lleva en su interior la celda de Carga. La Galga Extensiométrica se compone de una resistencia de cobre integrada en una base (normalmente de acero ó cerámica) que se deforma junto al cuerpo de la Célula de Carga. Al deformarse cambia su resistencia al paso de la corriente eléctrica (valor óhmico). Esta variación es detectada por el circuito eléctrico y se produce la variación de mV. El circuito eléctrico que mide la variación de resistencia es el “ Puente de Wheastone “ [37]

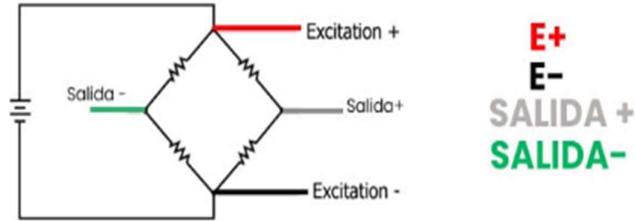


Figura 33. Uxcell Temperature sensor transmitter. **Fuente:**[38]

¿Qué es el puente Wheatstone?

Un puente de Wheatstone es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. La Celda de Carga y el Amplificador son dispositivos que trabajan en conjunto para poder medir el peso o la fuerza externa, ya que la celda es un transductor que convierte el desplazamiento o deformación en señales eléctricas en milivoltios por lo cual se requiere el uso del Amplificador para poder tener la información digital y procesarla. Para el proyecto se eligió la siguiente celda de carga tipo S debido a sus características:



Figura 34. CALT DYLY103 100KG Pull Pressure Compression and Tension Force S Beam Load Cell Sensor. **Fuente:** [39]

Características:

- Se pueden utilizar en Tensión y compresión
- Alta precisión con buena estabilidad
- Peso máx 100kg.

Caja sumadora

Al conectar 4 celdas de carga, la capacidad máxima del sistema en este caso será de 400kg. Para conectar más de una celda y absorber todo el peso de la carga con cuatro celdas de carga se colocan en paralelo (tanto la alimentación como la salida de las mismas). De esta forma, todas reciben la misma alimentación y cuando se “desequilibran” por el efecto del peso del producto, cada una suministra la misma señal de mV. Como están en paralelo, la resultante de todas juntas es dicha señal de mV. Hay que tener en cuenta que todas las celdas de carga que se pongan en paralelo deben de ser del mismo rango. La conexión de la caja sumadora usada se cita en la figura 35.

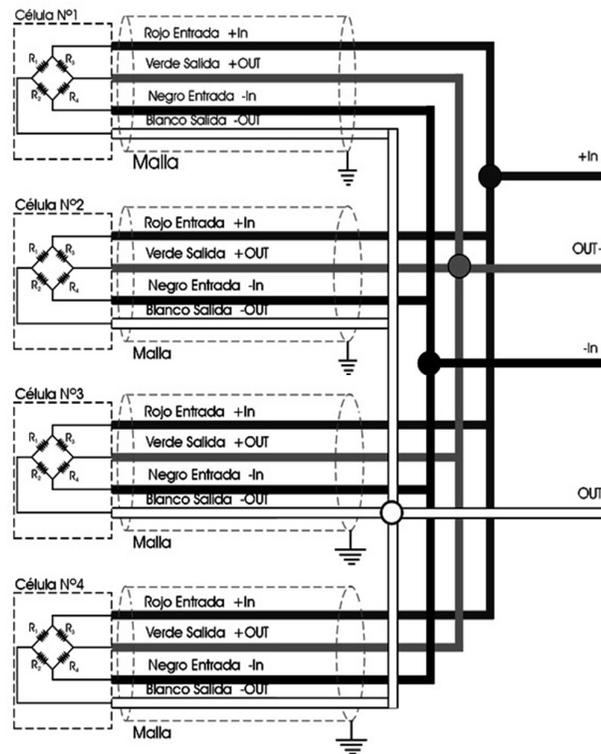


Figura 35. Esquema conexión caja sumadora. **Fuente:** [37]

Se eligió el siguiente modelo por temas económicos y accesibilidad al producto.



Figura 36. Uxcell Temperature sensor transmitter. **Fuente:**[40]

Amplificador de celda de carga

El amplificador de carga es un convertidor de carga que convierte señales de carga muy baja, como se generan, por ejemplo, mediante sensores piezoeléctricos, en señales de voltaje proporcional (voltios). Un amplificador de carga convierte la salida de carga negativa del sensor piezoeléctrico en proporción a la presión aplicada en un voltaje positivo y proporcional. El amplificador de carga es un acondicionador de señal y unidad de visualización de tensión.

Para el proyecto se eligió el siguiente amplificador para que cumpla la función de amplificar y visualizar el peso en su display, esto con el fin de tener dos valores de peso para referenciar con el peso que será adquirido y monitoreado en la PC.



Figura 37. Load Cell Amplifier with Digit Display, Output 4-20mA/0-10V/RS485. **Fuente:**[41]

El dispositivo proporciona alimentación y recibe una señal en milivoltios de las celdas de carga. Un procedimiento de calibración rápida proporciona una

visualización y salida precisas de una señal amplificada de 0-10 V o 4-20 mA seleccionable por el usuario para su uso con pantallas, controladores de tensión y / o PLC.

La pantalla digital muestra la tensión actual de la de la película o banda a través de la pantalla LED.

Características:

- Amplificador de celda de carga con pantalla de dígitos, señal de salida: 4-20 mA
- Las lecturas de salida del controlador de celda de carga digital se pueden configurar kg, g, ton y newtons
- La pantalla de celda de carga se puede utilizar como un indicador de celda de carga para leer los valores de peso, su precisión es de $\pm 0,2\%$ FS

Tarjeta de adquisición de datos

Para poder adquirir las señales y poderlas visualizar en la interfaz gráfica (Labview) es necesario una tarjeta de adquisición de datos. El modelo NI USB 6009 está compuesta de tres elementos, el elemento principal de la DAQ (de aquí en adelante la DAQ se refiere a la tarjeta NI USB-6009) y dos grupos de borneras, tal como se observa en la figura 38.

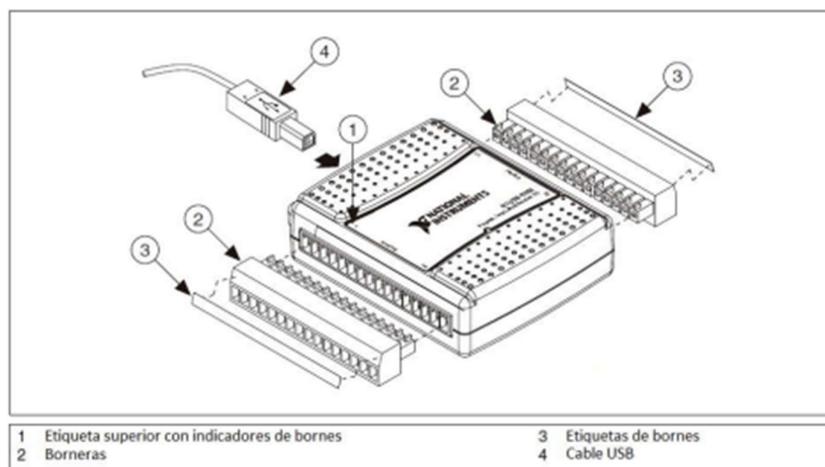


Figura 38. Tarjeta NI USB-6009. Fuente:[42]

Un grupo de borneras corresponden a las entradas y salidas analógicas y el grupo opuesto corresponden a las entradas y salidas digitales, entrada de trigger o contador, +5 V y tierra, como se indica en la figura 39.

Entradas/salidas analógicas del borne 1 al 16															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
GND	+AI0 -	GND	+AI1 -	GND	+AI2 -	GND	+AI3 -	GND	+AI3 -	GND	AO0	AO1	GND		
GND	AI0	AI4	GND	AI1	AI5	GND	AI2	AI6	GND	AI3	AI7	GND	AO0	AO1	GND

Entradas/salidas digitales, +5 V y tierra del borne 17 al 32															
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
GND	+5V	+2.5V	PF10	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0	P0.7	P0.6	P0.5	P0.4	P0.3	P0.2	P0.1	P0.0

Figura 39. Disposición de bornes Tarjeta NI USB-6009. **Fuente:**[42]

Cámara de secado:

Se eligieron tubos cuadrados de 1pulgada, acero inoxidable AISI 304
 Lámina de acero inoxidable perforada: 0.8mmx1000mmx2000mm

Aislante:

Por las características aisladores se optó de entre la gran variedad de aislantes elegir la capa de lana de roca de espesor de 3cm.

Por motivos económicos y técnicos se selecciona lana de roca.

Quemador:

En base a la potencia del calor útil obtenida, se eligió el quemador (GLP) KOMAN de antorcha de 24000BTU, ya que cumple con la potencia requerida y es de fácil acceso además de económico.

Blower Eléctrico:

En base al flujo volumétrico calculado se necesita un blower con una capacidad mínima de 38 CFM; la universidad me proveyó del siguiente blower que se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Características motor Blower eléctrico

SIEMENS	3-MOTOR 1LA7 090-4YA60	IECO
IMB 3 IP 55	2.0 HP BG090L	Ta-15/40 °C
AISLF 60 Hz	220 YV /440 Y V	7.0/3.5 A
P.S 1.10 S1	Cos 0.73	1645 rpm
11.6 Kg IEC34	Rod 6205/600 2ZC3	1000 msnm
CFM	103	

Software de adquisición de datos

El HMI realizado para el proceso se muestra en la figura 40.

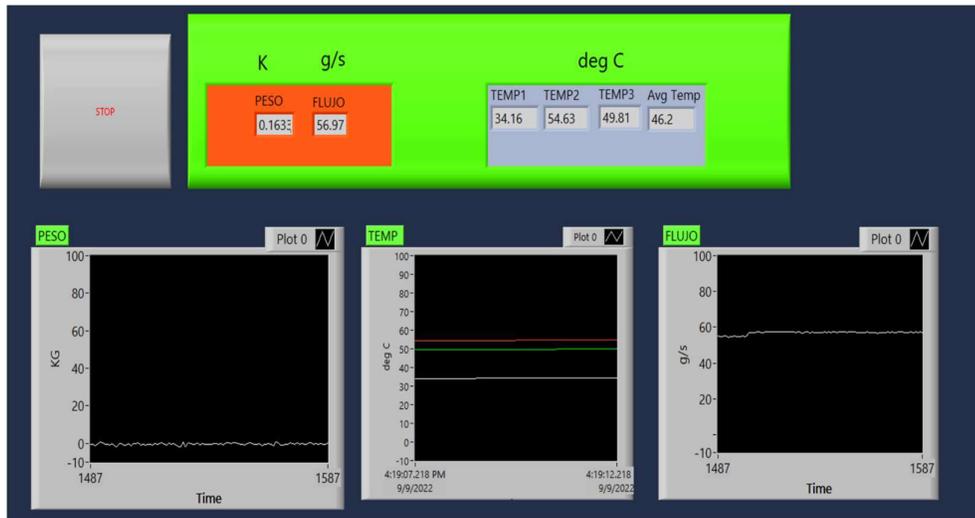


Figura 40. Disposición de bornes Tarjeta NI USB-6009.

EL HMI recibe datos que son visualizados y envía el dato de la variable a controlar (temperatura) hacia el variador.

La visualización se la realiza de forma gráfica y numérica, lo que sirve para el monitoreo constante de los parámetros involucrados en el proceso de secado, así como también de un indicador numérico que muestra los valores que van a ser enviados al variador de frecuencia para el respectivo control PID. La adquisición

de datos se la realizó con la tarjeta NI DAQ 6009, que permite una fácil configuración para el ingreso de señales y control a través del DAQ Assistant modul, como se observa en la figura 41.

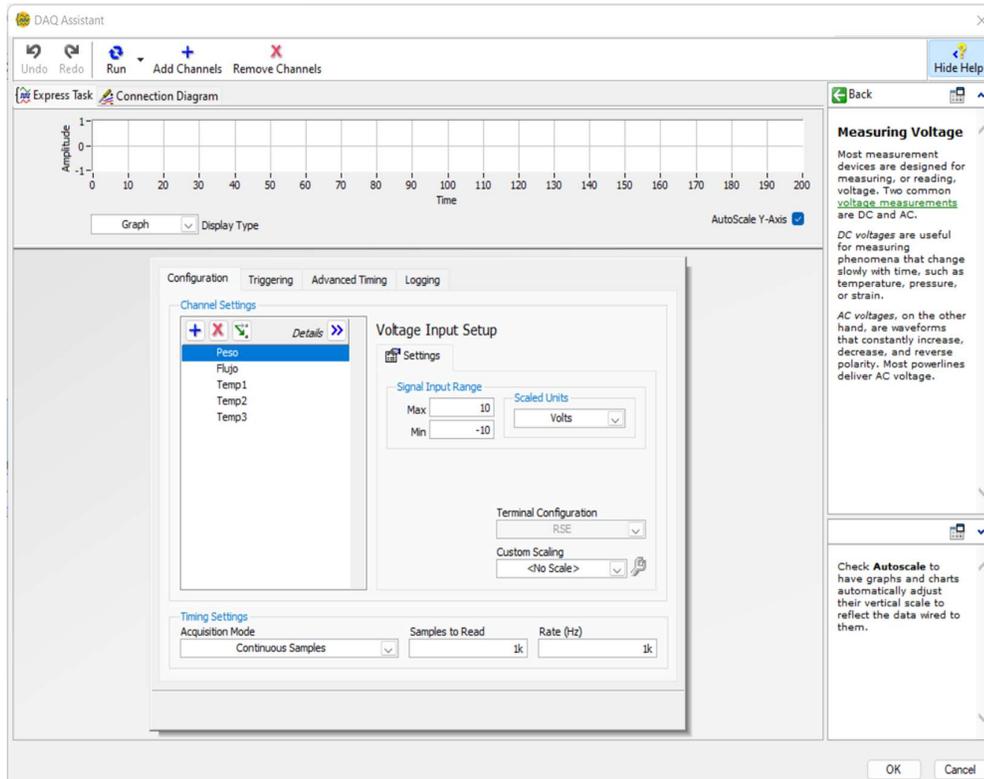


Figura 41. Set up pines de entrada de señales.

El mismo procedimiento se lo realizó para configurar la salida de señal.

Para el proceso se adquieren las señales (NI DAQ 6009), se configura la señal que está ingresando en cada pin de la tarjeta usando el DAQ assistant, luego usé un filtrador de señal para obtener una mejor calidad de señal, para posteriormente con las señales filtradas se empiezan a realizar los respectivos cálculos matemáticos de acuerdo a las calibraciones o fórmulas matemáticas para obtener finalmente un valor representado en una unidad de medida de parámetros estándares.

Las ecuaciones ingresadas acorde a la curva característica de cada sensor son las siguientes:

Sensor de temperatura:

La escala de este sensor es 0-200 deg C, y su salida de 1-5 v, su ecuación de respuesta es:

$$y = 50x - 50$$

X representa el valor de voltaje del sensor y Y representa la temperatura.

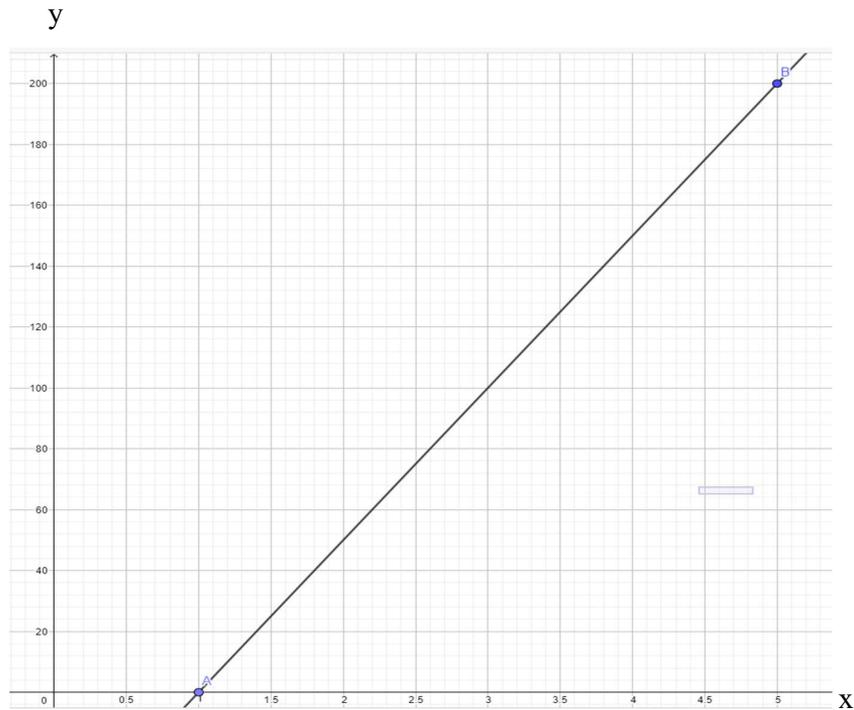


Figura 42. Gráfica de linealización

Los componentes xy de los puntos A = (1,0) y B= (5,200) representan la linealización de la variable de voltaje a temperatura.

Sensor de peso.

El transmisor recibe la señal proveniente del sumador y este la amplifica proporcionando una salida linealizada de 4 -20mA. Los pasos a seguir internamente en el amplificador transmisor son:

Ingresa el peso máximo total que recibirá el sensor, en este caso 400KG, ya que son 4 sensores de 100kg cada uno. Se ingresa manualmente a través del HMI del amplificador.

Calibración, se coloca el valor de una carga conocida, por temas ergonómicos y de disponibilidad se colocaron 105.6kg como valor high y sin carga como valor de

Low. El valor registrado con el multímetro fue de 2.157, que es acorde al valor esperado.

A partir de este punto se entiende que el transmisor enviará 1v en 0Kg y 5v en 400kg, por lo cual su ecuación es la siguiente.

$$y = 100x - 100$$

En la cual el valor de Y representa el peso y la variable X representa el voltaje.

Sensor de flujo

Para el sensor de flujo se obtuvo una calibración en g/s obtenida en trabajos previos a partir de usar un scanner de camioneta BTz50, medir físicamente la velocidad de salida en el blower con un anemómetro y luego relacionar esas mediciones con los valores de voltaje obtenidos. La calibración se muestra en la figura 43.

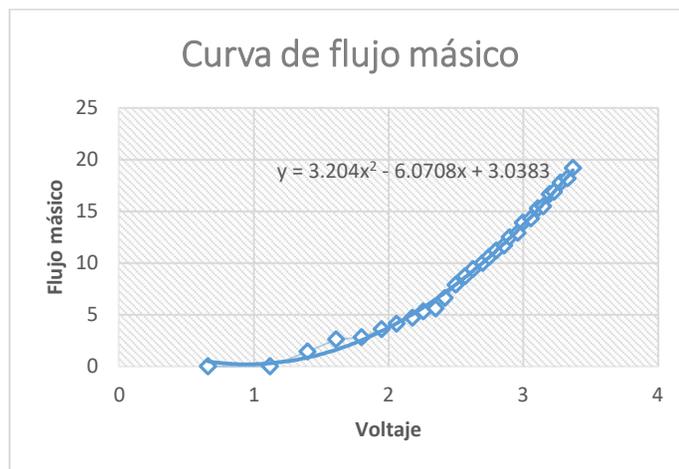


Figura 43. Gráfica de calibración [43]

La ecuación a ingresar es la siguiente:

$$y = 3.204x^2 - 6.0708x + 3.0383$$

Y representa el flujo y X representa el voltaje.

2.9 Sistema de control

El objetivo de un sistema de control es obtener una respuesta deseada a un sistema aplicado. Esto puede darse con un sistema de control en lazo abierto o un sistema

de control en lazo cerrado. Un sistema de control en lazo abierto determina la señal de entrada al proceso basado solo con la señal de referencia.



Figura 44. Sistema de control en lazo abierto. **Fuente:**[44]

Un sistema de control en lazo cerrado determina la señal de entrada al proceso usando la señal de referencia y la señal de salida, esto se logra restando las dos señales, la de referencia (r) y la salida de la planta (y), esto se llama error (e). Además, el valor de salida de la planta, se mantiene muy cerca al valor deseado por el usuario (r), sin importar, la variación del proceso dinámico de la planta.



Figura 45. Sistema de control en lazo cerrado. **Fuente:**[44]

Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

Este tipo de controlador consiste en aplicar la suma de tres controles: un control proporcional, un control integral y un control derivativo.

- El control proporcional es un control muy sencillo porque este solo incrementa en un factor constante, la variable de control cuando el error es grande. Su ganancia es K_p y se encuentra en la ecuación (5.2), su función de transferencia se encuentra en la ecuación (5.3).

$$u(t) = Kp e(t) = Kp(r(t) - y(t)) \quad (5.2)$$

$$C(s) = Kp \quad (5.3)$$

- El control integral es proporcional a la integración del error, ecuación (5.4), donde K_i es la ganancia integral. Esta ganancia está relacionada con los valores pasados del control del error. La acción integral es capaz de corregir el error en estado estable. Su función de transferencia es la ecuación (5.5).

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\zeta) d\zeta \quad (5.4)$$

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (5.5)$$

- El control derivativo está basado en el valor corriente del control del error, este control a diferencia del integral, predice el valor futuro del control del error, K_d es la ganancia derivativa. Su expresión se encuentra en la ecuación (5.6) y su función de transferencia en la ecuación (5.7).

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.6)$$

$$C(s) = K_d s \quad (5.7)$$

En la Figura 46, se muestra el esquema básico de un sistema de control PID, con el controlador y su sistema que es controlado.



Figura 46. Sistema de control PID. Fuente:[44]

Para encontrar las constantes del controlador PID, antes mencionado, se debe tomar en cuenta la respuesta del sistema. La respuesta a una entrada paso unitario posee cinco parámetros:

- Tiempo de retardo, t_d , es el tiempo requerido para que alcance la primera vez la mitad del valor final.
- Tiempo de subida, t_r , es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90% de su valor final.
- Tiempo pico, t_p , es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobrelogación.
- Sobreelongación, M_p , es el máximo valor del pico de la curva de respuesta.
- Tiempo de asentamiento, t_s , es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final.

En la Figura 47, se muestra la entrada y la respuesta al sistema, especificando los cinco parámetros.

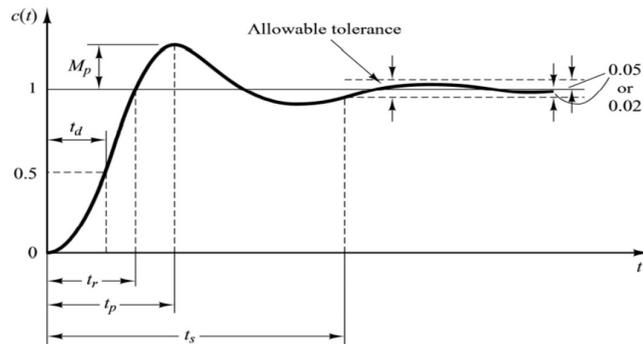


Figura 47. Curva de respuesta a escalón unitario. **Fuente:**[44]

2.10 Sintonización de controladores

El proceso de sintonización de controladores, consiste en ajustar los parámetros del controlador para producir una respuesta en lazo cerrado deseada. La sintonización de un controlador proporcional integral derivativo PID, presenta algunas

dificultades puesto que son tres los parámetros que se deben ajustar; la ganancia K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d . El ajuste de los parámetros del controlador se puede llevar a cabo para satisfacer un juego de especificaciones de diseño, éste es quizá uno de los procedimientos que mayor dificultad, puesto que son tres los parámetros a ajustar y necesariamente sería un procedimiento de prueba y error. Los resultados que se obtienen al aplicar estos procedimientos, son los parámetros óptimos, sin embargo, sólo dan una indicación de los parámetros iniciales (base) y a partir de éstos es todavía necesario hacer un reajuste de los mismos en caso de no obtener la respuesta de lazo cerrado deseada.

Se mencionan los procedimientos de uso frecuente:

- Método de oscilaciones sostenidas
- Método de oscilaciones amortiguadas
- Método de la curva de reacción
- Ziegler-Nichols
- Cohen-Coon
- Método Lambda
- Criterios de desempeño

De entre la gran variedad de métodos de sintonización en el presente trabajo se usó el método Lambda para el cual se detalla su teoría a continuación:

2.10.1 Método Lambda

La sintonía Lambda es un caso particular de asignación de polos que es usado comúnmente en la industria de procesos.

Requerimientos: modelo de primer orden, estable o integral, con tiempo muerto.

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT e^{-sL}}$$

Donde:

K_p es la ganancia estática

T es la constante de tiempo (también denominada retraso)

L es el retardo de tiempo

Los términos equivalentes de las dos ecuaciones se muestran a continuación en la figura 48.

Kp	=	Kp
T	=	Tp1
L	=	Td

Figura 48. Equivalencias **Fuente:** [45]

Como parte del proceso experimental se procede a calcular valores de sintonía para un control PI y PID haciendo uso de las siguientes ecuaciones que se muestran en la figura 49.

	PI		PID	
	Agresivo	Robusto	Agresivo	Robusto
K	$K = \frac{1}{Kp} \frac{T}{L+T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{T}{L+3T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{L/2+T}{L/2+T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{L/2+T}{L/2+3T}$
Ti	$Ti = T$	$Ti = T$	$Ti = T + L/2$	$Ti = T + L/2$
Td	---	---	$Td = \frac{TL}{L+2T}$	$Td = \frac{TL}{L+2T}$

Figura 49. Ecuaciones Sintonización Lambda. **Fuente:** [45]

2.11 Procedimiento para la Sintonía

Para realizar el tuning o sintonía del proceso en general se deben realizar 3 etapas principales que son: adquirir señales, modelar el proceso con la data obtenida, sintonizar el proceso.

Para adquirir señales se debe realizar:

- Acondicionamiento y funcionamiento de la planta
- Acondicionamiento y adquisición de datos

Luego se procede a realizar:

- Procesamiento y modelamiento del proceso

Por último, se realiza:

- Validación del modelo

Para eso se lo realiza con software especializado.

En la figura 50 se observa el proceso para realizar la sintonía.

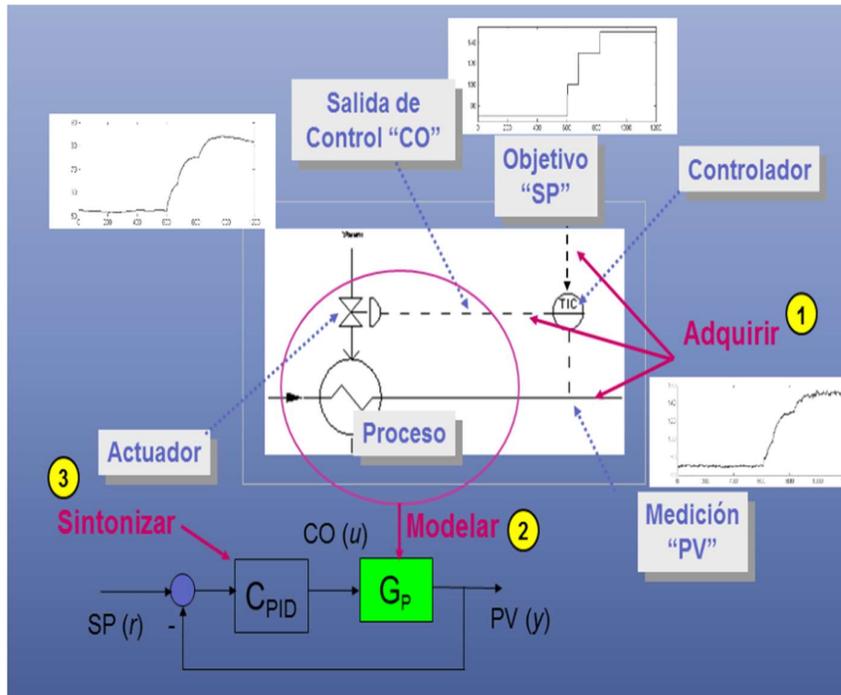


Figura 50. Procedimiento para la Sintonía. Fuente: [46]

2.12 Tuning proceso

Para dar un aporte mayor al presente trabajo se realizó dos procedimientos para encontrar el modelo del proceso, el primer procedimiento con data que provenía solo un pequeño impulso generado y observar la respuesta del sistema en lazo abierto. Se modeló manualmente y con software para corroborar la función de transferencia obtenida.

El segundo procedimiento con varios impulsos generados en el CV y esperar la respuesta del PV en lazo abierto, el cálculo se lo realizó con ayuda de software.

Manual:

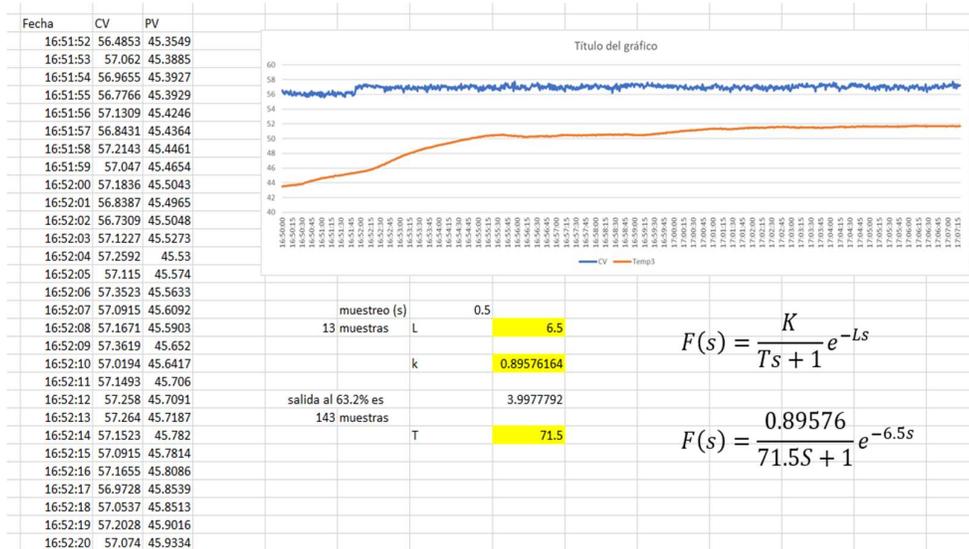


Figura 51. Cálculo manual

Para encontrar las constantes se procedió de la siguiente manera:

L: para encontrar este valor se cuenta los valores donde se refleje el cambio de PV en respuesta al impulso de la variable CV.

K: para encontrar este valor se divide el valor de PV sobre CV en el punto donde haya estabilidad entre sus valores, en este caso se toma el último valor generado de las variables.

T: este valor se encuentra multiplicando el valor del número de muestras que represente el 63.2% de la data por el muestreo.

De esta manera se obtuvieron los valores de la función de transferencia de forma manual los cuales se van a comparar posteriormente con la data obtenida mediante software para hacer la respetiva comparación.

Software:

Se utilizó Matlab para el análisis mediante software, para lo cual se desarrolló el procedimiento siguiente:

Ingresar la data obtenida (CV y PV) en el front de Matlab como se muestra en la figura 52 y 53.

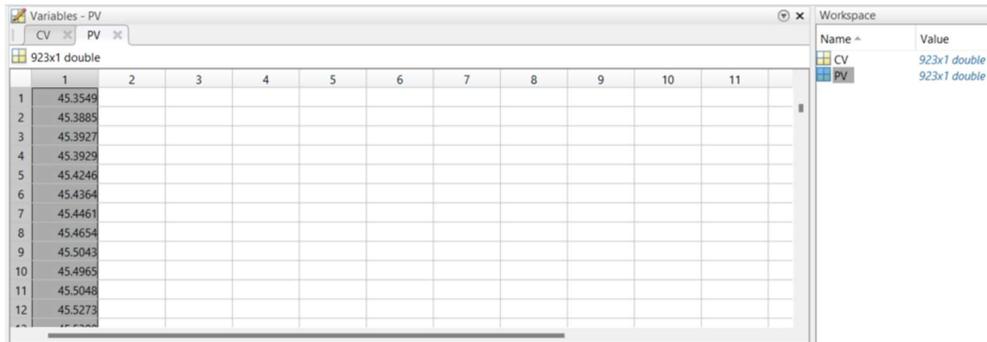


Figura 52. Visualización data importada.

Luego se verifica gráficamente la correspondencia de la data importada como se muestra en la figura 53.

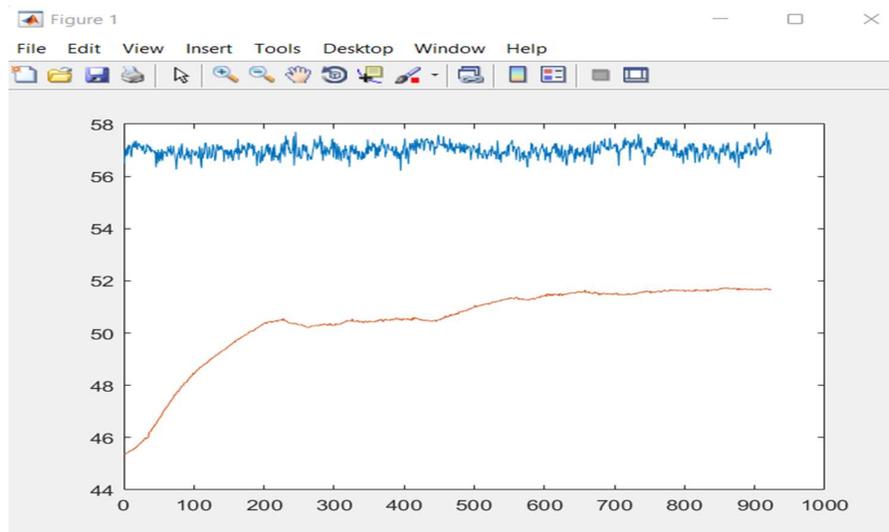


Figura 53. Visualización data importada.

Posterior a esto se ingresa al asistente para crear modelos matemáticos (systemIdentification) de Matlab.

Se toman las siguientes consideraciones:

La data obtenida en nuestro caso en el dominio del tiempo.

Se verifica la data ingresada, si es necesario se aplica un filtro a la data previo al ingreso al aplicativo, en la figura 54 se muestra la data ingresada.

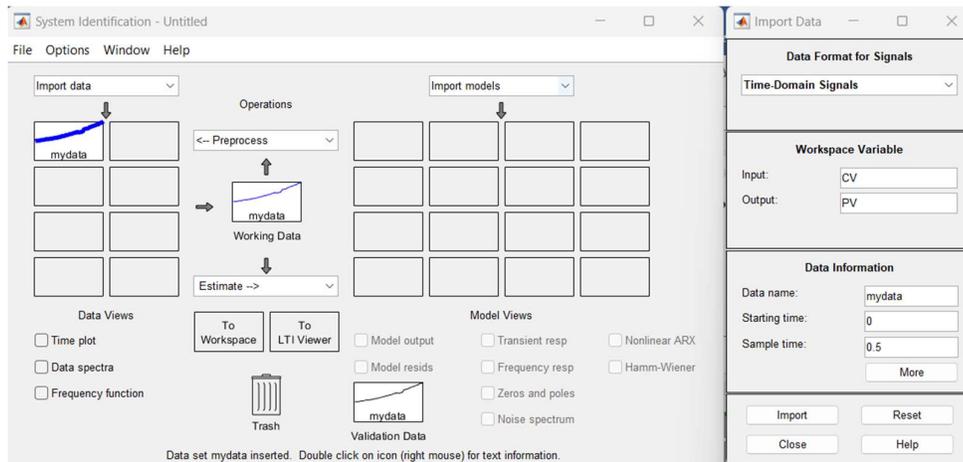


Figura 54. Visualización data importada.

Luego se realiza la estimación de los modelos en el box (estimate), se eligen los modelos y se visualizan las respuestas (Model output) como se observa en la figura 55.

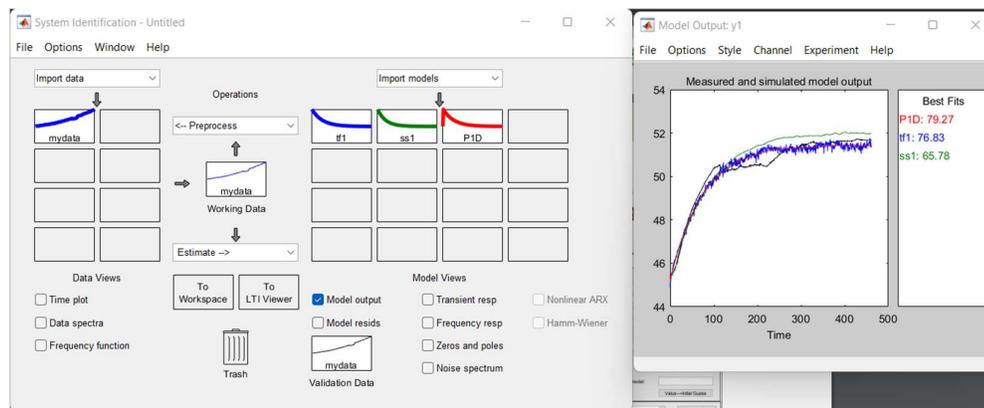


Figura 55. Estimación Modelo Proceso.

Para que el modelo este acorde a la realidad el valor de estimación debe ser mayor a 75%. En este caso se elige la estimación de Process models con un valor del 79.27%. En la figura 56 se observan las constantes del modelo obtenido.

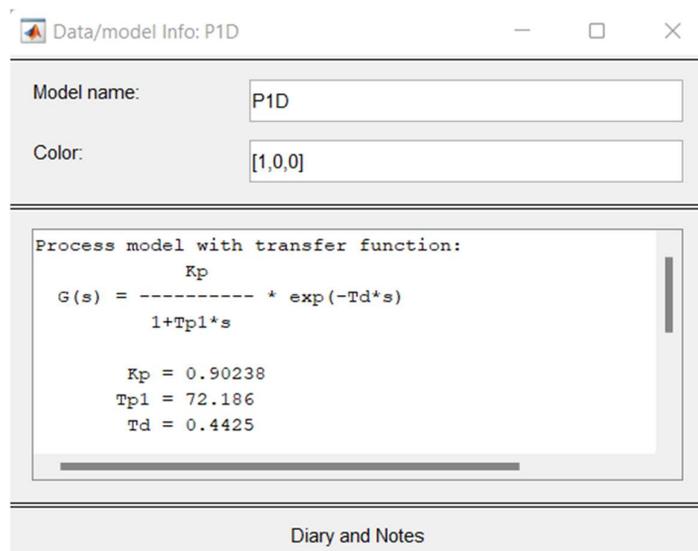


Figura 56. Salida del Modelo del Proceso.

Con estos valores se realizó una comparación de los datos obtenidos con los siguientes resultados que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación cálculos Manual Vs Software.

L	6.5	Td	0.4425
K	0.89576	K	0.90238
T	71.5	 Tp	72.186

Se observa la similitud en la función de transferencia obtenida, tanto de forma manual como por medio de software. La diferencia de valor del tiempo muerto se debe a que es apreciativo el momento en que se determina que el PV empiece a reaccionar al impulso generado por el CV.

Segundo modelamiento

Para realizar el segundo cálculo para modelar el sistema se realizó un preprocesamiento de la señal como se muestra en la figura 58.

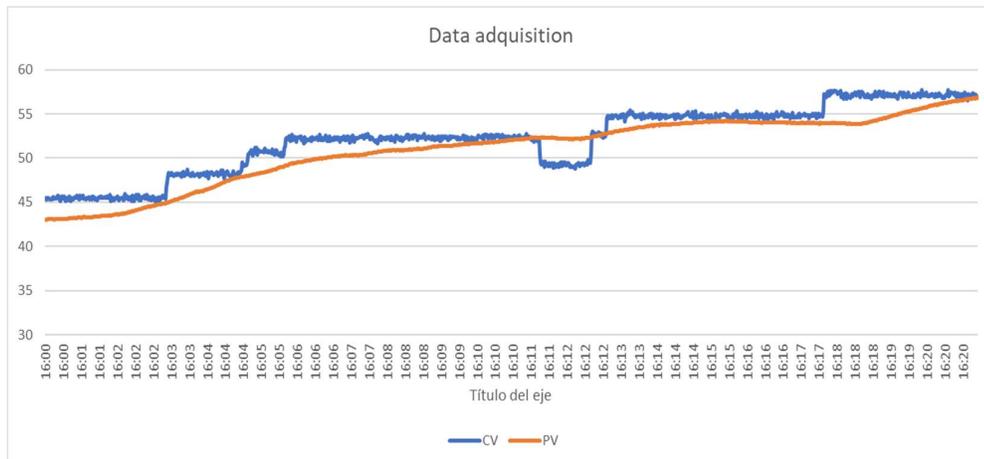


Figura 57. Data original.

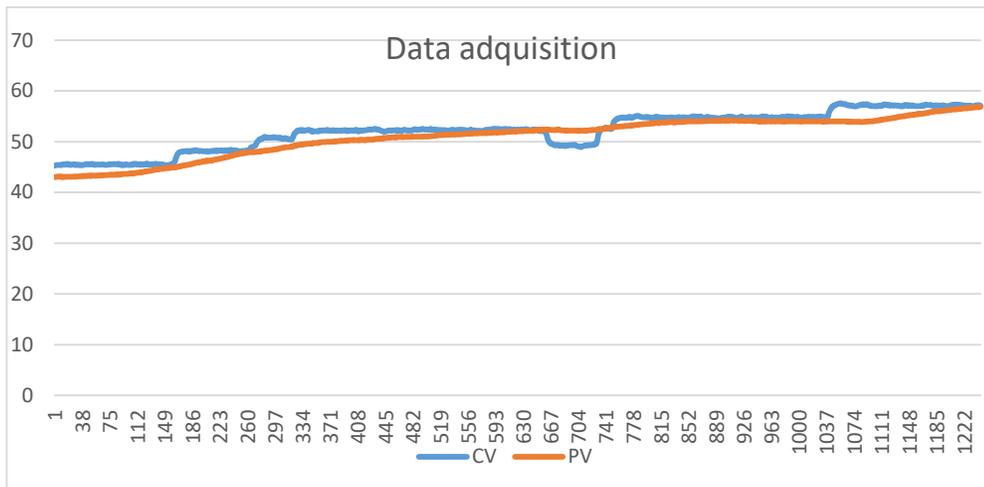


Figura 58. Data filtrada.

El preprocesamiento de datos se realizó mediante el siguiente filtro[47]:

$$S(t) = \begin{cases} Y(0) & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) & t > 0 \end{cases}$$

Donde:

El coeficiente α es un factor de suavizado entre 0 y 1.

$Y(t)$ es el valor de la señal a filtrar en un periodo de tiempo t .

$S(t)$ es el valor de la EMA en cualquier periodo de tiempo t .

$S(t - 1)$ es el valor de la EMA en el periodo de tiempo $t-1$ (pasado)

Con la data filtrada se realizó el procedimiento para modelar el sistema en software siguiendo los mismos pasos ya mencionados para el modelamiento.

En la figura 59 se observan los datos ingresados a las variables CV y PV en Matlab.

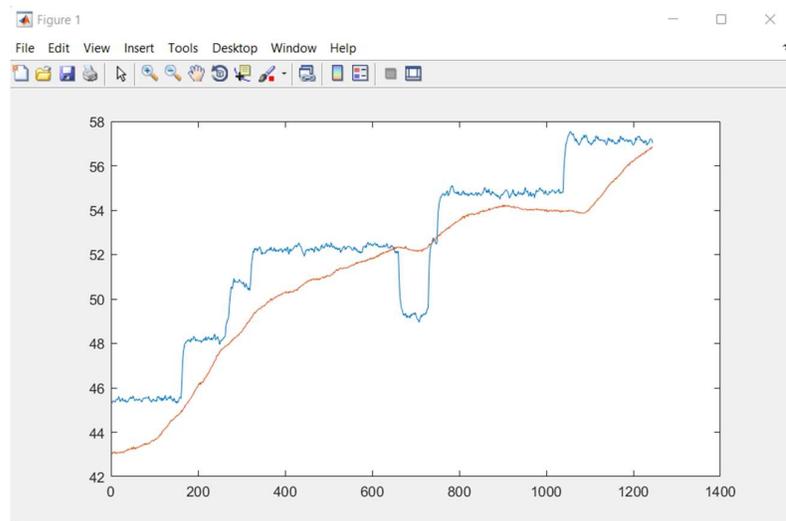


Figura 59. Visualización data importada.

En la figura 60 se observa el análisis realizado de estimación de los siguientes modelos: Transfer Function Models (tf1), State Space Models (ss1), Process Models (P1D) y la estimación de cada uno de estos.

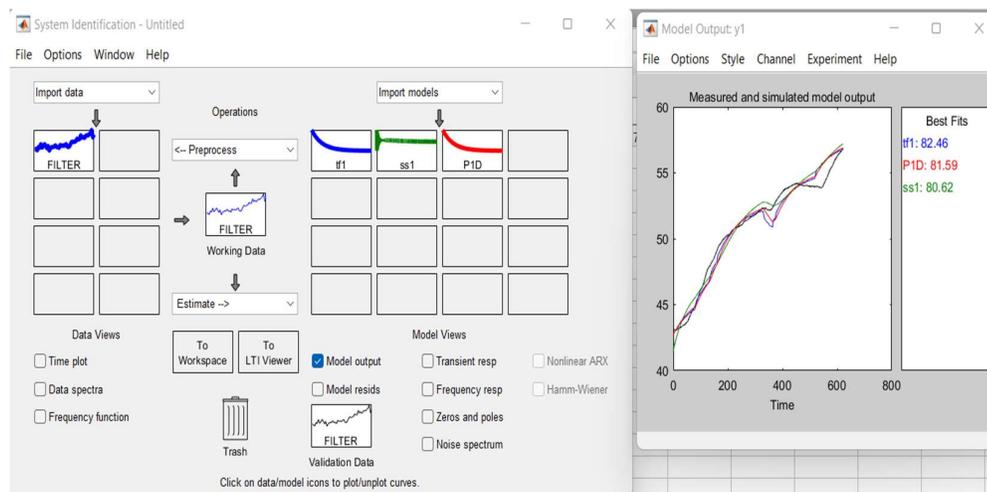


Figura 60. Estimación -Modelo Proceso.

Todos los modelos tienen una estimación mayor al 75%, por lo que se puede elegir cualquiera de estos.

En la figura 61 se observa el modelo obtenido en la estimación Transfer Function Models.

```
From input "u1" to output "y1":  
0.178 s + 0.01351  
-----  
s + 0.01346  
Name: tf1
```

Figura 61. Función de transferencia obtenida del proceso (a).

En la figura 62 se observa el modelo obtenido en la estimación Process Models.

```
PID =  
Process model with transfer function:  
Kp  
G(s) = ----- * exp(-Td*s)  
1+Tp1*s  
  
Kp = 1.0076 +/- 0.00097943  
Tp1 = 70.421 +/- 2.2603  
Td = 0 +/- 0.84075
```

Figura 62. Función de transferencia obtenida del proceso (b).

Una vez obtenido el modelo del sistema se realiza la sintonización para luego realizar la simulación del mismo.

Para la sintonización del PID se utilizó la metodología Lambda aplicando las ecuaciones ya mencionadas en la figura 49.

Las constantes obtenidas mediante la metodología Lambda se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 .Constantes de sintonización obtenidas

PID AGRESIVO				PID ROBUSTO	
K	0.99245732				0.33213186
Ti	70.841	ki	0.01411612	ki	0.01411612
Td	0.41750992	kd	2.39515269	Kd	2.39515269

2.13 Simulación del controlador usando simulink

Se ingresó la función de transferencia del modelo como se muestra en la figura 63 sin el simulador PID y con el simulador PID a fin de graficar el comportamiento de las respectivas respuestas.

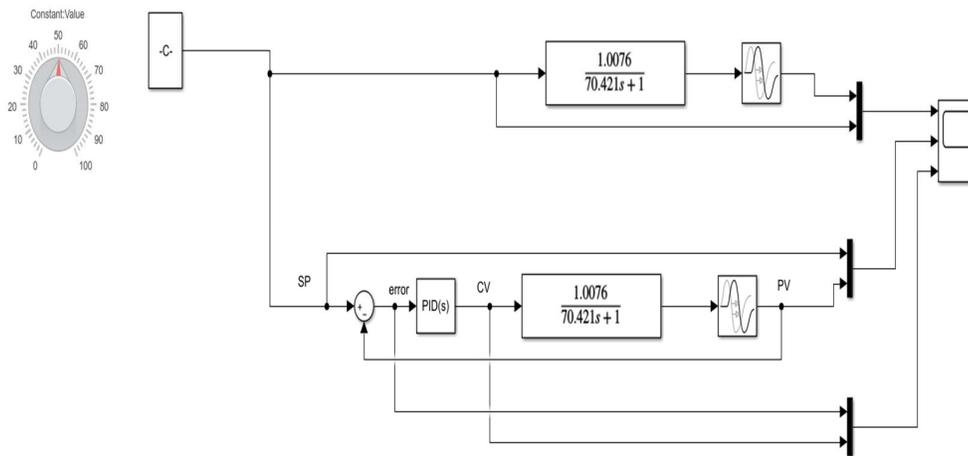


Figura 63 Modelo del proceso con y sin PID

En la figura 64 se observan las constantes de sintonización del PID ingresadas..

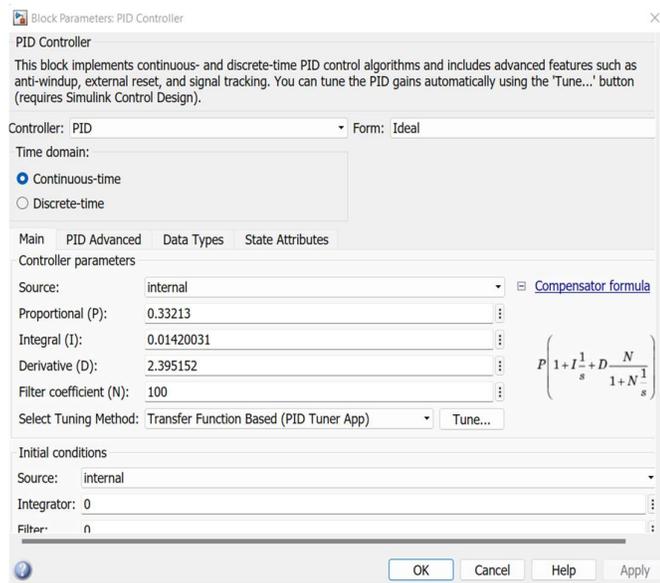


Figura 64. Ingreso de constantes en el PID.

En la figura 65 se observan las respuestas que se detallan a continuación:

El primer recuadro es la respuesta de la variable CV y PV sin el PID.

El segundo recuadro muestra la respuesta de mi PV ante los impulsos del CV y usando el simulador PID, en la que se puede observar que la respuesta de mi PV es la requerida ante las perturbaciones que se generan en la variable CV, por lo que se concluye que la sintonización del proceso es correcta.

El tercer recuadro es la salida del error y la variable CV

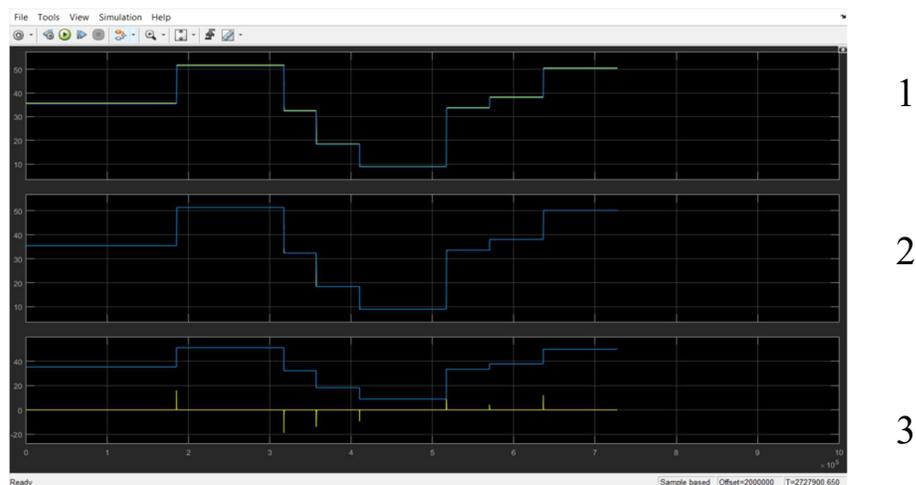


Figura 65. Resultado sintonización del proceso.

Experimentalmente se ingresaron los valores de las constantes del PID al variador de frecuencia, el cual fue configurado para trabajar con su control interno de PID.

2.14 Conclusiones del capítulo II

- Se verificó toda la teoría relacionada con el proceso de cacao, así como los procedimientos para realizar el tuning del control a implementar.
- Se revisaron todas las ecuaciones necesarias a utilizar en el proceso del diseño de la secadora rectangular.
- Se seleccionaron todos los dispositivos electrónicos a usar en el proceso de control de secado de cacao.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS RELACIONADOS CON EL SECADO DE CACAO EN EQUIPO RECTANGULAR.

3.1 Introducción

El presente capítulo contiene todos los análisis realizados para el diseño de la secadora rectangular.

El **objetivo** del presente capítulo es: mostrar los resultados obtenidos de las diferentes ecuaciones, así como de los diferentes procedimientos realizados para el control de la secadora rectangular.

En la tabla 11 se muestra el comportamiento del tiempo teórico de secado calculado a diferentes velocidades de aire.

Tabla 11. Valores de tiempo de secado a velocidad constante a máxima carga (100 kg)

V (m/s)	G (kg/hm ²)	hc (KJ/m ² h°C)	Rc (Kg/hm ²)	T (h)
0.5	1502.6	25.6	0.23	27.0
0.75	2253.9	35.4	0.32	19.5
1	3005.3	44.5	0.40	15.5
1.25	3756.6	53.2	0.48	13.0
1.5	4507.9	61.6	0.56	11.2
1.75	5259.2	69.7	0.63	9.9
2	6010.5	77.5	0.70	8.9
2.25	6761.8	85.2	0.77	8.1
2.5	7513.1	92.7	0.84	7.5
2.75	8264.5	100.0	0.91	6.9
3	9015.8	107.2	0.97	6.4

Según la literatura la máxima velocidad de secado es 3m/s.

En la figura 66 se observa como varía el tiempo para secar los granos de cacao en relación a la velocidad del aire, a mayor velocidad menor tiempo de secado.

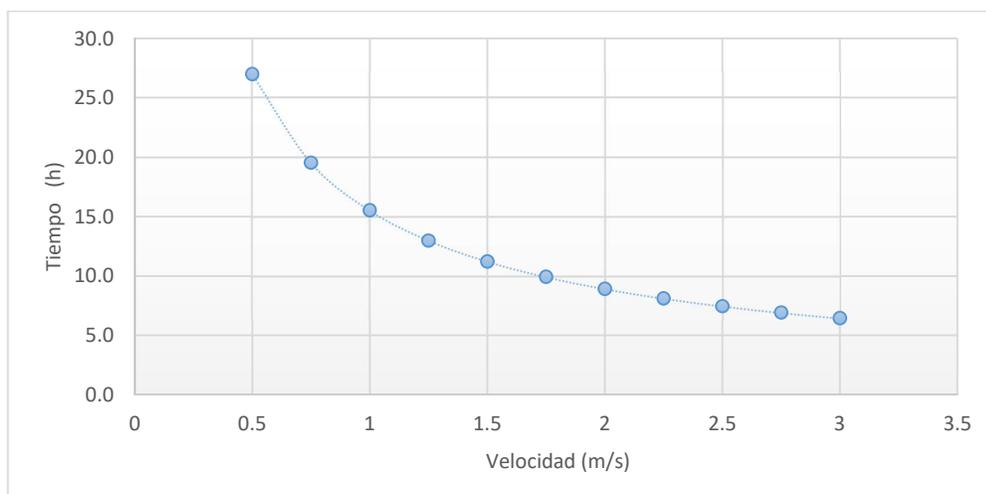


Figura 66. Tiempo secado vs Velocidad de secado

Tabla 12. Resultado de los cálculos para el secado de cacao con un peso de 57kg.

V (m/s)	G (kg/hm ²)	h _c (KJ/m ² h°C)	R _c (Kg/hm ²)	T (h)
3	9015.8	107.2	1.12	3.2

Tabla 13. Resultado diseño cámara de secado.

Ecuación N°.	Resultado a máxima capacidad del secador (100kg)	Resultado con 57 kg de cacao
2.1	V = 0.129 m ³	V = 0.0735 m ³
2.2	m = 100 kg	m = 57 kg
2.3	m _s = 40 kg	m _s = 22.8 kg
2.4	m _{7%} = 43.01 kg	m _{7%} = 24.52 kg
2.5	P _{sec} = 0.835 kg/m ³	P _{sec} = 0.835 kg/m ³
2.6	G = 9015.78 kg/m ²	G = 9015.78 kg/m ²
2.7	h _{conv} = 107.2KJ/m ² .h	h _{conv} = 107.2KJ /m ² .h
2.8	R _c = 1.12kg/m ² * s	R _c = 0.90kg/m ² * s
2.9	t _c = 6.4 h	t _c = 3.2 h

Tabla 14. Balance de energía calorífica.

Ecuación N°.	Resultado
3.0	$Q_c = 7199.54 \text{ kJ}$
3.1	$Q_{H_2O} = 7868.07 \text{ kJ}$
3.2	$Q_L = 403545.6 \text{ kJ}$
3.3	$m_{\text{base cam}} = 5.68 \text{ kg}$
3.4	$Q_{\text{plancha}} = 69.12 \text{ kJ}$
3.5	$Q_{\text{util}} = 418682.3 \text{ kJ}$
3.6	$\dot{Q}_{\text{util}} = 7.03 \text{ kW}$

Tabla 15. Balance de Pérdida de calor por convección en el exterior

Ecuación N°.	Resultado
3.7	$R_e = 52844.05$
3.8	$Nu = 143.99$
3.9	$h_{\text{conv}} = 13.56 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
4.0	$Q = 204.8 \text{ W}$
4.1	$R_T = 6.15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
4.2	$Q = 8.13 \text{ W}$

Tabla 16. Resultados para selección del ventilador

Ecuación N°.	Resultado
4.3	$\dot{m}_{\text{cacao-humedo}} = 0.0049998 \text{ kg/s}$
4.4	$\dot{m}_{\text{sin}} = 0.00199992 \text{ kg/s}$
4.5	$\dot{m}_\theta = 0.0030 \text{ kg/s}$
4.6	$\dot{m}_{\text{cin}} = 0.0030 \text{ kg/s}$
4.7	$\dot{m}_{w \text{ in}} = 0.00015053 \text{ kg/s}$
4.8	$\Delta \dot{m}_{\text{in}} = 0.0028 \text{ kg/s}$
4.9	$\dot{m}_a = 0.0139 \text{ kg/s}$
5.0	$v_1 = 1.173 \text{ m}^3/\text{kg}$
5.1	$\dot{V} = 0.018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 38 \text{ CFM}$

La altura de la cama se calculó en base al gasto volumétrico en este caso el máximo por diseño será de $0.384 \text{ m}^3/\text{s}$ a 297.6 kg de masa y velocidad de 3 m/s , sabiendo que el área puede ser calculada con el uso de la siguiente fórmula: $A = \frac{G}{v}$

Donde :

A= área

V= velocidad del fluido

G= Tasa de flujo

entonces: $A=0.128\text{m}^2$, por lo tanto la altura adecuada a partir del cálculo del área por la que va a pasar el flujo es de 0.16m

3.2 Análisis de distribución de temperatura en la secadora.

Para el análisis de la distribución de temperatura se realizaron pruebas con carga y sin carga, se utilizó la cámara termográfica para observar el comportamiento de los diferentes escenarios.

Prueba de distribución de temperatura con dispersor de gas sin carga

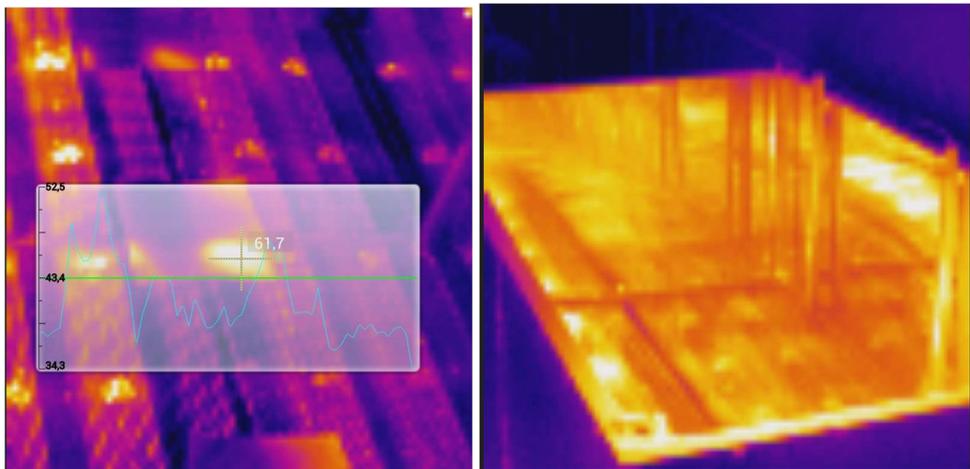


Figura 67. Distribución de temperatura en la secadora con dispersor de gas.

En la figura 67 se observa la respuesta de la temperatura con el uso del distribuidor de gas, la cual muestra un comportamiento simétrico en toda la cámara de secado, alcanzando la temperatura promedio de 61°C .

Prueba de distribución de temperatura sin dispersor de gas y sin carga

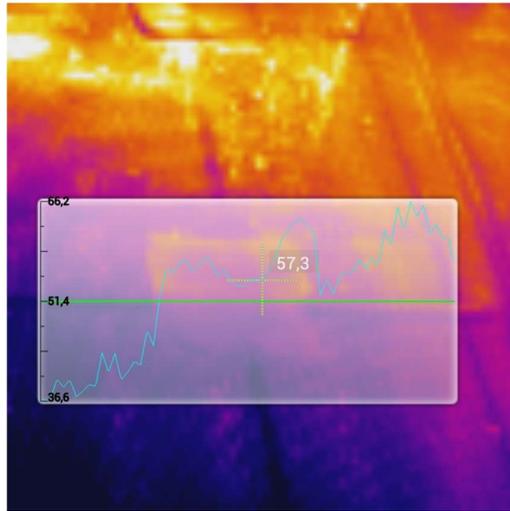


Figura 68. Distribución de temperatura en la secadora.

En la figura 68 se observa que la distribución de temperatura en la cama se ve reflejada la mayor parte calorífica en la salida del difusor, quedando la parte final de la cama con menor temperatura. Tarda más tiempo el proceso en alcanzar una mejor distribución de temperatura en la cama sin usar el dispersor.

Resultado de distribución de temperatura con dispersor de gas con carga



Figura 69. Distribución de temperatura en la secadora.

En la figura 69 se observa que la distribución de temperatura es más uniforme en toda la cama de la secadora, lo que ayuda al rendimiento térmico del proceso para

que el producto final mantenga las cualidades necesarias de producto final esperadas.

3.3 Resultados del proceso de secado de cacao usando dispersor de gas con una masa de 57kg

En la figura 70 se observa el HMI realizado en el software de Labview, el cual contiene labels numéricos y gráficas para poder realizar el monitoreo correcto de todas las variables del proceso como son: temperatura de los 3 sensores, flujo, peso. Se observa también la temperatura promedio de la cama se secado, contiene un botón de Stop el cual detendrá el monitoreo al presionarlo.

Además de un label que muestra el valor de voltaje que se está enviando al variador de frecuencia.

Los datos están siendo guardados en la base de datos, para su posterior análisis.

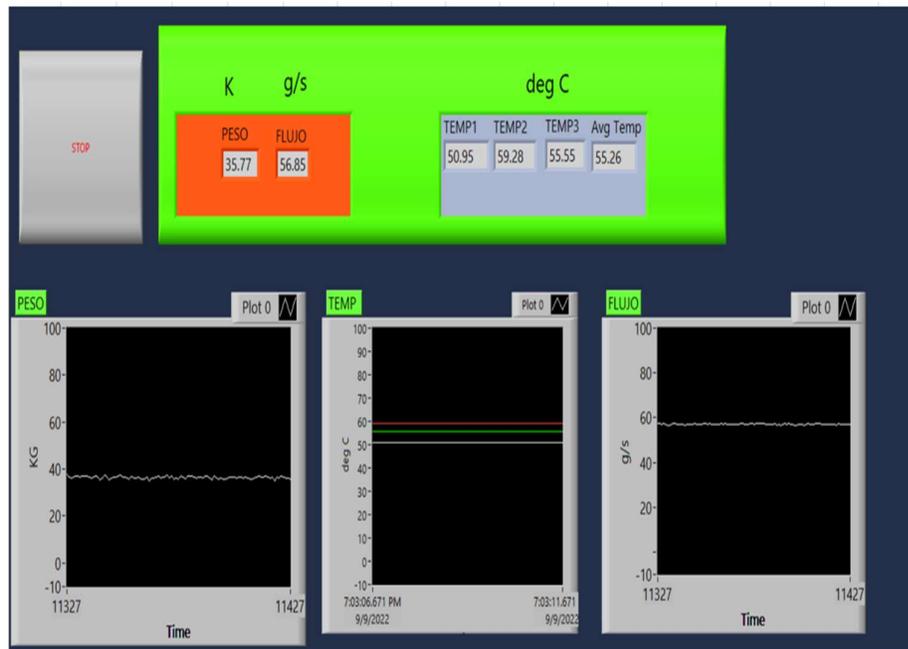


Figura 70. Gráfica HMI de Labview del proceso de secado.

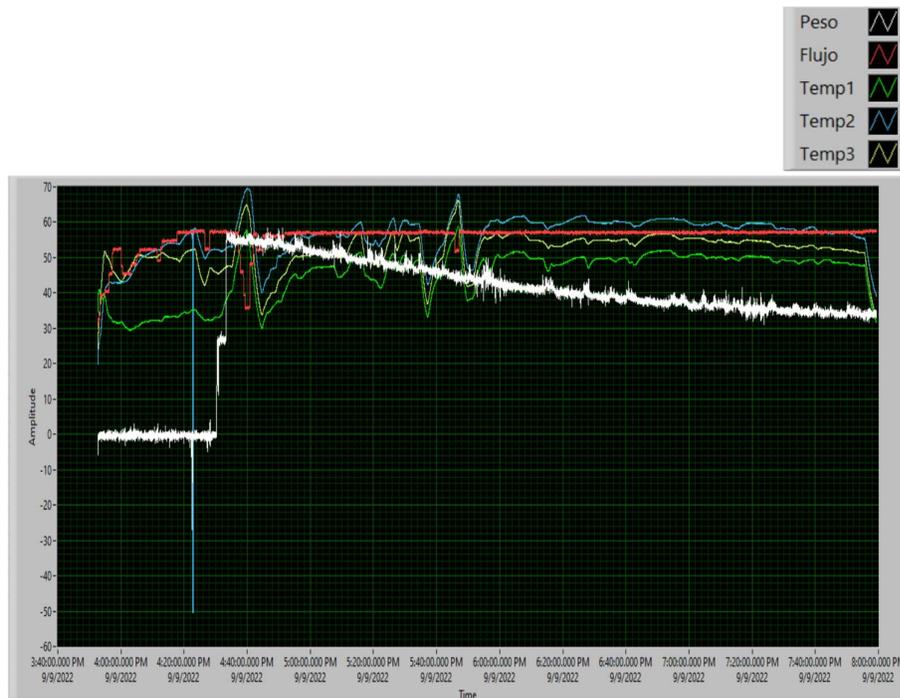


Figura 71. Gráfica HMI de Labview del proceso de secado.

En la figura 71 se observa el resultado de toda la adquisición de datos mientras se realizó el proceso de secado del cacao usando el control PID. Al inicio de la prueba se realizó la adquisición de datos para realizar el proceso de sintonización del sistema en lazo abierto, el cual se lo realizó hasta las 16:24. Luego se coloca la carga en la cama y se procede a realizar la prueba como tal.

Se observa el comportamiento decreciente de la curva de peso a una temperatura constante y velocidad máxima acorde a la literatura de 3 m/s. Durante el proceso se observan ciertos picos de temperatura que fueron generados al variar el flujo del quemador manualmente con el fin de observar la respuesta del PID ante una perturbación, dando como resultado la respuesta esperada del PV lo que se ve reflejada en la temperatura homogénea de la temperatura. La prueba duró 3h25min.

Después de procesar la data usando excel, el proceso de secado del cacao en forma automatizada queda plasmado en la figura 72.

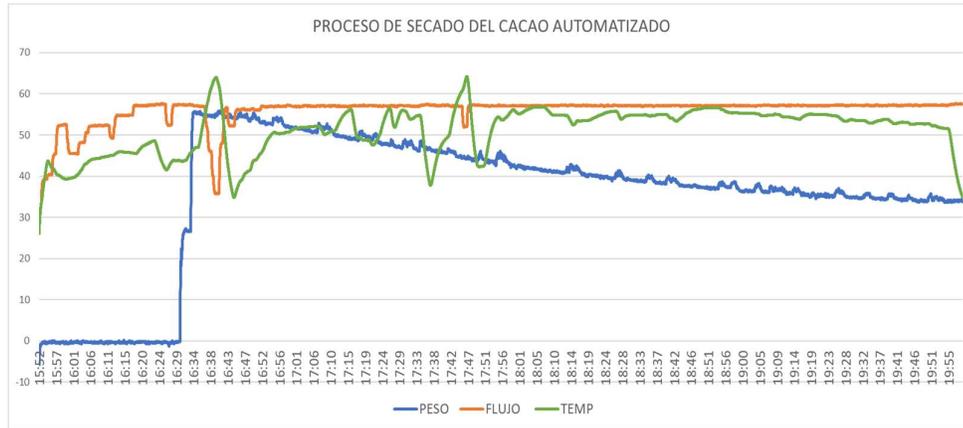


Figura 72. Proceso de secado del cacao.

En resumen del análisis de las gráficas 71 y 72 se realizó un control de temperatura adecuado usando el PID del variador de frecuencia; la temperatura se mantuvo mayormente en el rango de 60 °C y nunca sobrepasó los 70 °C que es el límite máximo recomendado en la literatura para el proceso de secado de cacao.

En la figura 73 se muestra el comportamiento del peso del cacao Vs humedad durante el proceso de secado:

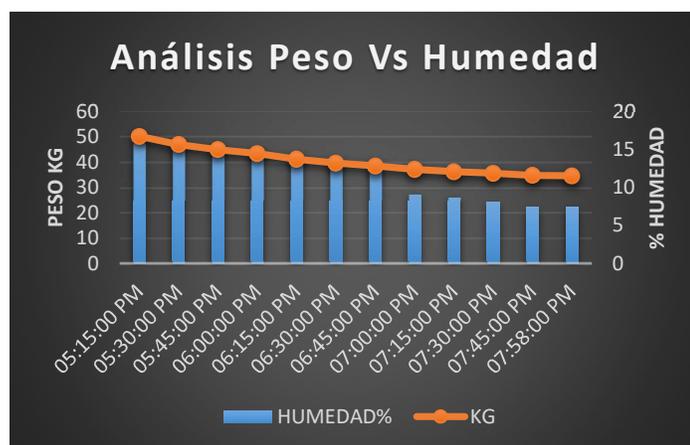


Figura 73. Gráfica análisis Peso Vs humedad.

Del análisis de la figura 73 se observa el comportamiento del peso del cacao vs la humedad, en la que se puede revisar que el peso va decreciendo acorde a la humedad, pero, a partir de las 19h00 aproximadamente se observa una desaceleración de la respuesta de la curva del peso, esto se debe a que el producto empieza a disminuir el contenido de humedad que posee.

En la tabla 17 se muestran los parámetros generales en forma de resumen del proceso de secado.

Tabla 17. Parámetros obtenidos del proceso de secado

Hora inicio proceso secado	16:33
Hora fin proceso secado	19:58
Duración total proceso	3h25min
Masa inicial	57 kg
Masa final	34.6 kg
% humedad inicial aprox	60%
% humedad final avg	7%
Altura inicial capa de cacao	7cm
Altura final capa de cacao	4.5cm
Disminución altura capa cacao	2.5cm
Peso inicial GLP	29.8 kg
Peso final GLP	26.4 kg
Consumo GLP proceso	3.4 kg

En la figura 74 se observa una fotografía del control de humedad realizado en intervalos de tiempo, la cual muestra en este caso el último valor de humedad registrado.



Figura 74. Muestra final de cacao al 7% de humedad.

También se observa el último valor de peso registrado en el instante de que el producto tiene el % de humedad requerido.

3.4 Análisis de consumo energético de operación.

Consumo eléctrico

Se analiza la potencia total instalada con los diferentes equipos que intervienen en el proceso de secado y que se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Potencia instalada

Blower	1491.4 W
Variador	275 W
Fuente de poder de 24VCC	120 W
Laptop	150 W
Total	2036.4 W

La tabla 19 muestra el consumo energético en \$ que se generó con 57 kg de masa, así como el costo total esperado con una masa de 297.6 kg.

Tabla 19. Consumo energético

Masa de cacao	P total= Potencia*tiempo uso	Costo
57 kg	6.94 KWh	0.64 \$
297.6 kg	33.6 KWh	3.09\$

Costo KWh en Ecuador: 0.092\$

3.5 Consumo GLP

El Consumo de GLP del proceso con masa de 57 kg de cacao es 3.4 kg de GLP.

El PVP del GLP de 30kg es 3\$, se toma esa referencia ya que ese es el precio en promedio de un tanque con 30kg de gas, por ende, cada kg de GLP cuesta 0.1\$

En la tabla 20 se muestra el costo total de GLP en \$ para las diferentes cantidades de masa de cacao.

Tabla 20. Costo de GLP

Masa de cacao	Kg de GLP	Costo \$
57 kg	3.4 kg	0.34 \$
297.6	17.75 kg	4.86\$

Costo de mano de obra aproximada por hora en Ecuador es 1.77\$ en base al salario básico (425\$)

En la tabla 21 se muestra el costo promedio por mano de obra en diferentes cantidades de masa de cacao.

Tabla 21. Costo de mano de obra

Masa de cacao	Tiempo (h)	Costo \$
57 kg	3.41	6.03 \$
297.6	16.5	29.2\$

Como resultado final se puede observar en la tabla 22 el costo total del proceso.

Tabla 22. Costo total proceso

Masa de cacao	Tiempo (h)	Costo \$
57 kg	3.41	7.01 \$
297.6	16.5	37.15\$

El costo por kg de cacao en el proceso de secado es de 0.12\$

El precio de venta de cacao seco en comparación con el cacao en baba es diferente, citando que esos precios varían diariamente según la oferta y la demanda.

El precio del cacao es variante, debido a la oferta y demanda nacional e internacional; para citar el ejemplo, se coloca el precio promedio durante todo el 2021.

Tabla 23. Costo total proceso

Masa de cacao 100kg	Costo \$
Seco	170
Baba	95

Haciendo la relación costo beneficio sin duda el vender el cacao seco resulta mejor económicamente, pero la ventaja principal al realizar la secadora es el tiempo, ya que se puede generar mayor masa de cacao para la venta en mucha menor cantidad

de tiempo, es una reducción aproximada de 10 -12 días en secado natural a horas que toma la secadora dependiendo de la cantidad a secar.

Esto sumado al beneficio de la calidad del producto y a un proceso tecnificado que sin duda genera mucho valor. La producción mensual es variable ya que depende de muchos factores, pero se hace referencia a la operación de la máquina durante 8 horas diarias en promedio. Al mes se asume que la máquina opere 160 horas en promedio, como en base a los cálculos para secar 100 kg se necesitan 6.4 horas, entonces se obtiene que la producción máxima de secado es 2500 kg/mes.

3.6 Valoración Económica.

Se detalla el costo total de los elementos mecánicos y mano de obra de la secadora en la tabla 24.

Tabla 24. Costo elementos mecánicos

Materiales	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Plancha de acero inoxidable 304 pulido	5	\$45	\$225
Plancha perforada en acero inoxidable 304	1	\$246.40	\$246.4
Tubo cuadrado galvanizado de ¼	5	\$28	\$140
Autoperforantes de ½ cabeza (estrella)	100	\$0.02	\$2
Barrilla roscada de 3/8 en acero inox	4	\$8	\$32
Tubo de 4" en acero inoxidable	5	\$20	\$100
Quemador	1	\$20	\$20
Mano de obra	1	\$600	\$600
Total			\$1365.40

En la tabla 25 se muestra el costo del sistema eléctrico.

Tabla 25. Costo sistema de control-eléctrico

Materiales	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Caja para conexiones	1	\$50	\$50
Fuente de 24V a 20 ^a	1	\$45	\$45
Borneras de 3p negra	2	\$0.25	\$0.50
Bornera de 2p roja	4	\$0.20	\$0.80
Bornera de 2p azul	4	\$0.20	\$0.80
Bornera de 2p verde	4	\$0.20	\$0.80
Paro de emergencia	1	\$5	\$5
Luz piloto	2	\$4	\$8
Pulsador NIA breaker	1	\$5.77	\$5.77
Porta relé	1	\$6.25	\$6.25
Int relay dinámico	1	\$13.85	\$13.85
Cable N° 18	15	\$0.30	\$4.50
Canaleta	1	\$7	\$7
Riel	1	\$9	\$9
Celda de carga tipo S 100kg	4	\$ 55	\$ 220
Amplificador de celda de carga digital, salida 4-20mA	1	\$116	\$116
Sonda RTD	3	\$35	\$ 105
Caja de conexiones de celda de carga	1	\$40	\$ 40
Transmisor de temperatura, PT100 (0-150°C)	3	\$12	\$60
NI DAQ6009	1	\$290	\$290
Costo del envío	1	\$144	\$144
Sensor de flujo MAF	1	\$105	\$105
Socket	1	\$6	\$6
Tubería de caucho de 4"	1	\$18	\$18
Total			\$1261.27

En la tabla 26 se detallan los costos indirectos.

Tabla 26. Costos indirectos

Insumos	Costo \$
Cacao, imprevistos	90
Total	90

Como resumen se obtiene el costo total de la secadora en la tabla 27.

Tabla 27. Costo total

Costos	\$Total
Costo elementos mecánicos	\$1365.40
Costo sistema de control-eléctrico	\$1261.27
Costos indirectos	\$90
Total	\$2716.67

3.7 Conclusiones del capítulo III

- Se mostraron todos los resultados inherentes al diseño del secador de cacao de convección forzada.
- Se mostró la efectividad de realizar el correcto tuning al PID.
- Se mostraron los costos realizados en la construcción de la secadora.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se modeló un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada de las siguientes características: dimensiones 1.6m x 0.8m x0.3m, capacidad máxima debido al volumen 100kg, temperatura de secado 60 deg C, con ventilador tipo turbina usando control automático PID y HMI de monitoreo.
- Los resultados experimentales obtenidos son los siguientes: masa inicial 57kg, Temp de secado 60 deg C, masa evaporada 22.4 kg, representa el 39% de la masa inicial, disminución de altura de capa de cacao 35%, porcentaje de humedad final 7%, tiempo total del proceso de secado de una masa de 57kg fue 3h25min, disminución del 97.3% del tiempo de secado comparado con el natural (5-10 días aprox). El costo de operación por kg de masa a secar es de 0.122 centavos de dólar.
- El uso de dispersor de gas ayuda a que la temperatura de la cámara no este focalizada en la entrada de aire lo que mejora el rendimiento térmico del proceso de secado.
- Se reduce el área que ocupa los métodos naturales de secado, como a su vez la mano obra al usar el secador rectangular.

RECOMENDACIONES

- Se debe considerar la temperatura y la humedad relativa del aire para determinar la cantidad de energía que debemos utilizar para alcanzar la temperatura de secado ideal para el proceso. La relación de temperatura ambiente con la energía necesaria es inversamente proporcional, es decir, cuando la temperatura ambiente disminuya la energía necesaria para

calentar el aire para el proceso incrementará. Todo esto depende de la zona donde se realizará el proceso del secado.

- La cantidad de energía necesaria para el secado debe ser disminuida con procesos de control con el fin de automatizar el proceso, optimizar el consumo de la misma y garantizar que el producto mantenga sus características de calidad.
- Usar procesos de automatización para minimizar los riesgos de enfermedades ocupacionales inherentes a esta labor.
- Se recomienda usar algún otro elemento de control para realizar el PID como un PLC, ya que estos son equipos destinados a este propósito.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. P. Rosero, “Secado artificial de cacao . Estado del arte,” Prim. Congr. Sales. Ciencia, Tecnol. e Innovación para la Soc., 2013.
- [2] E. Portillo et al., “Aroma formation of criollo Cocoa (*Theobroma cacao* L.) in function of the post-harvest treatment in Venezuela,” *Rev. Cient. UDO Agric.*, vol. 9, no. 2, pp. 458–468, 2009.
- [3] H. Tinoco and D. Y. Ospina, “Analysis of the Cocoa Dehydration Process for Reducing Drying Time,” *Rev. EIA*, no. 13, pp. 53–63, 2010.
- [4] “Ecuador, la Cuna del Cacao – República del Cacao.” <https://republicadelcacao.com/es/blogs/news/ecuador-the-home-of-cacao> (accessed Aug. 28, 2021).
- [5] U. Universidad de Posgrados, G. Vicente Salgado Andrade, and W. Ruiz Buchelli, “Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil DIRECTOR,” 2015.
- [6] J. C. Santos, “Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad CCN-51, Jama-Manabí,” UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, 2012.
- [7] “Cacao Híbrido CCN-51 cuenta con certificación de calidad – Ministerio de Agricultura y Ganadería.” <https://www.agricultura.gob.ec/cacao-hibrido-ccn-51-cuenta-con-certificacion-de-calidad/> (accessed Oct. 12, 2022).
- [8] “POSCOSECHA CACAO ~ Poscosecha Cacao.” <https://poscosechacacao.blogspot.com/2020/12/poscosecha-cacao.html> (accessed Aug. 28, 2021).
- [9] “LA COSECHA DEL CACAO ~ Poscosecha Cacao.” <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/08/la-cosechadel-cacao-esta-labor.html> (accessed Sep. 03, 2021).
- [10] “COSECHA, RECOLECCIÓN Y DESGRANE. INICIO EN LA RUTA HACIA UN CACAO DE EXCELENTE CALIDAD ~ Poscosecha Cacao.” <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/08/cosecha-y-desgrane-del-cacao.html> (accessed Sep. 03, 2021).
- [11] A. E. Quiroz Anchundia, “Análisis de los tres tipos de fermentación de cacao

- en la provincia de Los Rios,” no. May, 2021.
- [12] “APUNTANDO A UNA FERMENTACIÓN SUPERIOR DEL GRANO DE CACAO. ~ Poscosecha Cacao.” <https://poscosechacacao.blogspot.com/2021/02/el-beneficio-del-cacao-es-un-proceso.html> (accessed Sep. 03, 2021).
- [13] “MÉTODOS DE SECADO DE CACAO ~ Poscosecha Cacao.” <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/08/metodos-de-secado-de-cacao.html#RohanSec> (accessed Sep. 03, 2021).
- [14] “UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS MAESTRÍA EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN ENERGÉTICA TITULO: - PDF Descargar libre.” <https://docplayer.es/6675695-Universidad-de-cuenca-facultad-de-ciencias-quimicas-maestria-en-planificacion-y-gestion-energetica-titulo.html> (accessed Sep. 11, 2021).
- [15] “Automatización de los procesos de secado y selección del cacao ecuatoriano conservando las características sensoriales y previniendo riesgos laborales - PDF Free Download.” <https://docplayer.es/85663302-Automatizacion-de-los-procesos-de-secado-y-seleccion-del-cacao-ecuatoriano-conservando-las-caracteristicas-sensoriales-y-previniendo-riesgos-laborales.html> (accessed Sep. 11, 2021).
- [16] V. Hernández Gómez, O. Olvera García, P. Guzmán Tinajero, and D. Morillón Gálvez, “Secado de frutas y verduras con energía solar,” *Rev. Sist. Exp.* Junio, vol. 4, no. 11, pp. 22–33, 2017, [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia.
- [17] “Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca,” Accessed: Sep. 11, 2021. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992017000200005.
- [18] J. Bracamonte, “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE OPERACIÓN SOBRE LA TEMPERATURA DE DESCARGA Y,” no. April, 2015, doi:

10.13140/RG.2.1.1326.5442.

- [19] Ninla Elmawati Falabiba, “Diseño de un secador convectivo para el secado del grano de cacao,” 2019.
- [20] “Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg,” Accessed: Sep. 03, 2021. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5722/572262061015/html/index.html>.
- [21] “Secadora De Cacao Wilpac en venta en por sólo U\$S 2,300.00 - Ocompra.com Ecuador.” <https://www.ocompra.com/ecuador/item/secadora-de-cacao-wilpac-428941036/> (accessed Sep. 11, 2021).
- [22] R. Valdivia Arrunátegui, “Fundamentos del secado del cacao,” pp. 1–48, 2015, [Online]. Available: <https://cacaofcaug.files.wordpress.com/2015/08/fundamentos-del-secado-del-cacao.pdf>.
- [23] “NTE INEN 176 GRANOS DE CACAO. REQUISITOS COCOA BEANS. REQUIREMENTS 6 Páginas,” 2018.
- [24] C. Torres, Fernando; González, “Diseño de un secador motorizado con varias etapas de precalentamiento, para el cultivo de cacao en el Recinto “Los Ángeles”, provincia de los Ríos,” Appl. Microbiol. Biotechnol., vol. 85, no. 1, pp. 2071–2079, 2016.
- [25] J. A. Siguencia, “Evaluación de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita para granos de cacao ccn51,” 2013.
- [26] “View of Physical and chemical properties of cacao cultivars (Theobroma cacao L.) from Ecuador and Peru.” <https://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/462/575> (accessed Apr. 03, 2022).
- [27] D. Ortiz, J. Bastidas, J. Acosta, Ruales Carlos Frank, and C. Herrera, “Implementación de un secador de cacao a pequeña escala para disminuir el tiempo de secado y conservar las propiedades organolépticas en el Consejo Comunitario Las Varas Tumaco (Nariño),” vol. 2, pp. 1–9, 2019.
- [28] J. Guzman and N. Grandes, “Universidad técnica de cotopaxi,” IMPLEMENTACIÓN Exp. UN SECADOR HÍBRIDO PARA

- REDUCCIÓN DEL TIEMPO EN EL SECADO CACAO Mejor., vol. 1, p. 101, 2018, [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>.
- [29] José A Millán, “Psicometría.” <http://www.sc.edu.es/nmwmigaj/CartaPsy.htm>.
- [30] R. C. M. H. R. L. Saravia, “Ingeniería del secador solar,” 2000.
- [31] S. AG, “Convertidor SINAMICS V20,” pp. 1–66, 2012, [Online]. Available: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/484/67267484/att_61462/v1/v2_0_OPI_es-SP_es-ES.pdf.
- [32] “Electrotec | TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA INDUSTRIALES: RTD vs TERMOCUPLA.” <https://electrotec.pe/blog/RTDvsTERMOCUPLA> (accessed Sep. 18, 2022).
- [33] “Amazon.com: TOPINCN RTD PT100 Sonda de sensor de temperatura termopar 1/2" NPT conector de rosca con 3 cables 6.6 ft, -58 ~ 572 °F (-50 ~ 572.0 °F) : Industrial y Científico.” https://www.amazon.com/TOPINCN-Thermocouple-Temperature-Connector-58-572°F/dp/B07N1NRB7S?ref_ast_sto_dp&language=es_US (accessed Sep. 18, 2022).
- [34] “TRANSMISORES DE TEMPERATURA – HNSA INGENIEROS S.A.” <http://www.hnsa.com.co/transmisores-de-temperatura/> (accessed Sep. 18, 2022).
- [35] “Uxcell 24V DC 4-20mA -50C to 150C PT100 Temperature Sensor Transmitter: Temperature Transducers: Amazon.com: Industrial & Scientific.” https://www.amazon.com/Uxcell-4-20mA-Temperature-Sensor-Transmitter/dp/B00GN6X25U?pd_rd_w=sTcqV&content-id=amzn1.sym.deffa092-2e99-4e9f-b814-0d71c40b24af&pf_rd_p=deffa092-2e99-4e9f-b814-0d71c40b24af&pf_rd_r=ZGYPAQZRW90K3KDEJRD1&pd_rd_wg=Lq0bJ&pd_rd_r=05d7 (accessed Sep. 18, 2022).
- [36] “Sensor Maf 22204-21010 22204-0c020 Medidor De Flujo De Aire Para Toyota 22204-30010 22204-0l010 - Buy 22204-21010 Product on Alibaba.com.” <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/sensor-maf->

- 22204-21010-22204-0c020-medidor-de-flujo-de-aire-para-toyota-22204-30010-22204-01010-300017302297.html (accessed Sep. 19, 2022).
- [37] “CONTAVAL.” <https://www.contaval.es/celulas-carga-teoria/> (accessed Sep. 18, 2022).
- [38] “Celda De Carga De 10kg y Modulo Amplificador Hx711 UNIT Electronics.” <https://uelectronics.com/producto/celda-de-carga-de-10kg-y-modulo-amplificador-hx711/> (accessed Sep. 18, 2022).
- [39] “Amazon.com: CALT DYLY103 100KG Pull Pressure Compression and Tension Force S Beam Load Cell Sensor: Industrial & Scientific.” https://www.amazon.com/dp/B01F6IOW3Q?ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details&th=1&language=en_US (accessed Sep. 18, 2022).
- [40] “Amazon.com: Caja de conexiones pequeña 3.9x6.1x1.4 in Caja de conexiones de acero inoxidable, cubo para 4 celdas de carga Potenciómetro de alta precisión Caja de verano 4 maneras. Caja impermeable y resistente al agua. : Electrónica.” https://www.amazon.com/dp/B09B47Y9BS?psc=1&ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details&language=es_US (accessed Sep. 18, 2022).
- [41] “Load Cell Amplifier with Digit Display, Output 4-20mA/0-10V/RS485 , Accuracy $\pm 0.2\%$ FS, Digital Scale Load Cell readout (4-20mA): Amazon.com: Industrial & Scientific.” https://www.amazon.com/Digital-Amplifier-Output-Accuracy-Display/dp/B08CMF1VDG?ref_=ast_sto_dp&th=1&psc=1 (accessed Sep. 18, 2022).
- [42] L. Yáñez, “DAQ ni usb 6009,” p. 61, 2015.
- [43] T. Amaguaña and A. Marcelo, “Implementación a escala experimental de un secador de cacao rectangular para la reducción del tiempo de secado .,” 2022.
- [44] “Lazo Abierto y Lazo Cerrado - [Sistemas de Control].” <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/> (accessed Sep. 18, 2022).
- [45] M. . P. Corrales, “MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES,” 2021.

- [46] “Sintonización de Lazos de Control.”
<https://www.monografias.com/trabajos108/sintonziacion-lazos-control/sintonziacion-lazos-control> (accessed Sep. 21, 2022).
- [47] E. Edgar and E. Alonso, “Modelación Y Simulación,” pp. 1–33, 2015.

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades del aire a presión de 1 atm

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

ANEXO B. Propiedades en los puntos de ebullición y de congelación

TABLA A-2

Propiedades en los puntos de ebullición y de congelación

Sustancia	Datos para la ebullición a 1 atm		Datos para la congelación		Propiedades del líquido		
	Punto normal de ebullición, °C	Calor latente de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión, h_{if} , kJ/kg	Temp., °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , kJ/kg · K
Amoniaco	-33.3	1 357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.51
					0	639	4.62
					25	603	4.78
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1 394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
Salmuera (20% de cloruro de sodio por masa)	103.9	—	-17.4	—	20	1 150	3.11
<i>n</i> -Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Bióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilico, alcohol	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Etilenglicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1 109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1 261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13 560	0.139
					-161.5	423	3.49
Metano	-161.5	510.4	-182.2	58.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.78
Metanol	64.5	1 100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Aceite (ligero)	—	—	—	—	25	910	1.80
Oxígeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1 141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.51
					50	449	3.12
					-50	1 443	1.23
Refrigerante-134a	-26.1	216.8	-96.6	—	-26.1	1 374	1.27
					0	1 295	1.34
					25	1 207	1.43
					100	958	4.22
Agua	100	2 257	0.0	333.7	0	1 000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22

ANEXO C. Manual de operación y mantenimiento.

La secadora de cacao tiene el objetivo de acelerar el tiempo de secado de cacao usando un sistema automático que permita mantener sus características de calidad.

IMPORTANTE

El correcto funcionamiento de la máquina depende de los adecuados procedimientos que deben ser seguidos para evitar daños en la salud o mala calidad del producto final.

RESUMEN

Se detalla la forma de operar la secadora, los cuidados a considerar durante su funcionamiento así como las respuestas ante posibles eventos.

1. INTRODUCCIÓN

La correcta operación de la máquina depende de un correcto documento guía que plasme su funcionamiento; evitar daños a la secadora, personas y medio ambiente es de carácter fundamental en este documento.

1.1 Planteamiento del problema

La data histórica muestra que durante procesos que son operados de manera improvisada, sin guías, han causado serios daños a la propiedad privada, el medio ambiente y lo más importante la vida humana.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar un documento guía que permita la correcta operación y mantenimiento de la secadora al usuario preservando la seguridad personal, medio ambiente y de la secadora.

2.2 Objetivos específicos

Describir los componentes de la secadora y conocer la funcionalidad de cada uno de ellos.

Desarrollar el plan de mantenimiento preventivo de la máquina.

Desarrollar el manual de puesta en marcha de la máquina secadora.

3. INFORMACIÓN DE SEGURIDAD

El presente documento muestra y guía al usuario la forma correcta de operación de la máquina a fin de evitar eventos inesperados durante su operación.

3.1. Descripción de la máquina

La secadora de cacao es una máquina que está diseñada para operar a una temperatura aproximada de 60 deg C, con una capacidad máxima de carga de 100 kg y con un % inicial de humedad de alrededor del 60% del cacao, al finalizar el proceso de secado el cacao deberá contener 7% de humedad.

La temperatura es controlada automáticamente por medio de un variador de frecuencia que controla el motor de blower, logrando controlar la temperatura de la cámara a los parámetros establecidos.

Está construida con una malla perforada de acero inoxidable en la cual se coloca el cacao, además de láminas de acero inoxidable y material aislante para garantizar las cualidades de los alimentos y evitar contaminación del producto. Se usa GLP que será combustionado para generar aire caliente y dirigirlo al interior de la máquina.

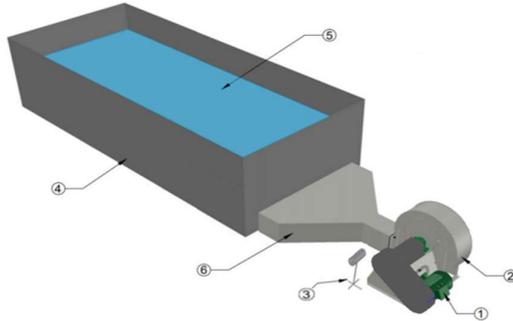
3.2. Funcionamiento de la máquina

Después de colocar el cacao en baba sobre la malla, hay que encender el chispero que luego encenderá el blower, la temperatura del interior de la máquina es monitoreada por 3 sensores de temperatura y el control de temperatura lo realiza un algoritmo del variador de frecuencia.

Todos los datos de los sensores son obtenidos por medio de una tarjeta de adquisición de datos, mismos que son monitoreados en un HMI.

3.3 Descripción de los componentes

Nº	Componente
1	Motor del blower
2	Soplador del blower
3	Quemador
4	Contenedor rectangular
5	Malla
6	Difusor



Potenciómetro para ajustar el set point del proceso; 2.2 v representa el set point 60 °C

Botón de parada de emergencia



Switch de encendido

Led indicador de encendido



Breaker principal

3.4. Procedimiento de puesta en marcha del secador rectangular del cacao.

- Alimentar el tablero de control a 220V.

- Accionar el breaker principal que se encuentra en el interior del tablero.
- Conectar la válvula al cilindro y abrir la misma.
- Verificar el valor de 2.2v en el variador de frecuencia en el parámetro r0752/0. En caso de no estar ese valor, girar el potenciómetro hasta obtener ese valor, este valor representa el set point de 60 deg C para el CV del proceso.
- Conectar la tarjeta NI DAQ 6009 a la Pc.
- Abrir el HMI realizado, en el cual se monitoreará las variables del proceso.
- Revisar en el HMI los valores de voltaje esperados de los sensores.
- Abrir la válvula del quemador a 1/16 de vuelta e inmediatamente pulsar el botón verde del chispero eléctrico.
- Observar que el quemador se encuentre encendido y abrir el quemador ¼ de vuelta.
- Con el selector encender el blower.
- Colocar el cacao en la secadora.
- Remover el cacao manualmente cada 10 minutos.
- Monitorear en el variador de frecuencia el parámetro r0752/1. Este valor representa el valor del PV del proceso.
- Retirar el cacao cuando cumpla su proceso de secado al 7% de humedad.
- Cerrar la válvula del tanque para que el gas restante se consuma y cerrar la válvula del quemador.
- Desactivar el blower del selector.
- Desconectar el breaker.
- Desconectar la alimentación de 220V.

4.0 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SECADOR

Tabla 28. Mantenimiento preventivo del secador.

Ítem	Descripción	Actividad
1	Limpeza de la cámara de secado.	Siempre al terminar su operabilidad
2	Calibrar el quemador.	Siempre y cuando el flujo sea inapropiado
3	Limpeza del dispensor del gas.	Siempre al terminar su operabilidad.

4	Revisión del soplador	Después de 3 a 4 meses.
5	Revisión de la parte eléctrica.	Después de cada operabilidad.

4.1. FALLAS AL MOMENTO DEL SECADO DEL CACAO Y SU SOLUCIÓN

Tabla 29 Falla-solución en el proceso.

Ítem	Descripción	Causa	Solución
1	Problemas con el quemador.	No se encuentra con suficiente GLP.	Llenar con GLP.
2	Problemas con el motor.	Malas conexiones.	Revisar la fuente de energía.
3	Baja cantidad de flujo.	Problema del variador de frecuencia.	Monitorear frecuencia
4	Sistema de remoción del cacao.	No existe removedor para el cacao.	Realizar un rastrillo artesanal.
5	Temperatura del proceso diferente de 60 deg C en promedio	Valor diferente de 2.2v en el parámetro r0752/0	Girar el potenciómetro hasta alcanzar el valor de 2.2v.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Un adecuado manual de usuario permite el correcto funcionamiento de la máquina y garantiza que el proceso de secado de cacao sea llevado a cabo sin inconvenientes.

La hoja -ruta de problema solución permite al usuario rápidamente encontrar una posible solución a los problemas.

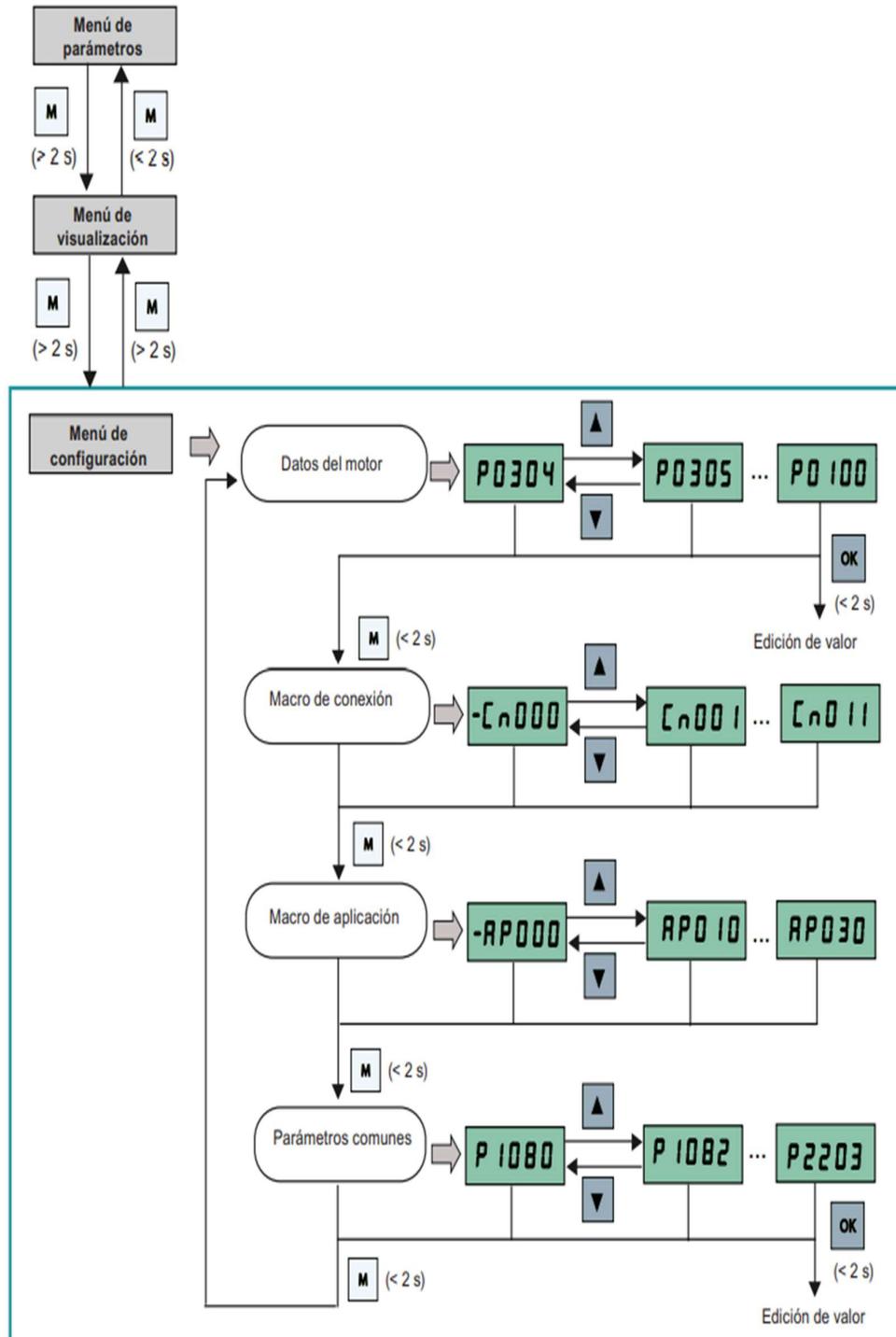
5.2 Recomendaciones

Mantener el presente manual en el área de operación de la máquina.

Leer el manual previo al uso de la secadora.

ANEXO D. Estructura de menús del variador

Estructura de menús

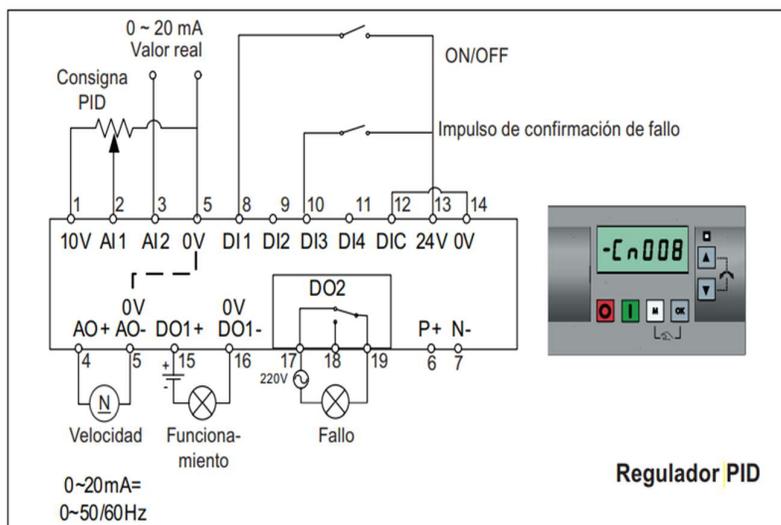


ANEXO E. Macro de conexión del variador, Regulación PID

Configuración de macros de conexión:

Parámetro	Descripción	Ajustes predeterminados de fábrica	Ajustes predeterminados de Cn008	Observaciones
P0700[0]	Selección de la fuente de señales de mando	1	2	Bornes como fuente de señales de mando
P0701[0]	Función de la entrada digital 1	0	1	ON/OFF
P0703[0]	Función de la entrada digital 3	9	9	Confirmación de fallo
P2200[0]	Habilitación de regulador PID	0	1	Habilitación de PID
P2253[0]	CI: Consigna PID	0	755.0	Consigna PID = Entrada analógica 1
P2264[0]	CI: Realimentación PID	755.0	755.1	Realimentación PID = Entrada analógica 2
P0756[1]	Tipo de entrada analógica	0	2	Entrada analógica 2, de 0 a 20 mA
P0771[0]	CI: Salida analógica	21	21	Frecuencia real
P0731[0]	BI: Función de la salida digital 1	52.3	52.2	Convertidor en funcionamiento
P0732[0]	BI: Función de la salida digital 2	52.7	52.3	Fallo del convertidor activo

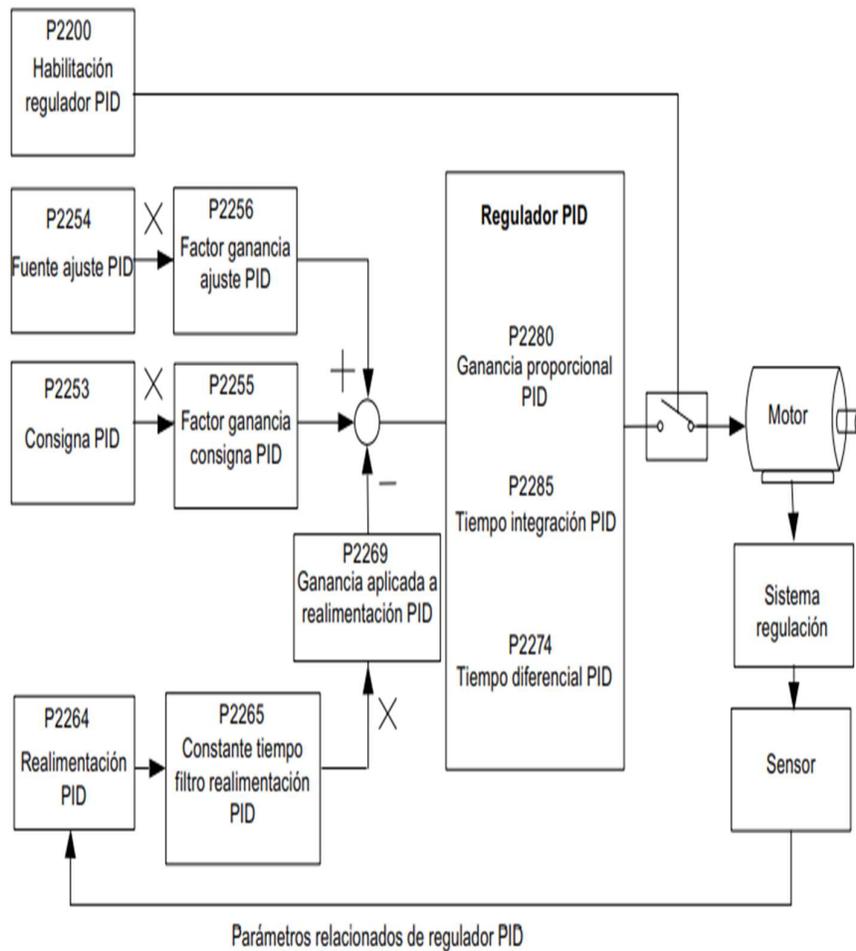
Macro de conexión Cn008: Regulación PID con referencia analógica



ANEXO F. Configuración del regulador PID

Funciones

El regulador PID integrado (regulador tecnológico) admite toda clase de tareas de control de procesos simples, como control de presiones, niveles o caudales. El regulador PID especifica la consigna de velocidad del motor de tal manera que la variable del proceso que se va a controlar corresponde a su consigna.



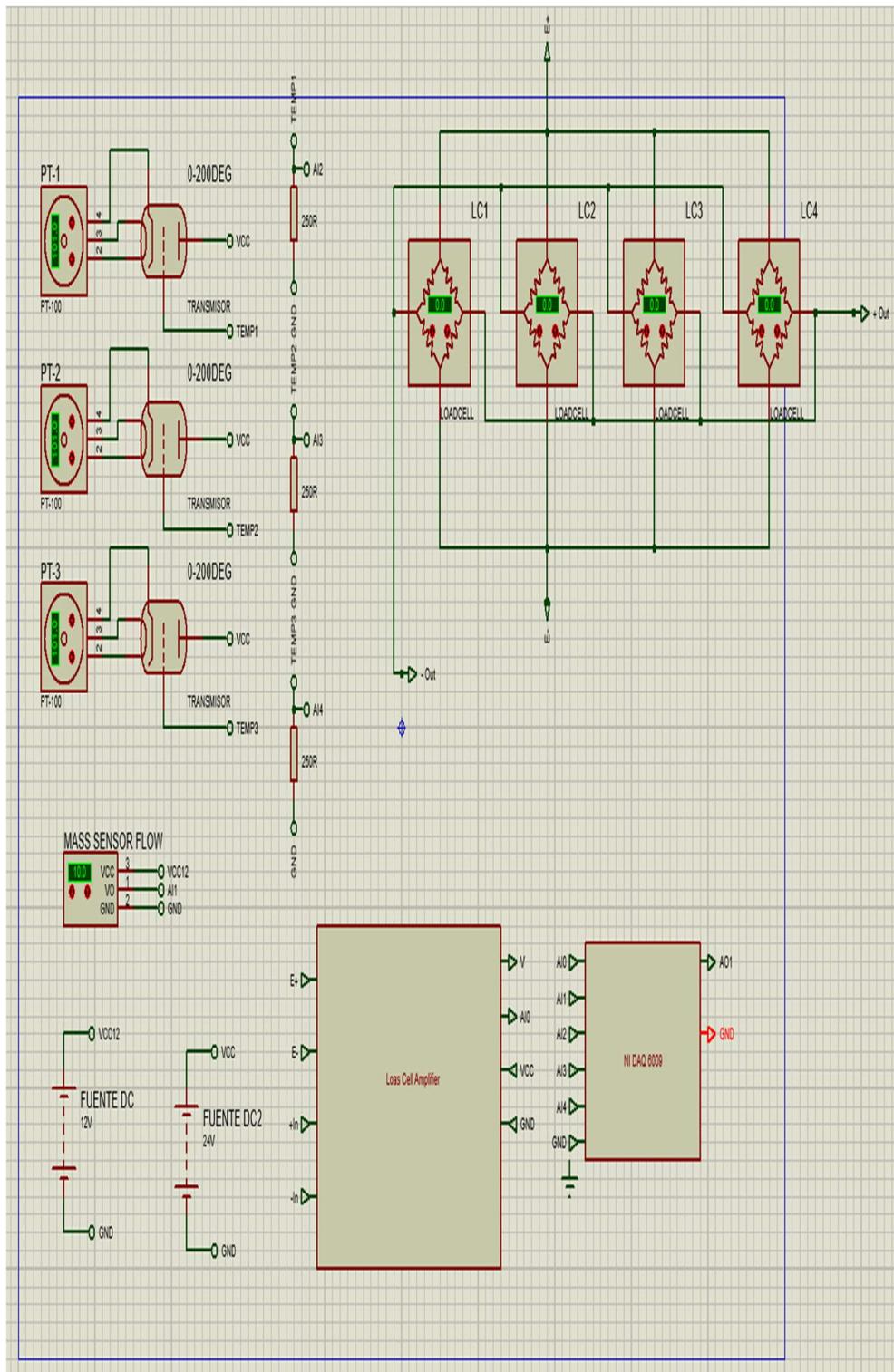
ANEXO G. Propiedades de los materiales aislantes

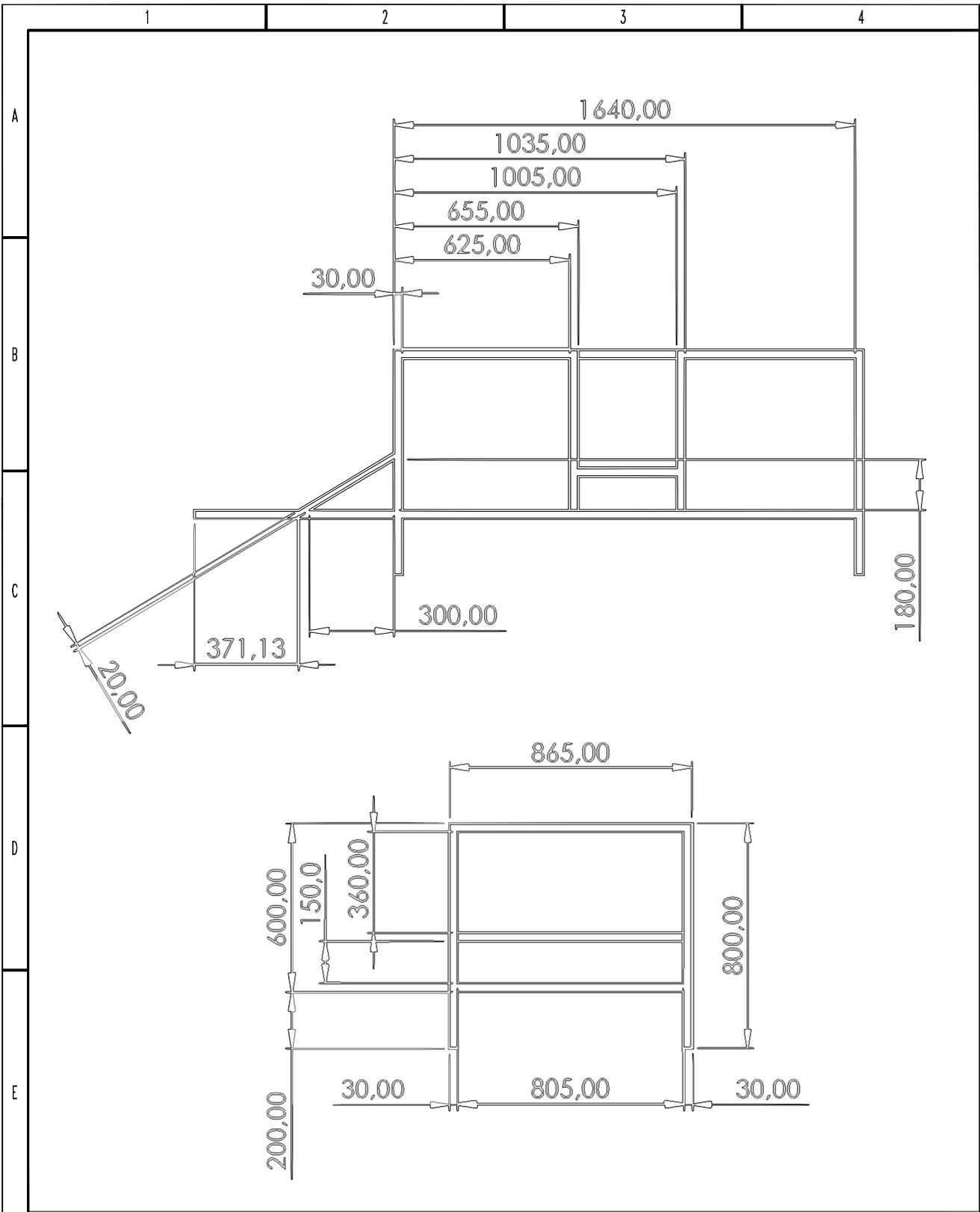
	AISLANTE TÉRMICO	RESISTENCIA TÉRMICA $R = M^2 \cdot kW$	ESPESOR AISLANTE
	TECNOTERMIC A6: Aislante térmico reflexivo de Tecnol	2,29	16 mm
	LANA DE ROCA	1	4 cm
	LANA DE VIDRIO	1	4 cm
	CORCHO	1,026	4 cm
	POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	0,976	4 cm
	POLIESTIRENO EXTRUIDO (XPS)	1,053	4 cm
	POLIURETANO	1,379	4 cm
	CELULOSA	1,026	4 cm

ANEXO H. Características técnicas del acero inoxidable

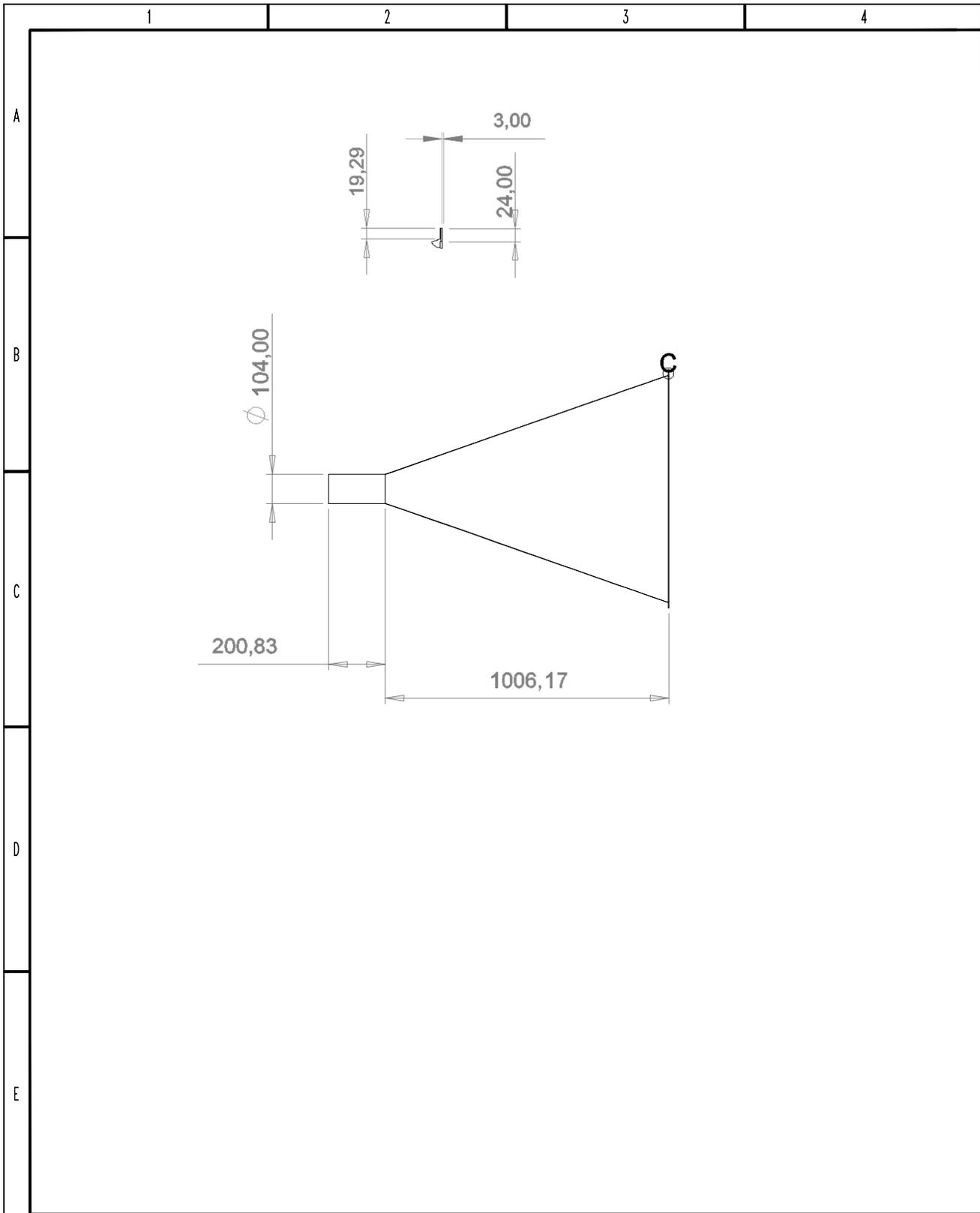
TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE		SERIE 300 - AUSTENÍTICO												
		Acero al Cromo Níquel						Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno				Acero refractario		
DESIGNACIÓN	TIPO ASTM (AISI)	301	302	303	304	304 L	321	316	316 S	316 L	316 Ti	309	310	310 S
	COMPOSICIÓN QUÍMICA	C% 0.15 Máx.	C% 0.15 Máx.	C% 0.15 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.08 Máx.	C% 0.20 Máx.	C% 0.25 Máx.
Mn% 2.00 Máx.		Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.	Mn% 2.00 Máx.
PESO ESPECÍFICO (g/cm³)		7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.95	7.95	7.95	7.95	7.9	7.9	7.9
	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm²)	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	200.000	200.000	200.000
ESTRUCTURA		AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO
	CALOR ESPECÍFICO A 20°C (J/kg K)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
PROPIEDADES FÍSICAS	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m K)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	12.5	12.5	12.5
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA MEDIO (α 10⁻⁶ /°C)	16.92	17.28	17.3	17.30	17.30	16.74	16.02	16.02	16.02	16.50	14.9	15.9	15.2
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20°C (μΩ/cm)	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.74	0.74	0.74	0.75	0.78	0.79	0.79
	PERMEABILIDAD TÉCNICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO	AMAGNÉTICO
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20°	DUREZA BRINELL	135185	135185	135185	130150	130145	130185	130185	130185	130170	130190	140185	142210	142210
	DUREZA ROCKWELL	7582	7090	7090	7088	7085	7088	7085	7085	7085	7085	7085	7085	7085
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CON DEFORMACIÓN EN FRÍO (Rm) (N/mm²)	560750	560720	530700	500700	500800	500700	540600	540600	520670	540600	540600	540600	520670
	ELASTICIDAD CON DEFORMACIÓN EN FRÍO (Rp0.2) (N/mm²)	215340	205340	205340	195340	175300	205340	205410	205410	195370	215380	215370	215370	205370
OTRAS PROPIEDADES	SOLUBILIDAD	MUY BUENA	MUY BUENA	NO ACONSEJABLE	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA
	INADIVIBILIDAD COMPARADO CON UN ACERO RESISTENTE PARA a. B1112	45%	45%	55%	45%	45%	36%	45%	45%	45%	-	45%	45%	45%

ANEXO I. Circuito de conexiones y planos de estructura

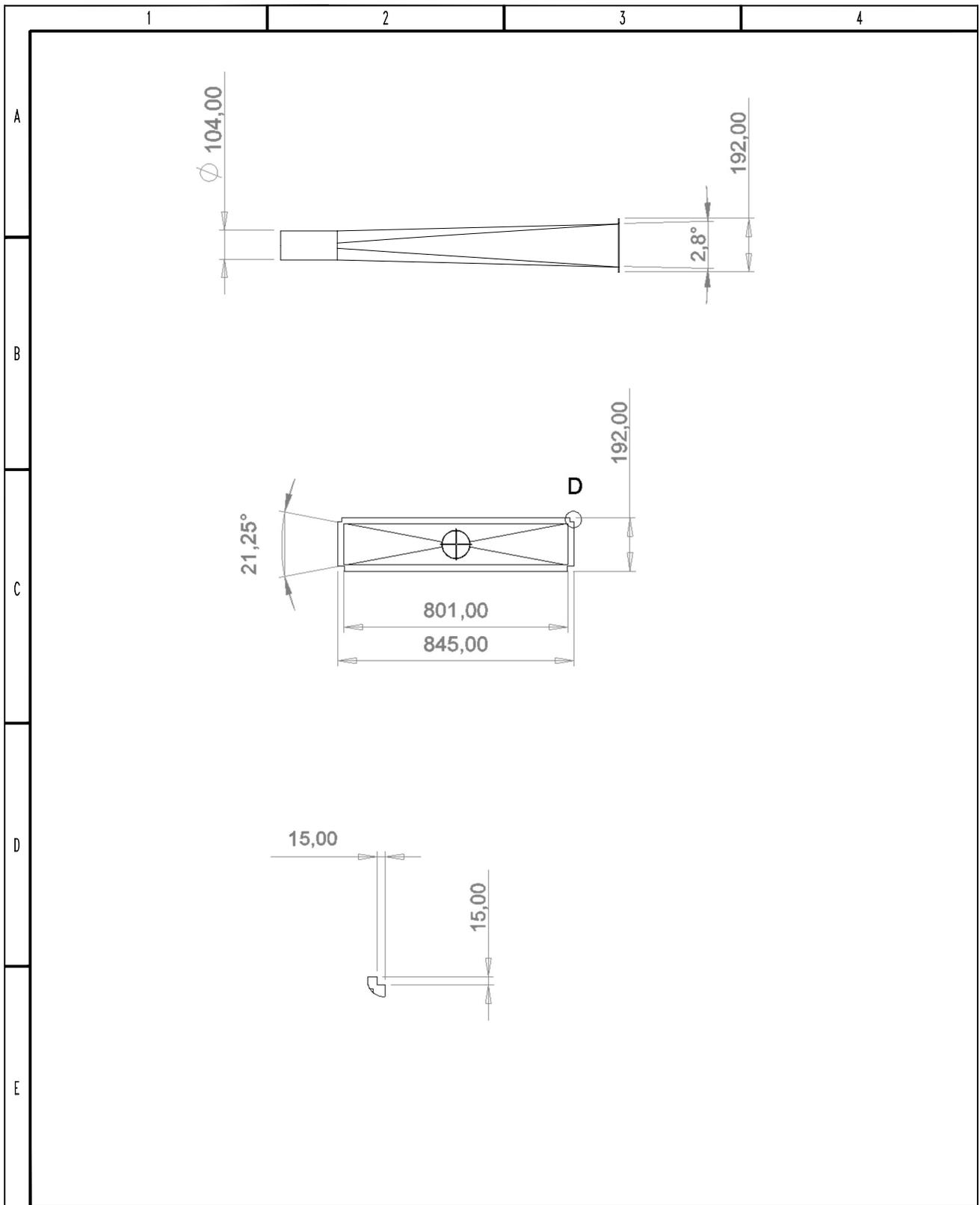




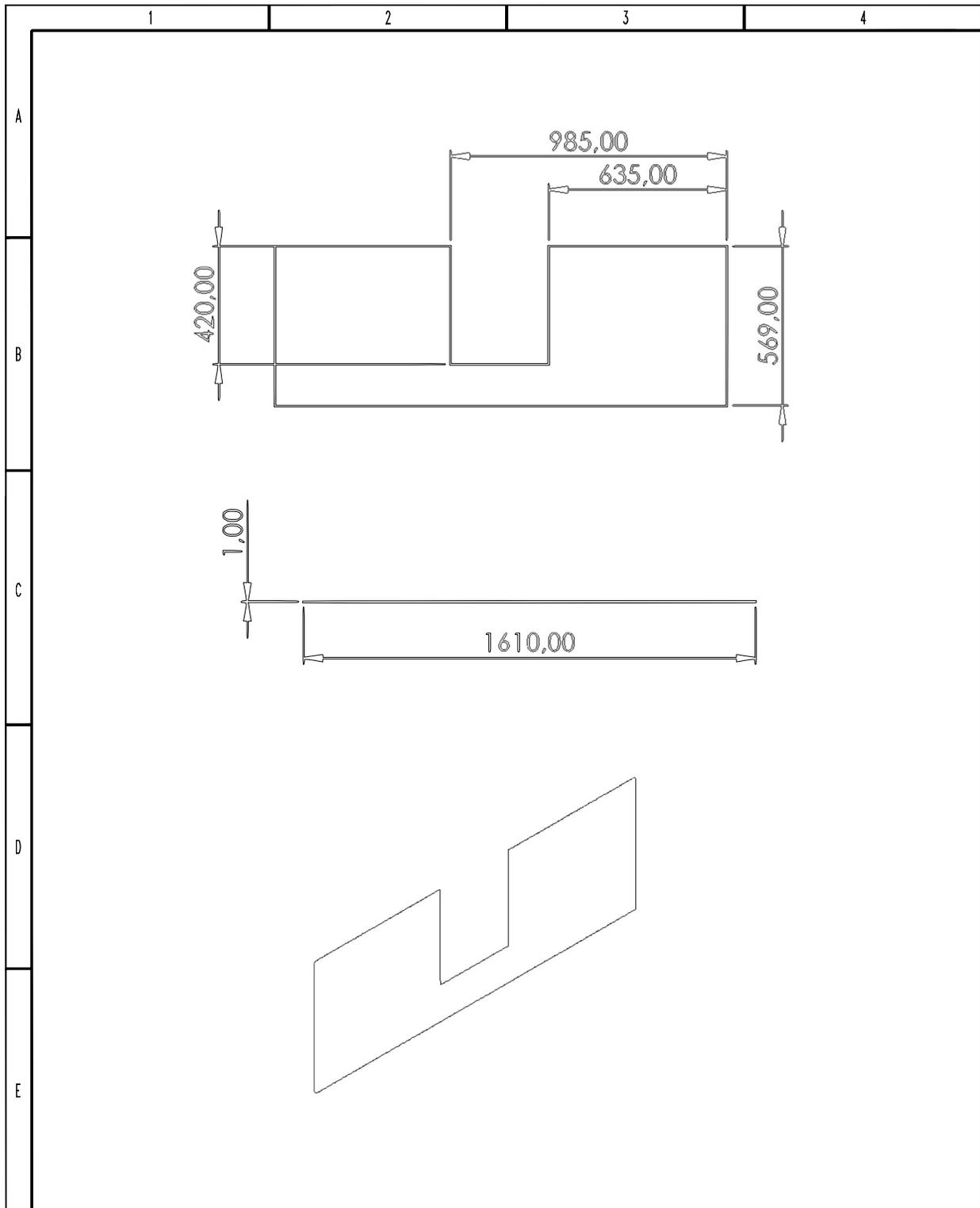
				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
						MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	
				Fecha	Nombre	Escala	
				Dib.	Jaramillo Diego	1:2	
				Rev.			
				Apro.			
				UTC		Fig1. Estructura secador-vista frontal	
						ISO E	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				
						(Sustituye a:)	



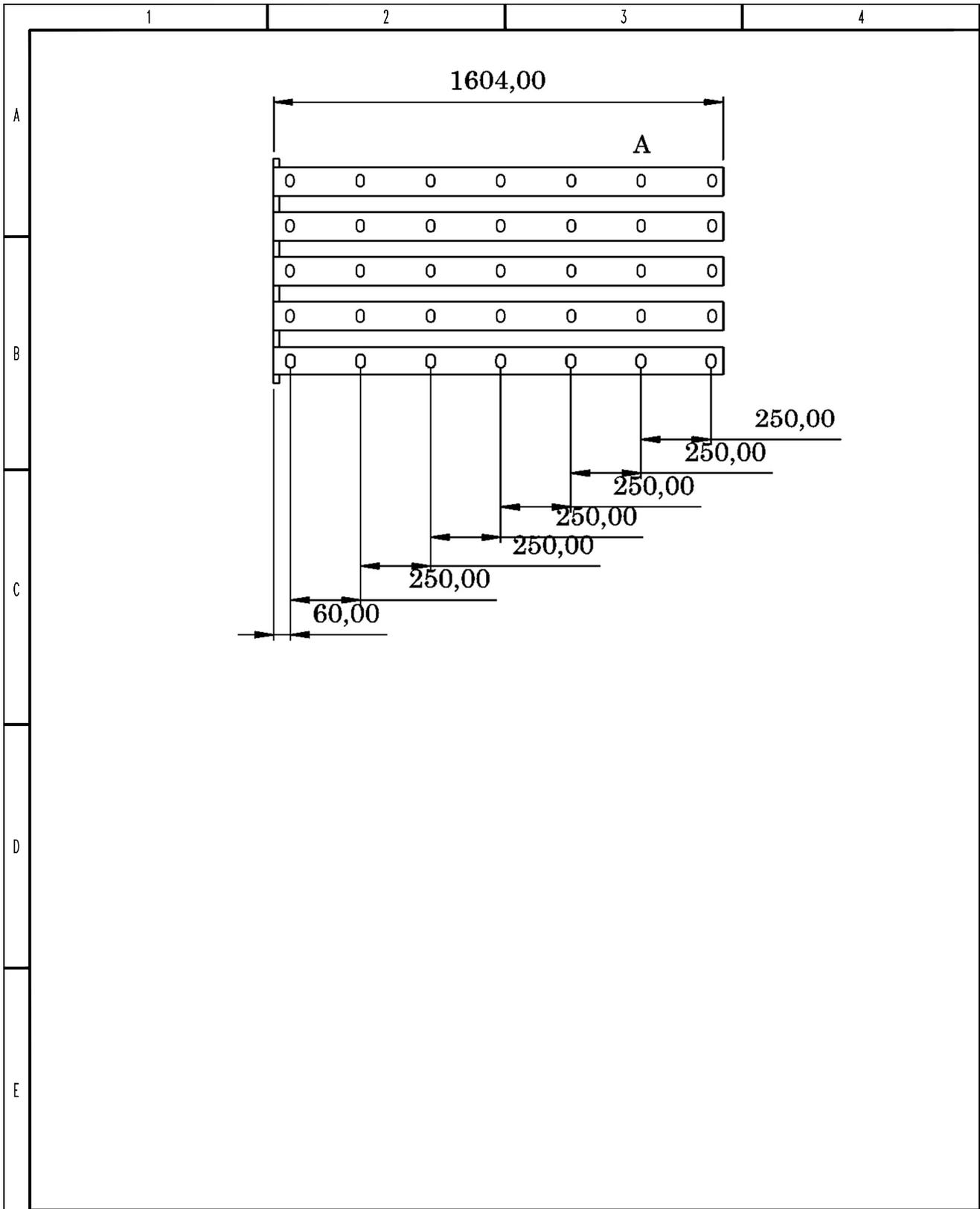
				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECÁNICA	
				Fecha	Nombre	MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	Escala 1:2
				Dib.	Jaranillo Diego		
				Apro.			
				Apro.		Fig2. Plano difusor-vista lateral	ISO E 
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTC			
				109 (Sustituye a:)			



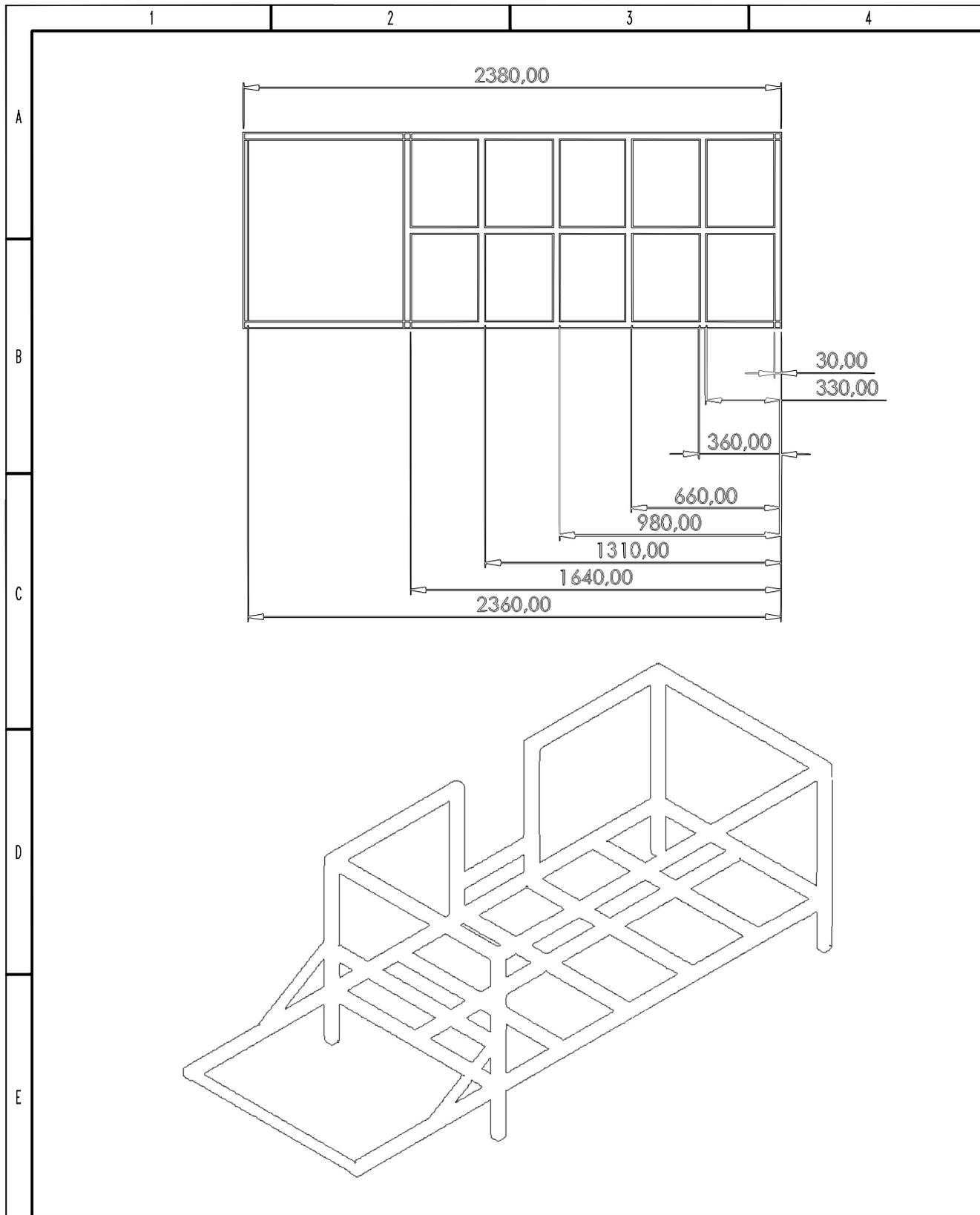
				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECÁNICA	
						Escala	
						1:2	
				Fecha	Nombre	MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	
				Dib.	Jaramilla Diego		
				Rev.			
				Apro.			
				UTC		Fig3. Plano difusor- vista frontal	
						ISO E	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				
						(Sustituye a:)	



				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
				Fecha	Nombre	MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	Escala 1:2
				Dib.	Jaramilla Diego		
				Rev.			
				Apro.		Fig4. Plano placa frontal	ISO E
				UTC			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustituye a:)	

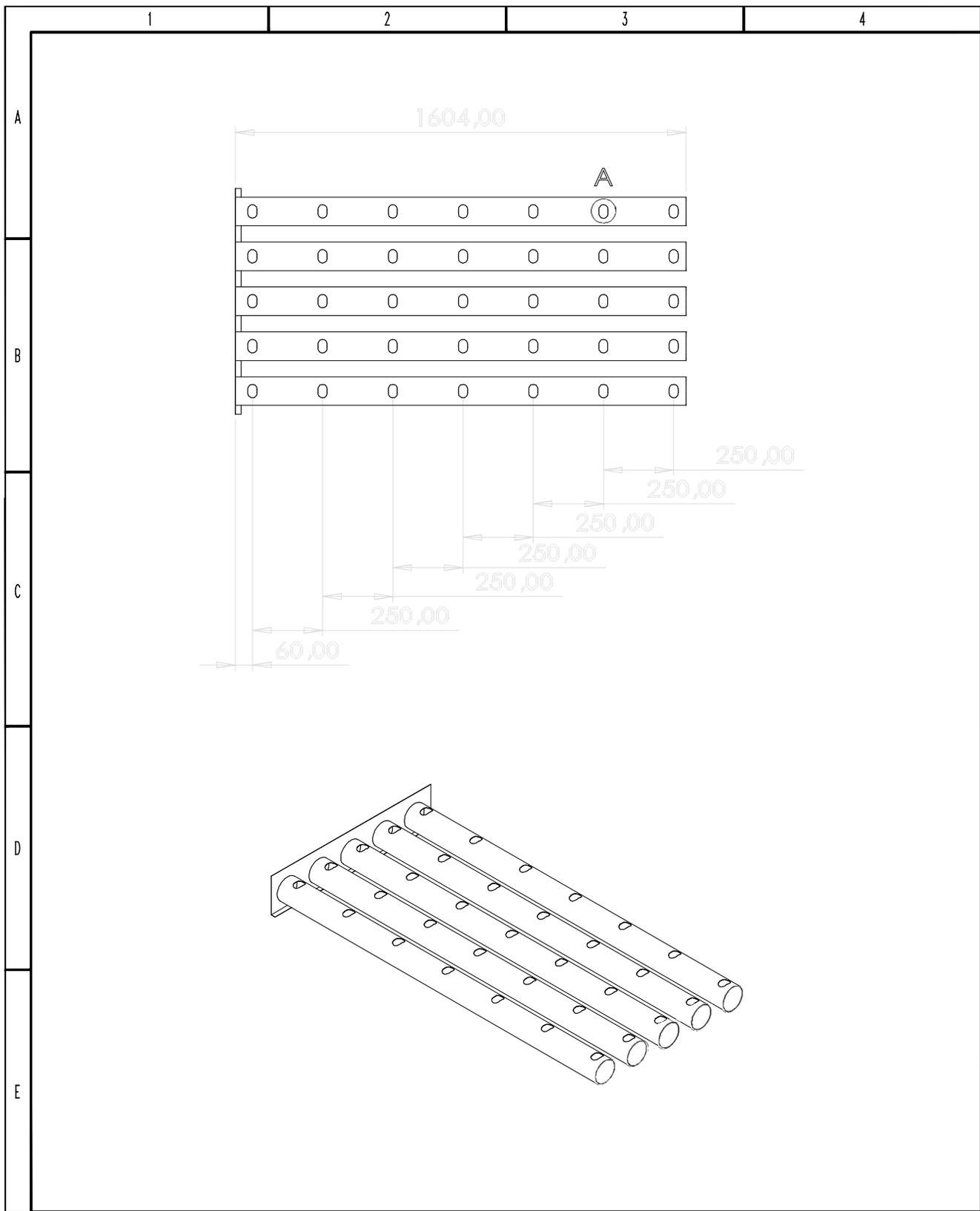


				tolerancias		(Peso)		MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
				Fecha		Nombre		Escala	
				Dib.		Jaramillo Diego		1:2	
				Rev.				MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	
				Apro.				Fig5. Distribuidor de gas- vista interior	
				UTC				ISO E	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						
								112 (Sustituye a:)	



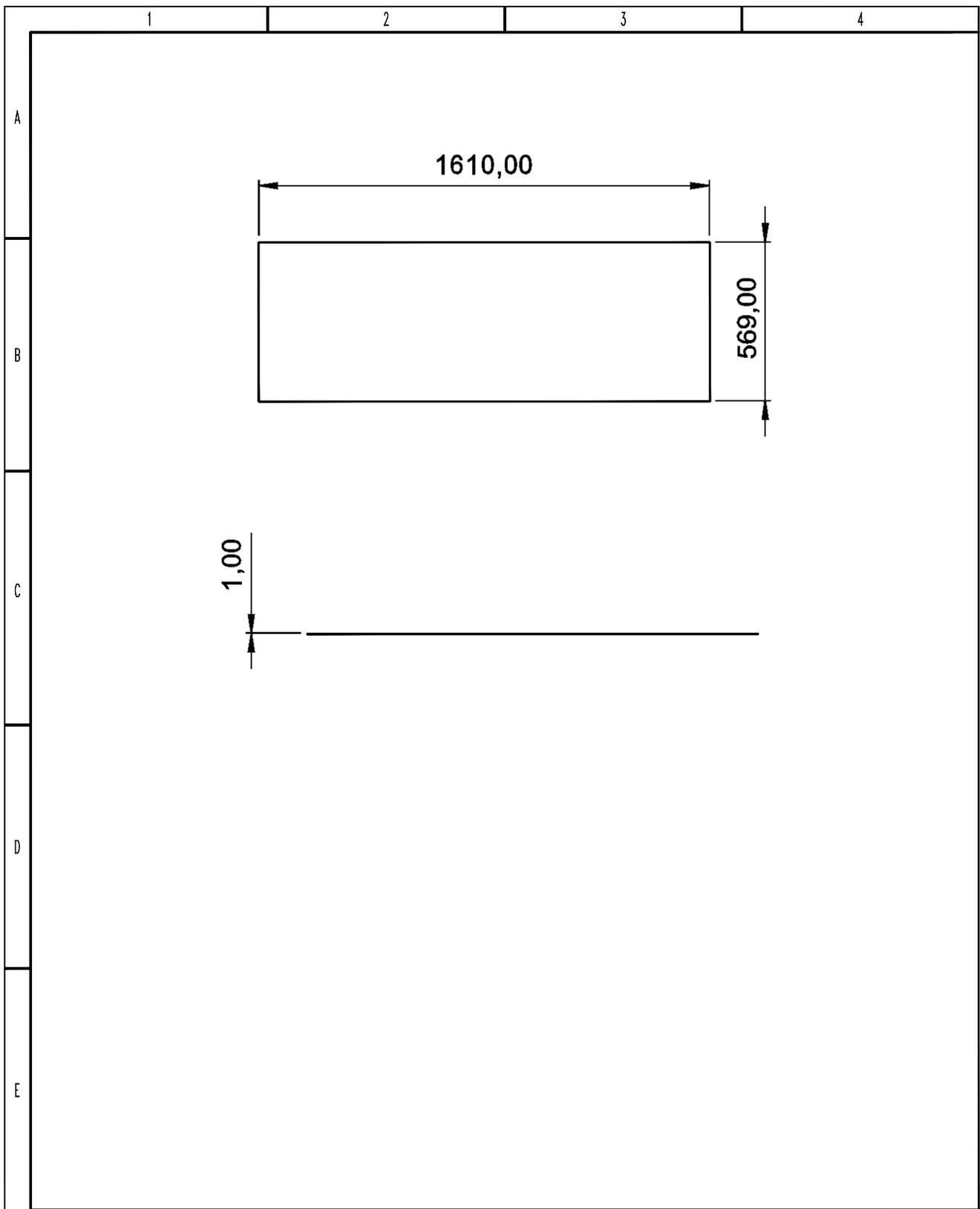
				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
						MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	Escala 1:2
				Fecha	Nombre		
				Dib.	Jaramillo Diego		
				Rev.			
				Apro.			
				UTC		Fig6. Plano secador lateral	ISO E
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			113	(Sustituye a:)



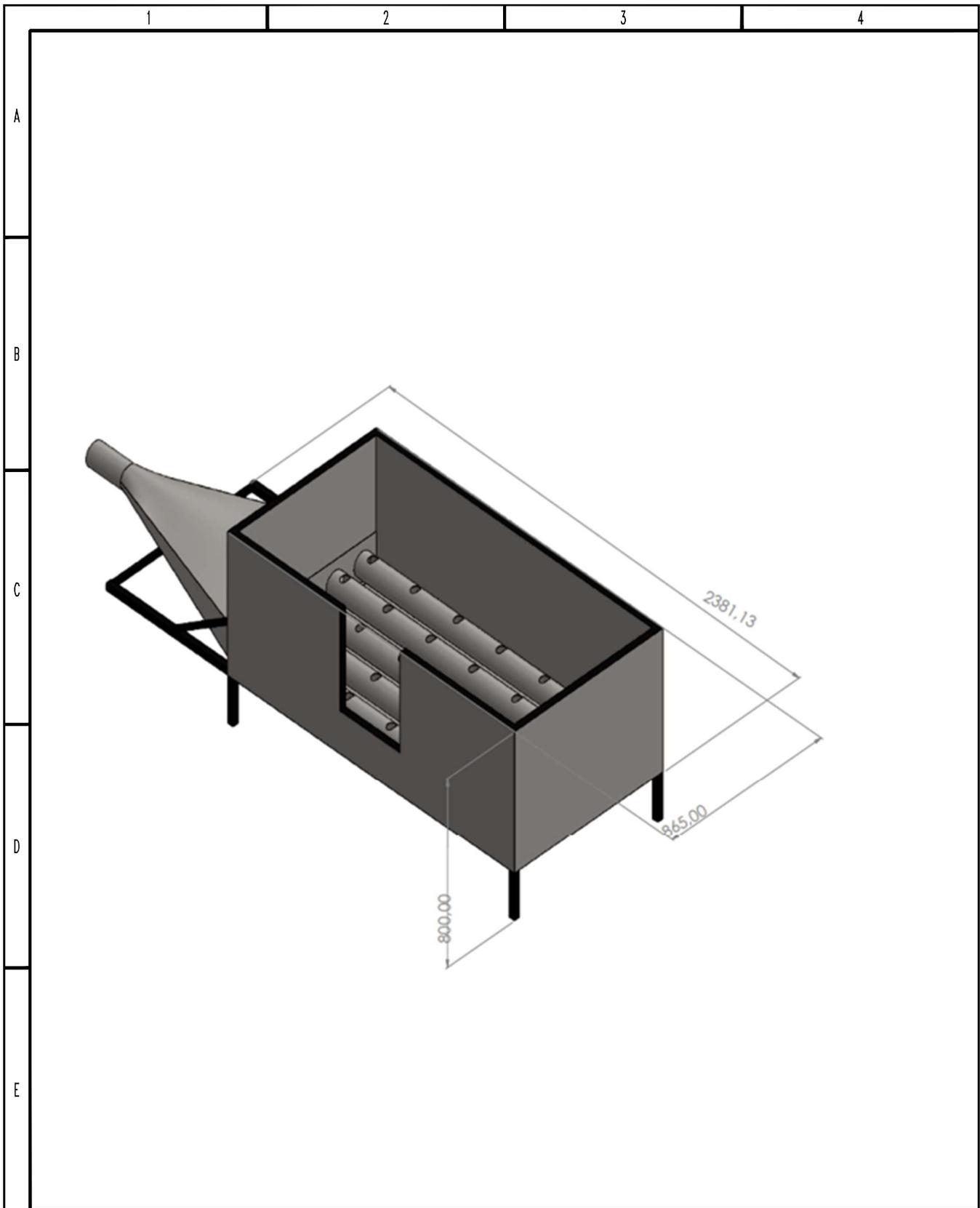


				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECÁNICA	
				Fecha	Nombre	MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	Escala 1:2
				Dib.	Jaramillo Diego		
				Rev.			
				Apro.		Fig8. Distribuidor de gas-vista lateral	ISO E
				UTC			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			115	(Sustituye a:)





				tolerancias	(Peso)	MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
					Fecha	Nombre	Escala
				Dib.		Jaramillo Diego	1:2
				Rev.			MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA
				Apro.			Fig9. Placa posterior interior
				UTC			ISO E
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				
							(Sustituye a:)



				tolerancias		(Peso)		MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA	
				Fecha		Nombre		Escala	
				Dib.		Jaramillo Diego		1:2	
				Rev.				MODELACIÓN DE UN SECADOR RECTANGULAR PARA EL SECADO DE CACAO EN CONVECCIÓN FORZADA	
				Apr.					
				UTC		Fig10. Estructura secador completo		ISO E	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			117		(Sustituye a:)	