

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA CLIMÁTICA
PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE CURADO DE TABACO
VIRGINIA PARA LA EMPRESA COLTABACO S.A.S**

**JUAN FELIPE LOZANO SUAREZ
REINALDO CALA RUIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA CLIMÁTICA
PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE CURADO DE TABACO
VIRGINIA PARA LA EMPRESA COLTABACO S.A.S**

**JUAN FELIPE LOZANO SUAREZ
REINALDO CALA RUIZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

**CARLOS BORRÁS PINILLA
PhD. en Ingeniería Mecánica**

Codirector

**PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO
Msc. en Métodos numéricos aplicados al calculo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por tantas bendiciones, mis padres Humberto y Claudia,
mi hermano José David y mi sobrino Juan José,
a mi familia “diferente y feliz”
por brindarme inspiración,
ejemplo y apoyo incondicional
a lo largo de mi carrera profesional y vida.

Juan Felipe Lozano Suarez

DEDICATORIA

A mis padres por brindarme su amor y apoyo incondicional,
formarme como persona con su buen ejemplo.

A mis hermanos Santiago, Silvia y Laura,
que han estado conmigo y han ayudado de alguna u otra manera
en mi formación profesional.

Reinaldo Cala Ruiz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios y nuestras familias por brindarnos motivación para ser mejores profesionales cada día, a Philip Morris International, a los ingenieros Juan Carlos Pulido, Fitzgerald García y a todo el equipo de trabajo de Coltabaco S.A.S en Villanueva – Santander, por su ayuda en esta investigación, gracias a su gran interés por la mejora del Agro Colombiano este proyecto pudo hacerse realidad. Agradecimientos para los profesores Calos Borrás y Pedro Díaz por la dirección, motivación, asesoría intelectual y sugerencias a lo largo de este proyecto, al equipo de Smart Ingeniería, por su apoyo y asesoría en la construcción del prototipo, por último, a la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por cumplir con su misión de brindarnos formación integral y científica.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	22
1. OBJETIVOS.....	25
1.1 OBJETIVO GENERAL	25
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	27
2.1 CONTEXTUALIZACIÓN	27
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	29
2.3 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	31
3. MARCO TEÓRICO	33
3.1 PRINCIPALES PROCESOS DE CURACIÓN DE TABACO EN COLOMBIA...33	
3.1.1 Curado al horno (Flue-Cured).....	33
3.1.2 Curado con horno (Bulk-Cured).....	35
3.1.3 Curado al Aire (Air-Cured).	37
3.1.4 Curado al sol (Sun-Cured).....	40
3.2 VARIEDADES DE TABACO EN COLOMBIA	41
3.2.1 Tabaco Burley.....	41
3.1.2 Tabaco Virginia.....	42
3.2.3 Tabaco Negro.....	44
3.3 OPERACIÓN DE COLTABACO S.A.S EN COLOMBIA	45
3.4 PROYECTO TABACO VIRGINIA CURADO AL SOL (VSC) –YELLOW	46
3.5 ETAPAS DE CURADO TABACO VIRGINIA.....	52
3.5.1 Amarillamiento.....	52
3.5.2 Fijación de color o secado de lámina.....	53
3.5.3 Secado de vena.....	54
4. PROCESO DE DISEÑO Y CONTRUCCIÓN	55

4.1 DISEÑO CONCEPTUAL.....	55
4.1.1 Requerimientos del consumidor.....	55
4.1.2 Requerimientos del diseñador.	56
4.1.2.1 Materiales estándares.....	56
4.1.2.2 Mantenimiento.	56
4.1.2.3 Montaje.	57
4.1.2.4 Resistencia a la corrosión.....	57
4.1.2.5 Capacidad.....	57
4.1.2.6 Seguridad.....	57
4.1.2.7 Durabilidad.....	57
4.1.3 Matriz calidad (QFD).....	58
4.2 DISEÑO EN DETALLE	60
4.2.1 Sistema de ventilación y calefacción.	61
4.2.2 Sistema estructural.	64
4.2.2.1 Recinto interior del proceso de curado.....	64
4.2.2.2 Caja de controles.	66
4.2.3 Sistema de control y medición.	67
4.2.3.1 Control PID de temperatura.	69
4.2.3.2 Control ON – OFF humedad relativa.	75
4.2.3.3 Peso de las hojas.....	77
4.2.4 Sistema de interfaz y manipulación de datos.....	79
4.3 PROCESO CONTRUCCIÓN	81
4.3.1 Sistema estructural.	81
4.3.2 Sistema calefacción.	84
4.3.3 Sistema de pesaje.	87
4.3.4 Sistema de ventilación.	88
4.3.5 Sensor de temperatura y humedad relativa.	89
4.3.6 Tablero de control.	90
4.3.7 Materiales y especificaciones.	93
4.4 RECOMENDACIONES DE USO Y MANTENIMIENTO	95

5. VERIFICACIÓN DE CONTROLES Y SENSORES.....	98
5.1 CALIBRACION PID Y VELOCIDAD DE VENTILADOR.....	98
5.2 AJUSTE DE PESO	101
5.3 COMPROBACION DE FUNCIONAMIENTO DE SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA	102
6.PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	104
6.1 PRUEBA UNO (1), “Proceso de curación caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander simulado en la cámara climática”.....	108
6.1.1 Temperatura y humedad relativa (prueba uno (1)- cámara climática).	110
6.1.2 Peso de las hojas (prueba 1 – cámara climática).	117
6.2 PRUEBA DOS (2), “Proceso con modificaciones al ambiente de curación en el caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander simulado en la cámara climática”	119
6.2.1 Temperatura y humedad relativa (prueba dos (2)- cámara climática).....	122
6.2.2 Peso de las hojas (prueba 2 – cámara climática).	128
6.3 ANALISIS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HUMEDA DEL TABACO VIRGINIA USADO EN LAS PRUEBAS.....	129
6.3.1 Prueba gravimétrica para la determinación de masa seca y húmeda (secado en estufa).	130
6.3.2 Determinación de humedad en base húmeda de las hojas de tabaco Virginia usadas en las pruebas.....	135
7. ESTUDIO DE AZÚCARES EN PRUEBAS REALIZADAS	141
8. CONCLUSIONES	143
9. RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	147

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Principales productores de tabaco en el mundo	28
Figura 2. Horno de Flue-Cured.	30
Figura 3. Caney de Virginia Sun Cured VSC.	31
Figura 4. Horno para Flue Cured.	34
Figura 5. Grafico Flue Cured.....	35
Figura 6 Horno tipo Bulk Cured.....	37
Figura 7. Caney de Air Cured.	38
Figura 8. Tabaco secándose al aire Air cured.	39
Figura 9. Estructura para Sun Cured	40
Figura 10. Cultivo de tabaco Burley	41
Figura 11. Tabaco Burley curado.....	42
Figura 12. Color de hojas de tabaco Virginia	43
Figura 13. Nomenclatura posiciones foliares	43
Figura 14. Hoja de tabaco negro.....	44
Figura 15. Sitios de cultivo y operac,ión del tabaco de PMI.....	45
Figura 16. Esquema de produccion de tabaco PMI	46
Figura 17. Caney cubierto de plástico de prueba o estructura VSC.	47
Figura 18. Caneyes cubiertos de plástico en Villanueva (Santander).....	47
Figura 19. Distribución del tabaco Virginia dentro de un caney cubierto de plástico.....	48
Figura 20. Cujes dentro de un caney cubierto de plástico.	48
Figura 21. Posición de los instrumentos de medición.	49
Figura 22. Humedad en exceso en las paredes del caney cubierto de plástico. ...	50
Figura 23. Comportamiento en estructura VSC o caney cubierto de plástico amarillo verdoso.....	51
Figura 24. Amarillamiento tabaco Virginia	52
Figura 25. Fijación de color tabaco Virginia	53

Figura 26. Secado de vena tabaco Virginia	54
Figura 27. Esquema para diseño de prototipo de cámara climática.	60
Figura 28. Lógica de funcionamiento del prototipo	61
Figura 29. Ventilador – Resistencia	62
Figura 30. Calentamiento en la cámara climática	63
Figura 31. Compuerta superior camara climatica	65
Figura 32. Orificio rectangular para dar ingreso al aire caliente al recinto del prototipo	65
Figura 33. Compuerta para visualizar el proceso y colgar las hojas de tabaco	66
Figura 34. Caja de controles	67
Figura 35. Esquema del Circuito eléctrico del prototipo de cámara climática	68
Figura 36. Termocupla	69
Figura 37. Sensor de Humedad relativa	69
Figura 38. Sistema de control en lazo cerrado con control PID para temperatura.	70
Figura 39. PID ideal	71
Figura 40. Configuración autoajuste.	72
Figura 41. bloques de programación	73
Figura 42. Pantalla Principal	73
Figura 43. Asistente de instrucciones	74
Figura 44. PID operation	75
Figura 45. Proceso ideal del control ON- OFF de humedad relativa.....	76
Figura 46. Esquema control ON-OFF de humedad relativa.....	76
Figura 47. Actuador lineal	77
Figura 48. Explicación de funcionamiento de una celda de carga	78
Figura 49. Celdas de carga.....	78
Figura 50. Parrilla para colgar hojas	79
Figura 51. Pantalla Wecon.....	80
Figura 52. Esquema conexión de pantalla o panel HMI.....	80
Figura 53. Pantalla vista desde un computador de programa LEVI STUDIO.	81
Figura 54. Ensamble cabina	82

Figura 55. Lana de vidrio	83
Figura 56. Parrilla de montaje de tabaco	83
Figura 57. Puerta de acceso principal y empaque.	84
Figura 58. Ducto en construcción	85
Figura 59. Montaje resistencias	86
Figura 60. Ventilador.....	86
Figura 61. Ducto de calefacción en construcción.....	87
Figura 62. Celdas de carga.....	88
Figura 63. Actuador lineal para la apertura de la compuerta superior	88
Figura 64. Compuerta superior construida.....	89
Figura 65. Termocupla y sensor de humedad	90
Figura 66. Tablero de control.....	90
Figura 67. Pantalla táctil en el prototipo.....	91
Figura 68. Prototipo de cámara climática con vista a la caja de control.....	92
Figura 69. Prototipo de cámara climática.....	92
Figura 70. Configuración de control PID desde el prototipo.....	99
Figura 71. Comprobación de velocidad de aire	100
Figura 72. Ajuste de peso	101
Figura 73. Peso conocido en la parrilla del prototipo.	102
Figura 74. Comparación de medición.	103
Figura 75. Caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander.	104
Figura 76. Cosecha prueba uno.....	111
Figura 77. Hojas de tabaco antes de iniciar la prueba uno.	111
Figura 78. Hojas de tabaco Virginia prueba uno.	112
Figura 79. Inicio de Amarillamiento.....	115
Figura 80. Inicio de Secado de Lámina.....	116
Figura 81. Inicio de secado de vena	116
Figura 82. Tabaco resultante de la prueba uno.	117
Figura 83. Hojas de tabaco prueba uno empacadas.	117
Figura 84. Hojas de tabaco Virginia antes de iniciar la prueba dos.	122

Figura 85. Inicio Amarillamiento.....	125
Figura 86. Inicio de secado de Lámina	126
Figura 87. Inicio secado de Vena.....	126
Figura 88. Hojas de tabaco curadas en el prototipo en la prueba dos.....	127
Figura 89. Hojas de tabaco prueba dos empacadas.....	127
Figura 90. Hojas de tabaco antes de iniciar el experimento.	131
Figura 91. Hojas de papel para deshumidificarlas	131
Figura 92. Pesado de las muestras con recipiente antes de iniciar la prueba.	132
Figura 93. Hojas de tabaco dentro de la estufa.	133
Figura 94. Hojas de tabaco en estado seco.....	133
Figura 95. Tabaco antes de ser ingresado al laboratorio.....	141

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Ambiente de curación en caney amarillo verdoso de Capitanejo.	105
Grafica 2. Amarillamiento en el caney amarillo verdoso	106
Grafica 3. Secado de lámina o fijación de color en el caney amarillo verdoso. ...	106
Grafica 4. Secado de vena en caney amarillo verdoso.	107
Grafica 5. Temperatura y humedad prueba uno.	113
Grafica 6. Temperatura y humedad relativa en etapa de amarillamiento prueba uno.	114
Grafica 7. Temperatura y humedad relativa en secado de lámina prueba uno.	114
Grafica 8. Temperatura y humedad relativa en secado de vena prueba uno.	115
Grafica 9. Peso de las hojas de la prueba uno.	118
Grafica 10. Temperatura y humedad relativa de la prueba dos	123
Grafica 11. Temperatura y humedad relativa en amarillamiento de la prueba dos.	124
Grafica 12. Temperatura y humedad relativa en secado de lámina de la prueba dos.	124
Grafica 13. Temperatura y humedad relativa en secado de vena de la prueba dos.	125
Grafica 14. Peso de las hojas en la prueba dos.	128
Grafica 15. Peso de las hojas en las dos pruebas de curación.	136
Grafica 16. Contenido de humedad en base húmeda en las pruebas realizadas.	137
Grafica 17. Contenido de humedad en base húmeda en amarillamiento.	137
Grafica 18. Contenido de humedad en base húmeda en secado de lámina.	138
Grafica 19. Contenido de humedad en base húmeda en secado de vena.	139

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos del consumidor.....	56
Tabla 2. Requerimiento del diseñador	58
Tabla 3. Matriz de relacionamiento.....	58
Tabla 4. Matriz de Resultados	59
Tabla 5. Materiales principales	93
Tabla 6. Datos técnicos del prototipo.....	95
Tabla 7. Condiciones de instalación, operación y riesgo.	95
Tabla 8. Recomendaciones de mantenimiento.....	97
Tabla 9. Estadísticas de ambiente de curación caney amarillo verdoso.....	105
Tabla 10. Estadísticas de la etapa de amarillamiento en el caney amarillo verdoso.....	106
Tabla 11. Estadísticas de la etapa de secado de lámina en caney amarillo verdoso	107
Tabla 12. Estadísticas de la etapa de secado de vena en caney amarillo verdoso	107
Tabla 13. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Amarillamiento dada en caney amarillo verdoso de Capitanejo.....	108
Tabla 14. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Secado de lámina dada en el caney amarillo verdoso de Capitanejo.....	109
Tabla 15. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Secado de vena dada en el caney amarillo verdoso de Capitanejo.....	110
Tabla 16. Duración de cada etapa de curado en la prueba uno.	113

Tabla 17. Peso de las hojas en cada etapa de curación prueba uno.....	118
Tabla 18. Cambios realizados a la prueba dos.	119
Tabla 19. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Amarillamiento.	120
Tabla 20. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Secado de lámina.	120
Tabla 21. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Secado de Vena.	121
Tabla 22. Tiempos de curación de prueba dos.	123
Tabla 23. Datos de cambio de peso en prueba dos.....	128
Tabla 24. Cálculos para obtener peso de una hoja seca.	134
Tabla 25. Funciones de contenido de humedad en base húmeda.....	141
Tabla 26. Resultados de las pruebas de azúcares.	135

LISTA DE ANEXOS*

Anexo A. Manual del PLC

Anexo B. Manual del prototipo de cámara climática.

Anexo C. Planos cámara climática.

Anexo D. Forma de hacer el estudio de azúcares.

Anexo E. Informe estudio de azúcares CICTA.

Anexo F. Especificaciones del Ventilador.

Anexo G. Soldadura Tic.

Anexo H. Especificaciones Acero ASTM A36

Anexo I. Especificaciones lana de vidrio.

Anexo J. Especificaciones acero galvanizado.

Anexo K. Especificaciones acero inoxidable AISI 304

Anexo L. Carta de conformidad por parte de Coltabaco S.A.S

* Ver anexos adjuntos en el CD-ROM y se pueden visualizar en la base de datos de la biblioteca UIS

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA CLIMÁTICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE CURADO DE TABACO VIRGINIA PARA LA EMPRESA COLTABACO S.A.S.*

AUTORES: JUAN FELIPE LOZANO SUAREZ
REINALDO CALA RUIZ**

PALABRAS CLAVES: CURACIÓN, TABACO VIRGINIA, AUTOMATIZACIÓN, CÁMARA CLIMÁTICA, HUMEDAD EN BASE HÚMEDA.

DESCRIPCIÓN:

Coltabaco S.A.S una empresa afiliada a Philip Morris International, tiene un área de investigación ubicada en Colombia, con el fin de mejorar los procesos de siembra, cosecha y curado del tabaco. Ha implementado un proceso de curado de tabaco Virginia, experimental y no contaminante, usando estructuras cubiertas de plásticos y expuestas al sol, con las cuales se busca obtener tabaco de buena calidad como el obtenido en el proceso contaminante denominado Flue Cured.

En este proyecto se diseña y construye un prototipo de cámara climática, que simula distintos ambientes de curación de tabaco con diferentes parámetros de temperatura (control PID) y humedad relativa ambiente (control ON-OFF), además logra medir el cambio de peso de las hojas (PLC) durante el proceso de curado, esto con el fin de curar tabaco en un proceso experimental a nivel de laboratorio, para así, analizar el comportamiento del peso y la humedad en base húmeda de las hojas al final de cada prueba, logrando obtener conclusiones para mejoras en el ambiente de curación deseado.

En el interior del prototipo, se aproximó el ambiente de curación que ocurre en una estructura diseñada para curar tabaco Virginia al sol, cubierta de plástico amarillo verdoso ubicada en Capitanajo Santander, donde se encontró, que al lograrse una temperatura mínima en las madrugadas de 26 [°C] y no de 24.3 [°C] y una Humedad relativa máxima de 55 [%Rh] y no a 78 [%Rh] aproximadamente, en la etapa de secado de lámina y secado de vena, se logra una mejoría en la fijación de azúcares desde 6.76 [%] al 7.77 [%] en el producto final, además se encontró que el comportamiento de las hojas de tabaco Virginia en la etapa de Amarillamiento, no es muy variable al ser sometidas a diferentes condiciones ambientales.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla, Ingeniero Mecánico, P.h.D. Codirector: Pedro José Díaz, Ingeniero Mecánico, Msc

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CLIMATIC CHAMBER PROTOTYPE FOR THE CHARACTERIZATION OF THE VIRGINIA TOBACCO CURING PROCESS FOR THE COMPANY COLTABACO S.A.S.*

AUTHORS: JUAN FELIPE LOZANO SUAREZ
REINALDO CALA RUIZ **

KEYWORDS: CURED, TOBACCO VIRGINIA, AUTOMATION, CLIMATIC CHAMBER, MOISTURE ON WET BASIS.

DESCRIPTION:

Coltabaco S.A.S a company affiliated with Philip Morris International, has a research area located in Colombia, in order to improve the processes of sowing, harvesting and curing of tobacco. The company has implemented a process of curing Virginia tobacco, experimental and friendly to the environment, using structures covered in plastics and exposed to the sun, with which it seeks to produce good quality tobacco as obtained in the pollutant process called Flue Cured.

In this project, a prototype of a climatic chamber is designed and constructed to simulate different tobacco curing environments with different temperature parameters (PID control) and relative humidity (ON-OFF control), in addition, the prototype can measure the change in weight of the leaves (PLC) during the curing process and cure tobacco with an experimental process at the laboratory level, allowing to analyze the behavior of weight and moisture on wet basis of the leaves at the end of each test, obtaining conclusions for improvements in the desired curing environment.

Inside the prototype, the curing environment that occurs in a structure designed to cure Virginia tobacco in the sun, covered in greenish-yellow plastic located in Capitanejo Santander, was simulated. In the experiment it was found it is possible to generate an improvement in the sugar fixation from 6.76 [%] to 7.77 [%] in the final product (Virginia tobacco leaves), when a minimum temperature is reached in the early morning of 26 [° C] and not of 24.3 [° C] and a maximum relative humidity of 55 [% Rh] and not to 78 [% Rh] approximately, in the stage of sheet drying and vein drying of the curing process, it was also found, that the behavior of Virginia tobacco leaves in the yellowing stage is not variable when subjected to different environmental conditions.

* Graduation Project

** Faculty of Physics-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Carlos Borrás P, Mechanical Engineer, PhD. Codirector: Pedro José Díaz G, Mechanical Engineer, Msc.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la evolución en los gustos del fumador desde los tradicionales cigarrillos negros, hacia los cigarrillos rubios que se vienen imponiendo de manera inexorable, hace que no todos los productos derivados del tabaco (cigarrillos, tabaco para mascar, aspirar, fumar en pipa) sean iguales, hay una gran variedad de colores y sabores, los cuales amplían la gama de características y suplen los gustos de los diferentes consumidores alrededor del mundo, esto deduce que la producción de un cigarrillo es más compleja de lo que parece. Permanentemente las distintas empresas tabacaleras, ofrecen productos exclusivos con sabores característicos y únicos, lo que hace generar una receta de fabricación diferente para cada tipo de cigarrillo, esta acción crucial hace necesario el uso de infraestructuras y distintos métodos de curación para fijar las características de fumado requeridas, dando propiedades aromáticas y fijando distintas proporciones de componentes químicos en los productos finales. Estos procesos de curación son generalmente realizados en hornos de paredes de barro, estructuras con techo y circulación de aire fresco o estructuras con máxima exposición al sol y sin techo, procesos también denominados Flue Cured, Air Cured, y Sun Cured.

El sector tabacalero es una gran fuente de empleo agrícola e industrial, donde los agricultores cultivan, curan y venden a las empresas, que por lo regular son estas las que les facilitan insumos junto con capacitaciones para su respectivo proceso de siembra, cosecha y mejora continua de producción. Luego de que la hoja se encuentre curada, la fase industrial se encarga de la producción de los distintos productos derivados del tabaco.

En Colombia, Coltabaco S.A.S una empresa afiliada a Philip Morris International (PMI), es la tabacalera más grande del país y la única productora de cigarrillos a

nivel nacional, la cual compra el 51 por ciento de la producción de tabaco colombiano, donde el tabaco Virginia es un gran porcentaje de esta cantidad, pero este ha estado amenazado por el aumento de costo de producción y prohibición del uso de madera o carbón como combustible para la generación de calor en los hornos de curado típicamente usados para la variedad Virginia, además debido a los factores contaminantes del proceso y también por la optimización de estos procesos de curación en países competidores. El centro agronómico de investigación de Coltabaco S.A.S ubicado en Villanueva-Santander, busca la solución de esta problemática y lleva a cabo una serie de estudios los cuales mantienen actualizados a los agricultores en avances de metodologías de cultivo y curación requeridos para el mejoramiento de la calidad del tabaco producido.

Implementando un proyecto llamado YELLOW, Coltabaco S.A.S incursiona en temas de optimización de curación del tabaco Virginia, intentando igualar la calidad del tabaco Virginia curado en horno (Flue Cured), a la curación al sol (Sun Cured), analizando el comportamiento del tabaco mientras se va curando bajo distintas condiciones ambientales, estudiando los distintos fenómenos que hacen empeorar o mejorar el curado y buscando la posibilidad de usar energías renovables en los procesos de curación, impulsando así el desarrollo sostenible para la producción de tabaco. La construcción del prototipo de cámara climática hace parte de una etapa del proyecto YELLOW y busca simular distintos ambientes de curación, obteniendo datos puntuales de temperatura, humedad relativa, tiempo de curación y comportamiento del peso de las hojas, para así buscar el mejoramiento de la curva del proceso de curación al sol, simulando procesos a escala para luego generar ideas de tamaño macro.

En el capítulo 1 se muestran los objetivos del proyecto, dimensionando unas de las metas a alcanzar en esta etapa del proyecto. En el capítulo 2 y 3, se relata la problemática y se muestran ejemplos de sistemas de curación típicos para entrar en contexto. El capítulo 4 muestra la posible solución a esta problemática,

explicando el proceso de diseño y construcción del prototipo. Finalmente, en el capítulo 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos, para sus respectivas conclusiones y recomendaciones finales.

Se espera que las metas alcanzadas en este proyecto de investigación, no se queden únicamente en un requisito de graduación o laboral, sino como un punto de partida para el enriquecimiento del conocimiento y mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos, este proyecto es generador de ideas y prosperidad en la industria tabacalera la cual se ha caracterizado durante muchos años por ser una buena fuente de empleo y avance cultural.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar el diseño y construcción de un prototipo de cámara climática para la caracterización del proceso de curado de tabaco Virginia para la empresa Coltabaco S.A.S., la cual contribuye con el fortalecimiento de la misión de la Universidad Industrial de Santander y la escuela de Ingeniería Mecánica en su búsqueda de formar profesionales de alta calidad humana, para el beneficio de la industria y mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad a través del grupo de investigación DICBOT.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir una cámara climática para caracterización del proceso de curado de la hoja de tabaco Virginia con los siguientes requerimientos técnicos y funcionales:
 1. Capacidad de curado de 500-600 gramos de hoja de tabaco Virginia.
 2. Dimensiones aproximadas de 500x500x400 milímetros (mm).
 3. Capacidad de medir y controlar temperatura entre 10 °C y 80 °C grados Celsius del ambiente de curación.
 4. Capacidad de medir humedad relativa 0% y 95% de humedad relativa del ambiente de curación.
 5. Capacidad de medir el peso (gramos) de las hojas de tabaco.
 6. Capacidad de almacenar en tiempo real los datos de temperatura, humedad relativa del ambiente de curación y peso de las hojas de tabaco.

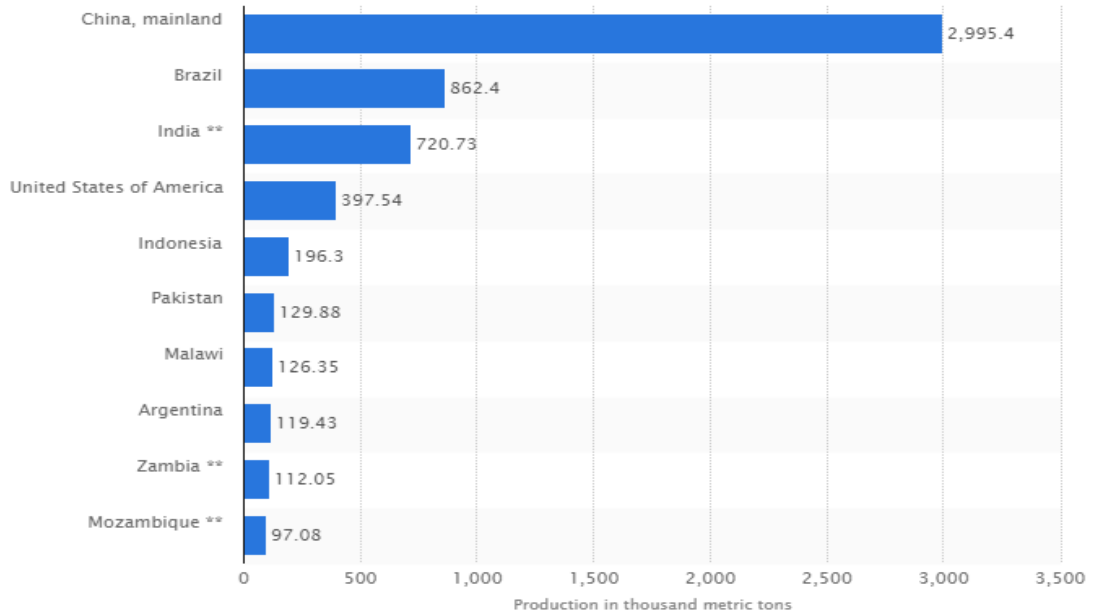
- Simular experimentalmente en el prototipo de cámara climática construido el proceso de curado al sol del tabaco Virginia, emulando las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) generadas en los secadores (caneyes) con paredes y techo de plástico amarillo verdoso ubicados en el municipio de Capitanejo /Santander, con el fin de determinar:
 1. Aumento o disminución del porcentaje de fijación de azúcar final en la hoja de tabaco Virginia, con diferentes perfiles de temperatura y humedad relativa en el ambiente de curado.
 2. Una función analítica que relacione el contenido de humedad (base húmeda) de la hoja de tabaco con el tiempo en cada etapa del proceso de curado.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 CONTEXTUALIZACIÓN

La industria tabacalera ha sido una de las más influyentes en la cultura a lo largo de la historia de Colombia; desde la época de la colonia, los indígenas cultivaban y procesaban de manera artesanal productos derivados de la hoja de tabaco y con el paso de los años, la particularidad del tabaco propio de las tierras americanas se volvió de conocimiento mundial hasta conformar la poderosa industria que es hoy. La siembra, cosecha, curado y procesamiento final del tabaco para la producción de cigarrillos, cigarros o puros y tabaco para mascar produce cuantiosas divisas en más de 125 países de los diferentes continentes del mundo. Además, produce más de 33 millones de empleos en el sector agrario a nivel mundial y si se tiene en cuenta los empleos en procesamiento esta cifra asciende a los 70 millones. China es el principal productor y consumidor de tabaco, seguido por Brasil, India y Estados Unidos. En la figura 1 se muestran los principales productores de tabaco en el mundo.

Figura 1. Principales productores de tabaco en el mundo



Fuente: STATISTA Leading countries in tobacco production [en línea] disponible en: <https://www.statista.com/statistics/261173/leading-countries-in-tobacco-production/>

En Colombia, la agroindustria del tabaco representa un considerable porcentaje del PIB nacional y da empleo a una importante porción de la población en distintas regiones del país, concentrando su cultivo principalmente en los departamentos de Boyacá, Caldas, Cesar, Huila, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Valle del Cauca y Santander, siendo el último considerado como uno de los mayores productores de tabaco en Colombia con 50 por ciento de la producción de tabaco negro nacional, reconocido por sus altos niveles de nicotina. Los municipios tabacaleros en Santander son en su respectivo orden: Capitanejo, San Gil, Barichara, Girón, Los Santos, Villanueva, Charalá y Socorro, juntos en el año 2014 produjeron 34.512 toneladas de tabaco.¹

¹ AGRONET. Ministerio de Agricultura de Colombia. [en línea] disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

Por su capacidad de adaptación en diferentes regímenes climáticos y su alta rentabilidad, el tabaco es uno de los cultivos preferidos por los campesinos colombianos, sin embargo, ante la apertura económica, la optimización de procesos por parte de compañías tabacaleras de otros países y las estrictas regulaciones en cuanto a la composición química del producto final, el tabaco colombiano ha visto disminuidas sus cifras de exportación debido a su incapacidad de competir con los precios y calidad del mercado, lo que ha llevado a los productores e industrias a buscar nuevas soluciones para minimizar los costos de producción y procesamiento y a su vez mejorar la calidad del producto para que la industria tabacalera en Colombia recupere su competitividad.

La producción de tabaco contempla dos fases, una agrícola y otra industrial. La fase agrícola es realizada por parte de los campesinos e incluye la siembra, cosecha de las hojas y su posterior proceso de curado, esto se realiza con la compañía y asesoramiento de las empresas; y la industrial, que incluye la adecuación final de la hoja, el armado y empaquetado del producto final, bien sea cigarrillos, cigarros o tabaco para mascar.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de curación del tabaco es quizá una de las estancias más importantes durante su cadena de producción y por tanto de las más delicadas; ya que aquí se realiza el proceso de conversión de los almidones contenidos en la hoja, en azúcares y alcaloides, que, de acuerdo a la variedad de tabaco, varía la proporción de estas sustancias presentes en la hoja.

Para realizar este proceso se cuenta con diferentes métodos, los cuales dependiendo del propósito con el cual se cura el tabaco, cambia desde el curado

tradicional en caneyes de madera, hasta el uso de hornos con ambiente controlado para su proceso de curación.

El tabaco Virginia es una variedad cultivada en Colombia por parte de la compañía COLTABACO S.A.S concentrando su producción en el departamento del Huila y el municipio de Capitanejo-Santander, que debido a la naturaleza aromática propia de la variedad, requiere de un proceso especial de curación para aprovechar de la mejor manera las características físico-químicas que ofrece, por ésta razón su proceso de curación se realiza en hornos que utilizan fuentes de calor provocadas por energías no renovables, este proceso es conocido como Flue-Cured. En la figura 2 se observa un horno para el curado de tabaco tipo Flue cured.

Figura 2. Horno de Flue-Cured.



Por ésta razón, la empresa COLTABACO S.A.S afiliada a la multinacional Philip Morris International (PMI), ésta interesada en cambiar éstas prácticas de curación a través de la implementación y uso de fuentes de energías renovables, en el proceso de curación del tabaco, buscando alcanzar resultados semejantes a los obtenidos en el proceso de curación Flue Cured pero en estructuras cubiertas de plásticos como la que se puede apreciar en la figura 3, conocidas como estructuras VSC, Caneye o secadores de plásticos expuestos al sol.

Figura 3. Caney de Virginia Sun Cured VSC.



2.3 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La compañía COLTABACO S.A.S afiliada a la multinacional Philip Morris International (PMI), con el fin de mejorar las prácticas agrícolas e industriales, ha implementado el proyecto Virginia curado al sol (*Virginia Sun Cured* o VSC), el cual es un plan estratégico para optimizar el proceso de curación de tabaco con el uso de estructuras operadas expuestas al sol, aprovechando la radiación de las zonas en donde se realiza el ciclo de curado. Dado que para el aprovechamiento de la radiación solar se debe conocer el comportamiento del producto durante el proceso de curación, es necesario caracterizar el proceso de curado del tabaco Virginia para evaluar su desempeño y consumo de energía indicado en el proceso de curación.

La empresa en su centro agronómico de investigación ubicado en Villanueva-Santander, ha realizado un rediseño de estas estructuras de curado buscando un mejor rendimiento a través de la utilización de distintos plásticos para fomentar un

efecto invernadero dentro de la estructura, pero dadas las condiciones de operación y las dinámicas del cambio de la temperatura y la humedad relativa dentro del recinto en la madrugada, se han obtenido tabacos de mala calidad.

Para la optimización del proceso, la compañía ha hecho el convenio con la Universidad Industrial de Santander a través del grupo de investigación DICBOT, para estudiar el fenómeno, con lo cual se hace necesario el diseño y construcción de un prototipo de cámara climática para la simulación y caracterización del proceso de curado de la hoja de tabaco *Virginia* bajo las distintas cargas térmicas que experimenta en un proceso de curado al sol, obteniendo así el comportamiento de curación con los parámetros necesarios que buscan mejorar el contenido de azúcar final y así el proceso de curado de la hoja.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 PRINCIPALES PROCESOS DE CURACIÓN DE TABACO EN COLOMBIA

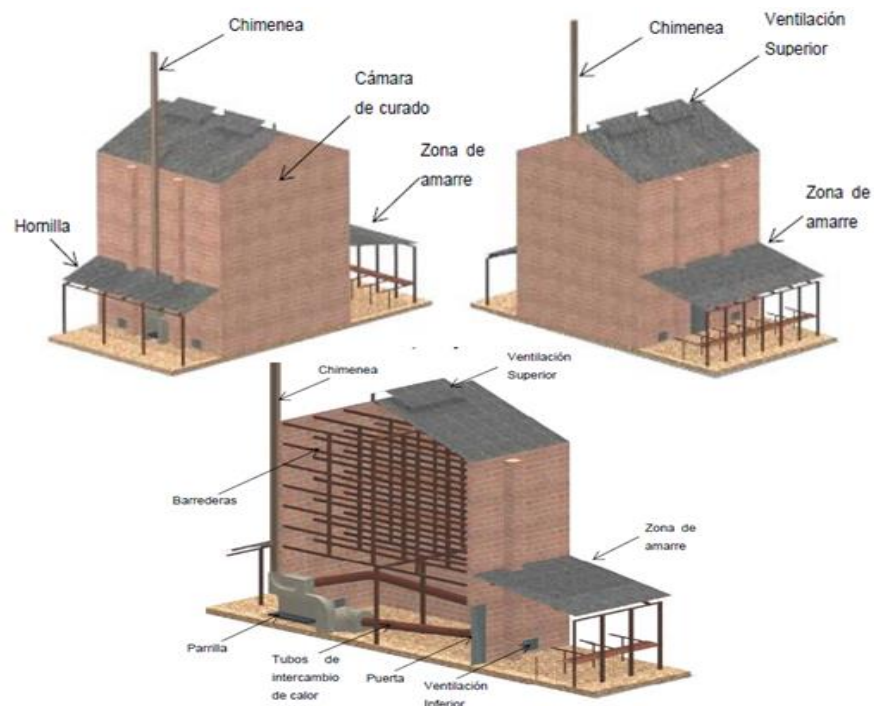
El tabaco es uno de los productos agroindustriales que más demanda energía térmica para su producción y a su vez es uno de los cultivos más difundidos en el mundo. Se usan distintos tipos de hornos en la curación de las hojas, de esta forma se fijan distintas características para cada variedad de tabaco, los procesos de curación del tabaco son cada vez más sofisticados gracias a los estudios que se realizan en diferentes partes del mundo, un ejemplo de esto es el proyecto “YELLOW” de la Compañía colombiana de tabaco (COLTABACO) el cual tiene como uno de sus objetivos la mejora de los modos de curación del tabaco colombiano, en este capítulo se hace una descripción de los principales procesos de curación del tabaco.

3.1.1 Curado al horno (Flue-Cured). Este tipo de curado de tabaco en horno o también conocido como Flue Cured, consiste básicamente en curar el tabaco en un recinto casi cerrado en su totalidad, con paredes de concreto y ladrillo hueco, equipado con un generador de calor a combustible y con ventilación, para así generar un ambiente de temperatura elevada y humedad relativa controlada, esto ocasiona una acelerada deshidratación en la hoja y un costo sensible en la producción del tabaco. El Flue Cured es un tipo de curación usado comúnmente para curar tabaco Virginia y hojas que se emplearan en envolturas de cigarros, debido a que la curación es acelerada por su alta generación de calor, se fijan los azúcares en el producto final de mejor manera en comparación con los demás tipos de curación. En la figura 4 se muestra un horno de curación de tabaco tipo Flue Cured, donde es posible observar sus componentes principales, las cuales son:

- Chimenea, para la salida de gases provenientes de la combustión

- Zona de amarre, donde las hojas de tabaco se organizan previamente para luego ser ubicadas en el interior del horno.
- Ventilación superior, diseñada básicamente para controlar la humedad del ambiente de curación.
- Tubos de intercambio de calor, para generar transferencia de calor entre el aire caliente proveniente de la quema de combustible y el ambiente de curación.
- Barrederas, distribución de barras de madera las cuales sirven para sostener las hojas de tabaco al interior del horno.
- Ventilación interior, pequeño agujero ubicado en la parte inferior del horno, la cual ayuda a circular el aire caliente dentro del recinto
- Puerta, para permitir el ingreso o salida al recinto interior del horno.

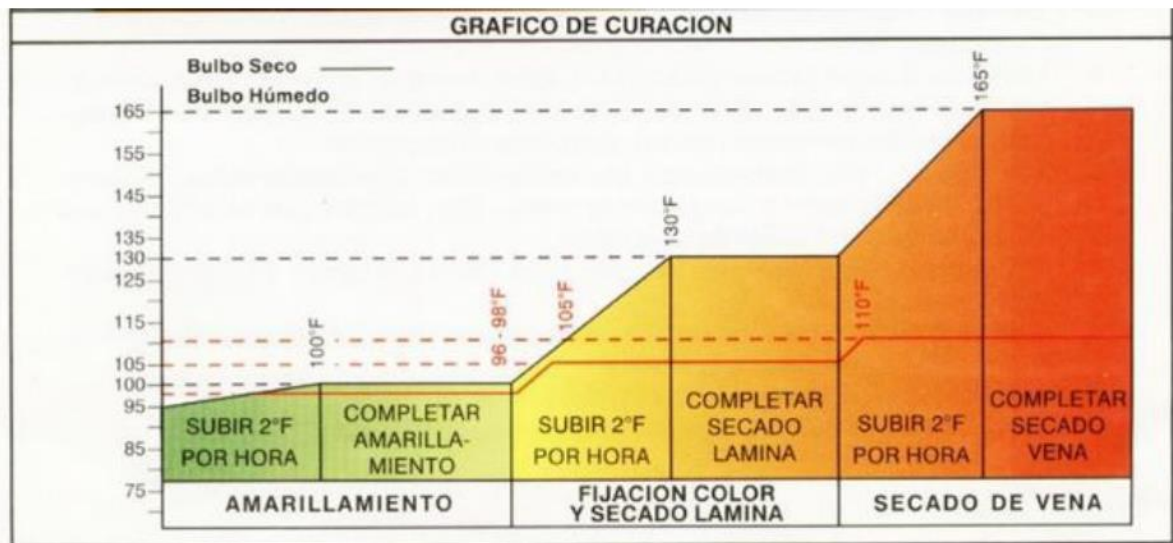
Figura 4. Horno para Flue Cured.



Fuente: JARA MORA Freddy Alexander Rediseño de hornos de curación de tabaco Virginia para mejorar la eficiencia energética de la empresa Protabaco S. A. (Trabajo de grado) Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica 2006

Los hornos Flue-Cured son el tipo hornos de curado de tabaco mayormente construido en Colombia, gran cantidad son localizados en las zonas tabacaleras de Capitanejo (Santander), siendo estos construidos desde los años setenta. El funcionamiento de este tipo de horno, consiste brevemente en mantener un ambiente de temperatura y humedad relativa controlado, generando el aumento de temperatura en el ambiente de curación, por medio de transferencia de calor entre gases provenientes de la quema de madera o carbón, superficie de ducto donde fluyen los gases anteriormente descritos y el ambiente de curación, la humedad relativa es controlada con la apertura o cierre orificios ubicados en el techo de los hornos. El perfil de temperatura estandarizado por Coltabaco S.A.S que se debe dar en el interior de los hornos tipo Flue Cured y para la curación de tabaco Virginia se puede observar en la figura 5.

Figura 5. Grafico Flue Cured.



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL Estudio de mejoramiento de tabaco Virginia curado al sol (VSC).

3.1.2 Curado con horno (Bulk-Cured). Esta modalidad de curación es conocida como al granel o Bulk-Cured, donde el curado del tabaco se da en estufas con

paredes interiores y exteriores metálicas, con aislación de lana de vidrio entre ambas caras, el abastecimiento de calor es proporcionado a través de un quemador de gas natural, el cual por medio de un intercambiador de calor indirecto gas-aire ubicado en las paredes, se eleva la temperatura del recinto y se evita el contacto de los gases de combustión con las hojas², el control de la temperatura se da regulando el gas natural quemado, en ocasiones automatizando las válvulas de paso del gas por medio de un control lógico programable (PLC) y en otras, el operario regulando el gas manualmente, según los valores de temperatura obtenidos por los sensores. La principal diferencia a los demás modos de curación es que el tabaco se cura todo en conjunto, es decir, el tabaco se trata al granel, no se cuelga hoja por hoja si no que se ubica en unos bastidores o canastas de varillas, y debido a esto se necesita forzar el aire con ventiladores a través de la masa de tabaco³, el tabaco curado en esta modalidad es el Virginia. En la figura 6 se puede observar un horno para curación de tabaco tipo Bulk Cured.

² ALTOBELLI F., CONRORI M. Estudio de desempeño energético de estufas de tabaco tipo Bulck curing [en línea] disponible en: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/14-009.pdf

³ JARA MORA Freddy Alexander Rediseño de hornos de curación de tabaco Virginia para mejorar la eficiencia energética de la empresa Protabaco S. A. (Trabajo de grado) Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica 2006 p. 230

Figura 6 Horno tipo Bulk Cured



Fuente: SPAPPERI [en línea] disponible en: <https://www.spapperi.com/en/product/fe300-en/>

Cultivadores han venido aumentando el uso de este tipo de curación, debido a que se ahorra en mano de obra por la rápida y sencilla postura del tabaco, también por ahorro de combustible, ya que el perfil de temperaturas en este tipo de curado es similar al de la figura 5 y el aire del proceso es recirculado y puede llegar a un ritmo de secado más rápido o similar al Flue Cured, el inconveniente o desventaja para muchos cultivadores, es que tienen un costo alto y en la mayoría de casos la falta de mantenimiento y las precarias condiciones de aislación provocan que las estufas presenten una gran deficiencia energética ⁴.

3.1.3 Curado al Aire (Air-Cured). Este tipo de curado se realiza en estructuras con laterales descubiertos y con flujo de aire natural, por esto se le conoce como Air-Cured, es decir, se busca que el aire del ambiente fluya dentro de las estructuras sin ser forzado artificialmente, siendo este, uno de los factores más importantes del proceso de curación, junto con la temperatura y la humedad relativa del recinto. Lo

⁴ ALTOBELLI F.; CONDORÍ M.; SORRENTINO C. Automatización de estufas de tabaco tipo bulk curing, ensayos a escala de laboratorio [em línea] disponible em: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2014/2014-t003-a007.pdf>

anterior no quiere decir que sea un tipo de curado autónomo, ya que es importante tener una supervisión y en ocasiones métodos de eliminación de humedad relativa del ambiente interior, abriendo o cerrando algunos laterales en las noches, para así conseguir los mejores resultados.

Este tipo de curación en ambientes húmedos es excesivamente lento, debido a que la curación depende del comportamiento ambiental de la zona, dura aproximadamente ocho (8) semanas en ambientes húmedos y en ambientes secos cuatro (4) semanas. En la figura 7 se puede observar una estructura para curación al aire o Air Cured, también conocida como Caney.

Figura 7. Caney de Air Cured.



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL Operación tabaco Virginia-.

Debido a las características de lenta curación, el tabaco final es bajo en azúcar y comúnmente se usa para curar tabaco Burley o Negro, los cuales le dan al humo

del tabaco un sabor ligero, dulce y con alto contenido de nicotina⁵. En la figura 8 se muestra el color y la modalidad de secado al aire dentro del caney Air Cured.

Figura 8. Tabaco secándose al aire Air cured.



Fuente: TABACOPEDIA Procedo de curado del tabaco. Curado al aire [en línea] disponible en: <https://tabacopedia.com/es/tratamientos-del-tabaco/procesos-de-curado-del-tabaco/curado-al-aire>

Las etapas de curación Air-Cured se dividen en 4 fases:

- A. **Laceado:** Duración 2-3 días, temperatura constante entre 25 y 24 [°C] y humedad relativa entre 60 y 70 [%].
- B. **Amarilleo:** Duración 9-12 días, temperatura constante entre 25 y 24 [°C] y humedad relativa entre 75 y 85 [%].
- C. **Fijación de color/secado de hoja:** Duración 3 días, temperatura constante entre 24 -25 °C y humedad relativa entre 60 - 70 [%].
- D. **Secado de Vena:** Duración 10-20 días, temperatura constante entre 24-25 [°C] y Humedad relativa menor de 50 [%]⁶

⁵ TABACOPEDIA Procedo de curado del tabaco. Curado al aire [en línea] disponible en: <https://tabacopedia.com/es/tratamientos-del-tabaco/procesos-de-curado-del-tabaco/curado-al-aire>

⁶ Ibíd.

3.1.4 Curado al sol (Sun-Cured). El curado al sol o también conocido como Sun-Cured, consiste en colgar las hojas de tabaco expuestas al sol directamente, debido a que no existe algún filtro solar, los rayos solares inciden directamente en la superficie de la hoja y la curación del tabaco tarda de 12 a 30 días aproximadamente, esta curación hace que las hojas tengan alto contenido de azúcar al final, junto con un color entre amarillo y naranja. En la figura 9 se muestra el tabaco Virginia curándose al sol.

Figura 9. Estructura para Sun Cured



Fuente: TABACOPEDIA Procedo de curado del tabaco. Curado al sol [en línea] disponible en: <https://tabacopedia.com/es/tratamientos-del-tabaco/procesos-de-curado-del-tabaco/curado-al-sol/>

Este proceso de curación es uno de los más usados en países orientales como Turquía, Grecia, Yugoslavia y Balcanes, en Colombia no es muy común ver este proceso. La variedad de tabaco usado en esta modalidad es el Virginia y debido a que es curado al sol, se caracteriza por tener buen aroma, haciendo que sea el tipo de curación idóneo para ser consumido en pipa o mascado.

3.2 VARIEDADES DE TABACO EN COLOMBIA

El tabaco se produce en diferentes partes del mundo, con distintos climas y tipos de suelo, estos cambios ambientales generan diferentes propiedades en la hoja cultivada, por lo que se realiza un cultivo distinto para cada región, en Colombia la tendencia de variedades de tabaco son aproximadamente tres (3), las cuales se denominan:

3.2.1 Tabaco Burley. Como se especificó en el ítem 3.1.3, la variedad Burley es un tipo de tabaco que se cura al aire exterior, dentro de caneyes abiertos en sus partes laterales que impiden que el sol incida directamente sobre la hoja de tabaco. En la figura 10 se muestra un cultivo de tabaco Burley ubicado en el departamento del Huila.

Figura 10. Cultivo de tabaco Burley



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL Operación tabaco Virginia-.

La cosecha se realiza de la planta entera (no hoja por hoja) para este tipo de tabaco, para luego realizar el respectivo proceso de curación. La planta es originaria del

estado de Kentucky en los Estados Unidos, se caracteriza por ser generalmente más alta que las plantas de tabaco Virginia, también porque el color de sus hojas es verde claro y el tallo aún más, se considera como una mutación del tabaco Virginia y contiene en promedio un número de veinte (20) a treinta (30) hojas por planta. Este tipo de tabaco es la segunda variedad más cultivada en el mundo⁷. En la figura 11 se puede observar hojas de tabaco Burley totalmente curado.

Figura 11. Tabaco Burley curado



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL. Operación tabaco Virginia-

El tabaco Burley curado, es característico por ser gran tamaño, de color canela y de textura semifina.

3.1.2 Tabaco Virginia. Esta variedad de tabaco es curada por medio del método Flue-Cured y debido a su proceso de curación rápido y con aire caliente, se obtiene en las hojas finales, una tonalidad amarilla o naranja. Se caracteriza por contener alto nivel azúcar en sus propiedades químicas y un aroma agradable o dulce. En la figura 12 se muestran los diferentes colores del tabaco Virginia después de una buena curación.

⁷ TABAJOPEDIA Tipos de tabaco burley [em línea] disponible em: https://tabacopedia.com/es/tipos-de-tabaco/burley/#_

Figura 12. Color de hojas de tabaco Virginia



Fuente: TABACOPEDIA Tops de tabaco Virginia [en línea] disponible en: <https://tabacopedia.com/es/tipos-de-tabaco/virginia/>

Esta planta alcanza una altura aproximada de ciento treinta centímetros (130 cm), con un contenido de hojas aprovechables de dieciocho (18) a veintidós (22). La cosecha de esta variedad es hoja por hoja con un orden específico en la posición foliar, empezando desde la base (hojas bajas) hasta la parte más alta (hojas coronas). En la figura 13 se muestra la nomenclatura adecuada para cada hoja dependiendo de su posición foliar.

Figura 13. Nomenclatura posiciones foliares



- T** - Coronas (3 hojas)
- B** – Alteras (5-6 hojas)
- C** – Media mata (4-5 hojas)
- P** – Prebajeras (5 Hojas)
- X** – Bajeras (3-4 hojas)

El tabaco Virginia se produce en más de setenta (70) países, pero particularmente en los Estados Unidos, Brasil, India, Tanzania, Malawi, Zimbabue y china, llegando a ocupar el 80 % de la producción mundial de tabaco.

3.2.3 Tabaco Negro. El tabaco negro o también conocido como tabaco rústico, es una variedad caracterizada por sus altas concentraciones de nicotina y alcaloides. El cultivo por parte de Coltabaco S.A.S se encuentra concentrado en la región de Santander y la región costera del país. Dado que para su cultivo no posee altos requerimientos técnicos, es la variedad con el más bajo costo de producción y con mayor resistencia a plagas y enfermedades. El proceso de curación de tabaco negro al igual que el tabaco Burley, se realiza al aire con caneyes tradicionales, requiere más de cuarenta (40) días para su curación, dependiendo de la posición foliar que se esté curando.

La variedad Burley, se caracteriza por tener hojas anchas y con tonalidad verde oscuro en su tallo, a su vez contiene alta cantidad de clorofila y azúcares, los cuales se fermentan posteriormente en el respectivo proceso de curación. En la figura14 se observan hojas de tabaco negro.

Figura 14. Hoja de tabaco negro.

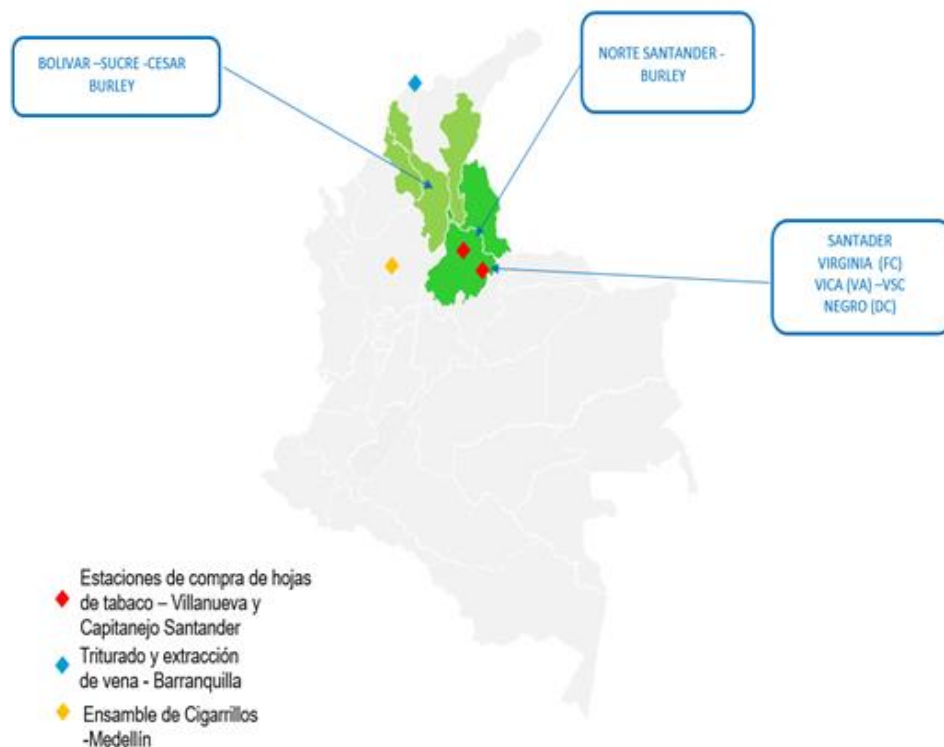


Fuente: FOROCHUMAJEK Cosecha, secado y curado de tabaco. [en línea] disponible en: <https://www.forochumajek.es/phpbb/viewtopic.php?f=132&t=12430>

3.3 OPERACIÓN DE COLTABACO S.A.S EN COLOMBIA

El proceso de producción de la empresa en el país, es básicamente cultivar, curar y recolectar las hojas de tabaco en su mayoría del departamento de Santander, para luego ser transportado a la planta de desvenado (separación de vena y lamina) ubicada en la ciudad de Barranquilla, por último, el tabaco es procesado para la elaboración de cigarrillos en la planta de producción de la Ciudad de Medellín. En la figura 15 se puede observar un esquema de las ubicaciones y zonas de producción por parte de Coltabaco S.A.S en Colombia.

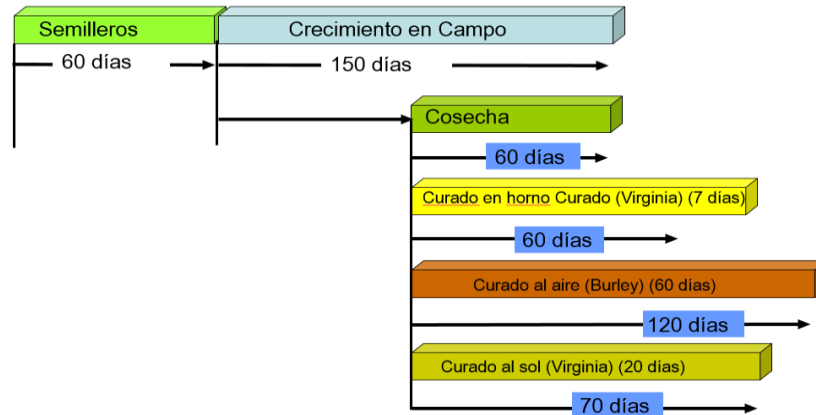
Figura 15. Sitios de cultivo y operación del tabaco de PMI



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL Operación tabaco Virginia

El principal estándar de producción de cultivo y curado de tabaco por parte de Coltabaco S.A.S se puede apreciar en la figura 16.

Figura 16. Esquema de producción de tabaco PMI



Fuente: PHILIP MORRIS INTERNATIONAL Operación tabaco Virginia.

3.4 PROYECTO TABACO VIRGINIA CURADO AL SOL (VSC) –YELLOW

La Compañía COLTABACO S.A.S afiliada a la multinacional Philip Morris International (PMI), realiza un plan estratégico denominado YELLOW, dirigido a optimizar las prácticas agrícolas e Industriales en la producción de tabaco Virginia curado al sol (**VSC- Virginia Sun Cured**). Con YELLOW se busca reducir el impacto ambiental que se ocasiona al curar tabaco Virginia en hornos tipo Flue Cured, buscando el reemplazo de fuentes de calor usadas en este método de curación del tabaco, como la quema de carbón o madera.

En la búsqueda de fuentes de energías renovables y amigables con el medio ambiente, la compañía COLTABACO S.A.S en su centro agronómico de investigación ubicado en Villanueva (Santander), optó por investigar y profundizar en el aprovechamiento del sol como fuente de calor, motivo por el cual se emplearon estructuras metálicas forradas en plásticos, conocidas como estructuras VSC, secadores, caneyes o tendales cubiertos de plástico; Estructuras diseñadas con el fin de aprovechar los rayos solares y así fomentar un efecto invernadero en el recinto interior, tal como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Caney cubierto de plástico de prueba o estructura VSC.



Las estructuras VSC, fueron forradas con plásticos de diferente termicidad y color, las cuales en su mayoría son ubicadas en Villanueva y Capitanejo (Santander), de esta forma se logra evaluar distintas condiciones ambientales en esta modalidad de curación. En la figura 18 se observan los caneyes cubiertos de diferentes plásticos, ubicados en Villanueva Santander.

Figura 18. Caneyes cubiertos de plástico en Villanueva (Santander).



Las dimensiones de estas estructuras son aproximadamente de cinco (5) metros de ancho por diez (10) metros de fondo y dos y medio de altura (2.5), la distribución del tabaco en su interior se representa en la figura 19 y figura 20.

Figura 19. Distribución del tabaco Virginia dentro de un caney cubierto de plástico.

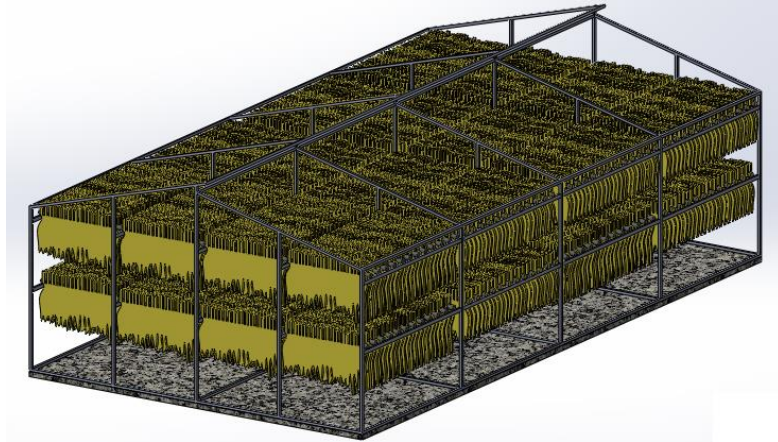


Figura 20. Cujes dentro de un caney cubierto de plástico.



Para caracterizar el proceso de curación al interior de estas estructuras cubiertas de plástico, en busca de un estudio profundizado y la generación de nuevas ideas,

la compañía COLTABACO S.A.S, desarrolla un plan de trabajo y extensión con el Grupo de investigación DICBOT de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. A partir de esto, se realizó el análisis del comportamiento de los caneyes cubiertos de plásticos o estructuras VSC, mediante el uso de distintos instrumentos de medición, como termo higrómetros junto con termocuplas distribuidas en partes estratégicas respectivamente como se puede apreciar en la figura 21 y una unidad de recolección de datos profesional que consta de una tarjeta de adquisición daq 9213 de dieciséis (16) canales, con el fin de obtener el comportamiento de algunas variables que intervienen en el ambiente de curación, como Temperatura, Temperatura de punto de rocío y Humedad relativa. Éste tipo de medición se realizó para las estructuras ubicadas en Villanueva y Capitanejo (Santander), con el fin de establecer y validar un modelo térmico del proceso de curado a través de los datos recolectados en campo, realizar análisis de propuestas tecno-económicas de mejora en el proceso y control automático de las variables de estados dinámicas para una mejora del producto, usando alternativas energéticas disponibles en la región.

Figura 21. Posición de los instrumentos de medición.



Luego de realizar los respectivos ensayos en los caneyes cubiertos de plástico, se procedió a analizar y tratar los datos obtenidos durante el desarrollo de cada prueba,

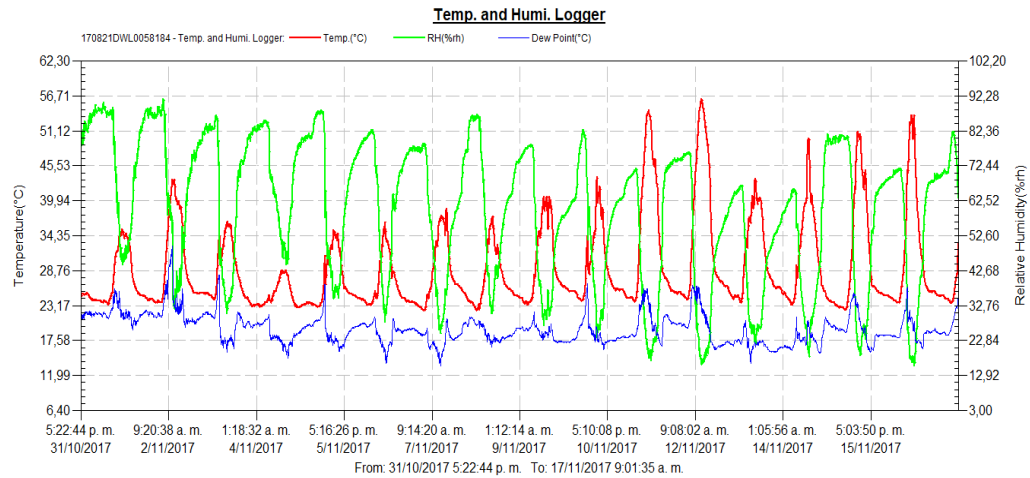
para de esta manera encontrar los posibles factores que hacen menos optimo este proceso de curación en comparación con el tipo Flue Cured, ya que el proceso de curado tardo de quince (15) a cuarenta (40) días en las distintos caneyes; Aunque durante el día se levantaban las paredes de plástico de las estructuras, para evacuar humedad, no fue suficiente, debido a que existió condensación de agua en los plásticos, tal como se puede observar en la figura 22 y manchas en el producto final, ya que el proceso de curación debe consistir en una deshidratación progresiva de la hoja.

Figura 22. Humedad en exceso en las paredes del caney cubierto de plástico.



Con datos obtenidos en los ensayos realizados como se puede apreciar en la figura 23, se pudo determinar que las horas más críticas del proceso de curación en las estructuras cubiertas de plástico, son las madrugadas, en donde la humedad relativa (línea verde) del ambiente adquiere valores altos, la temperatura del ambiente de curación (línea roja) se iguala a la temperatura de rocío (línea azul) y por ende se presenta condensación en las paredes de la estructura VSC y sobre la superficie de las hojas de tabaco, alterando el proceso de deshidratación y por supuesto el proceso químico que se está desarrollando en el producto.

Figura 23. Comportamiento en estructura VSC o caney cubierto de plástico amarillo verdoso.



De acuerdo al análisis de los datos obtenidos, se determinó que el plástico amarillo verdoso usado en un caney ubicado en Capitanejo (Santander), ofrece el mejor desempeño durante los ensayos, este plástico tiene buena capacidad para aprovechar los rayos solares, de esta forma puede elevar un poco más la temperatura dentro del recinto y durante la madrugada tener menos horas críticas de rocío en comparación con los demás plásticos utilizados, en esta estructura se obtuvieron buenos resultados y desempeños satisfactorios.

Con la información recopilada, se identifica el problema del rocío en las madrugadas y se procede a realizar el diseño y construcción del prototipo de cámara climática, la cual permite aproximar el comportamiento de temperatura y humedad relativa en las estructuras VSC a pequeña escala, para así poder buscar mejoras en el proceso de curación VSC y analizar factores para el rediseño de los caneyes cubiertos de plástico, modificando y encontrando los valores aceptables de las variables térmicas para desarrollar un mejor proceso de curación del tabaco Virginia curado al sol (VSC).

3.5 ETAPAS DE CURADO TABACO VIRGINIA

3.5.1 Amarillamiento. La etapa de Amarillamiento se produce cuando el tabaco se encuentra recién cosechado de campo, éste se dispone durante un par de días en los caneyes o estructuras de curado, en donde se espera la degradación de la clorofila dentro de la hoja y así dar paso con las de más etapas.

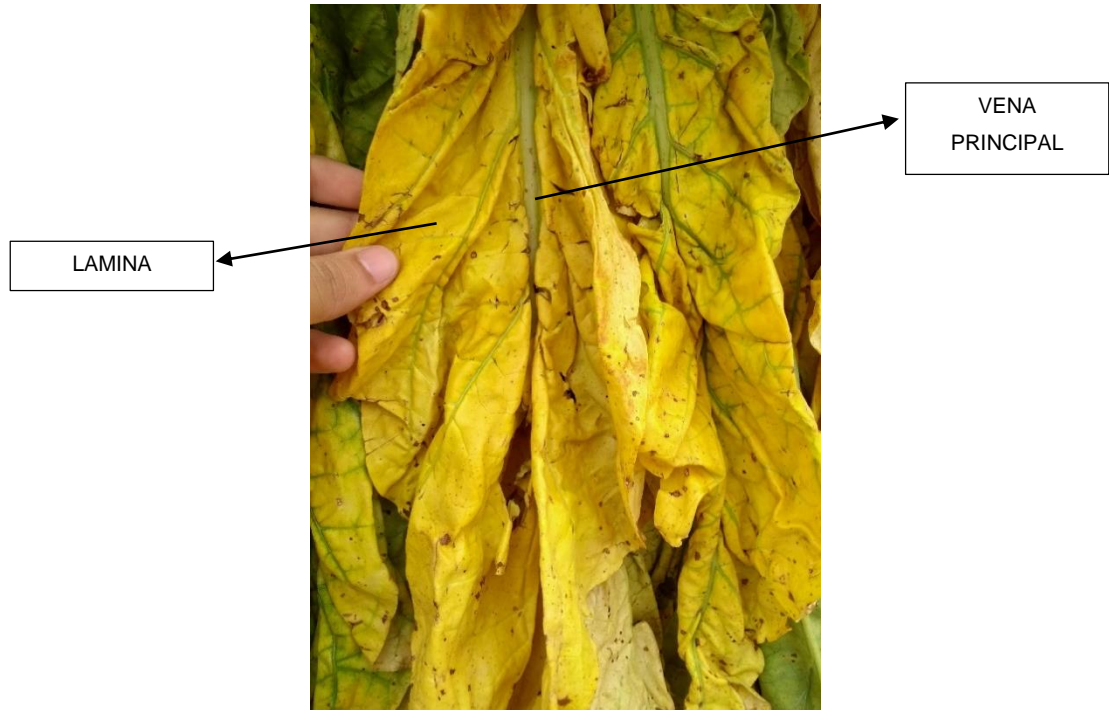
La importancia del Amarillamiento radica en que éste es un indicio de la transformación de los almidones contenidos en la hoja de tabaco y demuestra la conversión que éstos van presentando mientras se transforman en azúcares, los cuales son de vital importancia para asegurar una buena calidad en el tabaco Virginia. Si el proceso de Amarillamiento no se cumple de manera correcta, las hojas quedarán con tonalidad verdosa al final de la curación, lo cual da como resultado bajos niveles de azúcares, dado que no se completó la transformación de clorofila de la hoja. En la figura 24 se observan hojas de tabaco Virginia en la etapa de Amarillamiento.

Figura 24. Amarillamiento tabaco Virginia



3.5.2 Fijación de color o secado de lámina. Se puede decir que es una de las etapas más importantes en todo el proceso de curación y la de mayor control en las variables térmicas. En la etapa de secado de lámina se busca mediante la inyección de calor, la fijación de los azúcares provenientes de la conversión de los almidones presentes en la hoja, esto con el objetivo de evitar la oxidación de esta glucosa⁸. La oxidación de los azúcares produce manchas de tonalidad marrón en la lámina de la hoja, haciendo que el aroma característico del tabaco Virginia se pierda, dando paso a un aroma más fuerte, indeseable para la producción de cigarrillos de alta calidad. El aspecto amarillo fijado correctamente, da indicios de buenas prácticas de curación, y posibles buenas concentraciones de azúcares. En la figura 25 se observa una tonalidad deseada en la etapa de fijación de color, junto con la localización de lo que se le llama vena principal y lamina, en la hoja de tabaco.

Figura 25. Fijación de color tabaco Virginia



⁸ ABUBAKAR Y., YOUNG J.H., JOHNSON W.H., and WEEKS W.W. Changes in moisture and chemical composition of flue-cured tobacco during curing En: Tobacco Science (2000) 44:51-58

3.5.3 Secado de vena. Es la etapa final del proceso de curación y consta del secado de la vena principal de la hoja de tabaco mediante altas temperaturas, con lo cual se busca reducir en gran parte la cantidad de humedad presente en el producto. Las altas temperaturas también permiten que los azúcares fijados en la hoja se pierdan o sufran procesos de oxidación mientras la hoja sigue perdiendo humedad; una hoja de tabaco Virginia curada de alta calidad se caracteriza por su aspecto amarillo, vena totalmente seca y aroma dulce. En la figura 26 se observa una hoja de tabaco curada.

Figura 26. Secado de vena tabaco Virginia



4. PROCESO DE DISEÑO Y CONTRUCCIÓN

4.1 DISEÑO CONCEPTUAL

Con el fin de realizar un diseño del prototipo que cumpla con las características deseadas por el cliente, se realizó un estudio basado en los requerimientos necesarios para llegar a la solución que más se ajuste a estos.

4.1.1 Requerimientos del consumidor. La importancia de la implementación de este prototipo de cámara climática es simular las condiciones de curado del tabaco Virginia curado al sol, con la posibilidad de almacenar los datos principales del proceso de curación como temperatura del ambiente de curado, humedad relativa y comportamiento del peso de las hojas que se están curando dentro del prototipo, para así poder caracterizar el proceso de curado de la variedad de tabaco Virginia para las pruebas realizadas en este proyecto y otro tipo de tabaco para otra fase del mismo.

El cliente ofreció una lista de características que considero de gran importancia y con un despliegue de la función de calidad QFD (Quality Function Deployment) el cual es un método de diseño que recoge la voz del cliente y la traduce a características de diseño y operación que satisfacen las demandas y ayuda a evaluar los requerimientos técnicos más relevantes, se realizaron los siguientes análisis, para cada criterio fue asignando una ponderación de uno (1) a cinco (5), siendo cinco (5) la calificación que hace el criterio más importante, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Requerimientos del consumidor

Requerimientos del consumidor	Ponderación
Seguridad	5
Visibilidad del interior	4
Visualización de datos	4
Compacta	3
Versátil	3
Económica	3
Estética	2
Transporte	4
Fácil Manejo	5
Mantenimiento	3
Captación de datos	4

4.1.2 Requerimientos del diseñador. Es necesario realizar una lista de requerimientos tecnológicos que serán calificados con base a las necesidades del cliente para así seleccionar los más importantes y realizar la selección del mejor diseño.

4.1.2.1 Materiales estándares. Los materiales de construcción deben ser fáciles de conseguir y con precios no muy elevados, debido a que el tiempo de construcción y puesta en marcha del prototipo debe ser lo más corto posible, ya que la cosecha de tabaco se da una vez al año.

4.1.2.2 Mantenimiento. Todos los sistemas tecnológicos que se diseñen y construyan, de alguna u otra forma requieren de mantenimiento para su óptimo funcionamiento, en este caso es de importancia, debido a que se manipulan plantas que de algún modo son para el consumo humano, esto quiere decir que es muy importante que el sistema se mantenga limpio, en caso dado que exista alguna falla debe ser fácil desmontar y realizar cualquier tipo de reparación.

4.1.2.3 Montaje. El ensamble del prototipo debe ser practico debido a que, en el caso de requerir más prototipos, serían utilizados en zonas rurales de difícil acceso, razón por la que no hay una gran disposición de herramientas para ensamblan en el sitio, en su debido caso.

4.1.2.4 Resistencia a la corrosión. La corrosión es un factor importante que se debe prevenir, esto podría afectar la estructura y el sistema electrónico del prototipo, en caso de que se encuentre oxido en las superficies dentro del recinto, generarían cambios termodinámicos en el ambiente de curación, las hojas podrían tener contacto con materiales oxidados, lo que muy probablemente variara los estudios de laboratorio finales, donde se analiza el contenido de fijación de azúcar de las hojas, además de no ser higiénico el proceso de curación.

4.1.2.5 Capacidad. En promedio el valor del peso del conjunto de hojas, al final del proceso de curación es diez veces menor a lo que pesan inicialmente, entonces la capacidad de curación es importante, ya que mínimamente se requieren 200 gr de muestra seca para hacer un óptimo estudio de azucares.

4.1.2.6 Seguridad. Se deben prevenir cualquier tipo de accidente, el diseño debe ser confiable para no tener algún evento catastrófico y cuidar la vida humana, ante todo.

4.1.2.7 Durabilidad. El tiempo de uso del prototipo de cámara climática es extenso, se busca hacer gran cantidad de pruebas para mejorar el proceso de curación cada vez más, además que en otra etapa del proyecto se busca estudiar el curado de diferentes variedades de tabaco.

A continuación, se muestra una ponderación para cada criterio de la lista generada anteriormente, con un rango de uno (1) a cinco (5), siendo cinco (5) la calificación

de mayor valor, lo que hace el requerimiento importante, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Requerimiento del diseñador

Requerimientos del diseñador	Ponderación
Materiales estándares	3
Mantenimiento	4
Montaje	4
Resistencia a la corrosión	5
Capacidad	5
Seguridad	5
Durabilidad	4

4.1.3 Matriz Calidad (QFD). Teniendo los requerimientos de cliente y los requerimientos de diseñador se realiza una ponderación calificando según la relación que cada uno de estos tenga, con el fin de encontrar los más importantes y realizar la selección basados en estos. En la tabla 3 se muestra la matriz de relacionamiento de los criterios y en la tabla 4 la matriz calidad (QFD), cuyas puntuaciones se dan según criterios de buenos (9), regular (3) y deficiente (1).

Tabla 3. Matriz de relacionamiento.

Requerimientos		Diseñador								
		Materiales estándar	Mantenimiento	Montaje	Resistencia a la corrosión	Capacidad	Seguridad	Durabilidad	Estética	Estabilidad
Cliente										
Seguridad	5	3	9	9	3	1	9	9	1	9
Fácil manejo	5	0	3	9	0	0	9	3	3	1
Visualización de datos	5	0	1	3	0	0	0	0	9	9
Vida útil	5	9	9	3	9	1	9	9	3	0
Visibilidad del interior	4	0	1	9	1	0	1	0	3	0
Durabilidad	4	9	9	3	9	1	9	9	0	0
Captación de datos	4	0	1	3	0	9	0	0	0	0

Requerimientos		Diseñador								
		Materiales estándar	Mantenimiento	Montaje	Resistencia a la corrosión	Capacidad	Seguridad	Durabilidad	Estética	Estabilidad
Cliente										
Mantenimiento	4	9	9	3	9	1	9	9	3	9
Transporte a campo	3	3	3	0	3	1	3	3	0	3
Compacta	3	3	3	9	3	0	3	3	3	9
Versátil	3	3	1	3	0	3	0	0	3	3
Económica	3	9	3	3	9	3	0	3	9	3

Tabla 4. Matriz de Resultados

Requerimientos		Diseñador								
		Materiales estándar	Mantenimiento	Montaje	Resistencia a la corrosión	Capacidad	Seguridad	Durabilidad	Estética	Estabilidad
Cliente										
Seguridad	15	45	45	15	5	45	45	5	45	
Fácil manejo	0	15	45	0	0	45	15	15	5	
Visualización de datos	0	5	15	0	0	0	0	45	45	
Vida útil	45	45	15	45	5	45	45	15	0	
Visibilidad del interior	0	4	36	4	0	4	0	12	0	
Durabilidad	36	36	12	36	4	36	36	0	0	
Captación de datos	0	4	12	0	36	0	0	0	0	
Mantenimiento	36	36	12	36	4	36	36	12	36	
Transporte a campo	12	12	0	12	4	12	12	0	12	
Compacta	9	9	27	9	0	9	9	9	27	
Versátil	9	3	9	0	9	0	0	9	9	
Económica	27	9	9	27	9	0	9	27	9	
Estética	18	2	6	6	6	0	6	18	6	
Total	207	225	243	190	82	232	213	167	194	

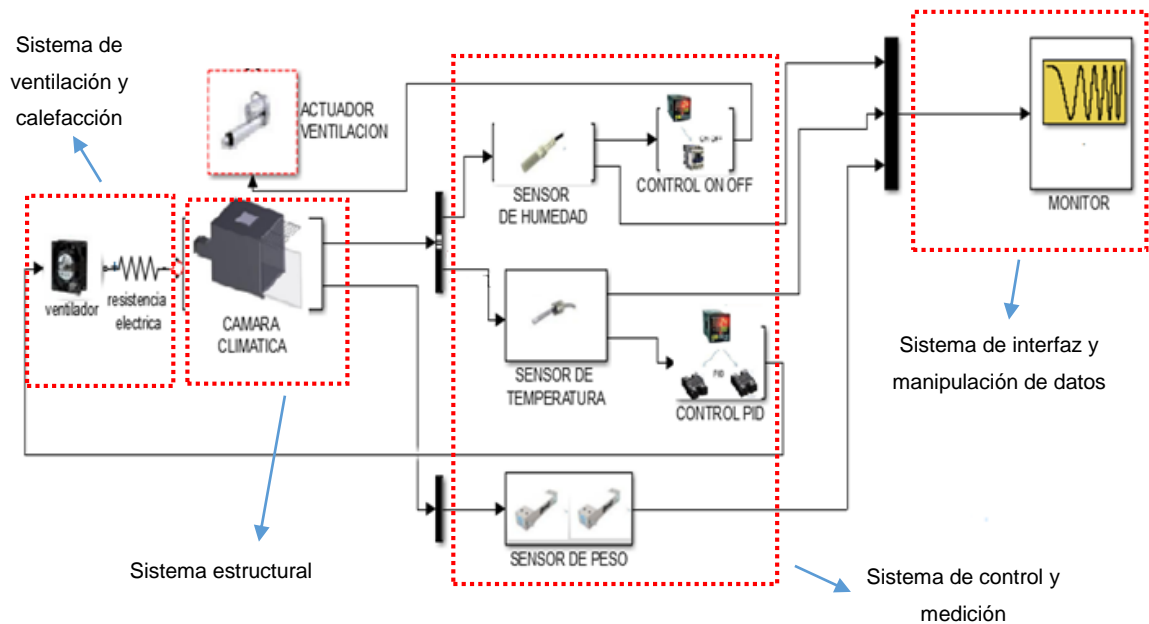
A partir de la matriz de calidad y debido a la ponderación asignada, se identifican cinco (5) características de diseño de mayor relevancia, las cuales son:

- Materiales estándar
- Mantenimiento
- Montaje
- Seguridad
- Durabilidad

4.2 DISEÑO EN DETALLE

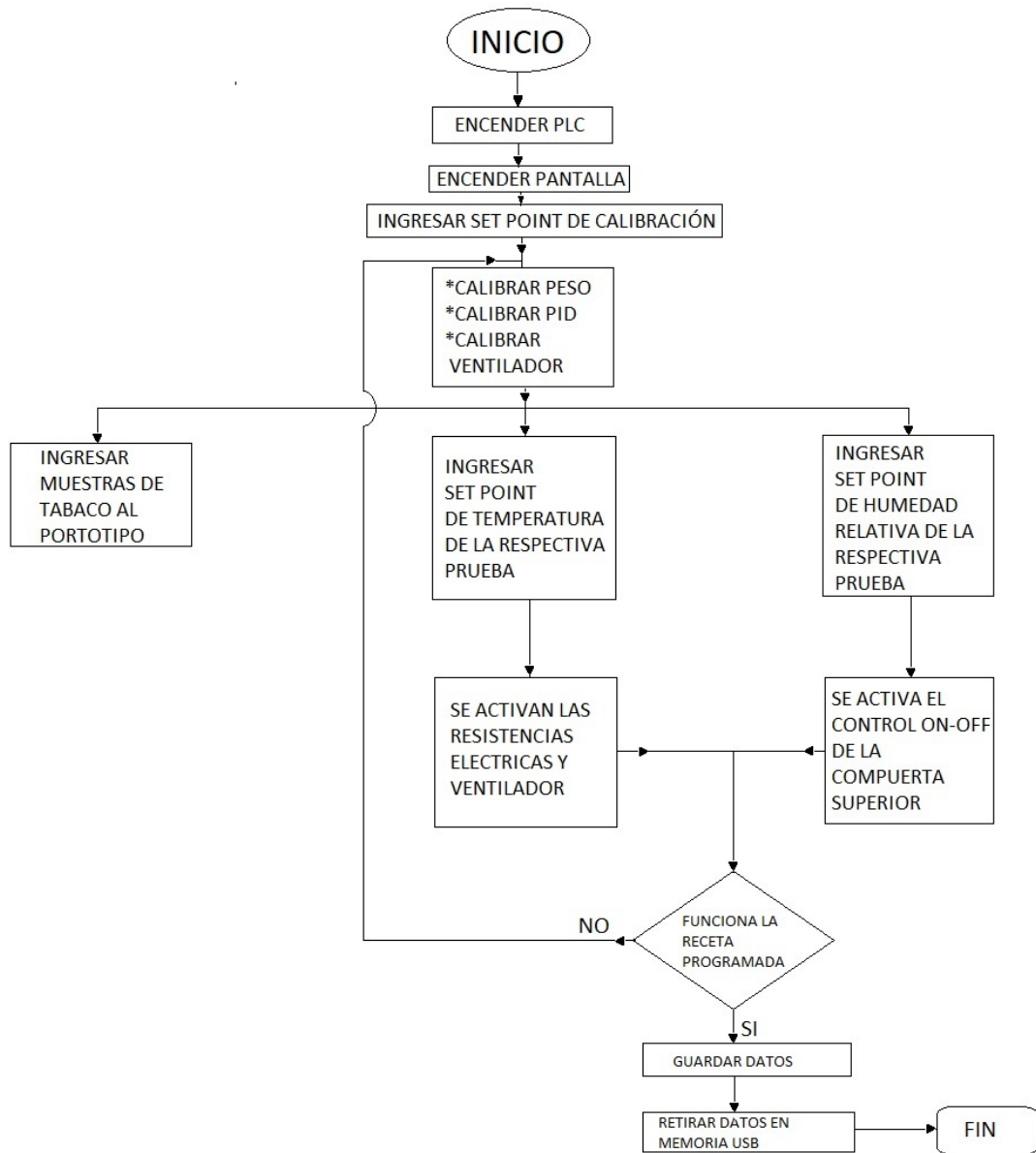
El prototipo para diseñar y construir debe ser acorde a los factores más importantes que arrojó la matriz de calidad (QFD). Éste prototipo es diseñado bajo la siguiente lógica de funcionamiento y por varios sistemas los cuales se representan en la figura 27 y 28.

Figura 27. Esquema para diseño de prototipo de cámara climática.



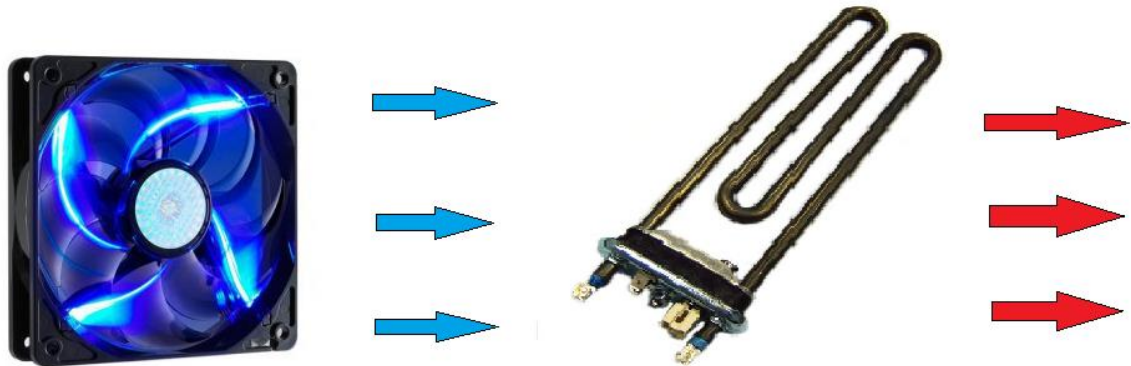
- Sistema de ventilación y calefacción
- Sistema estructural
- Sistema de control y medición
- Sistema de interfaz y manipulación de datos.

Figura 28. Lógica de funcionamiento del prototipo



4.2.1 Sistema de ventilación y calefacción. Este sistema es el encargado de absorber el aire exterior a la cámara climática mediante un ventilador, calentarlo con resistencias eléctricas he ingresarlo al recinto interior del prototipo. El funcionamiento de este proceso de calentamiento se observa en la figura 29.

Figura 29. Ventilador – Resistencia



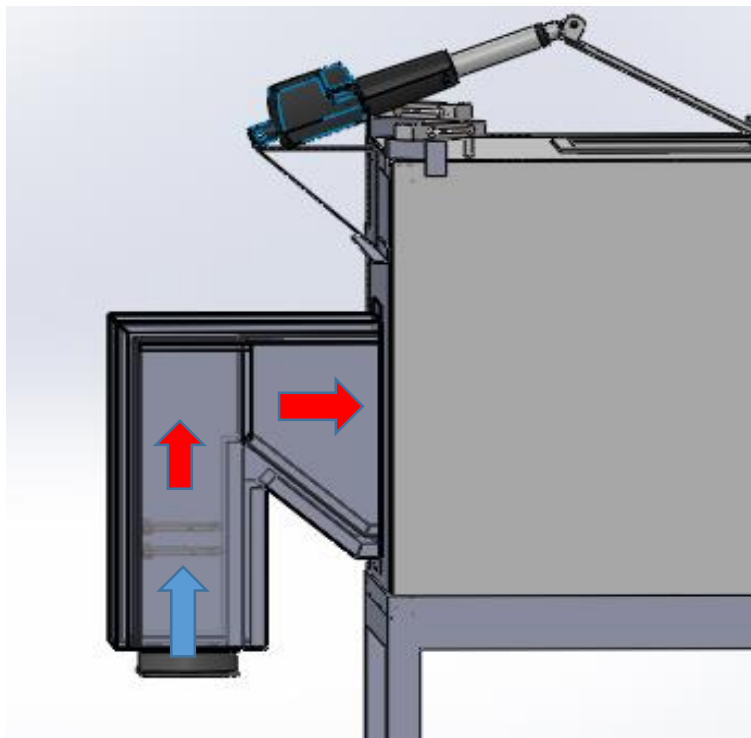
La convección en el curado de las hojas de tabaco es natural, por esta razón los valores de velocidad y flujo volumétrico del aire caliente que se deben manejar son aproximadamente de $0,1524 \text{ (m/s)}$, $0,0730 \text{ (m}^3/\text{s)}$ hasta un 50% por encima de estos valores⁹ para un curado tipo Flue Cured o en estructuras de tabaco virginia curado al sol (VSC), donde el aire que ingresa al proceso de curado es mínimo.

Debido a que uno de los requerimientos solicitados por la empresa, es que el prototipo de cámara climática pueda variar la velocidad del aire de entrada en proceso de curado y la temperatura del ambiente del mismo, para realizar distintos ensayos de curado en otra etapa del proyecto; se establece que dos resistencias de 400 [W] tienen la capacidad de calentar el aire de ingreso sin problema y un ventilador de marca EBCHQ serie 33524 el cual funciona a 2800 [rpm] y ofrece caudales entre $[138 - 162] \text{ [m}^3/\text{h]}$ (Ver Anexo F Especificaciones del ventilador), es suficiente para suplir las necesidades del sistema. En el diseño del prototipo, los dos dispositivos (resistencia y ventilador) se controlan por medio de un autómata programable (PLC), el cual por medio de la variación del ancho de pulso de la corriente suministrada o conocido como PWM, se regula la velocidad y el calor

⁹ Heat-Pump-Dehumidification During the curing of flue.cured. The Georgia Agricultural Experiment stations. Research Bulletin Number 439. Septiembre 2017

disipado por la resistencia, de modo que se mantenga bajo los parámetros preestablecidos en la lógica de programación planteada para cada ensayo a realizar en el prototipo. El principio de calentamiento en el prototipo de cámara climática se observa en la figura 30, resaltando la posición vertical del aire de ingreso al ducto, de modo que circule de abajo hacia arriba, aprovechando la característica de baja densidad del aire cuando este se calienta y su tendencia de moverse hacia arriba.

Figura 30. Calentamiento en la cámara climática



4.2.2 Sistema estructural.

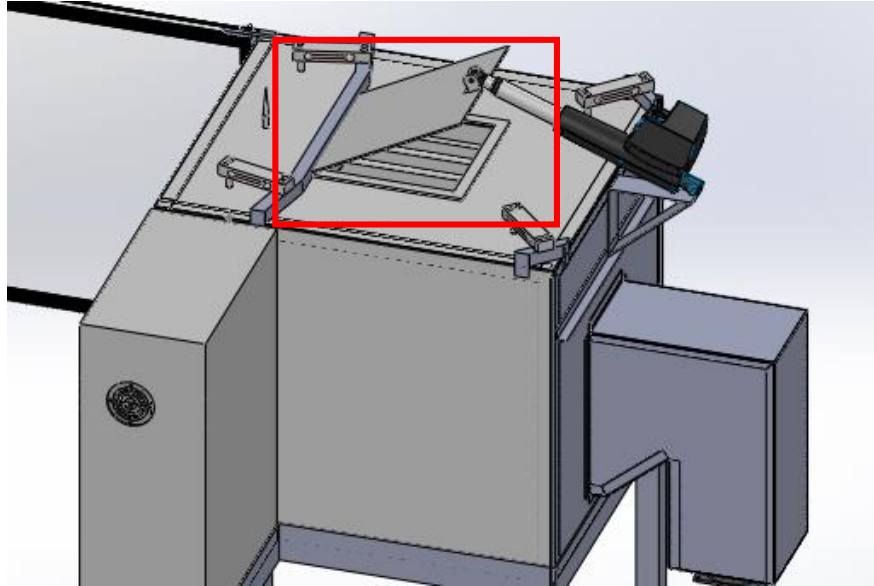
4.2.2.1 Recinto interior del proceso de curado. El largo de las hojas de tabaco Virginia mide en promedio 50 [cm], lo cual es un parámetro importante para dimensionar la altura del recinto de curación. Para realizar una prueba de contenido de azúcares en un conjunto de hojas de tabaco curadas, se requieren alrededor de 200 [gr] de hojas de tabaco seco y cada hoja en estado seco pesa alrededor de 2,4 [gr] en promedio, entonces la capacidad de curado de un prototipo de cámara climática debe ser de aproximadamente 85 hojas, relación mejor explicada con la ecuación (1).

$$\text{Cantidad de hojas} = \frac{\text{masa ideal para estudio de azúcar}}{\text{masa seca de hoja}} \quad (1)$$

Según los datos anteriores, las dimensiones del recinto pueden ser de alrededor de 540x540x540 milímetros (*mm*), teniendo así una simetría en el bloque de curación (hojas colgadas dentro del recinto).

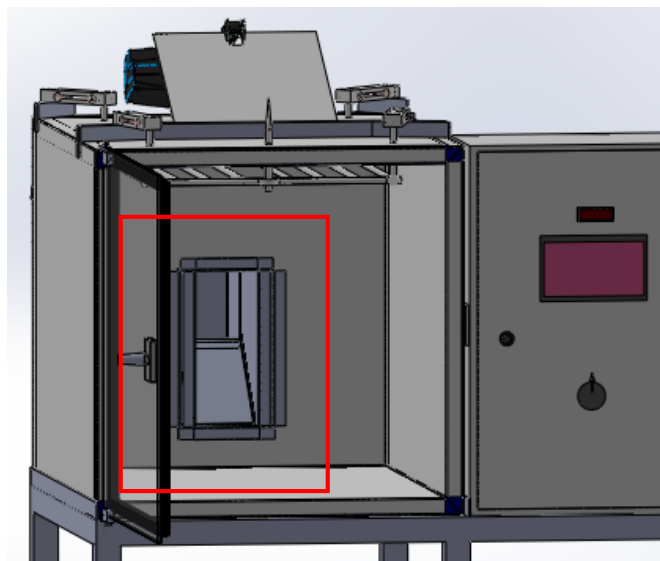
La caja interior del prototipo de cámara climática posee un orificio de forma cuadrada en la parte superior, diseñado con el fin de simular la extracción de la humedad del ambiente de curado en los hornos tipo Flue Cured y estructuras metálicas cubiertas de plástico (VSC). En la figura 31 se observa una representación de la compuerta superior para la extracción de humedad relativa del prototipo.

Figura 31. Compuerta superior camara climatica



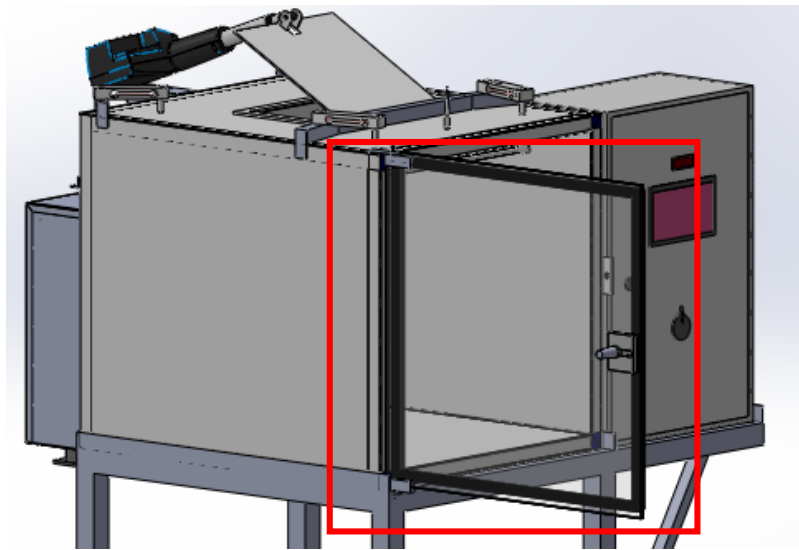
El aire después de ser calentado como se explicó en el ítem 4.2.1, ingresa al recinto por medio de un orificio en la cara posterior del prototipo de cámara climática. En la figura 32 se observa una representación del orificio rectangular ubicado en la cara posterior del recinto interior del prototipo.

Figura 32. Orificio rectangular para dar ingreso al aire caliente al recinto del prototipo



El proceso de curación que se da en el prototipo la cámara climática requiere supervisión visual de las hojas de tabaco durante todo el proceso, de esta forma se observa el comportamiento y los cambios que sufre el tabaco bajo distintos ambientes de curación, además de que el tabaco debe ser ingresado de manera fácil dentro del prototipo. Para suplir estas necesidades, se decide implementar una compuerta en vidrio templado. En la figura 33 se observa una representación de la puerta en vidrio.

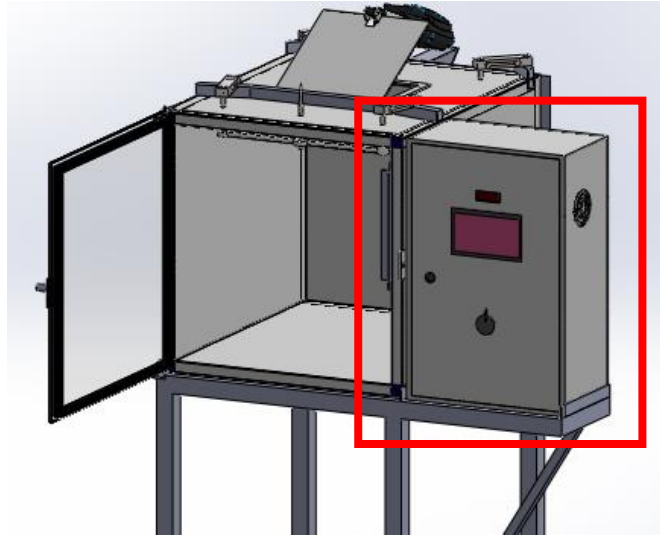
Figura 33. Compuerta para visualizar el proceso y colgar las hojas de tabaco



El material de esta compuerta es de vidrio templado, ya que éste material ofrece buena resistencia a impactos inesperados, soporta altas temperaturas y permite observar detalladamente el interior del prototipo.

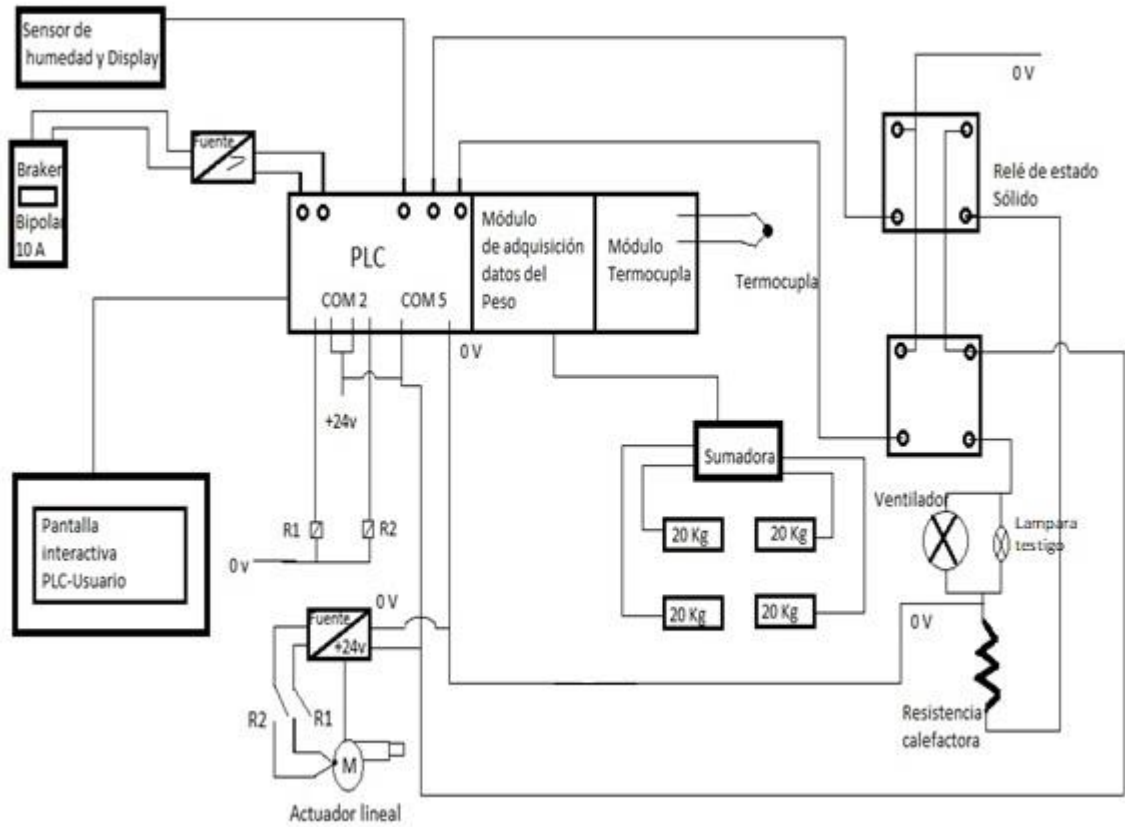
4.2.2.2 Caja de controles. En esta caja se encuentran las conexiones eléctricas y electrónicas necesarias para el funcionamiento y control del prototipo de cámara climática. En la figura 34 se observa la ubicación de la caja de controles.

Figura 34. Caja de controles



4.2.3 Sistema de control y medición. El ambiente de curación del tabaco debe ser controlado, por eso la curación en el mismo se da en distintos tipos de ambientes, el prototipo de cámara climática debe simular la temperatura y humedad relativa de curación requerida, en su recinto interior. Para cumplir con este requerimiento se diseñó el esquema del circuito eléctrico descrito en la figura 35 para ser implementado en el prototipo.

Figura 35. Esquema del Circuito eléctrico del prototipo de cámara climática



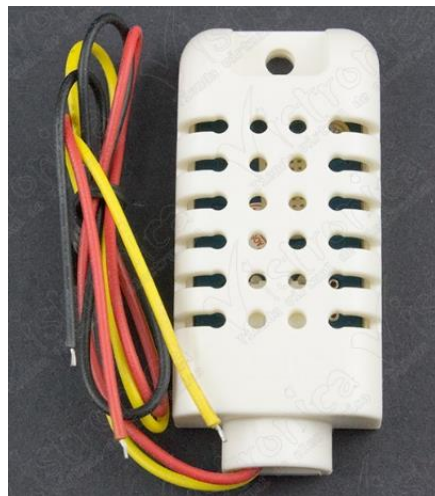
Donde la temperatura al interior del recinto se mide gracias a una termocupla de 10 [cm] como la que se muestra en la figura 36 y la humedad relativa por medio de un sensor capacitivo Am 2001 como el que se muestra en la figura 37.

Figura 36. Termocupla



Fuente: GOOGLE IMÁGENES Termocupla [en línea] disponible en: <https://goo.gl/images/S6Ksnt>

Figura 37. Sensor de Humedad relativa

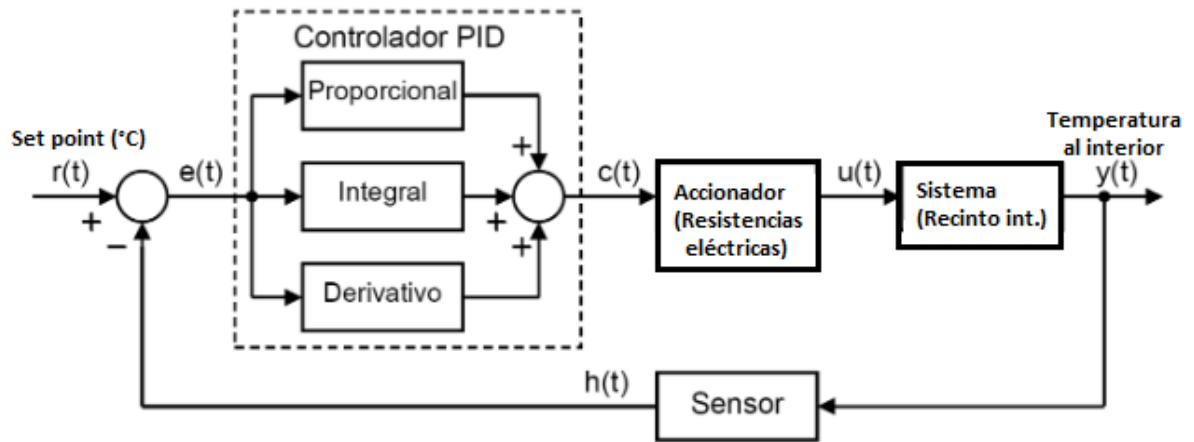


Fuente: VISTRONICA. Sensor de humedad capacitivo [en línea] disponible en: <https://www.vistronica.com/sensores/sensor-de-humedad-capacitivo-am2001>

4.2.3.1 Control PID para Temperatura. El prototipo cuenta con un control proporcional, integral y derivativo (PID) el cual fue diseñado para regular la temperatura interior del prototipo, mediante la regulación de operación de dos resistencias eléctricas de 400 [W] c/u ubicadas en el ducto de ventilación, regulando el calentamiento del aire a la entrada del recinto interior del prototipo. El esquema

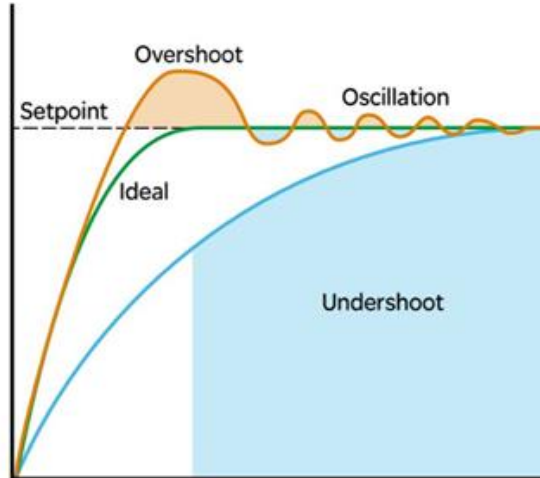
de control en lazo cerrado implementado para la regulación de temperatura se muestra en la figura 38.

Figura 38. Sistema de control en lazo cerrado con control PID para temperatura.



Donde $r(t)$, es el valor de entrada o Set point de temperatura deseado al interior del prototipo. Cuando la temperatura al interior del recinto $y(t)$ medida por el sensor, no es la deseada, el control PID regula la disipación de calor dado por las resistencias eléctricas hasta alcanzar el valor de Set point de temperatura requerido. En la figura 39 se observa el comportamiento del control PID, el cual busca alcanzar el valor de Set Point (temperatura requerida al interior del prototipo) regulando el funcionamiento de las resistencias, disipando más calor si la señal de temperatura esta en (Undershoot) o menos cantidad de calor si el valor de temperatura al interior de la cámara es mayor del deseado (Overshoot).

Figura 39. PID ideal



Fuente: EURO THERM Auto tuning pid control in a PLC EPLC [en línea] disponible en: <https://www.eurotherm.co.uk/lp/auto-tuning-pid-control-in-a-plc-eplc/>

Las constantes Proporcional, Integral y Derivativa, sirven para seguir el comportamiento de la curva que se aprecia en la figura anterior, donde la constante proporcional ayuda a aumentar la velocidad de respuesta al alcance de temperatura deseada, la constante derivativa a conseguir estabilidad y la constante integral ayuda a minimizar el error de respuesta con rapidez. Estas constantes son calculadas gracias la opción de autoajuste (auto-tuning PID control in a PLC) que ofrece el programa Wecon PLC Editor, en la figura 40 se muestra una toma de pantalla del programa, el cual brinda la opción de autoajuste de constantes PID, para mayor información ver el Anexo A Manual del PLC.

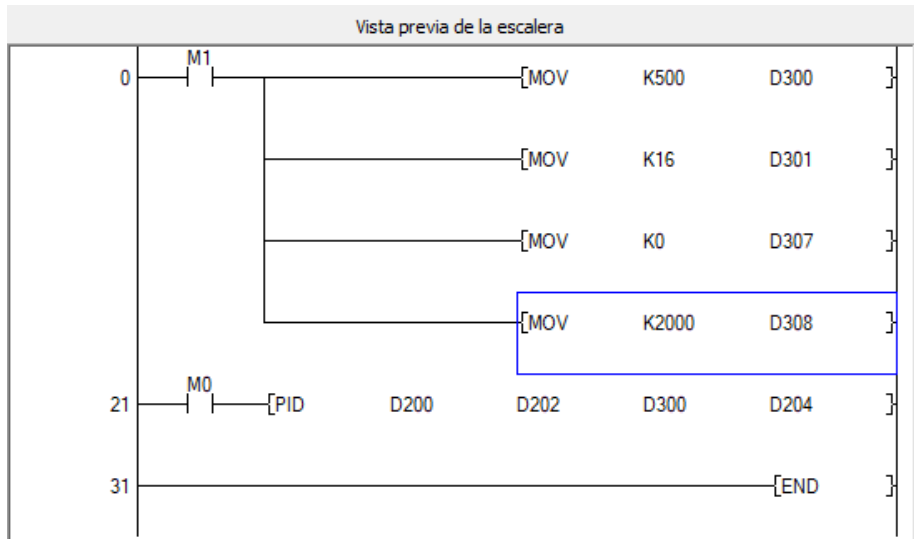
Figura 40. Configuración autoajuste.

Configuración de parámetros de control		
Condiciones de activación	LD <input type="button" value="v"/> M <input type="button" value="v"/>	1 <input type="text"/>
Intervalo de muestreo(Ts)	500 <input type="text"/>	1~32767(ms), Debe ser mayor que el tiempo de exploración del PLC
Dirección ACT	<input checked="" type="radio"/> Acción posi <input type="radio"/> Acción inver:	
Modo de salida	<input checked="" type="radio"/> Unidireccional <input type="radio"/> Bidireccional	
autoajuste	<input type="radio"/> Cerrar <input checked="" type="radio"/> Abierto	
La tasa máxima de aumento(DeltaT)	0 <input type="text"/>	0 ~ 320, filtro
Ganancia proporcional(Kp)	0 <input type="text"/>	0~32767 Kp aumento del valor real 256 veces
Ganancia integral(Ki)	0 <input type="text"/>	0 ~ 32767, $K_i = 16384T_s / T_i$, T_i es el tiempo integral
Ganancia diferencial(Kd)	0 <input type="text"/>	0 ~ 32767, $K_d \approx T_d / T_s$, T_d es el tiempo derivado
Filtrar(CO)	0 <input type="text"/>	0 ~ 1024, parte integral del filtro
Límite inferior de salida de control	0 <input type="text"/>	Valor recomendado: Unidireccional: 0, Bidireccional: -2000
Límite de salida de control	2000 <input type="text"/>	Valor recomendado: 2000

La opción de autoajuste, es una característica propia del PLC implementado, permite mediante una prueba piloto, realizar la sintonización de las constantes de la función PID de acuerdo a las necesidades del sistema y los requerimientos de operación del prototipo. Se decide usar la marca Wecon para el PLC, el cual es de software libre y no incurre en gastos adicionales de licencia y soporte técnico a la empresa.

La programación que se implementa en el prototipo es en tipo escalera, el cual permite seguir una línea de código sencilla y fácil de implementar, ofrece formas claras de programación y retroalimentación con cada módulo de adquisición de datos instalado, cada elemento a programar se puede ir modificando de acuerdo a las necesidades en el uso de memoria, puertos y conexiones; Haciendo que éstas se puedan entrelazar de manera eficiente, además de permitir un uso completo e intuitivo de la pantalla de interacción del usuario. En la figura 41 se observa una toma de pantalla del proceso de programación del prototipo.

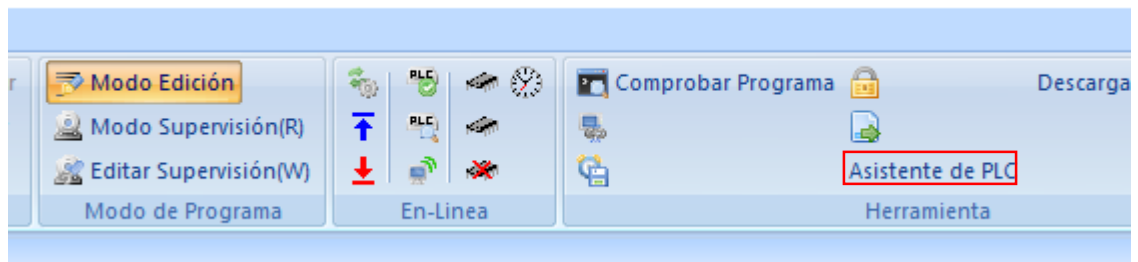
Figura 41. bloques de programación



Los pasos breves para realizar una correcta configuración de la característica de auto-sintonización se pueden ver a continuación, pero para mayor profundización se recomienda leer el Anexo A Manual del PLC.

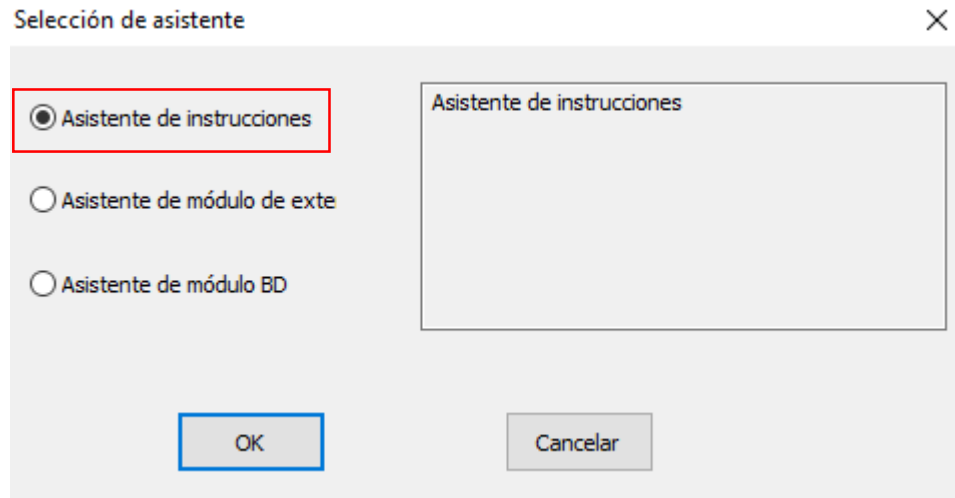
En primer lugar, se abre el programa y se llega a la configuración general, es decir, la pantalla de inicio del programa, como se puede ver la figura 42. Luego a esto, se selecciona la opción asistente de PLC, la cual redireccionará a otra parte del programa.

Figura 42. Pantalla Principal



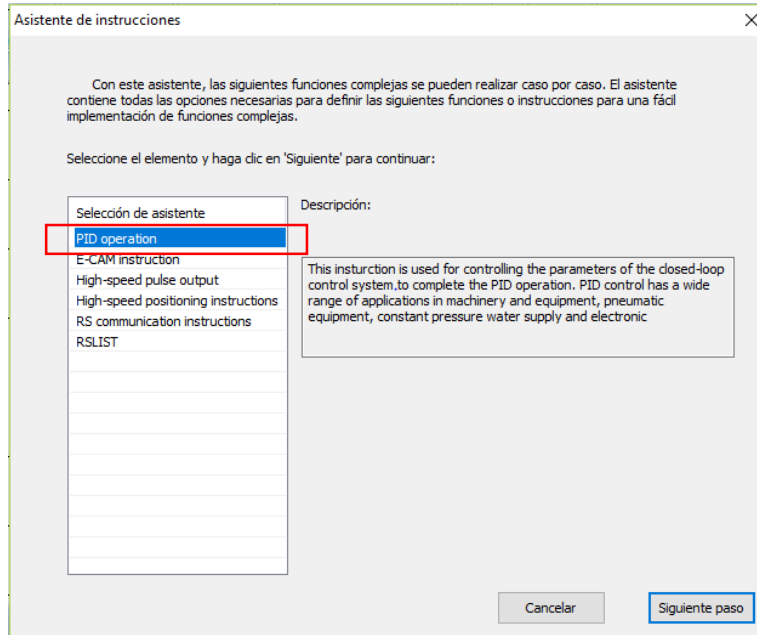
Luego de seleccionar la opción de asistente de PLC, éste nuevo menú desplegado muestra un conjunto de opciones de asistencia, debe ser seleccionada la acción de “Asistente de instrucciones” como se puede observar en la figura 43, desplegando otro menú de configuración.

Figura 43. Asistente de instrucciones



Seguido a éste paso, el programa mostrará distintas acciones a realizar, entre las cuales se encuentra la opción de “PID operation” como se muestra en la figura 44, desplegando el menú de configuración de la auto-sintonización (configuración autoajuste), procediendo a realizar el tratamiento respectivo para la configuración del autoajuste de las contantes derivativa, proporcional e integral del prototipo, cada vez que se requiera desde la interfaz del prototipo, como se describe en el ítem 5.1, además desde esta interfaz diseñada en el prototipo, también se logra calibrar la velocidad del ventilador que se requiere, con el fin de cumplir los requerimientos de velocidad de entrada al recinto que se requieran.

Figura 44. PID operation



4.2.3.2 Control ON - OFF para humedad relativa. La humedad relativa al interior de la cámara climática, es controlada con una compuerta en la parte superior como se describió en el ítem 4.2.2.1 donde el funcionamiento básico de esta compuerta es abrir o cerrar según sea necesario (ON-OFF), la apertura de la compuerta se realiza si los valores obtenidos de humedad relativa medidos por un sensor de humedad ubicado en el recinto interior del prototipo, son más altos de lo deseado (set point de humedad), en caso de que el valor sea más bajo del deseado (Set point de humedad), la compuerta se cierra para conservar humedad al interior del prototipo cámara climática. El proceso ideal de funcionamiento de control se observa en la figura 45, el esquema de control en la figura 46 y el mecanismo para el proceso de abrir o cerrar la compuerta superior consta de un actuador lineal de bolas recirculantes como se muestra en la figura 47.

Figura 45. Proceso ideal del control ON- OFF de humedad relativa

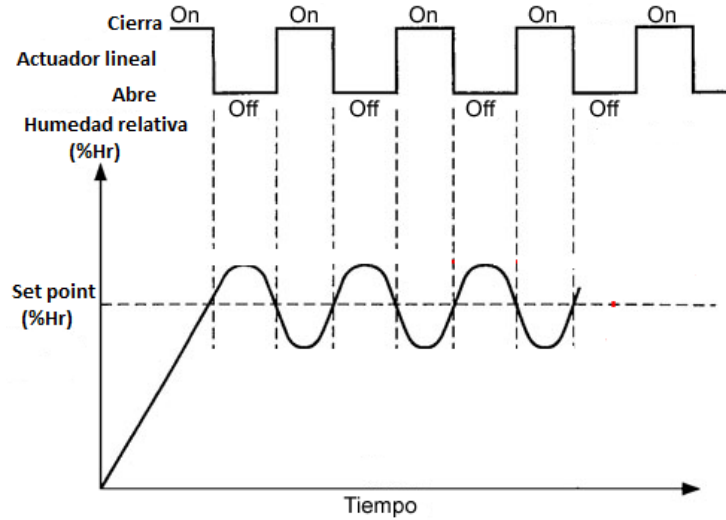


Figura 46. Esquema control ON-OFF de humedad relativa.

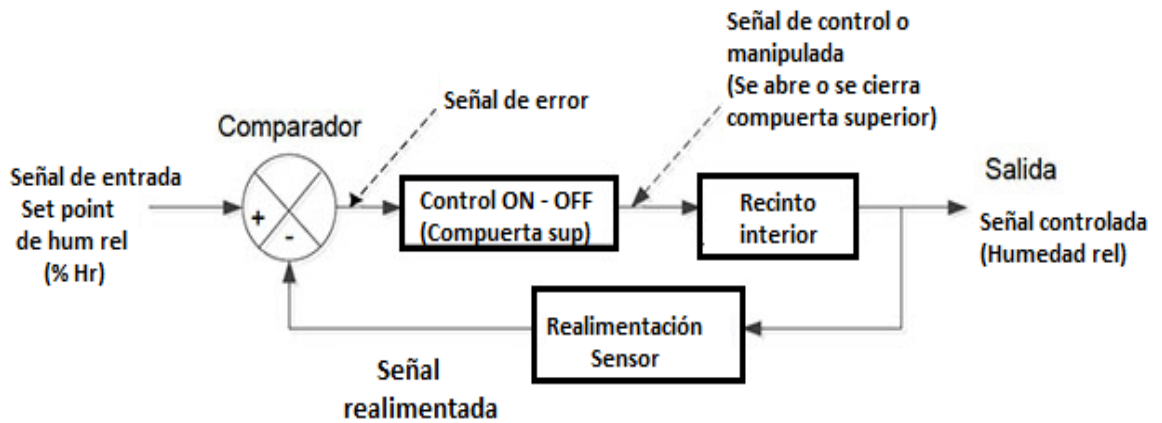
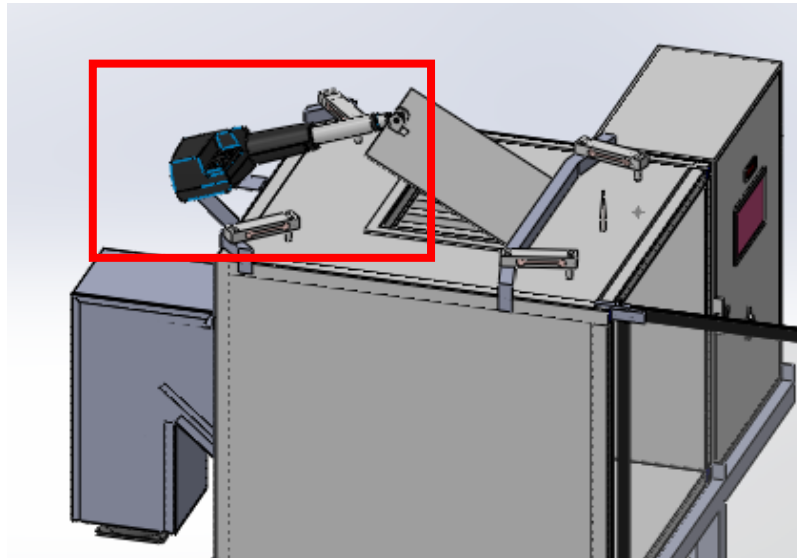
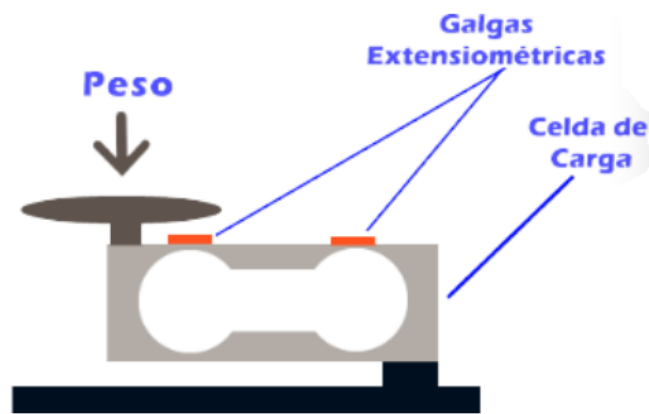


Figura 47. Actuador lineal



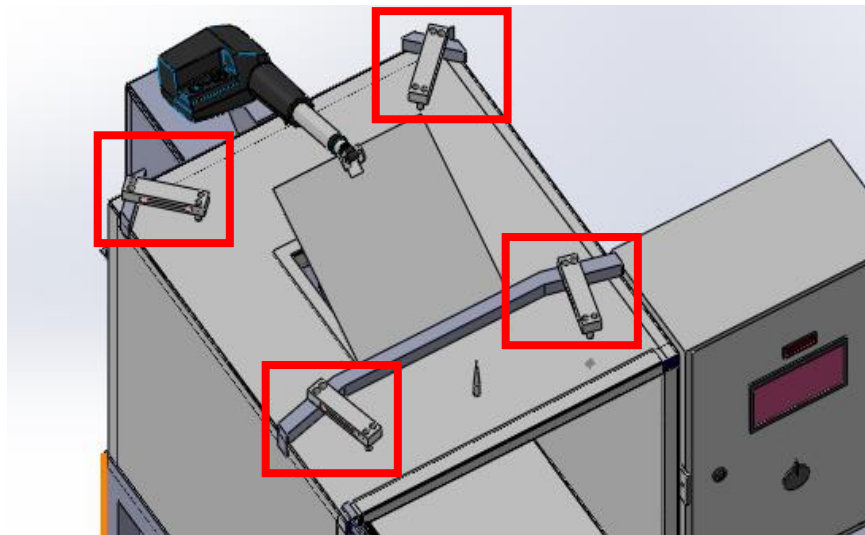
4.2.3.3 Peso de las hojas. El cliente requiere un equipo de experimentación, que sea robusto y que tenga un rango grande de valores de peso posibles para realizar distintas pruebas en el prototipo cámara climática, para suplir esta necesidad, el peso de las hojas de tabaco es medido con un sistema de 4 celdas de carga, que serán ubicadas en cada esquina la parte superior del prototipo. El funcionamiento de las celdas de carga esta descrito en la figura 48, donde las galgas extensiométricas se estresan por la flexión causada por el peso de las hojas, generando impulsos eléctricos, que luego serán traducidos en el peso del tabaco en tiempo real. La ubicación de las celdas de carga en el prototipo se muestra en la figura 49.

Figura 48. Explicación de funcionamiento de una celda de carga



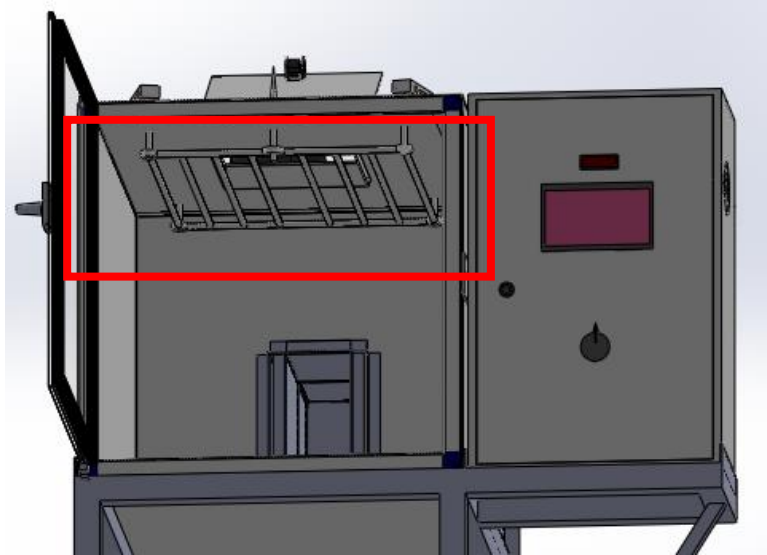
Fuente: LOGICBUS Celdas de carga [en línea] disponible en:
http://www.logicbus.com.mx/celdas_de_carga.php

Figura 49. Celdas de carga



El proceso de medición mediante celdas de carga, se da gracias a que las mismas, soportan la parrilla que se encuentra en el interior del recinto, como se muestra en la figura 50.

Figura 50. Parrilla para colgar hojas

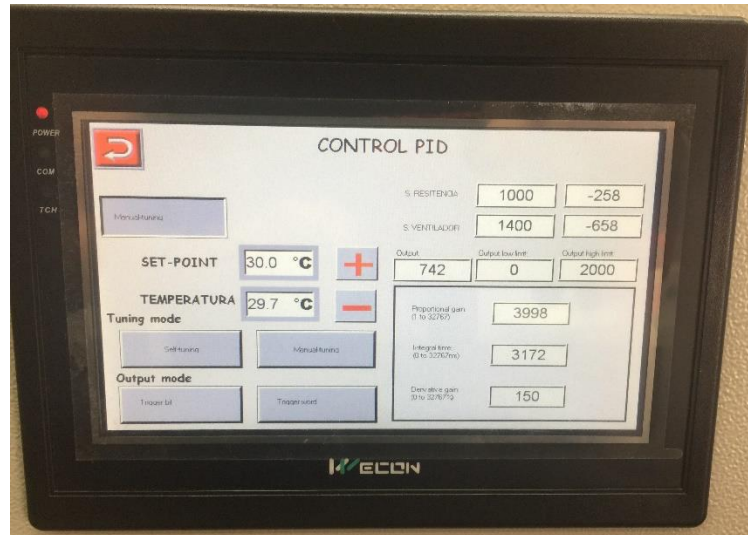


La parrilla en la cual va a estar sostenida la materia prima a estudiar, se diseñó de modo que su montaje sea modular y permita al usuario poner la cantidad de tabaco que sea necesario para cada prueba, de modo que se pueda montar y desmontar, fila por fila sin mayor inconveniente, gracias a este diseño se puede aprovechar de manera más eficiente el espacio disponible dentro de la cabina dependiendo de la cantidad de la muestra que se quiera estudiar.

4.2.4 Sistema de interfaz y manipulación de datos. La interacción con la cámara climática se diseñó de forma práctica y sencilla, la interfaz hombre- Máquina (HMI) está compuesta por un panel Wecon tipo touchscreen que consta de una pantalla LCD con capacidad táctil, esto permite interactuar con el PLC, visualizar e ingresar valores requeridos de funcionamiento del prototipo, como, Set point de temperatura y humedad relativa, potencia de resistencias eléctricas (velocidad y control de calentamiento con la calibración PID), velocidad de ventilador, y recopilación de datos como peso de las hojas a lo largo de las pruebas y el historial de comportamiento de temperatura y humedad relativa al interior del prototipo, de

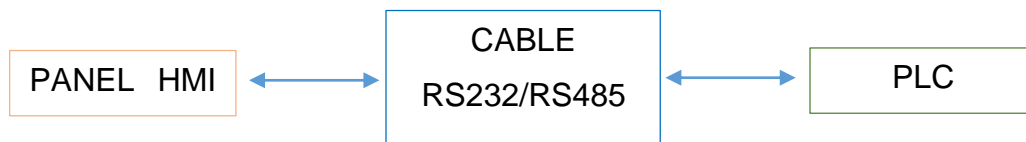
forma simple, Ver anexo B Manual del prototipo de cámara climática. En la figura 51 se observa la pantalla implementada.

Figura 51. Pantalla Wecon



El panel HMI o pantalla táctil, se conecta través de una interfaz ModBus RTU, la cual es un protocolo de comunicaciones, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, diseñado en 1979 por Modicon para su gama de controladores lógicos programables (PLCs)¹⁰ mediante RS232/RS485, permitiéndose así controlar el PLC en minutos. En la figura 52 se observa el esquema de conexión de pantalla o panel HMI

Figura 52. Esquema conexión de pantalla o panel HMI

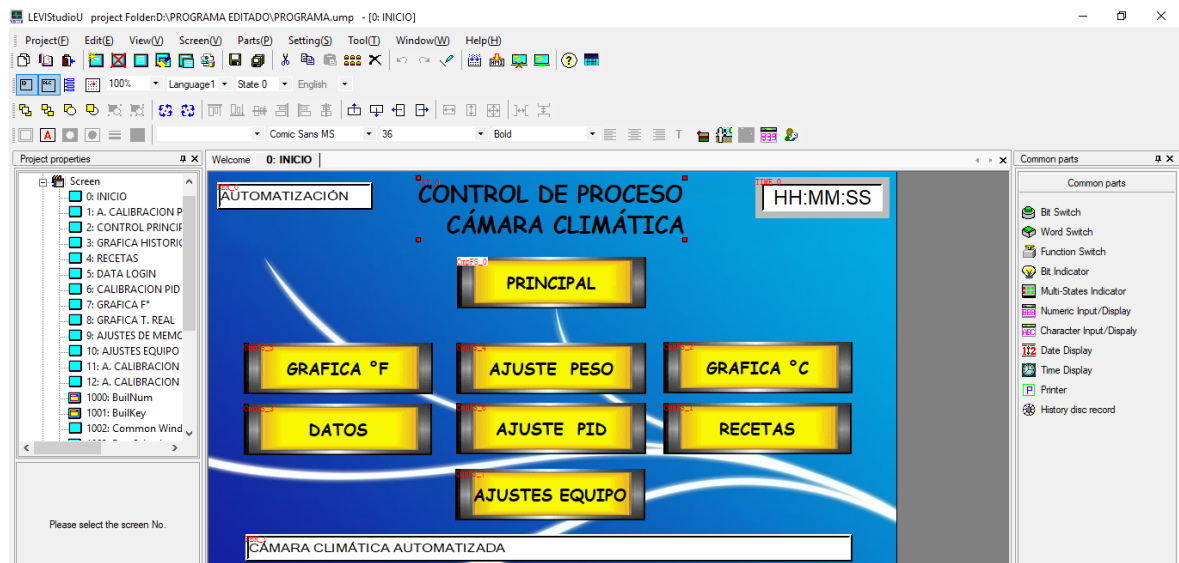


Este panel es simple de configurar y programar, además proporciona el software **LEVI Studio** para Windows, donde se logró diseñar los gráficos tales como botones,

¹⁰ LOGICBUS Modbus [en línea] disponible en: www.logicbus.com.mx/Modbus.php1

entradas numéricas, indicadores, gráficas y textos a mostrar en la pantalla, etc. Para controlar el PLC. El proceso de programación de la pantalla con el software LEVI STUDIO, es de entorno simple e intuitivo, el cual permite diseñar la interfaz visual desde Windows, en la figura 53 se puede observar una toma de pantalla de dicho programa.

Figura 53. Pantalla vista desde un computador de programa LEVI STUDIO.



4.3 PROCESO CONTRUCCIÓN

El proceso de construcción se llevó a cabo con la colaboración del equipo de ingeniería de la empresa SMARTS INGENIERÍA, la cual brindó al presente proyecto asesoría técnica en los procesos de manufactura y montaje del prototipo de cámara climática.

4.3.1 Sistema estructural. Inicialmente se procedió a realizar la construcción de la cabina principal de doble fondo, a partir de una lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 18 (Ver Anexo K. Especificaciones acero inoxidable AISI 304), se realizó el

corte de la lámina y posteriormente el respectivo doblado para dar conformado a cada una de las cabinas (Interior y exterior); luego a esto, se procedió a realizar la respectiva soldadura de los puentes de cada esquina y elementos importantes de unión, brindándole integridad a las cabinas, aplicando soldadura tipo Tic (Ver Anexo G. Soldadura Tic).

En segundo plano, se procedió al corte y ensamble de un marco interno para ofrecer soporte a las cabinas (interna y externa) a partir de acero estructural ASTM A36 (Ver Anexo H. Especificaciones acero ASTM A36) la cual funcionó como elemento de acople entre las dos cabinas, además de ofrecer soporte y robustez al equipo. En la figura 54 se observa el ensamble de la cabina.

Figura 54. Ensamble cabina



Posteriormente se realizó el respectivo ensamble de los elementos de la cabina (cara interna y externa), se instaló en el doble fondo de la cabina el aislante, en este caso se usó lana de vidrio (Ver Anexo I. Especificaciones lana de vidrio) de 2,5 cm embutido entre la cavidad preestablecida para este fin. En la figura 55 se observa el aislante térmico.

Figura 55. Lana de vidrio



La parrilla se construyó de acuerdo a lo planteado en el ítem 4.2.3.3 atendiendo todos los parámetros de diseño modular sugeridos. En la figura 56 se observa la parrilla de montaje de tabaco.

Figura 56. Parrilla de montaje de tabaco



La puerta se construyó con vidrio templado de 6 [mm], ya que éste material ofrece buenas características físicas ya mencionadas en el ítem 4.2.2.1, además de esto, a la puerta principal se le incorporó un empaque de sellado de silicona de alta temperatura, la cual ofrece buena hermeticidad, garantizando una mínima pérdida de calor. En la figura 57 se observa la puerta principal y el empaque.

Figura 57. Puerta de acceso principal y empaque.



El ensamble mecánico para soporte de la cabina y la caja del tablero de control se ensambló a partir de acero estructural ASTM A36, al cual se le aplicó una pintura catalizada para garantizar durabilidad e integridad química de la estructura.

4.3.2 Sistema calefacción. La construcción del ducto de calefacción se llevó a cabo de manera similar respecto a la cabina principal del prototipo de cámara climática, constando de doble pared. La construcción de la estructura se realizó a partir del

corte y doblado de una lámina de acero galvanizado calibre 20, a la cual se le dio el aspecto y geometría diseñada planteado en la figura 58. El diseño del ducto se pensó de arme y desarme modular para facilitar el mantenimiento de este en el futuro.

Figura 58. Ducto en construcción



Luego de realizar el respectivo ensamble del ducto de calefacción, se procedió a realizar el ensamble de todo el sistema de calefacción. Las resistencias calefactoras, se ubicaron sobre la pared posterior del ducto interno como se muestra en la figura 59.

Figura 59. Montaje resistencias



Para la instalación del sistema de ventilación se dispuso de un soporte de baquelita para aislar el ventilador de un contacto directo del calor del ducto. El ventilador se puede observar en la figura 60.

Figura 60. Ventilador



Luego tener todos los componentes necesarios en el sistema de calefacción, se procedió a realizar el empalme de todos los dispositivos ya mencionados, así como el material aislante embutido entre la cavidad preestablecida en el ducto de doble pared, el revestimiento usado para aislar térmicamente esta sección del dispositivo fue lana de vidrio de 2,5 cm espesor, suficiente para mantener una temperatura de operación segura para el usuario en su cara externa. Figura 61 ducto de calefacción en construcción.

Figura 61. Ducto de calefacción en construcción



4.3.3 Sistema de pesaje. Se instalaron las respectivas celdas de carga en la cabina principal, en total de instalaron cuatro (4) celdas de carga marca Lexus, ubicadas en cada esquina como se indicó en el ítem 4.2.3.3. Las celdas de carga instaladas fueron tipo Lexus BN170092 de duraluminio, modelo CZL601, cada una con capacidad de veinte (20) kilogramos [Kg], con una precisión de 0,02 [Kg], medición de peso tipo monobloque y se adiciono al sistema de pesaje, una caja sumadora de los datos obtenidos por cada celda de carga, los cuales luego son grabados en la

memoria del PLC. En la figura 62 se observa una de las celdas de carga utilizadas en el prototipo.

Figura 62. Celdas de carga



4.3.4 Sistema de ventilación. Para el mecanismo de ventilación de la cabina, se realizó la instalación de un actuador lineal, con el cual se realiza la apertura o cierre de la compuerta de escape de aire o humedad relativa del interior del prototipo, la cual se activa cuando la humedad relativa es excesiva dentro del recinto y es gobernado de acuerdo a los requerimientos planteados en la lógica de programación, atendiendo los requerimientos que necesite cada ensayo tal como se explica en el ítem 4.2.3.2. en la figura 63 se observa el actuador lineal.

Figura 63. Actuador lineal para la apertura de la compuerta superior



Además de esto, se construyó la compuerta superior de escape, a partir de una lámina de acero AISI 304 3/16", manufacturada a través de corte y doblaje mecánico, con soldadura tipo TIC. En la figura 64 se observa la compuerta superior de ventilación para evacuar la humedad del ambiente de curado del prototipo.

Figura 64. Compuerta superior construida.



4.3.5 Sensor de temperatura y humedad relativa. En cuanto a los instrumentos de medición implementados se encuentra una termocupla tipo J de bulbo de 10 [cm], ubicada estratégicamente hacia un costado de la compuerta de escape, de modo que se obtenga una medición de mayor exactitud de las variables térmicas que se están controlando dentro del recinto, a su vez también se instaló un sensor de humedad relativa en el interior de la cabina, en la parte superior derecha. En la figura 65 se observan los sensores de humedad relativa y temperatura del prototipo.

Figura 65. Termocupla y sensor de humedad



4.3.6 Tablero de control. El tablero cabina de control, en donde fue almacenado todo el sistema de control como terminales y equipos eléctricos, es de 50*20*30 [cm], el cual contiene el autómata programable Wecon de 32 puntos, además de los módulos de pesaje, módulo de lectura de temperatura y humedad relativa, también contiene la fuente de 24 voltios y todo el sistema de control de los dispositivos a 110 voltios. En la figura 66 se observa el tablero de control en su interior.

Figura 66. Tablero de control



De igual forma se instaló la respectiva pantalla táctil Wecon de siete pulgadas [7 in], la cual permite al usuario interactuar con el equipo, donde puede modificar los tiempos y variables térmicas como temperatura y humedad de acuerdo con las necesidades que requiera cada ensayo.

La pantalla cuenta con entrada de escritura táctil, además de puerto USB y puerto para tarjeta SD en donde el usuario puede descargar y guardar la información con los datos recolectados correspondientes de cada prueba realizada. En la figura 67 se observa la pantalla instalada en el prototipo

Figura 67. Pantalla táctil en el prototipo



Todo el sistema es alimentado desde una fuente de energía de corriente alterna a 110 voltios A/C, con una fuente de conversión de energía a 24 voltios DC. Esto con el fin que el dispositivo pueda ser trasladado a distintos lugares en donde una fuente de energía a 220 Voltios A/C sea de difícil acceso y esto dificulte su operación.

El prototipo de cámara climática ensamblada y lista para empezar las pruebas se puede apreciar en las figuras 68 y 69.

Figura 68. Prototipo de cámara climática con vista a la caja de control.



Figura 69. Prototipo de cámara climática.



4.3.7 Materiales y especificaciones. En la tabla 5 se puede observar un resumen de los materiales usados en el prototipo de cámara climática.

Tabla 5. Materiales principales

ELEMENTOS Y/O PIEZAS	CANTIDAD	MATERIAL	PROCESO	DESCRIPCIÓN
ESTRUCTURA RECINTO	1	AISI 304 Cal 18	CORTE, DOBLEZ, TIC	Armado de cabina con doble fondo, por doblez, corte mecánico y soldadura tic
ESTRUCTURA BASE	1	ASTM A36	ARMADO MECÁNICO	Ensamble mecánico de estructura para soporte de la cabina
DUCTO DE VENTILACIÓN	1	GALV Cal: 20	CORTE, DOBLEZ, TIC	Armado de ducto con doble fondo, por doblez, corte mecánico y soldadura tic
AISLANTE TÉRMICO	1,75 m2	LANA DE VIDRIO	EMBUTIDO	Embutido en el doble fondo de la cámara
PUERTA TIPO HORNO	1	VIDRIO TEMPLADO	ENSAMBLE	Ensamble mecánico a la cabina
COMPUERTA SUPERIOR	1	AISI 304 3/16"	ENSAMBLE	Armado, por doblez, corte mecánico y soldadura tic
ACTUADOR LINEAL	1	N.A.	ENSAMBLE	Ensamble mecánico entre la cabina y la compuerta
VENTILADOR	1	N.A.	ENSAMBLE	Ensamble al ducto de ventilación
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	2	N.A.	ENSAMBLE	Resistencias en M, ensambladas en el ducto de ventilación
PLC WECON 32 PUNTOS	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Autómata programable
PANTALLA WECON TACTIL 7"	1	N.A.	INTERFAZ DE USUARIO	Interfaz para la manipulación de datos

ELEMENTOS Y/O PIEZAS	CANTIDAD	MATERIAL	PROCESO	DESCRIPCIÓN
EMPAQUE PARA SELLO	2,3 m	SILICONA ALTA TEMPERATURA	ENSAMBLE	Sello
CELDAS DE CARGA LEXUS 10 Kg	4	DURALUMINIO	ENSAMBLE	Medición de peso tipo mono bloque
CAJA SUMADORA	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Suma de las señales de las celdas de carga
TERMOCUPLA	1	N.A.	ENSAMBLE	Medición de temperatura tipo bulbo 10 cm
SENSOR DE HUMEDAD	1	N.A.	ENSAMBLE	Medición de humedad
RELÉ DE ESTADO SOLIDO	2	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Control de señal para 110V
BREACKER BIPOLAR	2	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Protección eléctrica del sistema
MODULO WECON DE PESAJE	1	NA	AUTOMATIZACIÓN	Módulo 1 canal
MODULO WECON DE CONEXIÓN	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Módulo de 2 salidas y 2 entradas análogas
MODULO WECON DE TERMOCUPLA	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Módulo de entrada 2 canales
MEMORIA USB	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	Almacenamiento de datos
CAJA ELÉCTRICA	1	COLD ROLLED	AUTOMATIZACIÓN	Contenedor del equipo de control 50 x 30 x 20 cm
CABLEADO, PERILLAS Y FUENTES DE PODER	1	N.A.	AUTOMATIZACIÓN	conexiones necesarias y fuentes de poder.

Tabla 6. Datos técnicos del prototipo

DATOS TÉCNICOS PRINCIPALES			
VOLTAJE:	110v	TORQUE :	N.A.
AMPERAJE:	9	FUERZA:	N.A.
POTENCIA:	1000 W	PRESIÓN:	N.A.
FRECUENCIA:	60 HZ	CAPACIDAD:	0,15 m3
LARGO:	50 cm	CAUDAL:	N.A.
ANCHO:	50 cm	ALTO:	1,5 m
OTROS			
Recorrido Actuador L		15 cm	
Potencia Resistencias		400 w c/u	
Velocidad del ventilador		0,09 m/s	
Unidades de medición		Kg, °F y % humedad	

4.4 RECOMENDACIONES DE USO Y MANTENIMIENTO

Tabla 7. Condiciones de instalación, operación y riesgo.

CONDICIONES DE INSTALACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> - Instalar en un lugar donde el suelo se encuentre lo más nivelado posible, esto con el fin de evitar posiciones no deseadas que puedan alterar la verticalidad de las hojas o el fácil esfuerzo al volteo del equipo. - Ajustar y nivelar los niveladores de pie para evitar el caso anterior. - Es necesario tener en cuenta el voltaje de operación (110 V), además de NO compartir el punto de toma corriente con ningún otro consumo como protección adicional del equipo. - Evitar confinar en un sitio donde las condiciones climáticas estén aisladas (Cuartos con poca ventilación), esto con el fin de lograr los resultados deseados.

- El punto eléctrico debe contar con polo a tierra por norma y seguridad industrial.
- Evitar situar en espacios muy reducidos, con el fin de no restar grados de libertad a la puerta de vidrio frontal y la compuerta superior.

CONDICIONES DE OPERACIÓN (Ver manual de usuario en anexo B).

- a) Al introducir las hojas, asegúrese de que las varillas de la rejilla se encuentren perfectamente limpias, esto con el fin de no agregar gramos adicionales al proceso.
- b) Es necesario que al colgar las hojas no toquen el techo, esto con el fin de evitar errores en la medición de peso.
- c) Asegurarse de ajustar la puerta de vidrio desde el seguro de acero, esta requiere de un esfuerzo razonable para lograr el sello deseado.
- d) Para el comienzo del proceso es necesario que la puerta y la compuerta estén cerradas.
- e) Haga uso de la perilla de encendido y apagado, en caso de fallo en la red eléctrica, proceda a apagar la máquina con la perilla inmediatamente. (Ver manual de usuario en anexo #).
- f) Al acceder a la interfaz, el operario solo debe oprimir el botón ON, para comenzar el proceso, si se desean cambiar los valores de las recetas, se debe asignar una clave para acceder al sistema (Ver Anexo B. Manual de usuario del prototipo de cámara climática).
- g) Una vez finalizado el proceso, se debe proceder a la limpieza de la máquina con un trapo seco, eliminando las impurezas hacia la puerta de vidrio y repetir los pasos anteriores.

CONDICIONES DE RIESGO

- a) Evitar el contacto con la compuerta de vidrio al máximo (superficie caliente o rotura por exceso de carga).
- b) Por ningún motivo debe colocarse elementos en la superficie superior del equipo, esto puede representar un riesgo para las mediciones de las celdas

de carga, derrames líquidos, o alteraciones en el proceso por obstrucción de la salida de aire, entre otras.

- c) Evitar al máximo el contacto con los componentes eléctricos al interior de la caja, esto con el fin de evitar alguna alteración en el sistema que de paso a desprogramación o mal funcionamiento.
- d) NO lavar el equipo con ningún tipo de líquidos, a menos que sean atomizados y que no entren en contacto con los componentes eléctricos.
- e) Evitar el contacto del vidrio con líquidos fríos (por lo general limpieza), cuando éste se encuentre caliente.
- f) Evitar el contacto del vidrio con líquidos fríos (por lo general limpieza), cuando éste se encuentre caliente.
- g) Evitar el contacto del vidrio con líquidos fríos (por lo general limpieza), cuando éste se encuentre caliente.
- h) Evitar el contacto del vidrio con líquidos fríos (por lo general limpieza), cuando éste se encuentre caliente.

Tabla 8. Recomendaciones de mantenimiento.

CONDICIONES DE MANTENIMIENTO				
ELEMENTOS Y/O PIEZAS	TIPO DE MTO	TIEMPO	PROCESO	OBSERVACIONES
AUTOMATIZACIÓN	PREVENTIVO	1 AÑO	LIMPIEZA	PERSONAL COMPETENTE
AUTOMATIZACIÓN	PREVENTIVO	1 AÑOS	CALIBRACIÓN DE SENSORES	PERSONAL COMPETENTE
CÁMARA INOX	PREVENTIVO	DESPUES DE USAR EL PROTOTIPO	LIMPIEZA DE IMPUREZAS	PERSONAL IDONEO
EQUIPO EN GENERAL	PREVENTIVO	3 MESES	AJUSTE DE TORNILLERÍA	PERSONAL IDONEO
LIMPIEZA DEL DUCTO DE VENTILACIÓN	PREVENTIVO	2 MESES	LIMPIEZA CON AIRE A PRESIÓN	PERSONAL IDONEO
EMPAQUE Y FIBRA DE VIDRIO	CORRECTIVO	3 AÑOS	CAMBIO	PERSONAL COMPETENTE

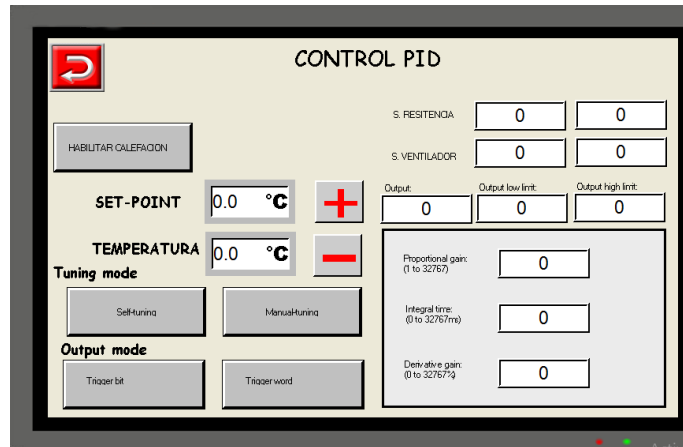
5. VERIFICACIÓN DE CONTROLES Y SENSORES.

Antes de iniciar las pruebas en el prototipo de cámara climática, el control PID es calibrado, la velocidad del ventilador se ajusta para que cumpla el requerimiento de velocidad de aire de entrada al ambiente de curación, el sistema de sensado del peso se calibra y se corroboran que estén funcionando óptimamente el sensor de humedad relativa y temperatura, para así cumplir los requerimientos del experimento.

5.1 CALIBRACION PID Y VELOCIDAD DE VENTILADOR

Esta opción diseñada en el prototipo es para calibrar el control Proporcional, Integral y Derivativo (PID), por ende, la potencia de consumo de las resistencias eléctricas de calefacción, además también se logra calibrar la velocidad del ventilador por medio de la interfaz programada en la pantalla táctil descrita en el ítem 4.2.4. La figura 70 es una toma de pantalla de la interfaz implementada en el prototipo, la cual sirve para ajustar las constantes PID, si desea obtener mayor claridad sobre los pasos a seguir dentro de la interfaz, se recomienda ver el Anexo B (Manual de usuario del prototipo).

Figura 70. Configuración de control PID desde el prototipo



Se decide que las resistencias eléctricas para los experimentos del presente proyecto deben funcionar en la mitad de su capacidad, lo cual cumple los requerimientos de calefacción sin ningún problema, esta capacidad de funcionamiento se puede variar por medio de la interfaz de la pantalla Wecon del prototipo, ver anexo B (Manual de usuario del prototipo). Para la velocidad del ventilador, la calibración se realizó como se muestra en la figura 71 en donde se observa la comprobación de la velocidad del aire en la entrada al ducto de ventilación y en la salida del mismo (ingreso de aire al recinto interior del prototipo).

Figura 71. Comprobación de velocidad de aire



Según el valor de velocidad de aire de aproximadamente $0,1524 \text{ (m/s)}$ descrito en el ítem 4.2.1, se establece que para cumplir este requerimiento el ventilador debe funcionar a 30 [%] de su capacidad máxima para este experimento, valor que se calibra por medio de la interfaz diseñada en el prototipo, Ver anexo B (Manual de usuario del prototipo).

5.2 AJUSTE DE PESO

Antes de iniciar las respectivas pruebas de curación en el prototipo de cámara climática, se debe calibrar el sistema de pesado, este proceso es básicamente ingresar la información de un peso conocido al software de la cámara climática. La figura 72 es una captura de pantalla de la interfaz del prototipo, para obtener mayor información sobre los pasos a seguir para la calibración se recomienda ver el anexo B (Manual de usuario del prototipo) y la figura 73 es el peso conocido puesto en la parrilla de sensado de peso del prototipo.

Figura 72. Ajuste de peso

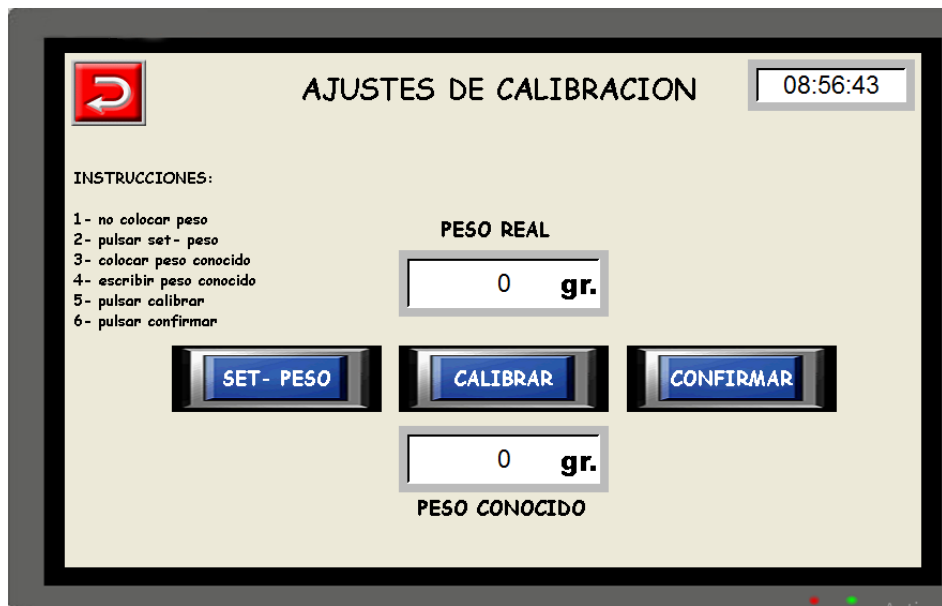


Figura 73. Peso conocido en la parrilla del prototipo.



5.3 COMPROBACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

Básicamente para comprobar que el sensor de humedad relativa y temperatura del prototipo estén funcionando bien, se midió las mismas variables de temperatura y humedad relativa medidos por los sensores usados en el prototipo, pero con otro dispositivo de medición y se realizó la respectiva comparación, en la figura 74 se observa la realización de la medición y comparación de los valores de temperatura y humedad relativa.

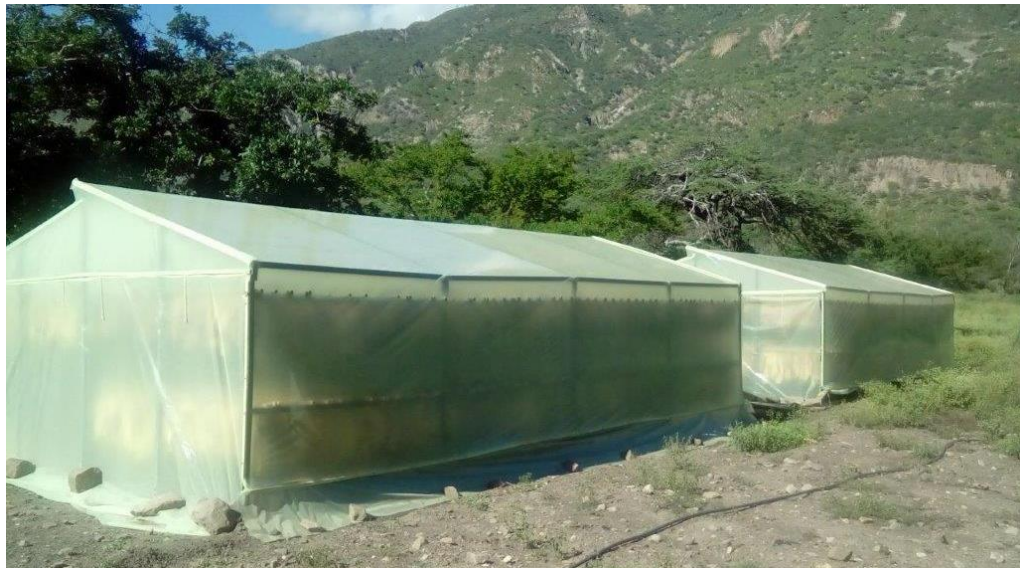
Figura 74. Comparación de medición.



6.PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANALISIS DE RESULTADOS

Las etapas de curación como se explican en el ítem 3.5, son Amarillamiento, secado de lámina o fijación de color y por último secado de vena, en las pruebas realizadas en la cámara climática estas etapas se simularon aproximándose al comportamiento del caney o tendal amarillo verdoso ubicado en Capitanejo – Santander como el que se puede apreciar en la figura 75, siendo la prueba uno (1) la aproximación al proceso de curación del caney, en el recinto interior del prototipo de cámara climática y la prueba dos (2) similar a la uno (1) pero con leves modificaciones en el ambiente de curación, para de esta forma analizar si se ocasiona o no, mejoría en el contenido de azucares del producto final, bajo diferentes parámetros de temperatura y humedad relativa del ambiente, en diferentes horas estratégicas de las etapas de curación.

Figura 7528. Caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander.



En el siguiente gráfico se puede visualizar el comportamiento de la temperatura, humedad relativa y temperatura de punto de rocío en el ambiente de curación del caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander, datos medidos por un termo higrómetro FLUS ET-175.

Gráfica 1. Ambiente de curación en caney amarillo verdoso de Capitanejo.

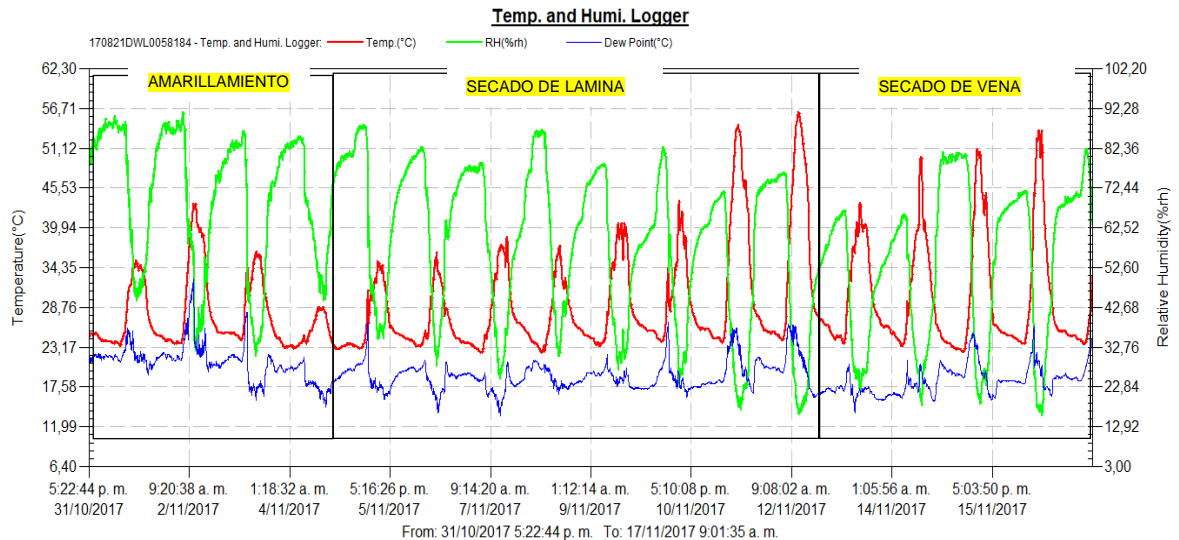


Tabla 9. Estadísticas de ambiente de curación caney amarillo verdoso.

Variable	Min	Max	Unidades
Temperatura	22.4	56.1	°C
Humedad relativa	15.7	91.2	%Rh
Punto de rocío	13.5	32.7	°C
Tiempo total	16 d, 15 h, 35 m		

Del gráfico anterior se logra deducir las características de curación y de igual forma los parámetros de temperatura y humedad relativa que se deben simular en la prueba uno (1) del prototipo de cámara climática, en cada etapa de curación. Para tener mayor claridad del gráfico del caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo, las etapas de curación se subdividen en los gráficos 2, 3, 4.

Grafica 2. Amarillamiento en el caney amarillo verdoso

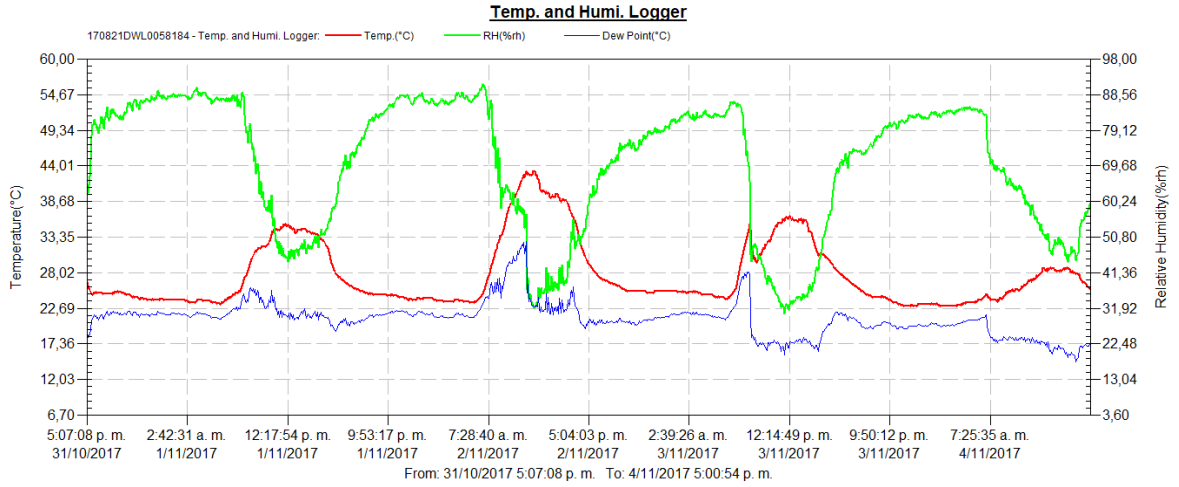


Tabla 10. Estadísticas de la etapa de Amarillamiento en el caney amarillo verdoso.

Variable	Min	Max	Unidades
Temperatura	23.0	43.2	°C
Humedad relativa	30.4	91.2	%Rh
Punto de rocío	14.7	32.7	°C
Tiempo total	3 d,23 h,45 m		

Grafica 3. Secado de lámina o fijación de color en el caney amarillo verdoso.

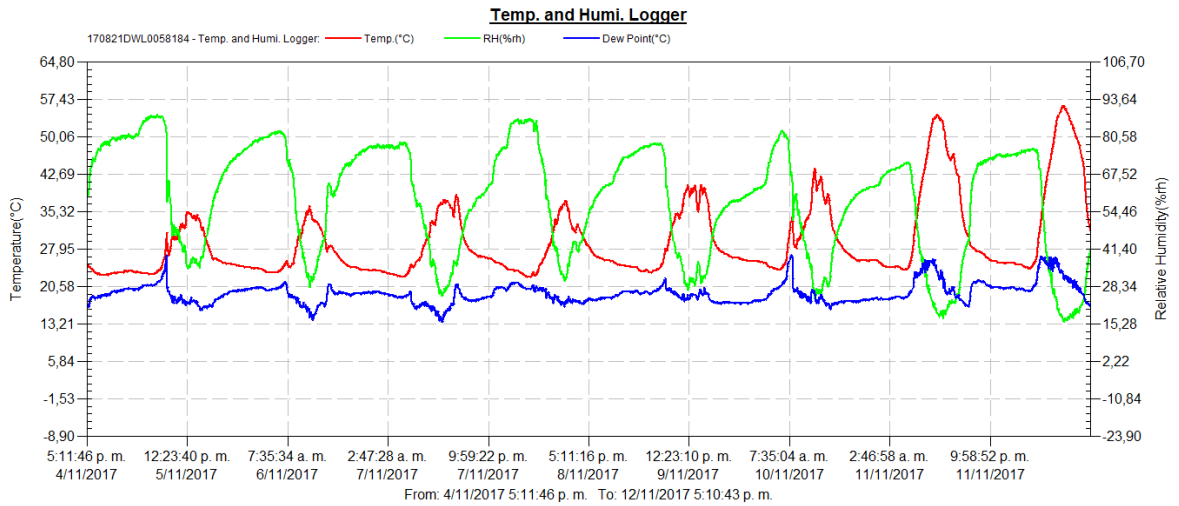


Tabla 11. Estadísticas de la etapa de secado de lámina en caney amarillo verdososo

Variable	Min	Max	Unidades
Temperatura	22.4	56.1	°C
Humedad relativa	16.1	88.1	%Rh
Punto de rocío	13.5	26.7	°C
Tiempo total	7 d,23 h,50 m		

Grafica 4. Secado de vena en caney amarillo verdososo.

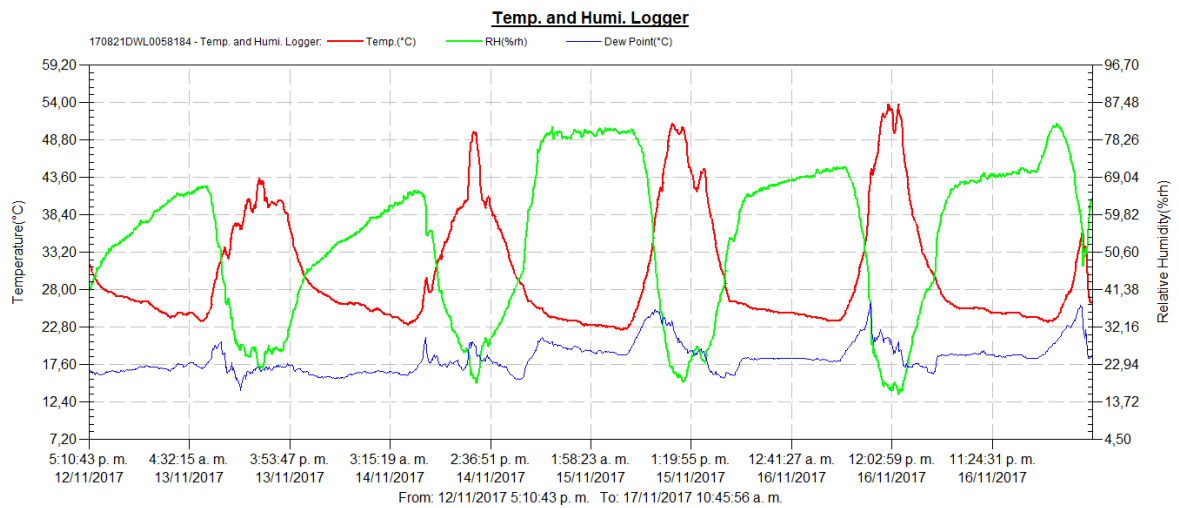


Tabla 12. Estadísticas de la etapa de secado de vena en caney amarillo verdososo

Variable	Min	Max	Unidades
Temperatura	22.5	53.6	°C
Humedad relativa	15.7	82.1	%Rh
Punto de rocío	14.0	26.2	°C
Tiempo total	4 d,17 h,35 m		

6.1 PRUEBA UNO (1), “PROCESO DE CURACIÓN EN CANEY AMARILLO VERDOSO UBICADO EN CAPITANEJO SANTANDER SIMULADO EN LA CÁMARA CLIMÁTICA”.

Como se describió en el ítem 6, la prueba uno (1) consiste en simular las características de curación del caney (tendal o estructura VSC) cubierta de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander en el prototipo de cámara climática, para tener la aproximación, se realizó un promedio del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada etapa de curado mostrado en la gráfica 1, para así determinar el Set Point o los valores de temperatura y humedad relativa que se requieren mantener en cada día de las diferentes etapas de curación realizadas en la prueba uno (1) del prototipo de cámara climática. En las tablas 13, 14 y 15 se pueden observar los valores en promedio en los que se basa el ambiente de curación dado en la estructura VSC o caney, cubierto de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander, los cuales serán valores aproximados de temperatura y humedad relativa simulados en el ambiente de curación de la prueba uno (1) del prototipo.

Tabla 13. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Amarillamiento dada en el caney amarillo verdoso de Capitanejo.

1 Día de AMARILLAMIENTO		
Hora	SET POINT (Prueba uno)	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	35	45.1
2:30 p. m.	34	47.7
3:00 p. m.	32	50
5:20 p. m.	30	55.2
6:30 p. m.	27	68.2
9:30 p. m.	24.7	84.4
2:50 a. m.	23.8	87
7:00 a. m.	25.2	91.1

1 Día de AMARILLAMIENTO		
Hora	SET POINT (Prueba uno)	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
8:00 a. m.	28	74.5
8:30 a. m.	30	70
9:00 a. m.	35	63.7
9:30 a. m.	37	60
10:00 a. m.	40	57
11:00 a. m.	43.2	37
12:00 p. m.	42	37.2

Tabla 14. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Secado de lámina dada en el caney amarillo verduoso de Capitanejo.

1 Dia de SECADO DE LAMINA		
Hora	SET POINT (Prueba uno)	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	35.7	35.7
2:00 p. m.	34.8	35.9
2:30 p. m.	33	38.5
3:00 p. m.	30.6	42.2
5:00 p. m.	28	69
6:00 p. m.	26.7	73.7
7:00 p. m.	25	73.3
11:00 p. m.	23	81.3
6:00 a. m.	24	83.8
9:00 a. m.	27	59
10:00 a. m.	30	47.2
11:00 a. m.	32	43.5
12:00 p. m.	34	35

Tabla 15. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad relativa por cada día en la etapa de Secado de vena dada en el Caney amarillo verdoso de Capitanejo.

1 Día de SECADO DE VENA		
Hora	SET POINT (Prueba uno)	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	52.1	17
2:00 p. m.	46.5	21.6
3:00 p. m.	44	23
4:00 p. m.	41	27.1
4:30 p. m.	36	34.6
5:00 p. m.	32.3	39.7
6:00 p. m.	29	46
7:00 p. m.	27	49.7
1:00 a. m.	25	60.9
6:00 a. m.	23.8	66.4
7:00 a. m.	25.5	65
7:30 a. m.	30.5	58.4
8:00 a. m.	35	56.8
8:30 a. m.	40	43
9:00 a. m.	43	35
10:00 a. m.	48	29
10:30 a. m.	51	24.3
11:00 a. m.	54.2	20
12:00 p. m.	56	16.2

6.1.1 Temperatura y humedad relativa [prueba uno (1)- cámara climática]. La cosecha de las muestras de tabaco Virginia usadas en la prueba uno (1) se realizó de un cultivo aledaño a la ubicación de la cámara climática, esto con el fin de buscar la conservación de las hojas y hacer un proceso similar al tradicional usado en el proceso de curación VSC en el caney amarillo verdoso ubicado en Capitanejo, las hojas seleccionadas en las pruebas realizadas en el prototipo fueron bajas en la posición foliar. En las figuras 76 y 77 se observa el proceso de cosecha, selección

y preparación de las muestras de tabaco Virginia usadas en la primera prueba de la cámara climática.

Figura 76. Cosecha prueba uno.



Figura 77. Hojas de tabaco antes de iniciar la prueba uno.



Una vez las hojas de tabaco Virginia fueron seleccionadas, se dio inicio al ingreso de estas dentro del prototipo de cámara climática, se colgaron un total de cuarenta y ocho (48) hojas en su interior y el suelo se cubrió con hojas de tabaco con el fin de simular algunas hojas que caen al suelo en el proceso de curado de tabaco

Virginia al sol (VSC). En la figura 78 se muestran las hojas de tabaco Virginia dentro de la cámara climática.

Figura 78. Hojas de tabaco Virginia prueba uno.



Con ayuda de los valores de las tablas 13, 14 y 15 (tablas de temperaturas promedio), se realizó la simulación del ambiente mostrada en el gráfico 5 en el prototipo, en donde se observa el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa al interior de la cámara climática durante la prueba uno (1) y en los gráficos 6, 7 y 8 la duración de cada etapa de curado por separado.

Grafica 5. Temperatura y humedad prueba uno.

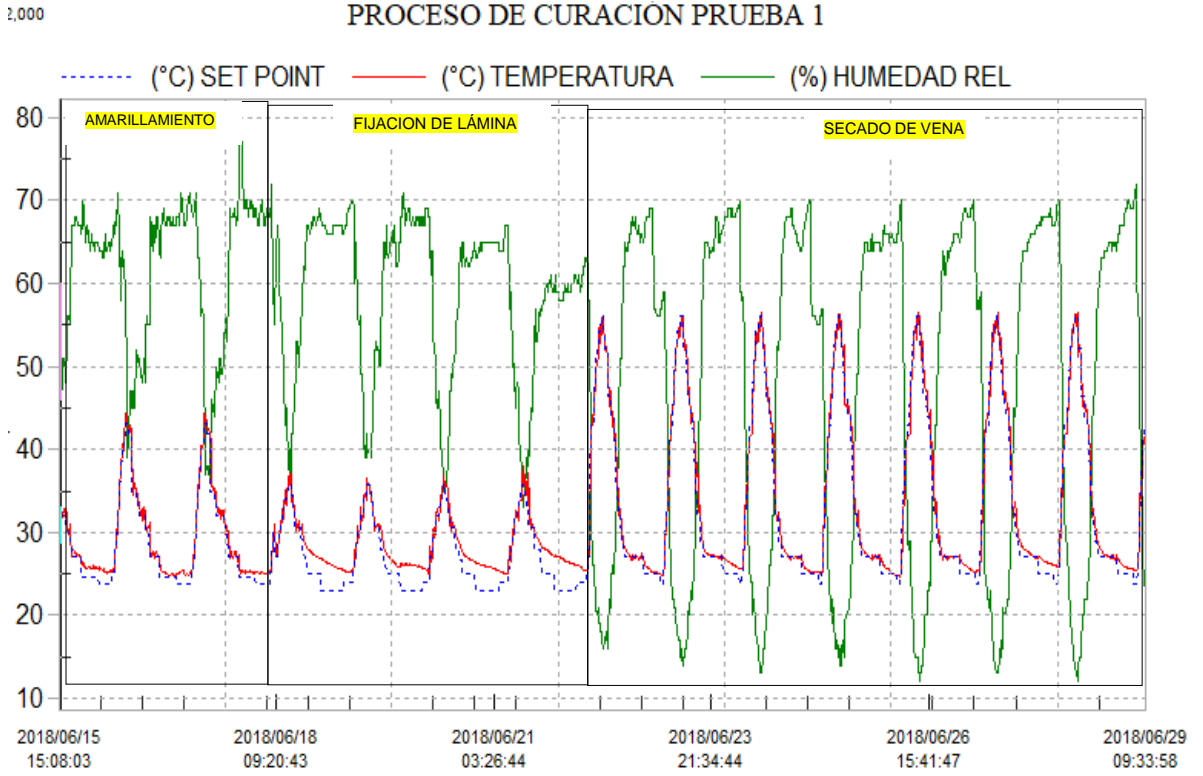
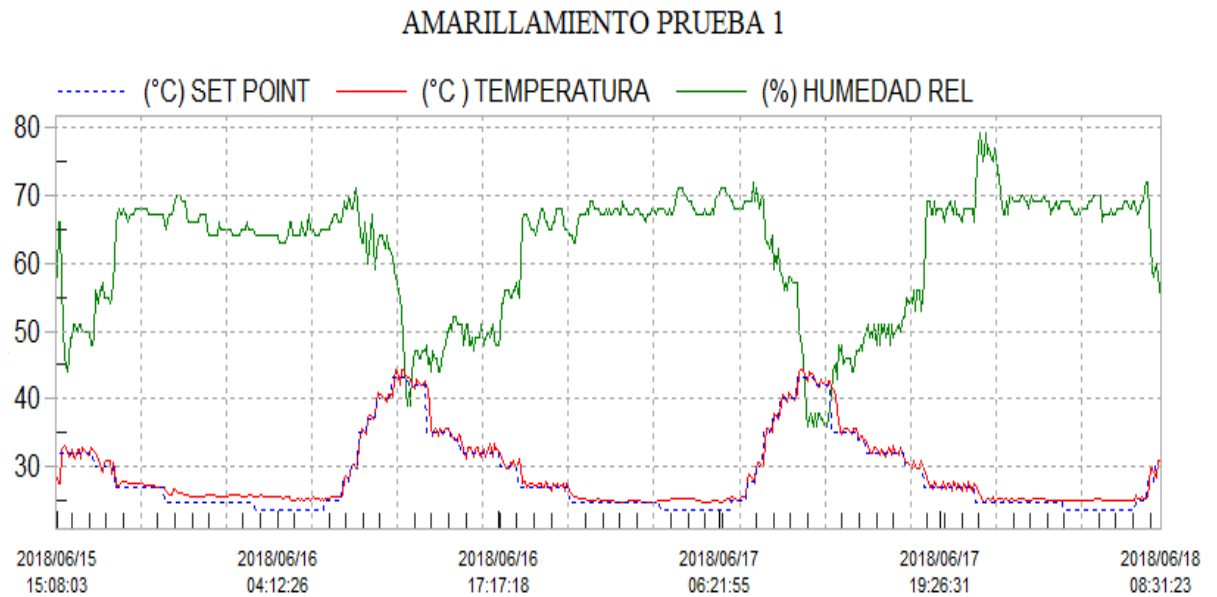


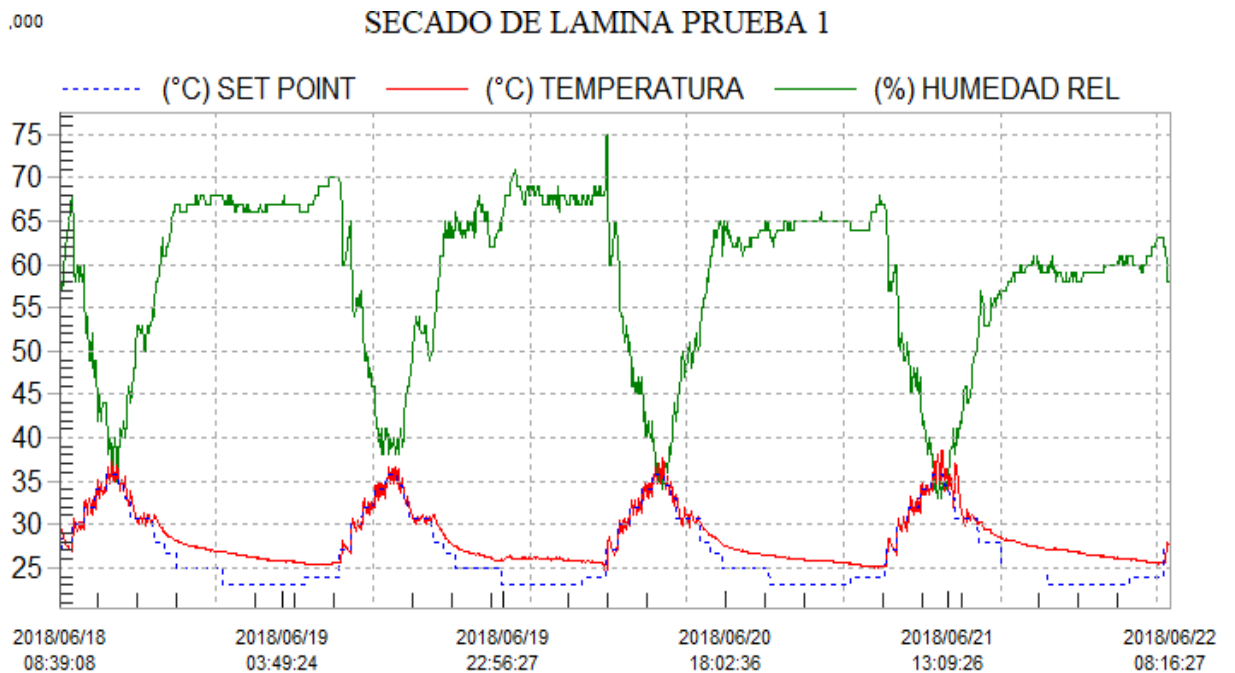
Tabla 16. Duración de cada etapa de curado en la prueba uno.

# HOJAS: 48	TIEMPO DE CURACIÓN			
ETAPA	INICIO	FIN	HORAS	DIAS APROX
Amarillamiento	15/06/2018	18/06/2018	65	3
	Hora: 15:08	Hora: 8:38		
Fijación de color	18/06/2018	22/06/2018	94	4
	Hora: 8:38	Hora: 8:23		
Secado de vena	22/06/2018	29/06/2018	167	7
	Hora: 8:23	Hora: 9:41		

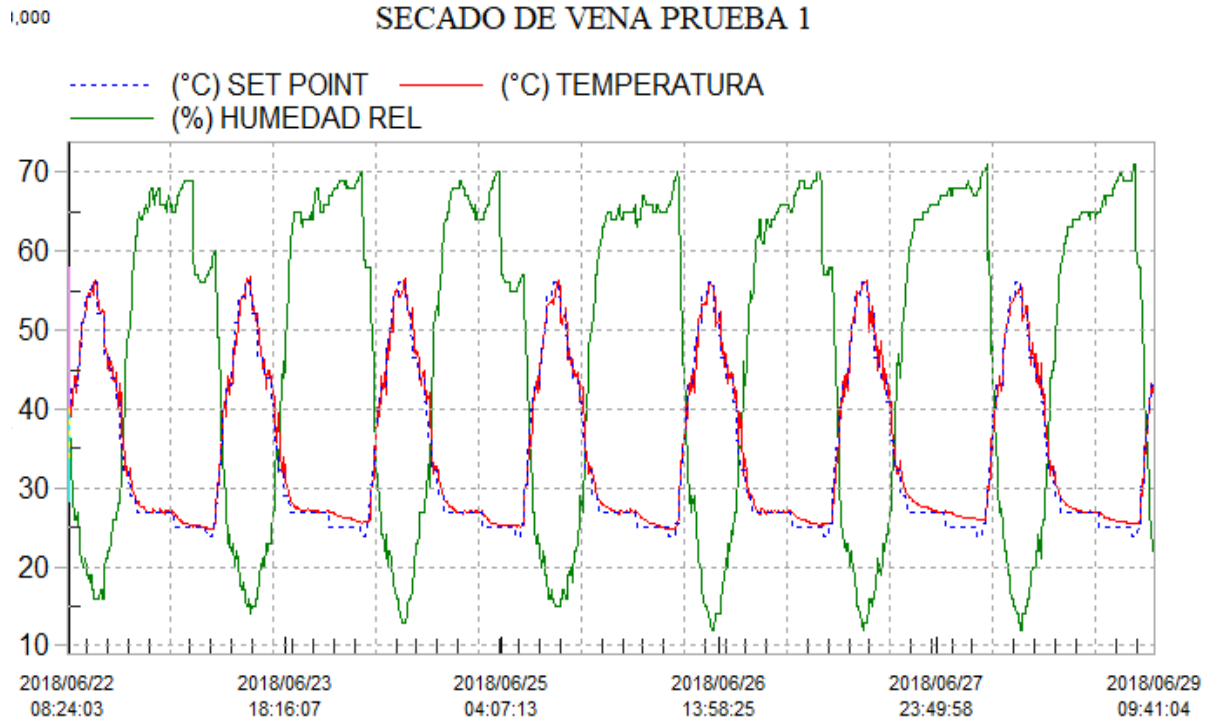
Grafica 6. Temperatura y humedad relativa en etapa de amarillamiento prueba uno.



Grafica 7. Temperatura y humedad relativa en secado de lámina prueba uno.



Grafica 8. Temperatura y humedad relativa en secado de vena prueba uno.



En las figuras 79, 80 y 81 se puede observar en fotografías el proceso de curación de la prueba uno (1) en sus diferentes etapas.

Figura 79. Inicio de Amarillamiento.



Figura 80. Inicio de Secado de Lámina.



Figura 81. Inicio de secado de vena



Las hojas de tabaco Virginia al final de la prueba uno (1) resultaron de color aceptable y con buen aroma. Una de las hojas de tabaco resultante de la prueba uno (1) se puede apreciar en la figura 82.

Figura 82. Tabaco resultante de la prueba uno.



Luego de retirar las hojas del prototipo de cámara climática fueron empacadas como se observa en la figura 83 para proceder a realizar el estudio de contenido de azúcares de las hojas.

Figura 83. Hojas de tabaco prueba uno empacadas.



6.1.2 Peso de las hojas (prueba 1 – cámara climática). El cambio de peso de las hojas de tabaco fue medido durante todo el proceso de curación tal como se

especifica en el ítem 4.2.3.3. En el grafico 9 se muestra el comportamiento de las hojas en la prueba uno.

Grafica 9. Peso de las hojas prueba uno.



En tabla 17 se observan datos importantes del valor del peso de las hojas en el inicio y final de las diferentes etapas de curación de la prueba uno (1).

Tabla 17. Peso de las hojas en cada etapa de curación prueba uno.

# HOJAS: 48	TIEMPO DE CURACIÓN				PESO HOJAS	
	INICIO	FIN	Horas	# DIAS APROX	Peso inicial	Peso final
Amarillamiento	15/06/2018	18/06/2018	65	3	1097 [gr]	839 [gr]
	Hora: 15:08	Hora: 8:38				
Fijación de color	18/06/2018	22/06/2018	94	4	839 [gr]	399 [gr]
	Hora: 8:38	Hora: 8:23				
Secado de vena	22/06/2018	29/06/2018	167	7	399 [gr]	146 [gr]
	Hora: 8:23	Hora: 9:41				

6.2 PRUEBA DOS (2), “PROCESO CON MODIFICACIONES AL AMBIENTE DE CURACIÓN EN CANEY AMARILLO VERDOSO UBICADO EN CAPITANEJO SANTANDER SIMULADO EN LA CÁMARA CLIMÁTICA”

En el grafico uno (1) se puede deducir que la temperatura del ambiente de curación intenta igualar a la temperatura del punto de rocío en las noches y en las madrugadas, esto quiere decir que es un punto crítico en el cual puede existir condensación de agua en el ambiente de curación y humidificación no deseada en la superficie de las hojas de tabaco, lo cual lo hizo un factor importante para hacer un leve cambio en la temperatura de las madrugadas en la prueba dos (2) del prototipo de cámara climática, además a esto, no se notó visualmente en la prueba uno (1) que la etapa de Amarillamiento, fuese crítica en el estado superficial de las hojas, entonces, se anuló la calefacción en esta etapa de curación y también la evacuación de humedad relativa del ambiente de curación de la primera etapa de curación de la prueba dos (2), además a esto se decidió disminuir la humedad relativa del ambiente de curación dejando el suelo del interior de la cámara climática sin hojas (en la prueba uno (1) se dejaron hojas en el suelo para simular las que se caen en el VSC) y en las etapas de secado de lámina y secado de vena se evacuo la humedad como se especifica en la tabla 18. En la prueba dos (2) se cambiaron los parámetros mostrados en la tabla 18.

Tabla 18. Cambios realizados a la prueba dos.

Etapa	Cambios realizados a la prueba (2)
Amarillamiento	<ul style="list-style-type: none">- No se enciende el control de temperatura.- La compuerta de evacuación de humedad del ambiente interior se deja cerrada.
Secado de lamina	<ul style="list-style-type: none">- Se reduce la humedad del ambiente interior, abriendo la compuerta cuando aumenta de 55 [%Hr]- En las madrugadas no se deja caer la temperatura a menos de 26 °C.
Secado de vena	<ul style="list-style-type: none">- En las madrugadas no se deja caer la temperatura a menos de 26 °C.

Etapa	Cambios realizados a la prueba (2)
	<ul style="list-style-type: none"> - Se reduce la humedad relativa, abriendo la compuerta cuando esta aumenta de 65 [%Hr]. - La temperatura en el último día de curación se eleva de 42 [°C] a 65 [°C].

Con la explicación anterior se puede deducir los nuevos datos de Set Point o Valores de temperatura y humedad relativa de la prueba dos (2), tal como se puede observar en las tablas 19, 20 y 21, resaltando los nuevos cambios en comparación con las tablas 13, 14 y 15.

Tabla 19. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Amarillamiento.

1 Día de AMARILLAMIENTO		
Hora	SET POINT (Prueba 2)	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	N.A	N.A
2:30 p. m.	N.A	N.A
3:00 p. m.	N.A	N.A
5:20 p. m.	N.A	N.A
6:30 p. m.	N.A	N.A
9:30 p. m.	N.A	N.A
2:50 a. m.	N.A	N.A
7:00 a. m.	N.A	N.A
8:00 a. m.	N.A	N.A
8:30 a. m.	N.A	N.A
9:00 a. m.	N.A	N.A
9:30 a. m.	N.A	N.A
10:00 a. m.	N.A	N.A
11:00 a. m.	N.A	N.A
12:00 p. m.	N.A	N.A

Nota: Las siglas N.A (No aplica) representan que durante la primera etapa de curación realizada en la prueba dos (2), no se hizo uso de valores de Set Point de temperatura y humedad relativa en el prototipo.

Tabla 20. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Secado de lámina.

1 Dia de SECADO DE LAMINA		
Hora	SET POINT	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	35.7	35.7
2:00 p. m.	34.8	35.9
2:30 p. m.	33	38.5
3:00 p. m.	30.6	42.2
5:00 p. m.	28	55
6:00 p. m.	26.7	55
7:00 p. m.	26	55
11:00 p. m.	26	55
6:00 a. m.	26	55
9:00 a. m.	27	55
10:00 a. m.	30	55
11:00 a. m.	32	43.5
12:00 p. m.	34	35

Tabla 21. Aproximación del comportamiento de temperatura y humedad para la prueba dos (2) realizada en el prototipo para cada día en Secado de Vena.

1 Dia de SECADO DE VENA		
Hora	SET POINT	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
1:00 p. m.	52.1	17
2:00 p. m.	46.5	21.6
3:00 p. m.	44	23
4:00 p. m.	41	27.1
4:30 p. m.	36	34.6
5:00 p. m.	32.3	39.7
6:00 p. m.	29	65
7:00 p. m.	27	65
1:00 a. m.	26	65
6:00 a. m.	26	65
7:00 a. m.	26	65
7:30 a. m.	30.5	65

1 Día de SECADO DE VENA		
Hora	SET POINT	
	Temp [°C]	Hum Rel [%Hr]
8:00 a. m.	35	65
8:30 a. m.	40	65
9:00 a. m.	43	35
10:00 a. m.	48	29
10:30 a. m.	51	24.3
11:00 a. m.	54.2	20

6.2.1 Temperatura y humedad relativa (prueba dos (2)- cámara climática). En la prueba dos (2) realizada en el prototipo de cámara climática, la cosecha se realizó del mismo cultivo usado en la prueba uno (1) y de hojas bajas, con el fin de tener similitud al proceso de muestras iniciales de la prueba uno (1). En la figura 84 se puede observar las hojas de tabaco Virginia justo antes de ser ingresadas al prototipo y una medición de la longitud en una de las hojas.

Figura 84. Hojas de tabaco Virginia antes de iniciar la prueba dos.



El proceso de curación de la prueba dos (2) tuvo variación en los parámetros de temperatura y humedad relativa especificados en la tabla 18. El comportamiento de temperatura y humedad relativa al interior de la cámara climática durante la prueba (2) se muestra en el gráfico 10.

Grafica 10. Temperatura y humedad relativa de la prueba dos

CURACIÓN PRUEBA 2

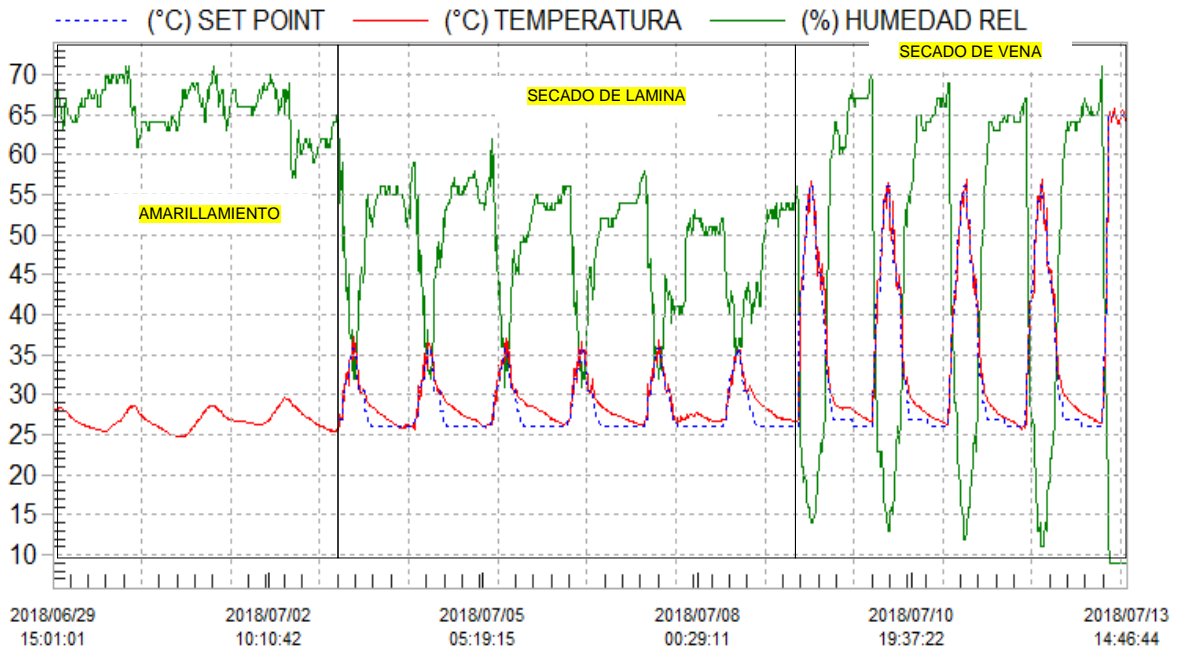
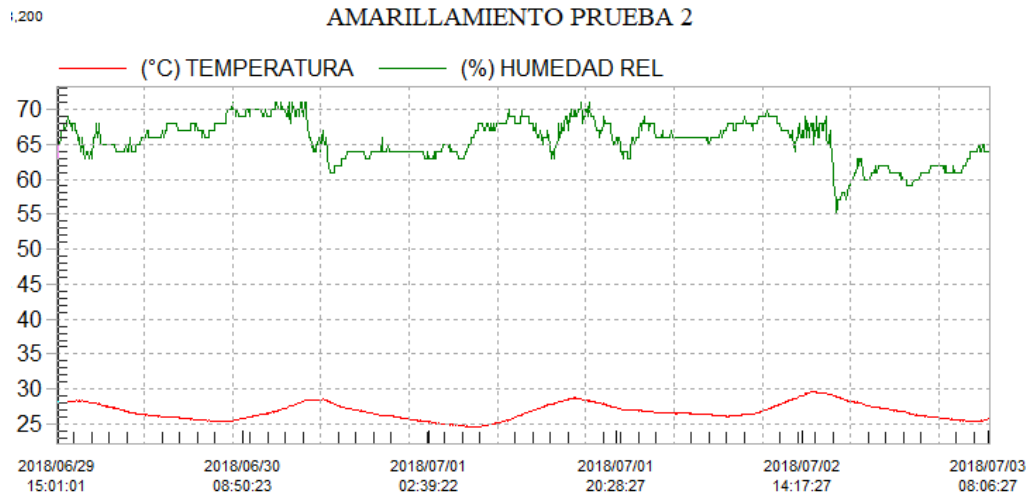


Tabla 22. Tiempos de curación de prueba dos.

# HOJAS: 48	TIEMPO DE CURACIÓN			
ETAPA	INICIO	FIN	HORAS	# DIAS APROX
Amarillamiento	29/06/2018	3/07/2018	88	3.5
	Hora: 15:01	Hora: 8:06		
Fijación de color	3/07/2018	9/07/2018	142	6
	Hora: 8:06	Hora: 7:33		
Secado de vena	9/07/2018	13/07/2018	102	4
	Hora: 7:33	Hora: 14:46		

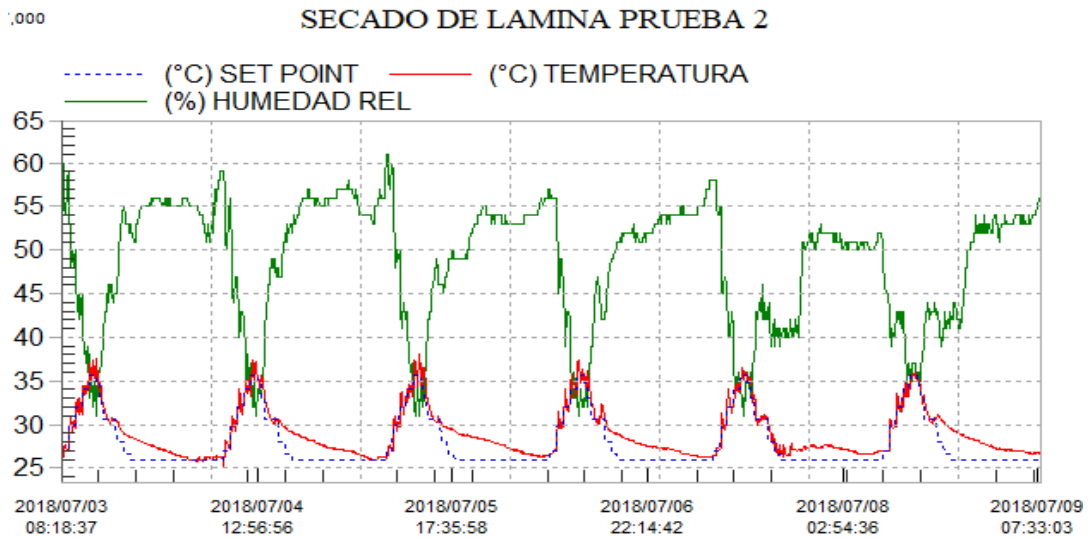
Para tener mayor claridad del comportamiento de los valores de temperatura y humedad relativa al interior en el ambiente de curación se pueden observar los gráficos 11, 12 y 13.

Grafica 11. Temperatura y humedad relativa en Amarillamiento de la prueba dos.

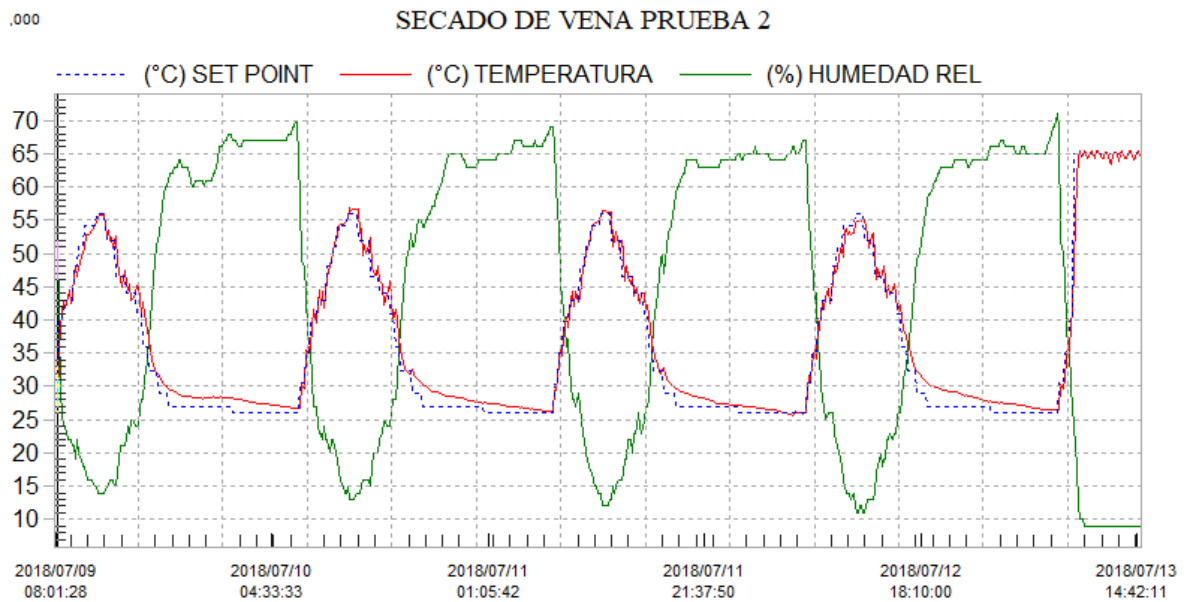


Nota: En esta etapa no se encendieron los controles de temperatura y humedad relativa.

Grafica 12. Temperatura y humedad relativa en secado de lámina de la prueba dos.



Grafica 13. Temperatura y humedad relativa en secado de vena de la prueba dos.



La prueba dos (2) realizada en la cámara climática arrojó mejores resultados visibles en la hoja de tabaco Virginia final en comparación con la primera prueba, en la figura 85, 86 y 87 se puede observar el inicio de cada etapa de curado en registro fotográfico.

Figura 85. Inicio Amarillamiento



Figura 86. Inicio de secado de Lámina



Figura 87. Inicio secado de Vena.



Las hojas de tabaco Virginia al final de la prueba dos (2) resultaron de un color un poco mejor al resultante en la prueba uno (1) y también con buen aroma. Una muestra de hoja resultante de la prueba dos (2) se puede apreciar en la figura 88.

Figura 88. Hojas de tabaco curadas en el prototipo en la prueba dos.



Luego de finalizada la prueba dos (2) del prototipo de cámara climática, las muestras fueron empacadas como se muestra en la figura 89 para proceder a realizar el respectivo estudio de contenido de azúcares.

Figura 89. Hojas de tabaco prueba dos empacadas.



6.2.2 Peso de las hojas (prueba 2 – cámara climática). El cambio de peso de las hojas de tabaco Virginia de todo el proceso de curación de la prueba dos (2) se muestra en la gráfica 14.

Gráfica 14. Peso de las hojas de la prueba dos.



Tabla 23. Datos de cambio de peso en prueba dos.

# HOJAS: 48	TIEMPO DE CURACIÓN				PESO HOJAS	
	ETAPA	INICIO	FIN	Hor as	# DIAS APROX	Peso inicial
Amarillamiento	29/06/2018	3/07/2018	88	3.5	960 [gr]	616 [gr]
	Hora: 15:01	Hora: 8:06				
Fijación de color	3/07/2018	9/07/2018	142	6	616 [gr]	301 [gr]
	Hora: 8:06	Hora: 7:33				
Secado de vena	9/07/2018	13/07/2018	102	4	301 [gr]	115 [gr]
	Hora: 7:33	Hora: 14:46				

6.3 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE HUMEDA DEL TABACO VIRGINIA USADO EN LAS PRUEBAS.

Debido a que la mayoría de los materiales sólidos están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total (m_h) del material es igual a la suma de su masa seca (m_s) y de su masa de agua (m_{H_2O})¹¹, así como se muestra en la ecuación (2).

$$m_h = m_s + m_{H_2O} \quad (2)$$

En materiales sólidos en los que hay evaporación de agua, la masa de agua cambia, sin embargo, la masa seca se mantiene constante. El contenido de humedad en base húmeda es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total¹², es decir, representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra de tabaco respecto a su masa total. En la ecuación (3) se muestra la forma de obtener el valor del contenido de humedad en base húmeda.

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} * 100 \quad (3)$$

La definición del valor de humedad en base húmeda, permite identificar de manera cuantificable el punto donde las hojas de tabaco Virginia usadas en las distintas pruebas de la cámara climática solo están constituidas por materia seca. Para obtener la equivalencia porcentual de masa seca (m_s) y masa húmeda (m_h) del tipo de tabaco Virginia de las pruebas uno (1) y (2) realizadas en el prototipo de cámara climática, se requiere de un experimento gravimétrico.

¹¹ MARTINES L., Enrique, LIRA C. Leonel Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos Simposio de Metrología 2010

¹² Ibíd.

6.3.1 Prueba gravimétrica para la determinación de masa seca y húmeda (secado en estufa). Este procedimiento experimental del método de secado en estufa, busca hallar las proporciones de peso seco y húmedo del tipo de hojas de tabaco Virginia como las usadas en las distintas pruebas de curación del prototipo de cámara climática, para así poder determinar el contenido de humedad en base húmeda de las diferentes pruebas.

El análisis gravimétrico por desecación consiste brevemente en la medición de la pérdida de peso de la muestra debida a la evaporación de agua, el proceso puede efectuarse usando una estufa con circulación forzada de aire a presión atmosférica o al vacío¹³ y una balanza para tomar datos del peso de la muestra, antes y después del secado. El orden del proceso es principalmente preparar la muestra, pesarla, secarla en la estufa, dejarla en reposo para enfriarla a temperatura ambiente y pesarla muestra nuevamente, este proceso es descrito a continuación:

- Preparación de la muestra: Se realizó una selección de diez (10) hojas de tabaco Virginia, de la misma posición foliar (bajeras) con una geometría similar, en la misma etapa de maduración y del mismo cultivo usado en las distintas pruebas realizadas en el prototipo de cámara climática. En la figura 90 se observa las hojas en estado verde o totalmente húmedas.

¹³ GARCÍA MARTÍNEZ, Eva FERNÁNDEZ SEGOVIA, Isabel Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación. [en línea] disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16339/Determinaci%C3%B3n%20de%20humedad.pdf>

Figura 90. Hojas de tabaco antes de iniciar el experimento.



- Secado en estufa de los recipientes: En este proceso experimental se usaron bolsas de papel seco, las cuales fueron ingresadas en la estufa a 70 [°C], para desprender así cualquier tipo de humedad presente en las mismas y seguidamente obtener el valor del peso de los recipientes con mayor precisión. En la figura 91 se observan las hojas dentro de la estufa y al momento de pesarlas.

Figura 91. Hojas de papel para deshumidificarlas



- Pesado de la muestra: Las hojas húmedas fueron pesadas antes de ingresarlas a la estufa junto con los recipientes debidamente secados. Se tomó el valor del peso de las muestras como se observa en la figura 92.

Figura 92. Pesado de las muestras con recipiente antes de iniciar la prueba.



- Secado de la muestra: En este tipo de experimento los productos con un elevado contenido en azúcar deben deshidratarse en estufa a una temperatura no mayor a 70 [°C] ¹⁴. Las hojas de tabaco Virginia fueron ingresadas a la estufa a una temperatura constante de 65 [°C] durante cinco (5) días. En la figura 93 se observa el ingreso de las muestras a la estufa.

¹⁴ Ibíd.

Figura 93. Hojas de tabaco dentro de la estufa.



- Reposo y toma de datos del peso: Luego de que las muestras estuviesen totalmente secas, fueron retiradas de la estufa, puestas en reposo a temperatura ambiente para así obtener el valor del peso de las hojas en estado seco. En la figura 94 se puede visualizar las hojas en estado seco y en el momento de pesarlas.

Figura 94. Hojas de tabaco en estado seco.



- Cálculos de humedad: Las variables de entrada de la siguiente tabla son obtenidas del experimento gravimétrico descrito anteriormente. En la tabla 24 se calcula el peso de la hoja seca.

Tabla 24. Cálculos para obtener peso de una hoja seca.

Análisis de contenido de humedad y peso de la hoja			
$P_{mhum} = b - a$		$\% \text{ Cont hum} = \frac{(P_{mhum}) - (P_{msec})}{P_{mhum}} \times 100$	
$P_{msec} = c - a$		$\% \text{ Cont sec} = 100 - (\% \text{ Cont hum})$	
Variables de entrada			
a	155	gr	Peso del recipiente
b	369	gr	Peso de recipiente junto con muestra húmeda
c	179	gr	Peso de recipiente junto con muestra seca
Variables de salida			
P _{mhum}	214	gr	Peso de la muestra húmeda
P _{msec}	24	gr	Peso muestra seca
% cont hum	88.78	%	Contenido de masa húmeda humedad
% cont sec	11.22	%	Contenido de masa seca

Según los datos anteriores se observa que el contenido de humedad presente en las hojas de tabaco Virginia usado en las pruebas del presente proyecto es bastante elevado, ocupando un 88.78 [%] del peso de las muestras de tabaco, dato que se aproxima al valor dado por la literatura, el cual especifica que el porcentaje de humedad de las hojas de tabaco es de alrededor de 90 [%]¹⁵ y por consiguiente la proporción de peso seco sería un 11.22 [%] del peso total.

¹⁵ TSO T. C, Physiology and biochemistry of Tobacco plants Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. 118.

6.3.2 Determinación de humedad en base húmeda de las hojas de tabaco Virginia usadas en las pruebas. Con los datos obtenidos en la tabla 24 y en colaboración con la ecuación (3), se define que:

$$\%H_{bh} = \frac{m_h - m_s}{m_h} * 100 \quad (4)$$

$$\%H_{bhp} = \frac{m_{ht} - (0.1122 * m_h)}{m_h} * 100 \quad (5)$$

Siendo:

$\%H_{bh}$ = Contenido De humedad en base húmeda.

$\%H_{bhp}$ = Contenido de humedad en base húmeda de las pruebas.

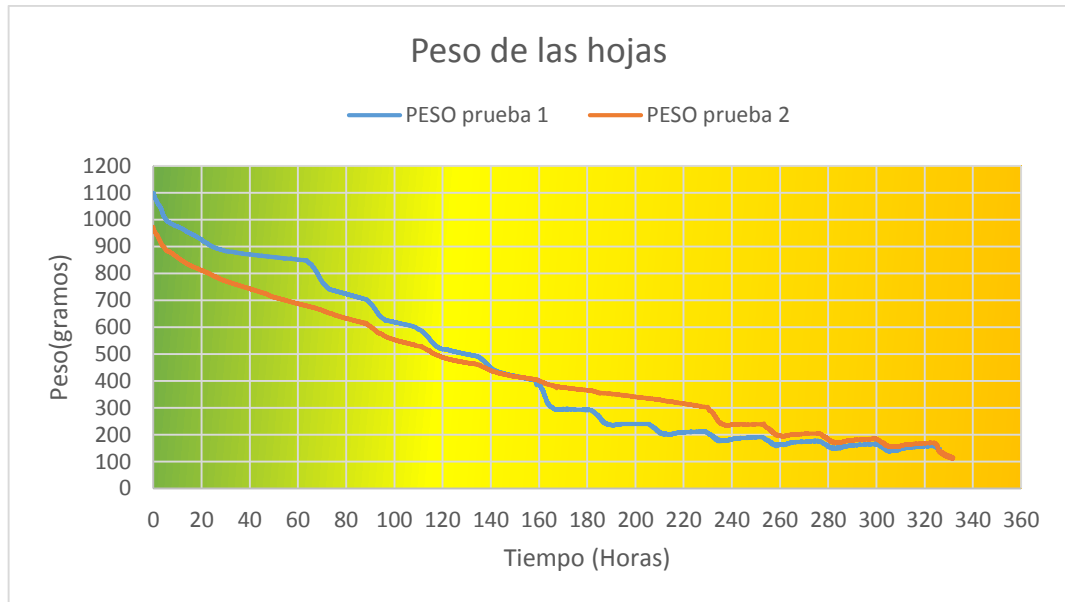
m_h = Peso de las hojas totalmente húmedas.

m_s = Contenido de masa seca de las muestras

m_{ht} = Peso de las hojas en deshumidificación a medida que avanza la curación.

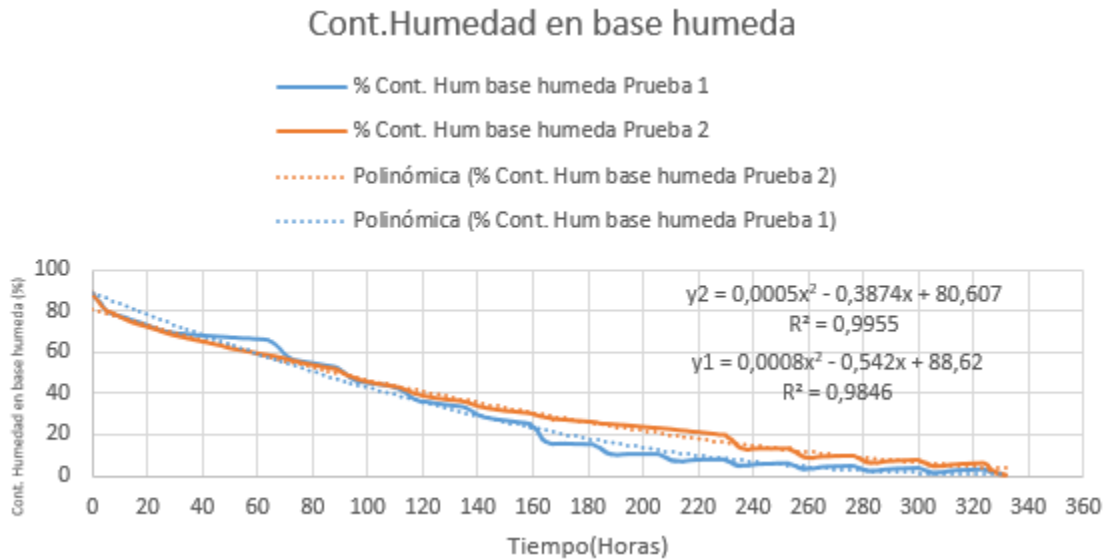
En el siguiente gráfico se muestra el peso de las hojas de tabaco Virginia (m_{ht}) de las dos pruebas realizadas en el prototipo de cámara climática a medida que avanza el tiempo de curación.

Grafica 15. Peso de las hojas en las dos pruebas de curación.



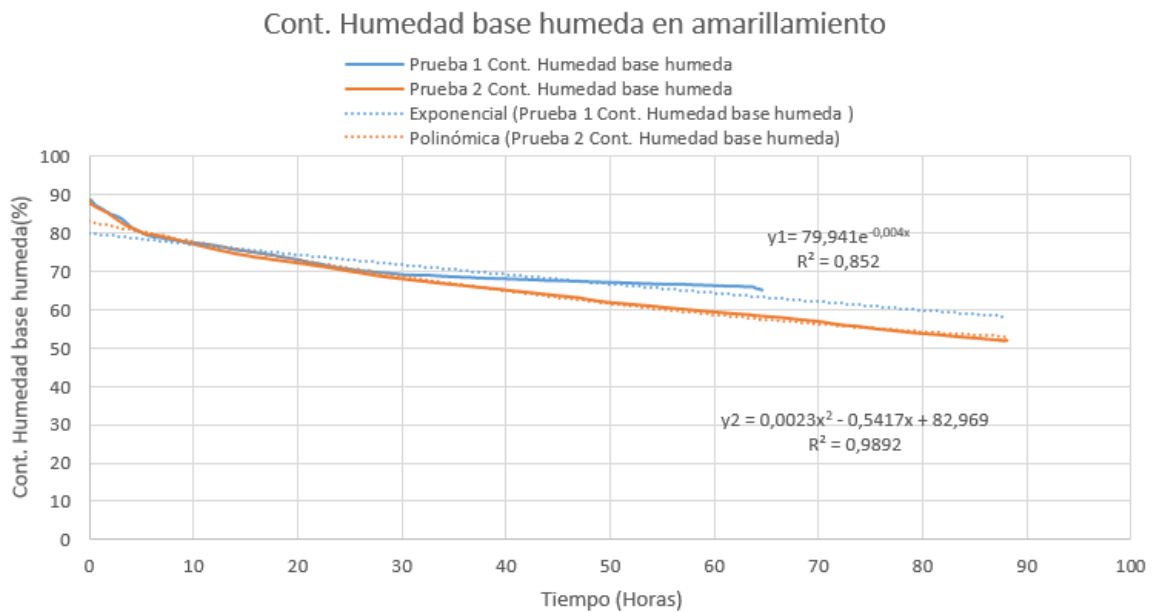
Con el valor del cambio del peso de las hojas de tabaco Virginia (m_{ht}) mientras ocurre cada etapa de curado al interior del prototipo de cámara climática en las diferentes pruebas y conociendo la proporción de peso húmedo (m_{H_2O}) y seco de las hojas (m_s), por medio de la prueba gravimétrica descrita en el ítem 6.3.1 ver tabla 24, se logra determinar el contenido de humedad en base húmeda para cada prueba realizada según la ecuación (5). El contenido de humedad en base húmeda de las hojas de tabaco Virginia usadas en las pruebas realizadas en el prototipo de cámara climática se observa en el gráfico 16.

Grafica 16. Contenido de Humedad en base húmeda en las pruebas realizadas.



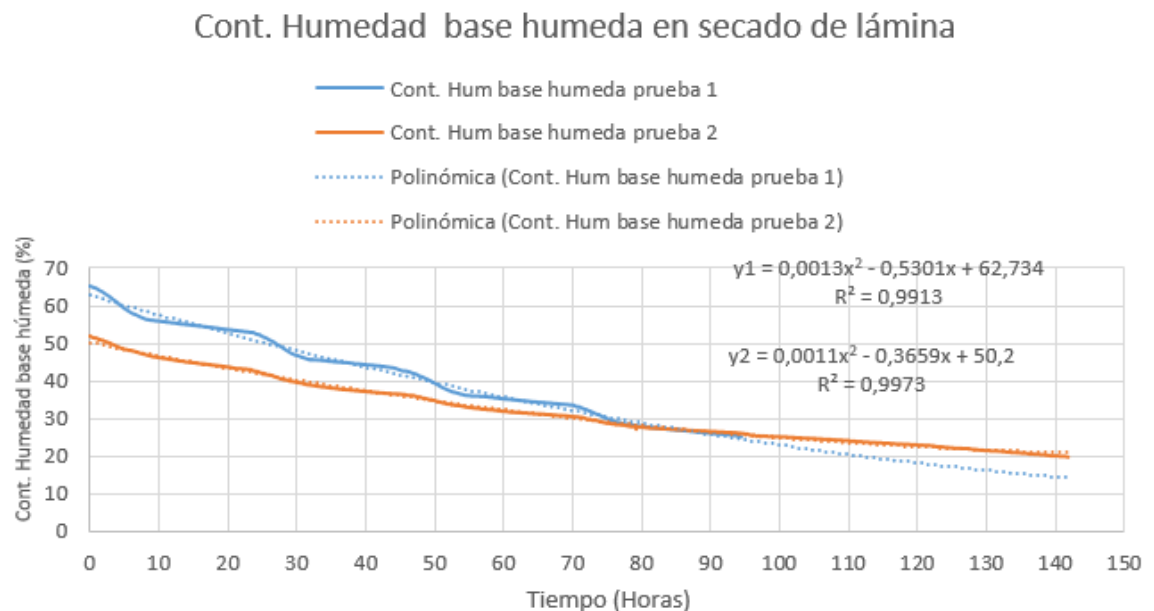
Para tener mayor claridad de las curvas de contenido de humedad en base húmeda en cada etapa de curación realizadas en el prototipo se puede observar el grafico 17, 18 y 19.

Grafica 17. Contenido de humedad en base húmeda en amarillamiento.



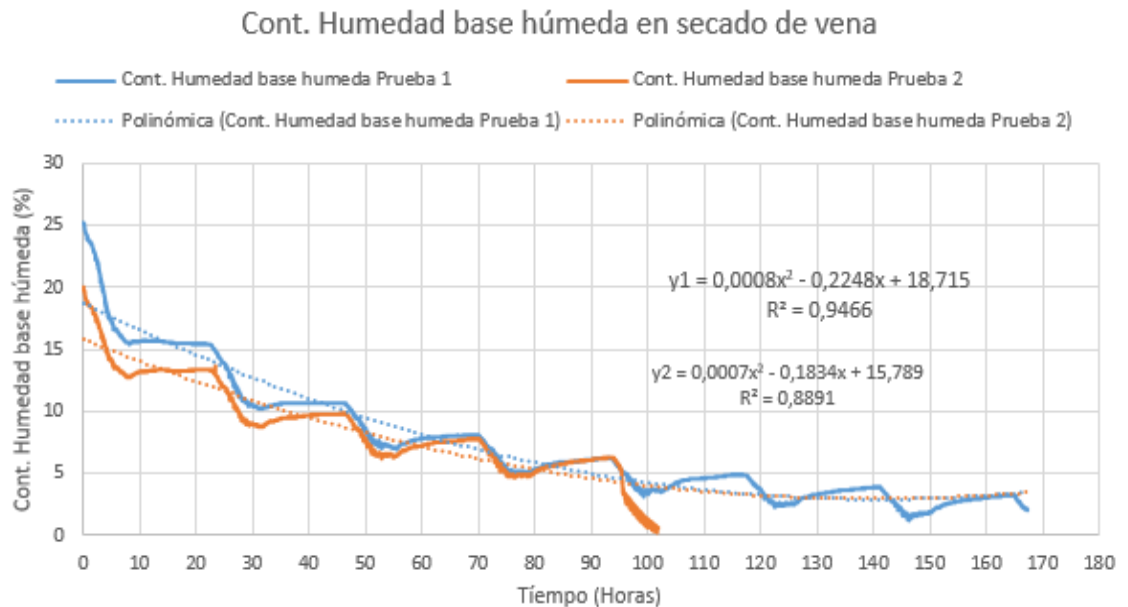
Del gráfico anterior se puede analizar que, el comportamiento de humedad presente de las hojas utilizadas en los ensayos de curación, realizados en el prototipo de cámara climática, muestran que, en su etapa de amarillamiento, el contenido de agua presente en las hojas, es similar en las dos pruebas realizadas, ya sean sometidas a altas temperaturas (prueba 1) como las generadas en el caney de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo, o sencillamente sin valores altos de temperatura y sin control riguroso de humedad relativa (prueba 2).

Grafica 18. Contenido de humedad en base húmeda en secado de lámina.



La evacuación de humedad relativa y el aumento de temperatura en las madrugadas de la segunda prueba realizada en el prototipo, puede generar un comportamiento continuo en el cambio de peso de las hojas en su etapa de secado de lámina, tal como se pueden comparar en el anterior gráfico.

Grafica 19. Contenido de humedad en base húmeda en secado de vena.



Del gráfico anterior se puede concluir que las hojas de tabaco usadas en las distintas pruebas realizadas en el prototipo se curaron en su totalidad, ya que el contenido de humedad presente en las hojas se aproximó a cero en su etapa final de curación. El comportamiento de la humedad presente en las hojas en la etapa de secado de vena es similar bajo los diferentes parámetros que se usaron en las pruebas realizadas en el prototipo.

Comparando las curvas de contenido de humedad (base húmeda) de las pruebas uno y dos, se puede analizar que la etapa de secado de lámina presenta mayor variación con respecto a las otras, ya que el comportamiento de la hojas, al modificar los parámetros de curación tal como se realizó en la prueba dos, cambió de manera notoria la forma de deshumidificación de la muestra, lo cual indica que es una etapa sensible a cualquier cambio que se genere en el ambiente de curación.

En la tabla 25 se puede observar las funciones determinadas a partir de los gráficos anteriores y que representan una aproximación a los valores de contenido de humedad en base húmeda, dados en cada prueba realizada en el prototipo.

Tabla 25. Funciones de contenido de humedad en base húmeda.

Etapa de curado	Ecuación Obtenida	
	Prueba uno (1)	Prueba Dos (2)
Todo el proceso	$Y_1 = 0,0008x^2 - 0,542x + 88,62$ $R^2 = 0,9846$	$Y_2 = 0,0005x^2 - 0,3874x + 80,607$ $R^2 = 0,9955$
Amarillamiento	$Y_1 = 79,94e^{-0,004x}$ $R^2 = 0,852$	$Y_2 = 0,0023x^2 - 0,5417x + 82,969$ $R^2 = 0,9892$
Secado de lámina	$Y_1 = 0,0013x^2 - 0,5301x + 62,734$ $R^2 = 0,9913$	$Y_2 = 0,0011x^2 - 0,3659x + 50,2$ $R^2 = 0,9973$
Secado de vena	$Y_1 = 0,0008x^2 - 0,2248x + 18,715$ $R^2 = 0,9466$	$Y_2 = 0,0007x^2 - 0,1834x + 15,789$ $R^2 = 0,8891$

Éstas son las ecuaciones de aproximación del contenido de humedad en base húmeda de las hojas de tabaco, siendo el valor de "X" el tiempo en horas de curación y "Y" el contenido porcentual de humedad en base húmeda de cada prueba. Describen el fenómeno de deshidratación de las muestras utilizadas, permitiendo conocer el contenido de agua para cualquier punto de las etapas de curación de las pruebas realizadas, obteniendo coeficientes de determinación aceptables que se ajustan al

7. ESTUDIO DE AZÚCARES EN PRUEBAS REALIZADAS

El estudio de contenido de azúcares en las hojas de tabaco Virginia curadas de las pruebas uno y dos realizadas en el prototipo, se llevó a cabo con la colaboración del laboratorio de alimentos CICTA de la Universidad Industrial de Santander, donde se usó cromatografía líquida de alta eficacia o high performance liquid chromatography (HPLC) usando detector de índice de refracción (IR) (ver anexo D. Forma de hacer el estudio de azúcares), el cual es un método que sirve para detectar la proporción de fructosa y sacarosa fijados en las hojas. En la figura 95 se puede apreciar las muestras antes de ser ingresadas a las pruebas de laboratorio.

Figura 95. Tabaco antes de ser ingresado al laboratorio.



Los resultados del estudio de contenido de azúcares de las muestras de tabaco son visibles en la tabla 25 y están respaldados por documentos originados por el laboratorio CICTA, ver Anexo E (Informe estudio de azúcares CICTA).

Tabla 26. Resultados de las pruebas de azúcares.

Prueba	Sacarosa	Fructosa	Contenido total de azúcares	unidades
1	2.24	4.52	6.76	%
2	2.81	4.96	7.77	%

Fuente: Estudio de azúcares CICTA – Anexo E

En la tabla 25 se puede observar que el contenido total de azúcares aumento en la segunda prueba realizada en el prototipo de cámara climática, desde el 6,76[%] al 7,77 [%]. Lo cual es significativo para la empresa y tratándose de un prototipo de pruebas de laboratorio, impulsa la investigación y empeño en la búsqueda de mejoras del proceso de curación del Virginia curado al sol (VSC) en caneyes cubiertos de plásticos.

8. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo de cámara climática con dimensiones interiores de 540x540x670 milímetros [mm] para la caracterización del proceso de curado de tabaco Virginia para la empresa Coltabaco S.A.S, que cumple con los requerimientos planteados en el proyecto, el cual controla temperatura desde 10 [°C] hasta 100 [°C] y humedad relativa desde 0 [%Hr] hasta 95 [%Hr] del ambiente interior del prototipo.
- El prototipo de cámara climática mide, almacena y permite visualizar en tiempo real los valores del cambio del peso de las hojas en curación en gramos, temperatura [°C y °F] y humedad relativa [%Hr] del ambiente interior, a lo largo de cada prueba realizada en el equipo, para su posterior análisis.
- El prototipo de cámara climática tiene la capacidad de contener al inicio de cada prueba un aproximado de 5000 gramos de hojas de tabaco Virginia en estado húmedo y de producir un aproximado de 600 gramos de hojas curadas.
-
- Se simuló experimentalmente en el prototipo de cámara climática, el proceso de curado al sol del tabaco Virginia, aproximando las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa generadas en el ambiente interior de un caney cubierto de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander en el interior del prototipo.
- La fijación de contenido de azúcares totales mejoró de 6.76 [%] con el perfil de temperatura y humedad relativa usados en la prueba uno (1) a 7.77 [%] con el perfil de la prueba dos (2), buscando que el valor de humedad relativa no sea mayor a 60 por ciento [% Hr] en horas del día y la temperatura en las

madrugadas sea mínimo de 26 grados Celsius[°C], durante las etapas de secado de lámina y secado de vena además, la etapa de amarillamiento no requiere de un riguroso control de temperatura y humedad relativa de su ambiente de curación, mejorando así el ambiente de curación del caney cubierto de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander, aproximado en el prototipo.

- Se determinó una función analítica aproximada, que relaciona el contenido de humedad (base húmeda) de la hoja de tabaco con el tiempo, en cada etapa del proceso de curado de las distintas pruebas realizadas en el prototipo, las cuales aproximan un ambiente de curación en el prototipo similar al ocurrido dentro de un caney cubierto de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo.
- La construcción del prototipo permite simular procesos de curación de tabaco a nivel de laboratorio, para poder concluir los diferentes fenómenos críticos en cada etapa de curado o determinar nuevos métodos de curación bajo distintos parámetros de temperatura, humedad relativa y tiempo de curación, que mejoren el producto final.
- El proceso de diseño y construcción se realizó con base en distintos requerimientos de calefacción y velocidad de aire de curación, proyectados para pruebas futuras, lo que llevo a diseñar y seleccionar los elementos usados en el prototipo con controles programables, para de esta forma hacer modificaciones en su funcionamiento y realizar pruebas de curación bajo distintitos parámetros de temperatura, humedad relativa, tiempo y velocidad de aire de entrada del ambiente de curación en el prototipo de cámara climática.
- Las herramientas de computación que se utilizaron para la realización del proyecto son Solidworks para el diseño CAD/CAE, Wecon Levi Studio HMI editor y Wecon PLC Editor para la programación, Data logger graph, Datalogtool y Microsoft EXCEL para los cálculos y gráficas.

9. RECOMENDACIONES

- Aun cuando la cámara climática cumple con los requerimientos de temperaturas altas, se hace necesario que, para alcanzar temperaturas bajas en el recinto interior, el prototipo de cámara climática este ubicado en ambientes de bajas temperaturas.
- Se sugiere que la velocidad de aire de entrada al recinto interior del prototipo sea de 0,1524 (m/s).
- Se recomienda revisar el manual de operación del prototipo la cámara climática adjunto en el anexo C, antes de hacer algún tipo de manipulación del equipo.
- Para seguir obteniendo mejoras del proceso de curación del caney cubierto de plástico amarillo verdoso ubicado en Capitanejo Santander desde el prototipo de cámara climática, se recomienda hacer comparaciones de los azúcares finales de las siguientes pruebas con el resultado del primer ensayo realizado en el presente proyecto.
- Se recomienda usar el mismo tipo de estudio de azúcares implementado en las pruebas realizadas en el presente proyecto, el cual consiste en el uso de cromatografía líquida de alta eficacia o high performance liquid chromatography (HPLC) usando detector de índice de refracción (IR), para así poder obtener futuras comparaciones en las diferentes pruebas de curación que se realicen en el prototipo de cámara climática.
- Se recomienda que, en la siguiente prueba de curación a realizar en el prototipo de cámara climática, se estudie el proceso de curado similar al

ocurrido dentro del caney cubierto de plástico amarillo verdoso, pero con valores de temperatura en las madrugadas de 28 [°C] y una humedad relativa del ambiente de curación en las etapas de secado de lámina y vena, de un máximo de 50 [%Hr], para de esta forma poder seguir analizando posibles mejoras del ambiente de curación en los caneyes cubiertos de plástico amarillo verdoso.

- Se recomienda enfocarse en la variación y búsqueda de parámetros óptimos en la etapa de secado de lámina, la cual según los resultados obtenidos demostró ser la más variable con los cambios efectuados al ambiente de curación.

BIBLIOGRAFÍA

ABUBAKAR Y., YOUNG J.H., JOHNSON W.H., and WEEKS W.W. Changes in moisture and chemical composition of flue-cured tobacco during curing En: Tobacco Science (2000) 44:51-58

AGRONET. Ministerio de Agricultura de Colombia. [en línea] disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

ALTOBELLI F., CONRORI M. Estudio de desempeño energético de estufas de tabaco tipo Bulck curing [en línea] disponible en: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/14-009.pdf

ALTOBELLI F.; CONDORÍ M.; SORRENTINO C. Automatización de estufas de tabaco tipo bulk curing, ensayos a escala de laboratorio [em línea] disponible em: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2014/2014-t003-a007.pdf>

CERQUERA PEÑA Néstor Enrique, RUIZ OSORIO Yaneth Liliana Evaluación del horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR

COOPERATIVE EXTENSION SERVICE Harvesting and curing flue – cured tobacco

GARCÍA MARTÍNEZ, Eva FERNÁNDEZ SEGOVIA, Isabel Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación. [en línea] disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16339/Determinaci%C3%B3n%20de%20humedad.pdf>

Heat-Pump-Dehumidification During the curing of flue-cured. The Georgia Agricultural Experiment stations. Research Bulletin Number 439. Septiembre 2017

JARA MORA Freddy Alexander Rediseño de hornos de curación de tabaco Virginia para mejorar la eficiencia energética de la empresa Protabaco S. A. (Trabajo de grado) Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica 2006 p. 230

LOGICBUS Modbus [en línea] disponible en: www.logicbus.com.mx/Modbus.php1

MARTINES L., Enrique, LIRA C. Leonel Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos Simposio de Metrología 2010

NAYANATARA S. Nayak Tobacco Curing and Fuel Efficiency in Karnataka, India Working Paper, No 77–13

TABACOPEDIA Procedo de curado del tabaco. Curado al aire [en línea] disponible en: <https://tabacopedia.com/es/tratamientos-del-tabaco/procesos-de-curado-del-tabaco/curado-al-aire>

TABAJOPEDIA Tipos de tabaco burley [en línea] disponible en: https://tabacopedia.com/es/tipos-de-tabaco/burley/#_

TSO T. C, Physiology and biochemistry of Tobacco plants Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. 118.