

**REDISEÑO DE HORNOS DE CURACIÓN DE TABACO
VIRGINIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN LA EMPRESA PROTABACO S.A.**

FREDDY ALEXANDER JARA MORA



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

2006

**REDISEÑO DE HORNOS DE CURACIÓN DE TABACO
VIRGINIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN LA EMPRESA PROTABACO S.A.**

FREDDY ALEXANDER JARA MORA

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

2006

**REDISEÑO DE HORNOS DE CURACIÓN DE TABACO
VIRGINIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN LA EMPRESA PROTABACO S.A.**

FREDDY ALEXANDER JARA MORA

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

Director

**OMAR ARMANDO GÉLVEZ
Ingeniero Mecánico**

Codirector

**RODOLFO BOLAÑOS
Ingeniero Químico**

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

2006

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Noviembre de 2006

A mis padres: Víctor y Aracelly.

A mis hermanos: Andre y Cami.

*Por su apoyo incondicional en la realización
de éste trabajo, de mi carrera y de mi persona.*

A San Gil, por ser cuna de tanto talento y de gente trabajadora.

AGRADECIMIENTOS

A la compañía PROTABACO S.A, en especial al Doctor Jesús Rojas, al ingeniero Rodolfo Bolaños, al ingeniero Aníbal García y al ingeniero Alfonso Peñaranda como guías incondicionales para la realización del proyecto, por la fe que han depositado en el talento santandereano y su inquietud en pro de mejorar cada día más.

A la Universidad Industrial de Santander, en especial al profesor e ingeniero Omar Armando Gélvez por su respaldo y colaboración en la culminación de la investigación.

A los habitantes del municipio de Yaguará en el Huila, sede del proyecto de investigación, por su hospitalidad y amabilidad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1 OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVOS GENERALES	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2 CONTEXTO ACTUAL DE LOS HORNOS DE TABACO.....	5
2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LOS HORNOS CONVENCIONALES PARA CURACIÓN DE TABACO VIRGINIA EN COLOMBIA.....	5
2.1.1 Características del los hornos de tabaco	6
2.1.2 Pérdidas en el beneficio del tabaco.....	27
2.1.3 Costos de beneficio del tabaco	32
2.1.4 Inconvenientes en la transferencia tecnológica.....	40
2.2 HORNOS DE TABACO EN EL MUNDO	44
3 PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO EN EL DISEÑO DE HORNOS CONVENCIONALES.....	50
3.1 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LOS HORNOS.....	50
3.1.1 Factores y variables de diagnóstico	51
3.1.2 Instrumentos de medición en el diagnóstico de los hornos.....	52
3.1.3 Formatos de medición y tomas de datos	53
3.1.4 Análisis de los factores y las variables	57
3.2 BALANCE ENERGÉTICO DE UN HORNO DE TABACO VIRGINIA.....	131
3.2.1 Calor teórico requerido para curar tabaco.....	133
3.2.2 Estimación de la eficiencia de un horno de un horno de tabaco.....	136

3.3	ÁRBOL DE POSIBILIDADES DE MEJORA.....	137
3.3.1	Soluciones inmediatas	139
3.3.2	Soluciones a largo plazo.....	144
4	IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES INMEDIATAS.....	145
4.1	SISTEMA RECIRCULADOR RHT.....	145
4.1.1	Proyecto RAF	147
4.1.2	Principio de funcionamiento del sistema RHT	149
4.1.3	Expectativas del prototipo	154
4.1.4	Criterios de diseño	155
4.2	SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE DE COMBUSTIÓN	175
4.2.1	Principio de funcionamiento	176
4.2.2	Expectativas del prototipo	178
4.2.3	Criterios de diseño	178
4.3	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	184
4.4	METODOLOGÍA DE PRUEBAS.....	188
4.5	CUADROS DE RESULTADOS	190
4.5.1	Análisis de las cenizas	190
4.5.2	Consumo global de combustible.....	192
4.5.3	Uniformidad de los parámetros de curación	193
4.5.4	Aumento de la transferencia de calor por los tubos	196
4.5.5	Ahorro económico y retorno de la inversión	198
	CONCLUSIONES.....	199
	RECOMENDACIONES.....	201
	BIBLIOGRAFÍA	204
	ANEXOS.....	206

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Partes principales de un horno convencional.....	10
Figura 2 Vista en corte de un horno convencional y sus partes	10
Figura 3 Esquema de un horno convencional para curado de tabaco Virginia	11
Figura 4 Vista panorámica inferior de un horno de tabaco Virginia.....	13
Figura 5 Sellamiento del acople hornilla-tubo-chimenea con masa de arcilla	14
Figura 6 Acople de los tubos del intercambiador de calor según la dirección de los gases	15
Figura 7 Ventilaciones inferiores	15
Figura 8 Ventilaciones superiores y uniones estructurales del horno en la parte superior	16
Figura 9 Forma correcta de cargar los cujes o varas.....	17
Figura 10 Atizado de la hornilla a alta temperatura	18
Figura 11 Proceso de capataceo o subida de cujes al horno.....	19
Figura 12 Grietas generadas por la dilatación térmica en la hornilla	21
Figura 13 Comparativa de distribución de temperaturas medido en la dimensión vertical del horno	22
Figura 14 Sigrómetro de mecha y su ubicación en el horno.....	23
Figura 15 Sensor termohigrómetro UMMI.....	24
Figura 16 Sensor de temperatura, humedad relativa y conexión eléctrica del UMMI	24
Figura 17 Tubería al rojo en etapa de secado de lámina.....	25
Figura 18 Detalle de un horno incendiado	25
Figura 19 Mallas de protección colocadas sobre la zona caliente de los tubos de intercambio de calor	25
Figura 20 Batería de hornos de tabaco e impacto en la contaminación del aire	27
Figura 21 Gráfico de pérdidas y requerimientos en la cadena de valor agregado del beneficio de tabaco.....	28

Figura 22 Estructura de costos número uno para grandes agricultores.....	37
Figura 23 Estructura de costos número dos para pequeños agricultores	38
Figura 24 Resumen y comparación de la estructura de costos en el beneficio del tabaco...	39
Figura 25 Principales yacimientos de carbón en explotación en Colombia.....	42
Figura 26 Cobertura de energía eléctrica nacional en las zonas interconectadas	43
Figura 27 Quemadores de gas tipo Bulk-curing para conversión de hornos convencionales	46
Figura 28 Sistemas de control y termostatos para conversión de hornos convencionales ..	46
Figura 29 Tubos de intercambio de un horno convencional brasilero	47
Figura 30 Plano (metros) de una hornilla a leña de un horno brasilero.....	47
Figura 31 Foto de la hornilla convencional de Brasil	48
Figura 32 Horno hornilla para un horno de 12 metros tipo Bulk-curing a leña en Argentina.....	48
Figura 33 Hornilla convencional de Colombia. Horno de capacidad 2,5 hectáreas.....	48
Figura 34 Esquema isométrico de los puntos de medición de las fronteras y los sensores UMMI en pruebas de Yaguará.....	54
Figura 35 Esquema de planta de los puntos de medición sobre los tubos y paredes en pruebas de Yaguará	55
Figura 36 Flujo de energía en un horno de tabaco	57
Figura 37 Tamaño de carbón colocado en la parrilla para secar en etapa de amarillamiento	61
Figura 38 Tamaño de carbón colocado en la parrilla para elevar temperatura	61
Figura 39 Ensayo hecho en horno convencional. Resultado toma de datos y gráfica UMMI.	65
Figura 40 Formación de humos negros en la chimenea	65
Figura 41 Áreas de la parrilla	69
Figura 42 Vista de planta de la hornilla convencional.....	69
Figura 43 Plano de corte lateral de la hornilla convencional	70
Figura 44 Corte frontal y posterior de la hornilla convencional	70
Figura 45 Forma de la hornilla y su efecto de apantallamiento	72

Figura 46 Instrumentos de toma de datos para correlacionar la temperatura de los gases y la de la superficie en los tubos de intercambio de calor	77
Figura 47 Curva de correlación entre la temperatura superficial de los tubos y la de los gases	78
Figura 48 Estimación de la temperatura de los gases a lo largo de la tubería y de la temperatura en la hornilla	78
Figura 49 Clasificación de carbones según la ASTM	82
Figura 50 Rastros de arcilla en el carbón y carbón ripio.....	84
Figura 51 Modo de seccionar la tubería para el cálculo de transferencia de calor	86
Figura 52 Leyes de transferencia de calor en los tubos y perfil de temperaturas	87
Figura 53 Resistencias térmicas en el circuito de transferencia de calor desde los gases hasta la cámara	88
Figura 54 Película de hollín en tramo de chimenea	89
Figura 55 Detalle de la sección transversal de la tubería.....	90
Figura 56 Curva de consumo y de desempeño de horno convencional testigo. Horno 2...	91
Figura 57 Diagrama de flujo del programa de cálculo de la transferencia de calor por la tubería en una etapa de curado.....	92
Figura 58 Perfil de temperatura T_g calculada de los gases para toma de datos horno convencional. Horno 1. Primer proceso del programa.....	93
Figura 59 Perfil de temperatura T_g calculada de los gases para la toma de datos del horno tradicional. Horno 2.....	94
Figura 60 Calor transferido de los gases hacia la cámara en función de la posición de los tubos y la etapa de curado. Horno 1	94
Figura 61 Calor transferido de los gases hacia la cámara en función de la posición de los tubos y la etapa de curado. Horno 2	95
Figura 62 Horno de paredes de madera	98
Figura 63 Hornos de ladrillo de cemento	99
Figura 64 Horno de ladrillo común de arcilla cocido	99
Figura 65 Dimensiones estándar de un ladrillo convencional.....	100

Figura 66 Diagrama de resistencias térmicas y diagrama de resistencias simplificado en el ladrillo.....	101
Figura 67 Dimensiones principales del horno convencional	106
Figura 68 Relación entre las temperaturas de las paredes de ladrillo y tabaco en función de las temperaturas de la cámara y ambiente en el horno número 1 y 2	107
Figura 69 Perfil de temperatura en la pared del horno	108
Figura 70 Perfil de temperaturas en la hornilla	110
Figura 71 Lámina galvanizada corrugada.....	112
Figura 72 Perfil de temperaturas en el suelo de horno.....	115
Figura 73 Flujo de aire por convección natural en un horno convencional de curación de tabaco.....	116
Figura 74 Analogía de flujo entre un horno convencional de tabaco, a) convencional; b) con recirculación	118
Figura 75 Estándar de operación de las ventilaciones de un horno.	119
Figura 76 Balance de masa de agua, aire seco y volumen de control para un horno convencional.....	120
Figura 77 Perfil de temperatura en la cámara de curado en un horno sin presencia de viento	123
Figura 78 Perfil de temperatura en la cámara de curado en un horno con presencia de viento	123
Figura 79 Ordenamiento espacial de los datos de temperatura superficial en los tubos ..	124
Figura 80 Temperatura superficial (°C) en los tubos en función de las etapas de curado.	124
Figura 81 Método de cálculo de la dispersión de las temperaturas en el proceso.....	126
Figura 82 Distribución de temperaturas en la cámara y desviación $\sigma(x10)$ (°F) para horno convencional.....	127
Figura 83 Distribución de humedades en la cámara y desviación σ (%) para horno convencional.....	127
Figura 84 Distribución de temperaturas en la cámara y desviación $\sigma(x10)$ (°F) para horno RAF	128
Figura 85 Distribución de humedades en la cámara y desviación σ (%) para horno RAF	128

Figura 86	Analizador ORSAT colocado en el conducto chimenea	129
Figura 87	Emisiones contaminantes a la atmósfera	130
Figura 88	Contaminación del suelo y el ambiente por el carbón	130
Figura 89	Diagrama de energía en un horno de tabaco.....	131
Figura 90	Distribución de la energía potencial del carbón E_g en función de las etapas de curado en el monitoreo de un horno convencional.....	132
Figura 91	Contenido de humedad en base seca en función de las etapas de curado.....	135
Figura 92	Cantidad teórica de energía en kJ necesaria para el secado del tabaco en función del piso foliar	135
Figura 93	Árbol de mejoras en los procesos de curación de tabaco.....	144
Figura 94	Esquema generalizado de un secadero convectivo.	146
Figura 95	Esquema del sistema recirculador RAF	148
Figura 96	Sistema de Recirculación RAF	148
Figura 97	Elementos del recirculador RAF.....	149
Figura 98	Esquema del sistema recirculador RHT	150
Figura 99	Sistema de Recirculación RHT.....	150
Figura 100	Funcionamiento del recirculador RHT para hornos de tabaco.....	151
Figura 101	Simetría de flujo para el uso de un solo ventilador en recirculador RHT	153
Figura 102	Proceso de diseño del recirculador RHT	158
Figura 103	Esquema de las corrientes de aire de proceso presentes en el horno RHT	159
Figura 104	Esquema de las líneas de flujo de aire para el sistema de recirculación RHT	161
Figura 105	Curva del sistema del conjunto de ventiladores axiales en paralelo	162
Figura 106	Selección del ventilador axial SIEMENS y curva de desempeño del diseño ...	163
Figura 107	Especificaciones dimensionales del ventilador seleccionado.....	164
Figura 108	Medidas principales del horno para montaje del recirculador RHT	165
Figura 109	Puntos de geometría del recirculador RHT	166
Figura 110	Cálculo de la inclinación de los ventiladores	166
Figura 111	Resultados gráficos del programa de generación de medidas del recirculador para dos configuraciones de horno	167

Figura 112 Medida de separación interna de barredera para diseño de ducto de entrada de aire.....	168
Figura 113 Representación virtual de la estructura del recirculador RHT	170
Figura 114 Análisis estructural mediante CAE en ANSYS®	171
Figura 115 Curva de desempeño del ventilador para simulación	171
Figura 116 Condiciones iniciales del flujo para el sistema recirculador RHT.....	172
Figura 117 Enmallado de la estructura de descarga del recirculador con el software COSMOS-Flow®	172
Figura 118 Resultados de la simulación de flujo en el recirculador.....	172
Figura 119 Variación de la temperatura ambiente y del horno para cálculo de pérdidas.	173
Figura 120 Configuración de la empaquetadura de fibra mineral para aislamiento del recirculador.....	174
Figura 121 Esquema del admisor de aire para hornillas	176
Figura 122 Partes del admisor de aire.....	177
Figura 123 Estimación del tamaño del impulsor del ventilador centrífugo	180
Figura 124 Especificaciones del motor eléctrico conseguido para el ventilador centrífugo	180
Figura 125 Dimensiones principales de la hornilla para instalación del admisor de aire .	181
Figura 126 Impulsor del ventilador centrífugo de 280 cfm.....	182
Figura 127 Análisis CFD intermedios para el ventilador centrífugo del admisor de aire.	182
Figura 128 Resultado final satisfactorio del análisis CFD para el ventilador centrífugo...	183
Figura 129 Condiciones iniciales de flujo para el sistema de admisión de aire	183
Figura 130 Enmallado y resultados de flujo para el sistema admisor de aire	183
Figura 131 Construcción del recirculador en la planta de desvenado de PROTABACO San Gil (Santander)	186
Figura 132 Montaje del recirculador en horno situado en la zona rural de Yaguará (Huila)	186
Figura 133 Construcción y montaje del admisor de aire para la hornilla	187
Figura 134 Cenizas del horno testigo	191
Figura 135 Cenizas del horno con admisor de aire	191

Figura 136 Muestras de ceniza analizadas	192
Figura 137 Condiciones sicrométricas de la cámara de secado en horno con tiro natural	194
Figura 138 Condiciones sicrométricas de la cámara de secado en horno con recirculador RHT	195
Figura 139 Comparación de las desviaciones estándar entre tiro natural y tiro con recirculador RHT.....	195
Figura 140 Temperatura superficial de la tubería en los puntos de toma datos. Arriba: horno convencional; abajo: horno con recirculación RHT	197
Figura 141 Temperatura superficial y calor transferido en función de los coeficientes de convección interno y externo de la tubería.....	196

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Consumo específico carbón/tabaco en función del piso foliar	12
Tabla 2 Factores de pérdidas energéticas, causas y sus implicaciones	31
Tabla 3 Resumen de los parámetros de conversión a unidad kilo de tabaco.....	35
Tabla 4 Estructura de costos número uno para los grandes agricultores en función kilo seco	35
Tabla 5 Estructura de costos número dos para los pequeños agricultores en función kilo seco.....	36
Tabla 6 Tendencia del precio interno del carbón 2004-2005 para el carbón utilizado en el Huila.	42
Tabla 7 Variables a medir en el diagnóstico de los hornos de tabaco	51
Tabla 8 Variables e instrumentos de medición utilizados en la toma de datos	53
Tabla 9 Variables e instrumentos especializados para diagnóstico de los hornos de tabaco	53
Tabla 10 Formato toma de datos proyecto en Fonseca (Guajira) 2004	55
Tabla 11 Formato toma de datos proyecto en Yaguará (Huila) 2006	56
Tabla 12 Objetos de estudio en la generación de calor y combustión.	59
Tabla 13 Rata másica de combustible promedio en función de las etapas de curado	67
Tabla 14 Resultados del cálculo del tamaño de parrilla	68
Tabla 15 Comparación entre los tamaños de hornilla reales y los calculados	69
Tabla 16 Datos geométricos del conducto de chimenea.....	73
Tabla 17 Condiciones generales de chimenea en tiro natural.....	73

Tabla 18	Condiciones generales de chimenea en tiro forzado.....	73
Tabla 19	Cálculo de la relación de aire teórico para combustión de carbón	74
Tabla 20	Cantidad de aire teórico de combustión calculado para las diferentes etapas del proceso	75
Tabla 21	Entalpías de las sustancias participantes en la reacción de combustión..	80
Tabla 22	Entalpía de los productos de la combustión en función de la temperatura	81
Tabla 23	Análisis elemental del carbón y las escorias hecha por Ingeominas	83
Tabla 24	Análisis próximo del carbón en muestra secada al aire.....	83
Tabla 25	Análisis próximo de las cenizas de un horno de tabaco.....	83
Tabla 26	Calidades del carbón mineral según instituto de carbón de Oviedo (España).....	84
Tabla 27	Datos de entrada al cálculo de transferencia de calor en la tubería.....	88
Tabla 28	Fracciones parciales y masas molares de los gases de combustión para cálculo de propiedades.....	90
Tabla 29	Datos de entrada al programa del cálculo de transferencia de calor. Horno número 1	90
Tabla 30	Datos de entrada al programa del cálculo de transferencia de calor. Horno número 2	91
Tabla 31	Resultado de los cálculos de transferencia de calor por los tubos en horno número 1.....	95
Tabla 32	Resultado de los cálculos de transferencia de calor por los tubos en el horno número 2	96
Tabla 33	Medidas principales de los ladrillos de construcción común. Medidas en milímetros	100
Tabla 34	Conductividad térmica de los materiales de ladrillo más usados en la construcción de hornos de tabaco.....	100

Tabla 35	Resultados del estudio de aislamiento térmico. Costo/Beneficio del material en función del tipo de ladrillo	103
Tabla 36	Materiales para aislamiento térmico disponibles en el mercado	103
Tabla 37	Costo/Beneficio de algunos materiales para aislamiento térmico industrial	104
Tabla 38	Medidas máximas y mínimas de los hornos convencionales	106
Tabla 39	Área de las fronteras del horno	106
Tabla 40	Pérdidas de calor por la paredes de ladrillo H12 horno convencional en número 1.....	108
Tabla 41	Pérdidas de calor por la paredes de ladrillo H12 horno convencional número 2.....	109
Tabla 42	Pérdidas por la hornilla en el horno número 1	111
Tabla 43	Pérdidas por la hornilla en el horno número 2.....	111
Tabla 44	Parámetros de cálculo para estimar resistencias térmicas en otras fronteras.....	112
Tabla 45	Cálculo del coeficiente de convección natural en las paredes internas del horno	113
Tabla 46	Cálculo de resistencias por conducción para otras fronteras.....	114
Tabla 47	Cálculo del caudal de aire de proceso en función de las etapas de secado	121
Tabla 48	Composición del calor requerido para secar alimentos.....	134
Tabla 49	Parámetros de entrada para el cálculo del calor requerido para curar tabaco	136
Tabla 50	Relación entre la cantidad de energía teórica para secar y la cantidad suministrada al horno.....	137
Tabla 51	Cuadro de posibilidades de mejora en los hornos versus ventajas	143
Tabla 52	Corrientes que intervienen en un secadero convectivo generalizado de la Figura 94	146

Tabla 53	Paralelo comparativo entre el sistema de recirculación RAF y RHT.....	154
Tabla 54	Parámetros de diseño para un horno de tabaco con tiro forzado	157
Tabla 55	Rendimiento volumétrico (kg tabaco/m ³) en los tipos de hornos Flue y Bulk cured con racks.....	161
Tabla 56	Caudal de aire impulsado (m ³ /s) de ventiladores axiales SIEMENS monofásicos bajo diferentes presiones.....	163
Tabla 57	Selección del ventilador axial SIEMENS monofásico	163
Tabla 58	Especificaciones de catálogo para ventiladores axiales monofásicos SIEMENS.....	164
Tabla 59	Medidas de la pared posterior del horno de tabaco.....	165
Tabla 60	Cálculo del peso de la estructura y del número de espárragos de anclaje	169
Tabla 61	Cálculo del torque de arranque y de régimen para el ventilador axial..	170
Tabla 62	Cálculo estimado de la cantidad de calor perdido por las paredes sin aislamiento	175
Tabla 63	Cálculo del caudal del ventilador mediante relación estequiométrica ..	179
Tabla 64	Medidas de la honrilla de la Figura 125.....	181
Tabla 65	Lista de materiales y precios para el recirculador RHT.....	184
Tabla 66	Lista de materiales y precios para el admisor de aire a las hornillas.....	185
Tabla 67	Parámetros de cálculo para número de hornadas.....	188
Tabla 68	Características del lote y la batería de hornos.....	188
Tabla 69	Cálculo del número de hornadas por horno y distribución de las pruebas	189
Tabla 70	Cálculo del consumo de carbón por vara	192
Tabla 71	Resultados del consumo de combustible obtenidos en los ensayos de los prototipos	193
Tabla 72	Cálculo del ahorro de combustible por cada uno de los prototipos.....	193

Tabla 73	Calidad y precio del tabaco curado en hornos convencionales sin reformas.....	194
Tabla 74	Calidad y precio del tabaco curado con el prototipo recirculador RHT	194
Tabla 75	Cálculo del número de hornadas para recuperar la inversión	198
Tabla 76	Emisiones contaminantes y comparación con normas ambientales en tiro natural.....	242
Tabla 77	Análisis Orsat de los gases de chimenea en tiro natural	242
Tabla 78	Emisiones contaminantes y comparación con normas ambientales en tiro forzado.....	243
Tabla 79	Análisis Orsat de los gases de chimenea en tiro forzado	243
Tabla 80	Especificaciones técnicas del horno modular.....	252

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO....	207
ANEXO B. SISTEMAS DE CURACIÓN DE TABACO.....	222
ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN...	232
ANEXO D. CÓDIGOS EN MATLAB DE LOS PROGRAMAS.....	239
ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS ORSAT.....	241
ANEXO F. IMPLEMENTACIÓN DE HORNOS DE CURACIÓN TIPO BULK- CURING EN COLOMBIA.....	244
ANEXO G. PROYECTO URE Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS.....	255
ANEXO H. GLOSARIO DE TERMINOS.....	259
ANEXO I. PLANOS DE LOS PROTOTIPOS.....	267

RESUMEN

TITULO:

REDISEÑO DE HORNOS DE CURACIÓN DE TABACO VIRGINIA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EMPRESA PROTABACO S.A.*

AUTOR:

Freddy Alexander Jara Mora**

PALABRAS CLAVE:

Tabaco, postcosecha del tabaco, curación de tabaco, beneficio del tabaco, hornos de curación de tabaco, secado de tabaco, Flue-curing, Bulk-curing, rediseño de hornos, sistemas de recirculación

DESCRIPCION:

El propósito de este proyecto de investigación es estudiar el proceso de curación y secado de tabaco tipo Virginia que se cura en hornos, analizando los factores energéticos y proponiendo cambios en el diseño actual de estas infraestructuras para reducir la cantidad de combustible utilizado y mejorar la calidad del tabaco.

La compañía PROTABACO S.A. en su misión de mejorar la productividad de la cadena del tabaco, ha incentivado la investigación en este aspecto para reducir costos de producción del tabaco en rama y aumentar la competitividad en el mercado internacional. Una muestra representativa de los hornos presentes en los departamentos del Huila, Santander y parte de la Costa Atlántica (Colombia) fue monitoreada y, con base en un diagnóstico energético, se propuso un árbol de posibilidades de mejora en las cuales se implementaron las más críticas.

El resultado del estudio concluye en la implementación de dos prototipos a modo de solución inmediata al problema energético y de calidad del tabaco; el primero es un prototipo de recirculación de aire para aumentar el secado del tabaco y el segundo, un admisor de aire para la combustión del carbón, principal fuente energética utilizada en esta aplicación. Los prototipos son bastante económicos, de fácil montaje, instalación y operación, creando una salida atractiva al problema de costos que están enfrentando los agricultores y productores tabacaleros. Los resultados de las pruebas de los prototipos mostraron un ahorro energético de aproximadamente 25% y un mejoramiento de la calidad del tabaco en 200 pesos colombianos por kilo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Armando Gelvez.

SUMMARY

TITLE:

REDESIGN OF VIRGINIA TOBACCO CURING BARNs TO IMPROVE THE ENERGETIC EFFICIENCY FOR PROTABACO S.A. COMPANY*

AUTHOR:

Freddy Alexander Jara Mora**

KEYWORDS:

Tobacco, post-harvest of tobacco, benefit of tobacco, tobacco curing barns, drying of tobacco, Flue-curing tobacco, Bulk-curing tobacco, redesign of barns, re-circulation systems.

DESCRIPTION:

The purpose of this investigation project is to study the process of curing and drying Virginia tobacco, which is cured in barns, analyzing the energetic factors and proposing changes in the actual design of these infrastructures to reduce the amount of fuel used and improve the quality of tobacco.

The PROTABACO S.A. company in its mission to improve the productivity of chain of tobacco, the investigation has motivated in this feature to reduce costs of production of leaf tobacco increasing the competitiveness in the international market. A representative sample of presents barns at the departments of the Huila, Santander and part of Atlantic coast (Colombia) was monitored and a tree of improving possibilities in which the more criticisms were implemented was proposed, on the basis of an energetic diagnosis.

The result of the study concludes in the implementation of two prototypes like immediate solution the energetic and quality problem of tobacco; the first is a prototype of re-circulation of air to increase the drying of tobacco and the second one is an admisor of air for the combustion of coal, principal energetic source utilized in this application. Prototypes are quite cheap to run, easily mountables and maneuverable, creating an attractive exit to the problem of costs that the agricultural tobacco growers and producers are confronted. The results of the tests of the prototypes evidenced approximately 25%'s energetic saving and an increase of the quality of tobacco in 200 Colombian pesos per kilo.

* Degree Work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Omar Armando Gelvez.

INTRODUCCION

Antes de la elaboración de los productos de tabaco (cigarros, cigarrillos, tabaco para aspirar, para pipas, para mascar entre otros) es necesario secar la hoja y dar sus características de fumado, usando infraestructuras de curación y secado. Los componentes biológicos de la hoja se transforman en el secado, dándole propiedades aromáticas y de nicotina, características de cada variedad de tabaco. Específicamente en el tabaco Virginia, una de las variedades más extendidas en el mundo, usada para elaborar cigarros y cigarrillos, la curación y el secado se hace por la creación de una atmósfera artificial bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad en infraestructuras denominadas hornos de cañón ó Flue-cured barns por sus siglas en inglés.

El sector del tabaco es un fuerte generador de empleo y divisas a los estados. Más de 125 países en el mundo de los seis continentes lo cultivan, generando más de 33 millones de empleos en labores de campo anualmente (70 millones si se tiene en cuenta los empleos en las industrias tabacaleras), jugando un papel muy importante desde el punto de vista social y económico. La producción de tabaco la conforman dos fases, una agrícola y una industrial. La fase agrícola es manejada por los cultivadores de la hoja de tabaco quienes la siembran, la cultivan, la cosechan y la secan, con insumos y asesoría técnica facilitados por las compañías tabacaleras que, posteriormente compran la hoja seca necesaria para la fabricación de cigarros y cigarrillos principalmente en la fase industrial.

En Colombia, la compañía PROTABACO S.A. elabora blends o mixturas de marcas de cigarrillos de exportación y para consumo nacional. Ella tiene a su disposición cerca de 1000 hornos de tabaco Virginia, los cuales empezaron a ser construidos y

operados desde la época de los setenta sin renovación tecnológica alguna. La producción de tabaco Virginia en Colombia ha estado presionada y amenazada por un aumento de costos de producción en las labores agrícolas y por una optimización de las estructuras de costos de países competidores y que han innovado en el tema de la curación de tabaco. La clave de la problemática agrícola del tabaco es la mecanización y la optimización de los costos de modo que las labores tiendan a ser más eficientes, sin dejar de lado el toque artesanal y la idiosincrasia de los campesinos.

Teniendo en cuenta que más del 90% de la energía usada para la producción de tabaco Virginia se invierte en el proceso de curado y secado, es lógico atacar en primera medida este costo, optimizándolo.

En el Capítulo 1 se muestran los objetivos del proyecto. En el Capítulo 2, se habla del contexto de la curación de los hornos de tabaco Virginia, tanto en Colombia como en el mundo, describiendo adicionalmente las características, estructuras de costos, factores de posibles ineficiencias e inconvenientes en la transferencia tecnológica. Con base en los puntos descritos en el Capítulo 2, el Capítulo 3 concluye un árbol de posibilidades de mejora en el diseño de los hornos, con base en un minucioso diagnóstico de operación térmica que aclara el panorama de cuáles son los factores críticos de ineficiencia. Finalmente, en el Capítulo 4 se implementan las soluciones claves mediante prototipos constructivos que se diseñaron y ensayaron por espacio de ocho meses en el departamento del Huila, el mayor productor de tabaco en Colombia.

Se espera que los objetivos alcanzados en este proyecto de investigación no sólo sirvan como requisito académico y laboral, sino como una ventana abierta más hacia el conocimiento y el mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos, genere expectativas de empleo a esta tierra santandereana donde el tabaco es un símbolo de prosperidad.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES

- ✚ Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander en su aporte al conocimiento y labor social mediante el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos y la solución de las problemáticas empresariales.
- ✚ Mejorar la productividad de la hoja de tabaco desde el contexto actual de los hornos de tabaco, mediante la incursión tecnológica liderada por el departamento de Investigación y Desarrollo de la compañía PROTABACO S.A. como una de las mayores compañías productoras de tabaco del país.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✚ Contextualizar la situación actual del los hornos de tabaco en Colombia¹ y resaltar posibles causas de pérdida e ineficiencia energética.
- ✚ Realizar un balance y flujo energético de los hornos convencionales² de curación de tabaco Virginia, estimando su actual eficiencia térmica por

¹ Ver Capítulo 2

² Ver el apartado 3.2 BALANCE ENERGÉTICO DE UN HORNO DE TABACO VIRGINIA

medio del diagnóstico³ de los diferentes factores de operación y diseño térmico e identificando los factores clave⁴.

✚ Implementar prototipos de mejora a los hornos de tabaco⁵ según los puntos clave para mejorar la eficiencia energética, que abarca dos puntos:

- 1) Diseñar y construir un prototipo de recirculador de aire para los hornos convencionales "Flue-cured" de curación de tabaco Virginia, uniformizando las condiciones dentro del horno a modo de solución inmediata para el problema de la calidad del tabaco curado y aprovechando el calor residual disminuyendo la cantidad de combustible necesario en el proceso de curación.
- 2) Diseñar y construir un sistema de admisión de aire forzado para aire de combustión de carbón en hornos convencionales "Flue-cured", disminuyendo la cantidad de carbón inquemado en las cenizas.

✚ Redactar un informe técnico con cálculos, conclusiones, propuestas y rediseños que sirvan como guía para construcción y operación de los hornos convencionales actuales y futuros financiados por la compañía PROTABACO S.A.

³ Ver el apartado 3.1 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LOS HORNOS

⁴ Ver el apartado 3.3 ÁRBOL DE POSIBILIDADES DE MEJORA

⁵ Ver el apartado 4 IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES INMEDIATAS

2 CONTEXTO ACTUAL DE LOS HORNOS DE TABACO

El tabaco es uno de los productos agroindustriales que más demanda energía térmica para su producción y es uno de los cultivos más ampliamente difundidos por el mundo. Los sistemas de curación más usados usan hornos o “barns” para dar las propiedades adecuadas a la hoja. Más del 90% de la energía para la producción de tabaco se da en el proceso de curado⁶ y es por eso que el combustible utilizado para la generación de calor lo hace un costo tan sensible. Además, el cultivo de tabaco es uno de los sectores que más mano de obra demanda en campo (aproximadamente 19 jornales por hectárea). Para este capítulo se hará un recuento cualitativo de las características de los hornos en Colombia y finalmente se hace una comparación de los hornos de Colombia y de los de países como Brasil, Argentina y los Estados Unidos.

2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LOS HORNOS CONVENCIONALES PARA CURACIÓN DE TABACO VIRGINIA EN COLOMBIA

Los hornos Flue-cured son los hornos mayormente construidos en Colombia. Solamente la compañía PROTABACO S.A. tiene a su servicio cerca de 1000 hornos tipo Flue-cured extendidos en las zonas tabacaleras de Capitanejo (Santander), el norte y centro del Huila y parte de la Costa Atlántica. Éstas infraestructuras se empezaron a construir en Colombia alrededor de los años setenta y desde entonces no se ha hecho una renovación tecnológica apreciable, salvo en la construcción de

⁶ CHISTENBURY, Gerald. Mechanization and Curing. CLEMSON University.

hornos con elementos estructurales como vigas de amarre y lámina galvanizada para el techo.

Para contextualizar la situación de los hornos de tabaco Virginia en Colombia desde el punto de vista energético, se debe hacer inicialmente un recuento de las características de los hornos (diseño, modo de operación, procesos de generación y transferencia de calor, materiales, etc.); luego identificar causales de las pérdidas en toda la cadena del beneficio (pérdidas de material, de energía, pérdidas por procedimientos), estableciendo unas estructuras de costos en las que se identifican los problemas críticos a atacar y finalmente listar los obstáculos que se tienen en la implementación y diseño de nuevas tecnologías en el sector tabacalero.

2.1.1 Características del los hornos de tabaco

En este apartado se hace un recuento de los diferentes aspectos mecánicos, termodinámicos, sanitarios y ambientales que tienen los hornos convencionales en Colombia (combustión, transferencia de calor, aislamiento térmico y ventilación principalmente) y, de un modo cualitativo se postulan posibles causales de pérdidas. Estas pérdidas pueden ser de tipo físico (diseño del horno mismo, forma, tamaño, elementos) y características de tipo procedimental (la forma como se opera el horno). Para ello, en cada característica se describe además la forma como se realizan ciertos procedimientos importantes en la operación y mantenimiento de los hornos, los avances y fallas que hay, todo apuntando a que uno de los costos que más representa pérdidas en la producción de tabaco es el combustible (ver 2.1.3 Costos de beneficio del tabaco).

Un horno de tabaco Virginia debe reunir ciertas características para que la hoja pueda ser curada y que al mismo tiempo tenga las condiciones sanitarias y de

calidad para ser vendida a la compañía. Además, el diseño y la operación de los hornos debe ser tal que asegure un buen margen de rentabilidad al agricultor, una factibilidad ambiental y seguridad de sus operarios. Un horno ideal de tabaco Virginia debe tener las siguientes características:

- 1) Tamaño: Estar construido en un área pequeña, contener los elementos necesarios para el curado y secado del tabaco y ofrecer el rendimiento adecuado por hornada.
- 2) Generación de Calor: Tener una fuente energética eficiente para favorecer las condiciones de temperatura y permitiendo una óptima alimentación de combustible.
- 3) Transporte Térmico: Permitir un eficiente y uniforme transporte energético desde la unidad generadora de calor hasta el tabaco.
- 4) Tener buena hermeticidad.
- 5) Ventilación: Permitir una buena circulación de aire y extracción de humedad.
- 6) Ofrecer seguridad y comodidad de sus operarios, maximizando el cargue, horneo, descargue del horno, acceso al tabaco y reduciendo procedimientos que generen desperdicios.
- 7) Tener aislamiento para contener la temperatura y reducir pérdidas al ambiente.
- 8) Tener resistencia térmica y mecánica.
- 9) Permitir uniformidad de los parámetros dentro de la cámara.
- 10) Sistema de monitoreo y control sencillo y eficiente. Minimizar intervención y manipulación humana.
- 11) Reducir riesgos de incendio.

12) Estar construido de materiales que faciliten la construcción y montaje, bajando costos de operación, de inversión y requiriendo poco mantenimiento.

13) Ser factible Ambientalmente.

A continuación se nombran las diferentes características.

❖ *Tamaño y partes*

El horno debe tener una relación altura/base tal que, por un lado no debe ser tan grande que se produzcan gradientes de humedad y temperatura demasiado alto y, por otro lado, tan pequeño como para que el rendimiento de tabaco por hornada sea demasiado bajo. La capacidad promedio de un horno convencional es de 2,5 hectáreas de tabaco. La altura de un horno convencional para curar tabaco esta entre los 6 y 8 metros⁷ y un área base entre los 36 y 50 metros cuadrados, asegurando una buena ventilación y el ascenso del aire por diferencia de densidades.

La zona denominada *plénium* (ver Figura 3) es muy importante para provocar el ascenso del aire y servir de condensador térmico al momento de sostener y elevar temperatura. Este plénium tiene entre 1,8 y 2,3 metros desde el piso hasta la primera barredera. Las *barrederas* son largas vigas de madera donde se colocan los cujes. Normalmente no se coloca tabaco en la barredera más baja, dando así un volumen de plénium mayor; muchas veces se reserva esta zona para colocar cujes

⁷ Aunque pueden haber hornos de la mitad del tamaño para cultivos de 1 hectárea, el estándar de tamaño se considera entre 6 y 8 metros.

con tabaco sobremaduro que no necesita mucho tiempo de amarillamiento⁸ en una recolección dispareja. Las barrederas deben estar distanciadas a lo ancho unos 90 a 110 cm dependiendo el tamaño del cuje, y a lo alto unos 70 u 80 cm en función del tamaño de la hoja. La *hornilla* es donde se genera el calor para luego ser trasferido por los *tubos de intercambio de calor*. Desafortunadamente no existe un protocolo unívoco para la construcción de hornos, lo que hace que haya variedad en la operación como en las eficiencias de los hornos. Las *ventilaciones* son elementos muy importantes en el curado ya que ayudan a dar la circulación de aire necesario y evacuar la humedad.

Los hornos van acompañados de otras infraestructuras para dar paso a tareas como amarre, acondicionamiento y clasificación. Estas son la fosa, la sala y la zona de amarre. La *zona de amarre* es donde se tejen los cujes, colocando las hojas de tabaco en las varas; debe estar lo más cercana al horno para evitar largos desplazamientos de materia. La *fosa de acondicionamiento* es una infraestructura físicamente muy parecida al horno pero de altura menor, con más barrederas y en donde se le da al tabaco la humectación adecuada para poder ser manipulado y transportado. Aunque dentro del horno se da un proceso de pre-humectación para que el tabaco pueda ser transportado a la fosa⁹, en la fosa se le da la humedad final de venta. La *sala de clasificación* es un cuarto donde se colocan mesas de madera de ciertas medidas y lámparas fluorescentes (una de sodio y una de mercurio por mesa) para escoger el tabaco hoja por hoja acorde a tres criterios: color, daño y tamaño. De este modo se pueden hacer los bultos de las diferentes clases o

⁸ Para conocer más acerca de las etapas del curado y secado del tabaco, ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO

⁹ Lo recomendable es pre-humectar el tabaco en el horno cuando la temperatura descienda a unos 110°F

calidades y después se transportan a la compañía para la venta que se ha programado con anterioridad.

Figura 1 Partes principales de un horno convencional

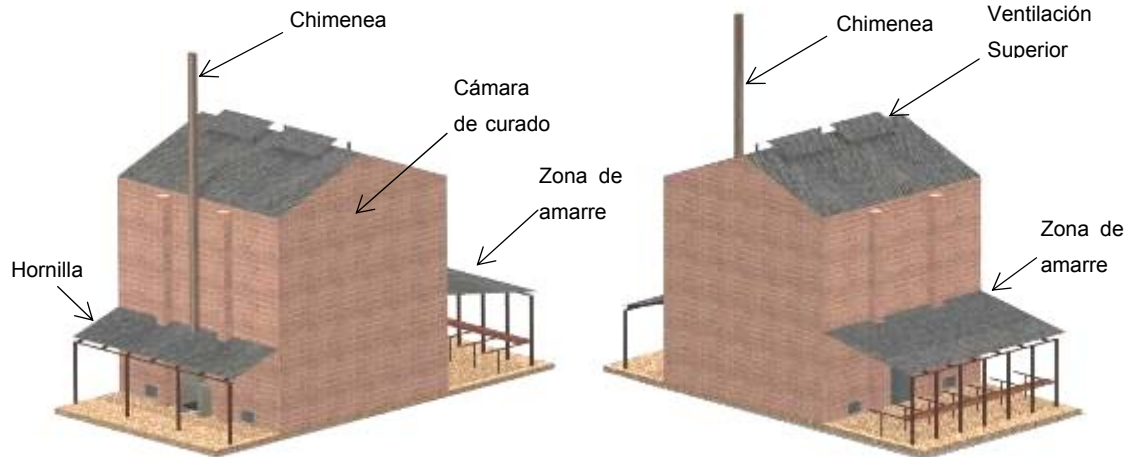


Figura 2 Vista en corte de un horno convencional y sus partes

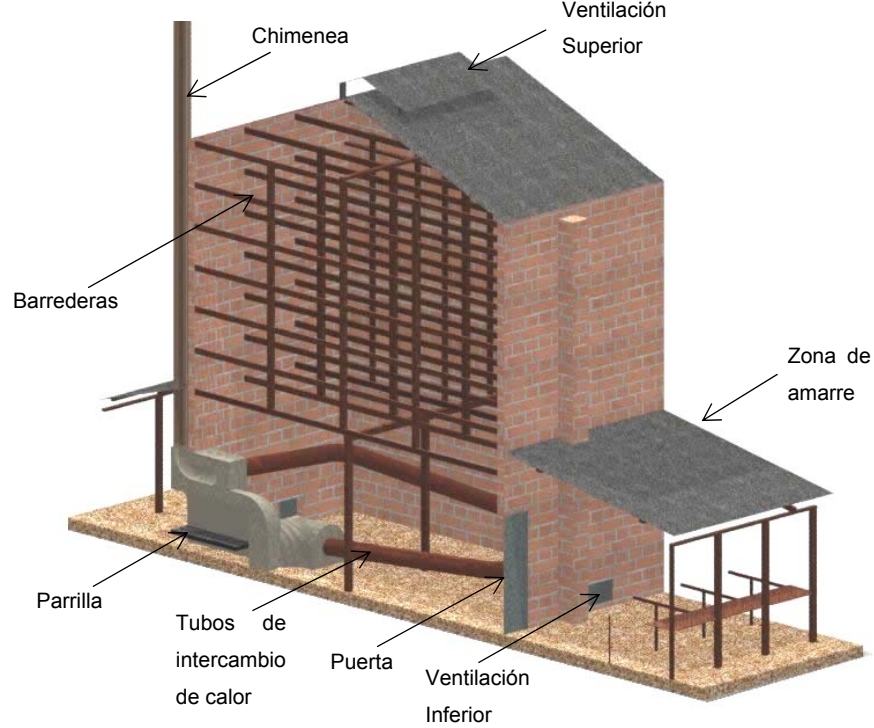
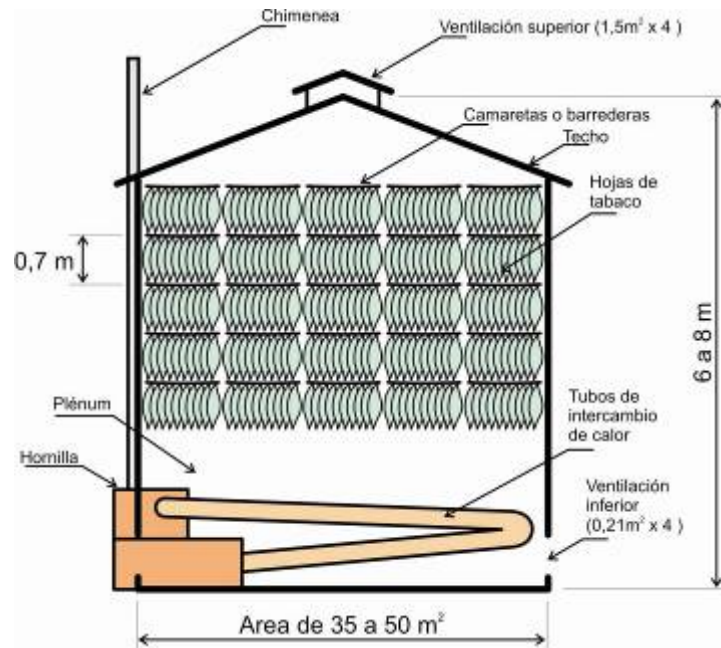


Figura 3 Esquema de un horno convencional para curado de tabaco Virginia



Medidas tomadas de planos de PROTABACO S.A.

❖ *Generación de calor*

El tabaco Virginia necesita una programación de temperaturas y humedades acorde a un estándar establecido para este proceso por las compañías tabacaleras en todo el mundo (ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Etapas). Para dar estas condiciones favorables de temperatura, en Colombia se usan combustibles fósiles como carbón, petróleo (o derivados) y muchas veces leña, rara vez se usa gas. Los combustibles sólidos son quemados en hornillas de parrilla. La eficiencia de la combustión de estos insumos es una de las características más importantes de los hornos de tabaco ya que desde éste se deriva una serie de costos muy importantes para el agricultor y un problema ambiental a solucionar (ver 2.1.3 Costos de beneficio del tabaco). Los datos comunes de consumo de carbón (el mayor combustible utilizado en esta aplicación) se listan en la Tabla 1. Para la generación de calor se usan por lo general

parrillas convencionales hechas de hierro fundido. También se usa un sistema manual de dosificación de combustible, con pala o a mano, generando inconvenientes en el sostenimiento de la temperatura.

Adicionalmente, la inducción de aire para el proceso de combustión no es controlada. Prácticamente el tiro de la chimenea y la congestión de la parrilla es la que da la cantidad de aire de combustión. La cantidad de aire de combustión debería estar regida por la rata másica de combustible con que se alimenta la hornilla acorde a un balance estequiométrico; es un gran causa de que se produzca combustión incompleta el no tener un elemento que controle el tiro (ver Tamaño y tiro de la chimenea).

Tabla 1 Consumo específico carbón/tabaco en función del piso foliar

Tipo de tabaco	Consumo específico	Tiempo de curado
Bajero	2	6 días
Mediamata	2.5	7 días
Superior	3	8 días

El hecho de consumir más tiempo y combustible, es porque las hojas bajas tienen menos cuerpo que las superiores, igual que la vena es más gruesa en hojas de últimas recolecciones y por ende es más difícil extraer la humedad. Los datos de la Tabla 1 varían ampliamente dependiendo de la calidad del carbón, las condiciones ambientales, el diseño del horno y la cultura de horneado, un factor humano que puede acarrear altos costos de consumo de combustible.

❖ *Transporte térmico*

Una vez de que se ha generado el calor en la zona de la hornilla, es necesario transportar esta energía al aire de proceso que está en contacto con el tabaco para secarlo. Por dentro de los tubos de intercambio de calor corren los gases de combustión y hacen transferencia hacia la cámara. El intercambiador de calor debe garantizar una uniforme distribución del aire caliente dentro del plénum y para ello, la inclinación de los tubos o cañones es importante, ya que de ella depende la rapidez con que los gases recorren la tubería. En los hornos de tabaco, normalmente estos tubos son de 24 a 30 centímetros de diámetro, hechos de acero Hot-Rolled soldada y de 1/16" de espesor. Algunos diseños colocan en la primera parte de la tubería (la que sale de la hornilla y la más caliente) tubería acero inoxidable.

Figura 4 Vista panorámica inferior de un horno de tabaco Virginia



Los hornos convencionales operan bajo el principio de convección natural. La tubería calienta el aire circundante dentro del plénum, ascendiendo por la diferencia de densidad entre éste y el aire ambiente. Se sabe que éste método de

transporte calórico es bastante ineficiente debido a los bajos coeficientes de convección que se pueden lograr¹⁰: raramente superan los 5 W/m²K.

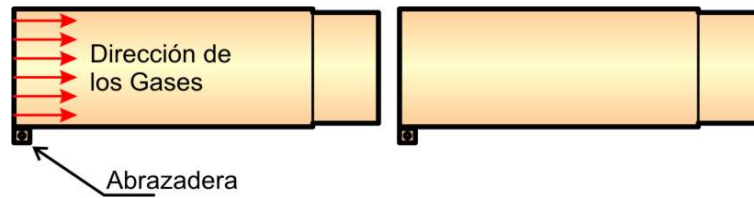
Otro inconveniente que se ve en los tubos de los hornos de tabaco es el pobre sellamiento. Los tubos de intercambio de calor están contruidos por tramos, y cada tramo debe estar sellado con el siguiente de modo que los gases de combustión no escapen y hagan contacto con el tabaco. Para solventar este inconveniente, los campesinos hacen un sellamiento superficial en dichos acoples con barro o cemento pero muchas veces esto no es recomendable ya que el barro puesto a altas temperaturas forma grietas por donde puede haber fugas de gases de combustión e introducirse a la cámara, condición indeseable en la operación del tabaco y su calidad final. A veces se acoplan los tubos uno detrás de otro teniendo en cuenta la dirección de los gases reduciendo la probabilidad de fugas. Algunos tubos tienen una abrazadera soldada al tubo para colocar un tornillo y dar ajuste (Figura 6).

Figura 5 Sellamiento del acolpe hornilla-tubo-chimenea con masa de arcilla



¹⁰ MILLS, Anthony. Transferencia de calor. Ed. única en español. Pág 305

Figura 6 Acople de los tubos del intercambiador de calor según la dirección de los gases



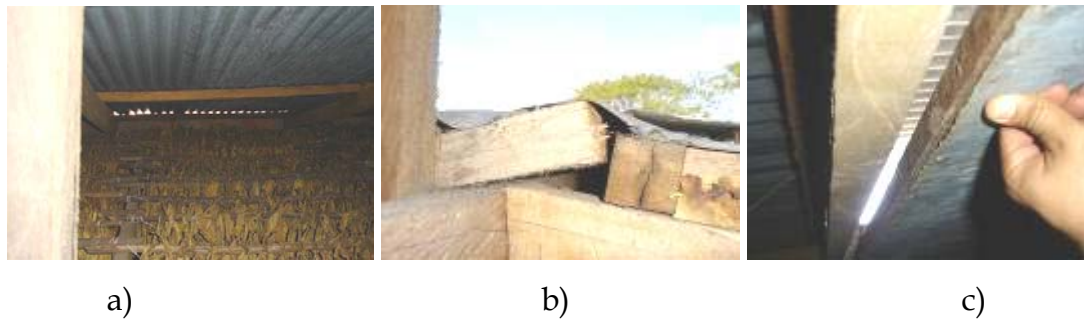
❖ *Hermeticidad*

Una buena hermeticidad disminuye la cantidad de calor desperdiciado por fugas al exterior y contiene la humedad necesaria en las primeras etapas de curado. Uno de los problemas de los hornos convencionales es su pobre hermeticidad. La unión entre la teja y la pared en la parte superior queda sin tapar, generando pérdidas de calor y humedad, así como la báscula y el marco de la ventilación superior. En todos los casos en la construcción de hornos se usan materiales convencionales como ladrillo, teja de cinc, cemento etc., lo cual hace que los hornos sean de cierto modo económicos en la inversión inicial pero no operacionalmente. Atendiendo este problema, se han implementado en algunos hornos ventilaciones de corredera en vez de ventilaciones basculantes para dar una mayor hermeticidad (Figura 7).

Figura 7 Ventilaciones inferiores: a) basculante; b) de corredera



Figura 8 Ventilaciones superiores y uniones estructurales del horno en la parte superior: a) unión teja-pared; b) unión camaretas-correa central; c) ventilación superior



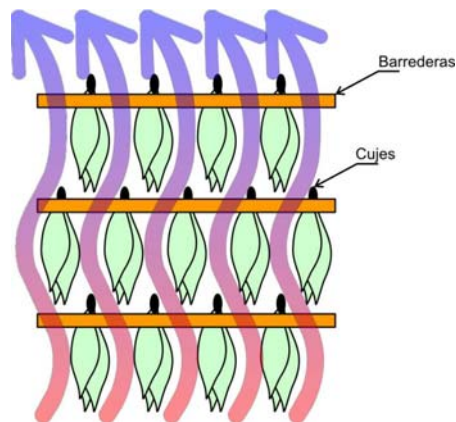
❖ *Ventilación y flujo de aire*

En los hornos de tabaco una deficiente ventilación puede acarrear problemas en las etapas de secado donde hay que evacuar humedad. Un curado muy prolongado con lenta extracción de humedad puede darle características no deseadas al tabaco como palidez, tabaco pasado y un consecuente aumento del consumo de combustible. La clave de la ventilación está en dos aspectos: el primero es la correcta orientación y posicionamiento de las ventilaciones (inferiores y superiores) en función de los vientos predominantes; la segunda está en el cargue. Ésta última condición es tal vez la más importante del proceso de curado. Un horno sobrecargado tiene poca ventilación y puede generar un gradiente de temperatura muy alto desde la primera a la última barredera; un horno cargado con pocas varas disminuye el rendimiento y dispara el consumo específico carbón/tabaco. Normalmente un horno de tabaco Virginia se carga con 800 varas de tabaco bajero y unas 1.000 varas de tabaco superior. El tabaco bajero se apelmaza debido a su poco cuerpo y puede dar síntomas de pudrición. Al momento de cargar es importante distribuir uniformemente las varas o cujes, dividiendo el total de varas

amarradas entre la cantidad de barrederas y cajones¹¹ disponibles en el horno. La forma más correcta de colocar los cujes uno sobre otro es de forma en zig-zag para garantizar que el aire pase lo más íntimamente posible sobre la hoja (Figura 9).

Las ventilaciones superiores son de 16 pies cuadrados (1,5 m²) de área cada una, con cuatro ventilaciones ubicadas simétricamente en el techo del horno, mientras que las ventilaciones inferiores tienen 0,2 m² de área de ventilación, colocando también cuatro ventilaciones en la parte inferior del plénum en la pared del horno.

Figura 9 Forma correcta de cargar los cujes o varas



El flujo de aire ascendente se crea en los hornos por el fenómeno de *convección natural*. El motor dinámico de flujo es la diferencia de densidades, lo que implica que hay una pobre circulación del aire en las primeras etapas y además porque las ventilaciones están cerradas.

¹¹ Las barrederas son divisiones a lo alto del horno, mientras que los cajones son divisiones a lo ancho y largo del horno. Las barrederas y cajones son equidistantes unas de otras.

❖ *Seguridad y peligros de salud*

Los hornos de tabaco tienen características muy similares a muchos hornos de secado de otros productos ya que maneja altas temperaturas que pueden causar riesgos de quemadura a quienes lo operan. Por un lado, la dosificación manual del combustible (carbón o leña) es una característica que atenta contra la integridad de los operarios u horneros teniendo en cuenta que en la hornilla se puede generar temperaturas de más de 850°C (ver Temperatura generada en la hornilla) y, por otro lado, el hecho de entrar a inspeccionar el tabaco y el psicrómetro (ver Control de los parámetros de curación) colocado en el *plénium* hace que el operario entre en una ambiente agresivo para su salud sabiendo la cantidad de dióxido de carbono presente por la respiración de la hoja.

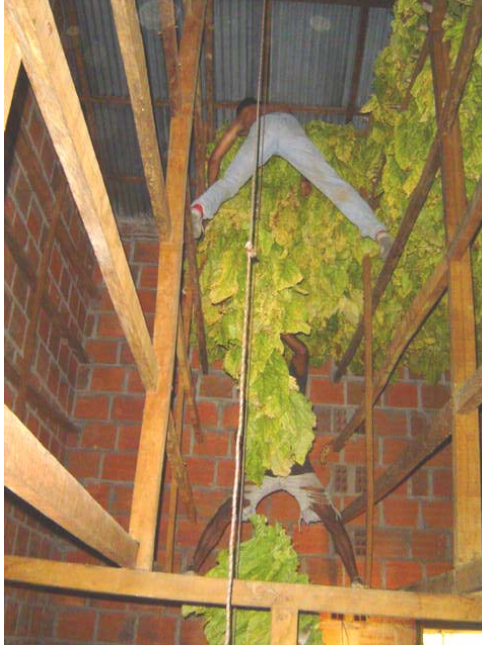
Figura 10 Atizado de la hornilla a alta temperatura



Otro inconveniente de seguridad en la operación de los hornos de tabaco está en el cargue. Por la altura de los hornos (4,5 a 5 metros en la última barredera) los capataces de amarre tienen que subir para colocar los cujes de una manera riesgosa

e incómoda. Igualmente, los procesos de cargue, descargue y desencuje son un poco lentos e incómodos y requieren muchos jornales.

Figura 11 Proceso de capataceo o subida de cujes al horno



❖ *Aislamiento térmico*

Las pérdidas al ambiente en cualquier tipo de horno es un criterio de diseño primordial. El material más utilizado para fabricar las paredes de los hornos es el ladrillo de arcilla cocida, algunos de ladrillo macizo y otros de ladrillo hueco tipo H12. La puerta, las ventilaciones y el techo usan lámina de cinc anclada a las camaretas o marcos de madera con puntillas. El factor climático afecta de manera contundente el consumo de combustible, como en las noches, en días lluviosos y con predominio de viento donde se dispara el consumo de combustible. El techo hecho de lámina de cinc ondulada puede traer un beneficio energético: pruebas hechas en el municipio de Fonseca (Guajira) con el proyecto de recirculación RAF

(ver 4.1.1 Proyecto RAF) dan resultados satisfactorios de operación en etapa de amarillamiento utilizando la radiación solar que hay sobre la teja sin necesidad de usar carbón en el día. El ladrillo convencional no es un material aislante por excelencia; sin embargo, para aplicaciones de este tipo, que a nivel industrial¹² se consideran de baja temperatura, puede ser una solución acertada.

Otra causal de pérdidas es el aislamiento de la hornilla. Aunque comparada con el total de área de la cámara, el área de la hornilla es muy pequeña pero está a una muy alta temperatura. Mediciones hechas por COLTABACO S.A. sugieren que la temperatura de la hornilla es superior a los 900°C. A ésta temperatura el efecto de la radiación es considerable y la transferencia de calor hacia el exterior aumenta ahora en forma exponencial.

❖ *Resistencia térmica y mecánica*

Uno de los problemas principales es la alta temperatura que se genera en la hornilla. El ciclaje térmico de encender y apagar el horno semana tras semana hace que ocurran grietas en las paredes de las hornillas; el cemento no es un material refractario por excelencia y su expansión térmica produce esfuerzos internos que superan la capacidad del material a esa temperatura, originándose sitios donde el los gases de combustión pueden escapar, hollar el tabaco y producir un descenso apreciable en la calidad de la hoja.

¹² Los fabricantes de materiales para aislamiento térmico trabajan desde 150°C, siendo la aplicación de tabaco máximo de 75°C en las paredes. Si se usara un material aislante se podía estar subutilizando, pero sería muy ventajoso para puntos calientes como la hornilla.

Figura 12 Grietas generadas por la dilatación térmica en la hornilla



❖ *Uniformidad de los parámetros de curación*

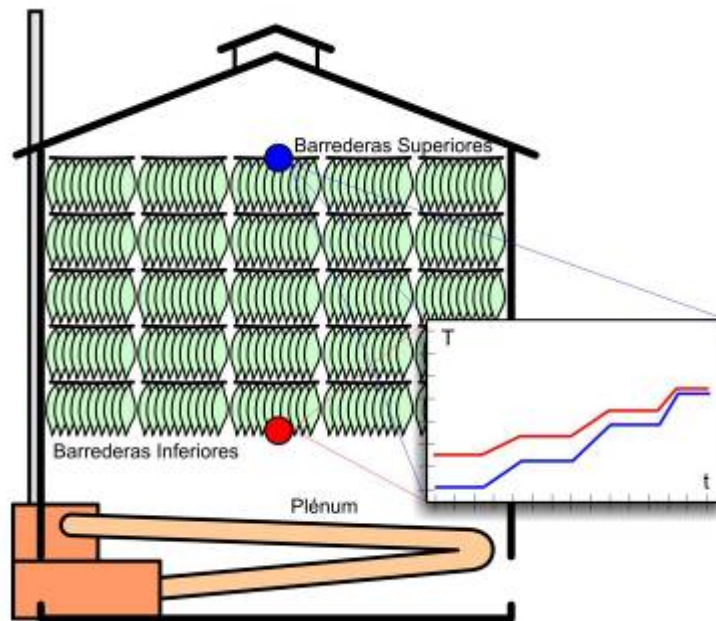
La cámara de curado debe garantizar que las condiciones termodinámicas del curado (temperatura y humedad) deben ser muy parecidas en toda la extensión del volumen del horno en la zona del tabaco, para así tener una calidad final uniforme del tabaco. Esta característica del horno puede generarse si el horno tiene un buen cargue y buena circulación del aire, así el intercambiador de calor no pudiera distribuir la temperatura eficientemente por sí solo¹³. Normalmente lo que sucede es que los tabacos de las barrederas más bajas se calientan más rápido y con más intensidad comparado con el tabaco que está en las barrederas superiores; estas últimas barrederas tienen una condición de menor temperatura y mayor humedad¹⁴, lo que implica que se prolongue la etapa de amarillamiento en esta

¹³ En teoría de intercambiadores de calor, el descenso acelerado de la temperatura a medida que los gases recorren la tubería es síntoma de una buena transferencia de calor, lo que indicaría un gradiente severo en los diferentes puntos del horno.

¹⁴ La transferencia de vapor de agua desde las hojas al aire y la transferencia de calor desde el aire a las hojas en el proceso de secado hace que el aire en la parte superior sea más húmedo y más frío.

zona, causando que se dé la calidad de tabacos “pasados” o calidad EK4¹⁵. A medida que se va finalizando el proceso de secado de lámina, la hoja va perdiendo cuerpo y el ascenso del aire tiene menor restricción mejorando la circulación; la hoja tiene menos volumen y por tanto la uniformidad en la cámara es mayor.

Figura 13 Comparativa de distribución de temperaturas medido en la dimensión vertical del horno



❖ *Control de los parámetros de curación*

Los parámetros de curación más importantes (temperatura y humedad, ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Etapas) son monitoreados en la mayor parte de los hornos por los psicrómetros de mecha, los cuales se instalan en un sitio estratégico del horno por debajo de la

¹⁵ El término “pasado” se refiere a que el horneado está pasado de maduración, es decir con mucho tiempo de amarillamiento.

primera barredera. Para llevar a cabo una correcta programación de la curación, se le da a cada agricultor una carta de proceso indicando las diferentes etapas, rangos de humedad y temperatura y las acciones a ejecutar en la operación del horno teniendo en cuenta la condición de secado del tabaco. PROTABACO S.A. ha incursionado en el campo de la tecnificación en este aspecto, comprando sensores termohigrómetros UMMI. Estos dispositivos tienen varias ventajas: primero, tener que entrar al horno y evitar las consecuencias para salud humana al estar expuestos al ambiente del horno y altas temperaturas¹⁶; segundo, se disminuyen las pérdidas de temperatura en el momento que se abre el horno para inspección; tercero, los sensores son bastante precisos y tienen la capacidad de guardar la información cronológicamente para posteriormente ser analizada, fáciles de usar y pueden usar corriente alterna o batería; cuarto, se puede sensar un mejor punto dentro de la cámara con condiciones “promedio”, ya que por lo general los sicrómetros se colocan en la parte baja de la cámara indicando una temperatura de punto caliente; quinto, no requieren mantenimiento o estar chequeando por agua en el bulbo húmedo.

Figura 14 Sicrómetro de mecha y su ubicación en el horno

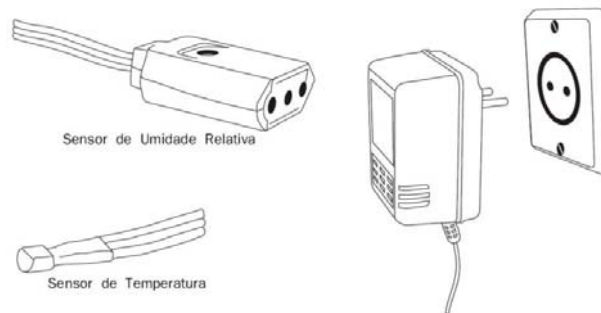


¹⁶ Mediciones hechas sugieren que las temperaturas pueden llegar hasta los 500°C en la superficie de los tubos.

Figura 15 Sensor termohigrómetro UMMI



Figura 16 Sensor de temperatura, humedad relativa y conexión eléctrica del UMMI



❖ *Reducción del riesgo de incendio*

En las últimas etapas, donde se manejan las más altas temperaturas del proceso de curado y la hoja está más seca, es donde está el mayor riesgo de incendio. La hoja seca tiene alta combustibilidad (cualidad deseable en el tabaco para fumar) y la pérdida de volumen por el propio secado hace que algunas hojas se desamarren por sí solas de los cujes o varas y caigan a la superficie caliente de los tubos. En un año, en promedio se incendian entre 5 y 8 hornos de tabaco en los dos programas de curación que duran aproximadamente cuatro meses. Para disminuir estos problemas de riesgo se colocan mallas sobre los tubos de intercambio de calor y así evitar que una hoja pueda caer sobre la zona más caliente de la tubería. Es necesario que los horneros revisen por hojas caídas sobre los tubos todo el tiempo.

Figura 17 Tubería al rojo en etapa de secado de lámina



Figura 18 Detalle de un horno incendiado



Figura 19 Mallas de protección colocadas sobre la zona caliente de los tubos de intercambio de calor



❖ *Materiales*

Los materiales de la construcción de hornos de tabaco son típicos materiales de construcción común: ladrillo macizo o hueco, cemento, madera de sección cuadrada, lámina galvanizada ondulada o lisa para techo y puerta respectivamente. La construcción de hornos nuevos se está haciendo en los últimos años con vigas de amarre (hormigón armado) y ladrillo hueco para reducir costos de transporte y peso. Estos materiales tienen ventajas como: disponibilidad en el mercado, economía reduciendo la inversión inicial y relativa facilidad de construcción lo cual no requiere personal especializado en la construcción del horno. Sin embargo, estos materiales pueden no ser recomendables para aplicaciones térmicas y pueden ocasionar pérdidas energéticas, una consecuente degradación del material mismo y precipitación de sustancias dañinas para la hoja como la cal del cemento.

❖ *Factibilidad Ambiental*

Las corporaciones regionales (la CAM y la CAS en los principales departamentos tabacaleros) han advertido que el uso de combustibles como carbón y leña en esta aplicación produce problemas principalmente de polución (PST o material particulado). Sin embargo, hay otros procedimientos y operaciones adicionales en los que las zonas tabacaleras influyen negativamente en el ecosistema:

- 1) El almacenamiento del carbón al aire libre sin colocar elementos de protección contra la lluvia hace que algunos compuestos del combustible se filtren en el suelo alterando la fertilidad del mismo y transmitiendo estas sustancias a las riveras fluviales cercanas. Adicionalmente, algunos

compuestos volátiles pueden inhalados por las mismas personas que operan los hornos causando problemas respiratorios.

- 2) La tala de árboles para suministro de leña es un factor que no se ha controlado en los predios tabacaleros.
- 3) Las cenizas igualmente se dejan al aire libre originando los mismos problemas de contaminación.
- 4) El arado de surcos y zanjas para riego hace que el suelo tenga una característica muy suelta en la superficie y compacta en el fondo, acelerando la erosión.

Figura 20 Batería de hornos de tabaco e impacto en la contaminación del aire

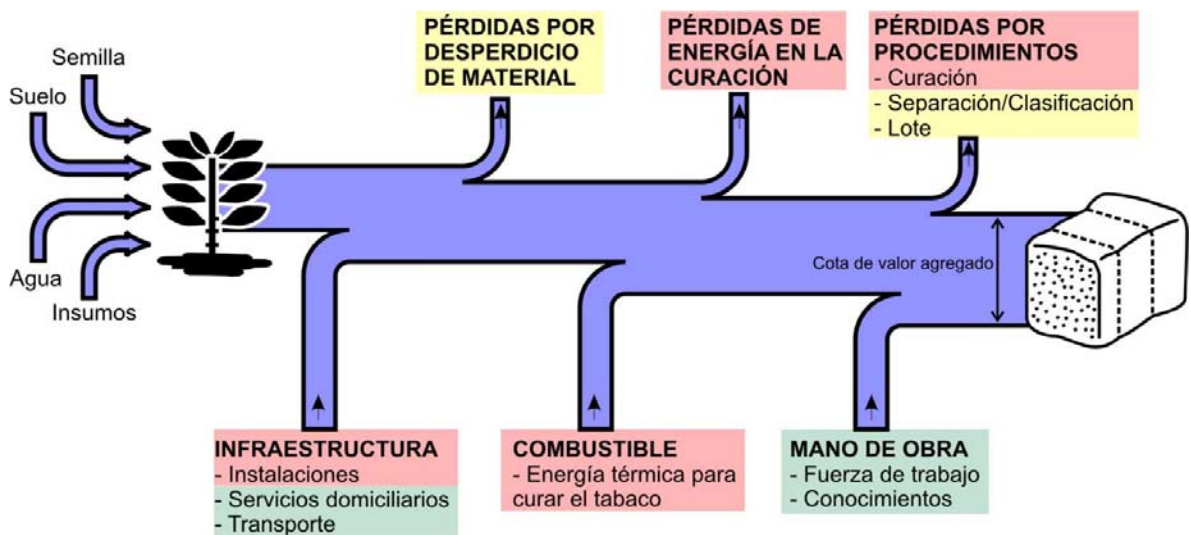


2.1.2 Pérdidas en el beneficio del tabaco

Las compañías tabacaleras son conscientes los costos más influyentes en el proceso de producción de tabaco en rama en Colombia es el *beneficio*. Cumplidas las etapas previas de desarrollo del cultivo, la calidad del tabaco empieza a definirse en la recolección de las hojas que acompañadas con una buena curación dará una

excelente calidad. El *beneficio* (ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Beneficio) comprende varias etapas cada una de las cuales debe ejecutarse correctamente para que la calidad alcanzada no se desmejore y los cultivadores obtengan la calidad deseada para una buena remuneración vía precio.

Figura 21 Gráfico de pérdidas y requerimientos en la cadena de valor agregado del beneficio de tabaco



Las pérdidas en el beneficio que disminuyen el margen de utilidad en la producción de tabaco son de diversa índole:

- ✚ Pérdidas de material y maltrato
- ✚ Pérdidas en energía en la curación
- ✚ Pérdidas por procedimientos

En la Figura 21 se muestra la franja de valor agregado del producto en términos de los diferentes factores que intervienen en el beneficio. Los ítems listados en la parte inferior de la franja azul son los requerimientos de la cadena de beneficio, los

cuales hay que optimizar, usando de cada uno de ellos una cantidad mínima y produciendo un alto valor agregado al tabaco. Los ítems de la parte superior de la franja azul corresponden a las pérdidas en la cadena del beneficio que se explicarán en los títulos a continuación. Los diferentes colores que aparecen en estos ítems son proyectos que se han adelantado y se están adelantando por diferentes organizaciones en pro de esta cadena. En rojo, se muestra el campo de acción de los proyectos de rediseño de hornos convencionales hechos por PROTABACO S.A.; en verde, las problemáticas a más largo plazo en infraestructuras de curación nuevas, también hechos por PROTABACO S.A., (ver 3.3.2 Soluciones a largo plazo) y en amarillo abarcan otros proyectos de métodos y tiempos hechos por PROTABACO S.A. y la Universidad Sucolombiana.

Como se puede ver, la problemática del sector tabaco es bastante amplia. Sin embargo, este proyecto solamente va a tener en cuenta lo concerniente a los hornos, su infraestructura y su operación.

❖ *Pérdidas de material y maltrato*

El transporte, la recolección, el amarre y la clasificación implican una manipulación manual o mecánica de la hoja de tabaco. El hecho de tener estas tres infraestructuras por separado (fosa, sala y horno) hace que haya pérdidas de material en el transporte de un lado al otro. Los hornos más avanzados curan y humidifican el tabaco en la misma cámara, eliminando la necesidad de construir otra cámara -la fosa- y reduciendo espacio.

Ciertas condiciones del tabaco como leñosidad antes del horneado y resequedad después del horneado hacen que dicha manipulación dañe la hoja y genere desperdicios. El transporte es un factor primordial en la pérdida de material que

muchas veces no se reintegra a la línea natural del proceso de beneficio. Algunos agricultores tienen la precaución de recoger dichos desperdicios para reintegrarlos al beneficio; otras veces se obtiene de estos desperdicios un material subproducto como la *miga*, la cual se vende a un precio muy bajo para hacer abonos orgánicos de calidad debido a la gran cantidad de proteínas que contiene el la hoja de tabaco.

❖ *Pérdidas de energía en la curación*

Más del 90% de la energía necesaria para la producción de tabaco lo requiere el proceso de curación¹⁷. Esto implica que los costos de producción de tabaco son muy sensibles en el horneo. El precio internacional del tabaco va en un asintótico descenso, lo que obliga a los países productores como Colombia a rediseñar los esquemas e infraestructuras de secado, abaratando los costos y aumentando las utilidades. Se han hecho muy pocos estudios de los factores de pérdidas energéticas de los hornos convencionales en Colombia; las cantidades de combustible usadas para secar tabaco son razonablemente altas comparadas con los consumos energéticos de hornos de otros países (ver 2.2 HORNOS DE TABACO EN EL MUNDO).

En la operación particular de los hornos se tienen sospechas que, estudiadas, serán comprobadas en este proyecto (ver 3.1 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LOS HORNOS) y se muestran en la Tabla 2.

¹⁷ CURING TOBACCO. James L. Jones, Scientist-In-Charge and T. David Reed, Extension Agronomist, Tobacco

Tabla 2 Factores de pérdidas energéticas, causas y sus implicaciones

Factor	Causas posibles	Implicaciones Observadas
Ineficiencia en la combustión.	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla ineficiente de aire y combustible. • Mezcla pobre de aire de combustión (tiro). • Mal diseño de las parrillas y hornilla (tamaño, separación de los rieles de la parrilla). • Deficiente suministro del carbón, tanto en la frecuencia como en la forma en que se atiza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas cantidades de carbón inquemado en las cenizas. • Altas concentraciones de particulado sólido en los gases de chimenea. • Gruesas películas de hollín en las paredes de los tubos al final del programa.
Pobre transferencia de calor de los gases de combustión hacia el tabaco.	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coeficiente global de transferencia de calor desde los gases hasta el tabaco (convección dentro y fuera de los tubos, conducción de pared en los tubos). • Materiales inadecuados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta temperatura de los gases de chimenea. • Gran diferencia entre la temperatura de los gases y la temperatura requerida para secar el tabaco.
Mal aislamiento térmico.	<ul style="list-style-type: none"> • Inadecuados materiales de construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de pared externa alta.
Poca hermeticidad	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de procedimientos o materiales para sellado hermético del horno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fugas y corrientes de aire en los acoples de los elementos estructurales del horno.
Condiciones de curado (temperatura-humedad) dispersas ¹⁸	<ul style="list-style-type: none"> • Cargue no uniforme. • Horno sobrecargado 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparición de tabacos manchados, pasados y podridos. • Exceso de tiempo para curado-secado.

¹⁸ Aunque por sí solo la des-uniformidad no es causal directa de pérdidas energéticas, dispara el consumo de combustible al tener que esperar que los puntos fríos en la cámara de tabaco logren las características adecuadas para concluir el secado. Además, la calidad del tabaco disminuye considerablemente al no haber condiciones uniformes.

❖ *Pérdidas por procedimientos*

Hay una causa de pérdidas muy importante en el beneficio del tabaco y son los procedimientos. No basta con tener un buen cultivo en el lote si no se sabe hornear, con tener los mejores insumos si no se saben aplicar, con tener un buen hornero si el horno está indebidamente cargado, con tener un muy buen tabaco curado si no se humecta adecuadamente ni se sabe clasificar. Pérdidas de este tipo son las más comunes: labores de campo fuera de tiempo (falta de riego antes del horneo, fertilizantes en la edad recomendada, recolección y cargue en un tiempo mayor a un día, etc.), recolección de hojas con diferente grado de maduración, recolección de hojas de diferente piso foliar¹⁹, mala programación del horneo, bultos con clases mezcladas o con humedad fuera de rango (ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Beneficio, Humectación), mala administración de los servicios, instrumentos, herramientas y demás activos. Todo esto tiene un factor común y la forma y el tiempo como de hacen las actividades que, de un modo u otro, aplacan la calidad del tabaco y disparan los costos directos.

2.1.3 Costos de beneficio del tabaco

La estructura de los costos de producción de tabaco en Colombia varía mucho según el tipo de tabaco que se esté cultivando, las particularidades propias del proceso de cultivo y la calidad y disponibilidad de los factores de producción²⁰. De igual forma, se puede afirmar que la cuenta que mayor peso tiene sobre los costos

¹⁹ Las hojas bajas, mediamata y superiores se curan siempre aparte.

²⁰ www.agronet.gov.co

totales es la correspondiente a la mano de obra y que los pagos por maquinaria y equipo son los que menos aportan a los costos totales, esto debido a que la producción de tabaco es muy intensiva en trabajo y emplea muy poca maquinaria. Los costos por hectárea cosechada son más altos para el tabaco rubio tipo Virginia, en comparación con los otros tipos de tabaco rubio (Burley y VICA) y tabaco negro, debido a que su cultivo es más intensivo en el uso de insumos, maquinaria, al utilizar un horno para el curado de la hoja, y transporte.

Los fundíos tabacaleros se pueden clasificar en dos grandes tipos, dependiendo de la estructura de costos que organiza el administrador de la finca. El primero está el agricultor que siembra grandes extensiones en tabaco y contrata los jornales, por lo general tiene tierra propia. El segundo tipo es el agricultor de poca extensión de cultivo, su estructura de costos es más bien familiar y su economía es de subsistencia; generalmente la tierra donde siembra el tabaco es tomado por arriendo. Desde este punto de vista, las estructuras de costos para estas dos clases de economía pueden ser estudiadas por separado. Los rendimientos también son diferentes, ya que los administradores de latifundios extensos tienen más probabilidades de solventarse económicamente para comprar insumos y otros servicios.

La estructura de costos para los agricultores de grandes extensiones de cultivo se caracteriza por estar en función del rendimiento del cultivo, es decir, los jornales y otros procedimientos se pagan en *función de kilos de tabaco seco* o en función de las varas amarradas o desamarradas. Esta es una buena estrategia para asegurar de algún modo la utilidad, ya que si el cultivo no da el rendimiento ideal en peso, los demás costos también disminuyen así como la utilidad en la venta que también se hace en función de kilos de tabaco seco. Los pequeños agricultores no tienen esta estructura, ya que su economía es de subsistencia o familiar y prefieren pagar

jornales en *función del tiempo de trabajo o actividades*, asegurando una entrada de dinero semana tras semana. Sin embargo, hay un costo muy importante que no se tiene en cuenta en estas microeconomías y es el arriendo del lote y a veces de los hornos. Aunque aparentemente contratar jornales en función del tiempo de trabajo es más rentable que contratar en función del kilaje, los pequeños agricultores pagan este rubro adicional que disminuye considerablemente las utilidades para sus familias, pero al mismo tiempo aseguran el tener trabajo por el momento aún sin ellos poseer tierras propias.

Estas dos estructuras de costos en el beneficio del tabaco se resumen en la Figura 24, de modo general. El costeo implementado es el costo total, incluyendo los costos directos e indirectos, los variables y fijos excepto el arriendo del lote para tener una base de comparación. Los costos también varían en función de los pisos foliares, ya que los tabaco bajeros o de primeras recolecciones son más sencillos en cuerpo y tienen menos peso, caso contrario a los tabacos superiores o coronas que necesitan más energía en el secado y multiplica los costos que están en función kilo. Los costos están resumidos de manera estimada, ya que algunos agricultores pagan más, otros menos, dependiendo mucho de la situación geográfica.

Tabla 3 Resumen de los parámetros de conversión a unidad kilo de tabaco

Unidad	Bajero	Mediamata	Superior
Cujes/horno	900	1000	1100
Kilos tabaco verde/horno	3000	5000	6500
Kilos tabaco seco/horno	500	750	1000
Kilos tabaco seco/cuje	0.6	0.8	0.9
Carbón/tabaco seco	2	2.5	3
m ³ agua/kilo tabaco*	7.50E-05	7.50E-05	7.50E-05
kW humectador	0.37	0.37	0.37
Horas humectación/horno	6	7	8
kW Lámparas fluorescentes	0.1	0.1	0.1
Horas clasificación/horno	24	32	40
Días horneo	6	7	8

* Cantidad de agua para humectar. El acondicionamiento del tabaco requiere subir la humedad de la hoja de un 9% desde que sale del horno hasta un 16,5% en la fosa

Tabla 4 Estructura de costos número uno para los grandes agricultores en función kilo seco

			Bajero	Mediamata	Superior
COSTO 1	Recolección	168000 \$/horno (12 jornales)	\$ 336.00	\$ 224.00	\$ 168.00
COSTO 2	Transporte lote-hornos	50000 \$/horno	\$ 100.00	\$ 66.67	\$ 50.00
COSTO 3	Amarre	75 \$/cuje	\$ 135.00	\$ 100.00	\$ 82.50
COSTO 4	Capataceo: subir cujes al horno	30 \$/cuje	\$ 54.00	\$ 40.00	\$ 33.00
COSTO 5	Horneo	150 \$/kilo tabaco	\$ 150.00	\$ 150.00	\$ 150.00
COSTO 6	Carbón	150 \$/kilo carbón	\$ 300.00	\$ 375.00	\$ 450.00
COSTO 7	Capataceo: bajar cujes y llevar a la fosa	23 \$/cuje	\$ 41.40	\$ 30.67	\$ 25.30
COSTO 8	Capataceo: desencuje, humectación	78 \$/cuje	\$ 140.40	\$ 104.00	\$ 85.80
COSTO 9	Energía eléctrica para humidificadores y lámparas	310 \$/kW-h	\$ 0.01	\$ 0.01	\$ 0.01
COSTO 10	Agua para humidificación	300 \$/m ³	\$ 0.02	\$ 0.02	\$ 0.02
COSTO 11	Clasificación y empaque	155 \$/kilo tabaco	\$ 155.00	\$ 155.00	\$ 155.00
Costo total beneficio por kilo de tabaco			\$ 1411.83	\$ 1245.36	\$ 1199.63

Tabla 5 Estructura de costos número dos para los pequeños agricultores en función kilo seco

				Bajero	Mediamata	Superior
COSTO 1	Recolección	168000	\$/horno (12 jornales)	\$ 336.00	\$ 224.00	\$ 168.00
COSTO 2	Transporte lote-hornos	50000	\$/horno	\$ 100.00	\$ 66.67	\$ 50.00
COSTO 3	Amarre	75	\$/cuje	\$ 135.00	\$ 100.00	\$ 82.50
COSTO 4	Capataceo: subir, bajar cujes, desencujar, humectar	130000	\$/horno (3 jornales)	\$ 260.00	\$ 173.33	\$ 130.00
COSTO 5	Horneo	110000	\$/horno (1 jornal)	\$ 220.00	\$ 146.67	\$ 110.00
COSTO 6	Carbón	150	\$/kilo carbón	\$ 300.00	\$ 375.00	\$ 450.00
COSTO 7	Energía eléctrica para humidificadores y lámparas	310	\$/kW-h	\$ 0.01	\$ 0.01	\$ 0.01
COSTO 8	Agua para humidificación	300	\$/m ³	\$ 0.02	\$ 0.02	\$ 0.02
COSTO 9	Clasificación y empaque	72500	\$/horno	\$ 145.00	\$ 96.67	\$ 72.50
Costo total beneficio por kilo de tabaco				\$ 1 496.03	\$ 1 182.36	\$ 1 063.03

Se evidencia claramente que los principales costos tienen que ver con los jornales y el combustible (carbón); éste último costo crece con el piso foliar ya que la hoja y la vena es más gruesa en pisos alteros y el proceso por lo general es más demorado que las hojas sencillas. En el beneficio del tabaco, intentar bajar los costos de jornales de una manera abrupta puede acarrear un problema social, ya que el tabaco es uno de los sectores agrícolas con mayor demanda de mano de obra en campo y eso por eso que la implementación de nuevas tecnologías como los hornos Bulk-cured debe hacerse de una forma lenta y a la par con un proceso de concientización a los agricultores y jornales del tabaco.

Figura 22 Estructura de costos número uno para grandes agricultores

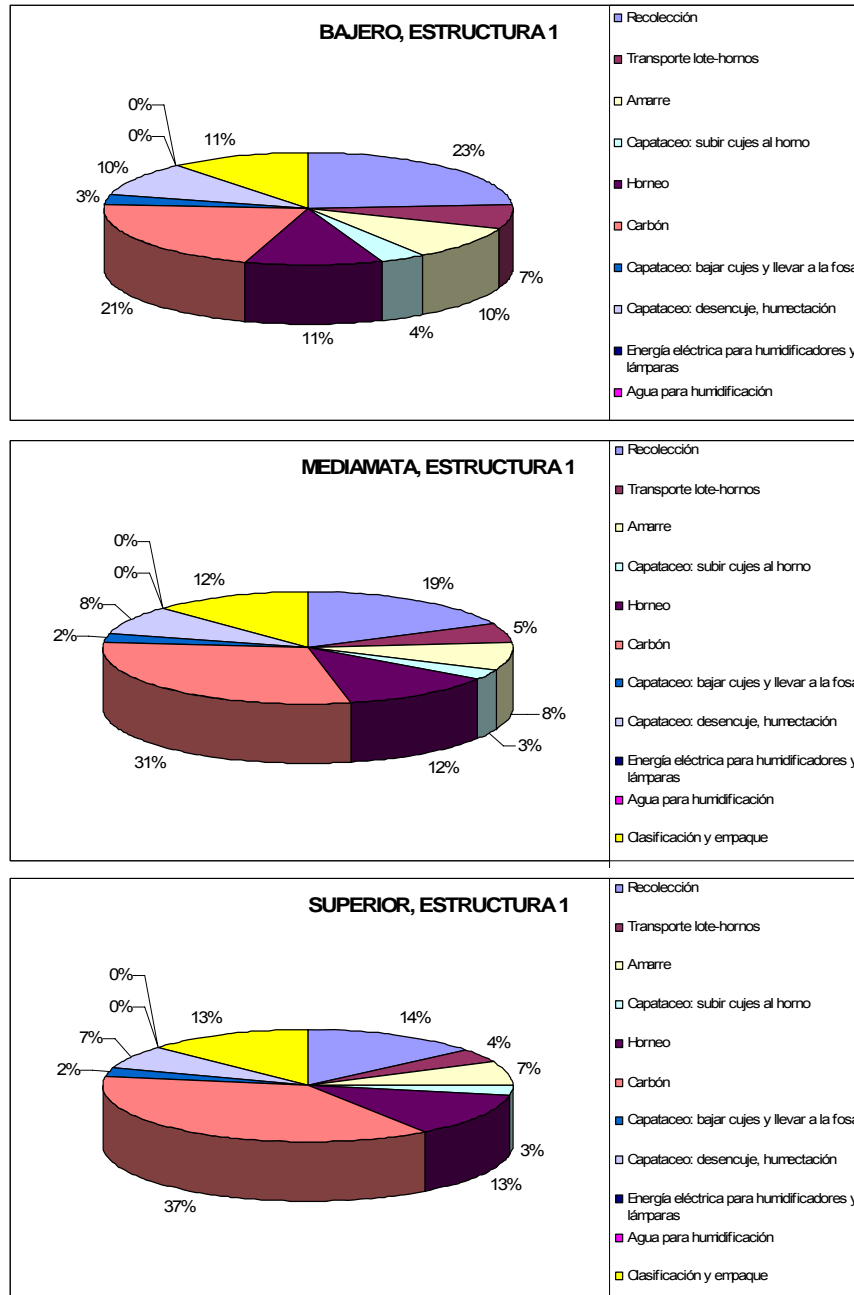


Figura 23 Estructura de costos número dos para pequeños agricultores

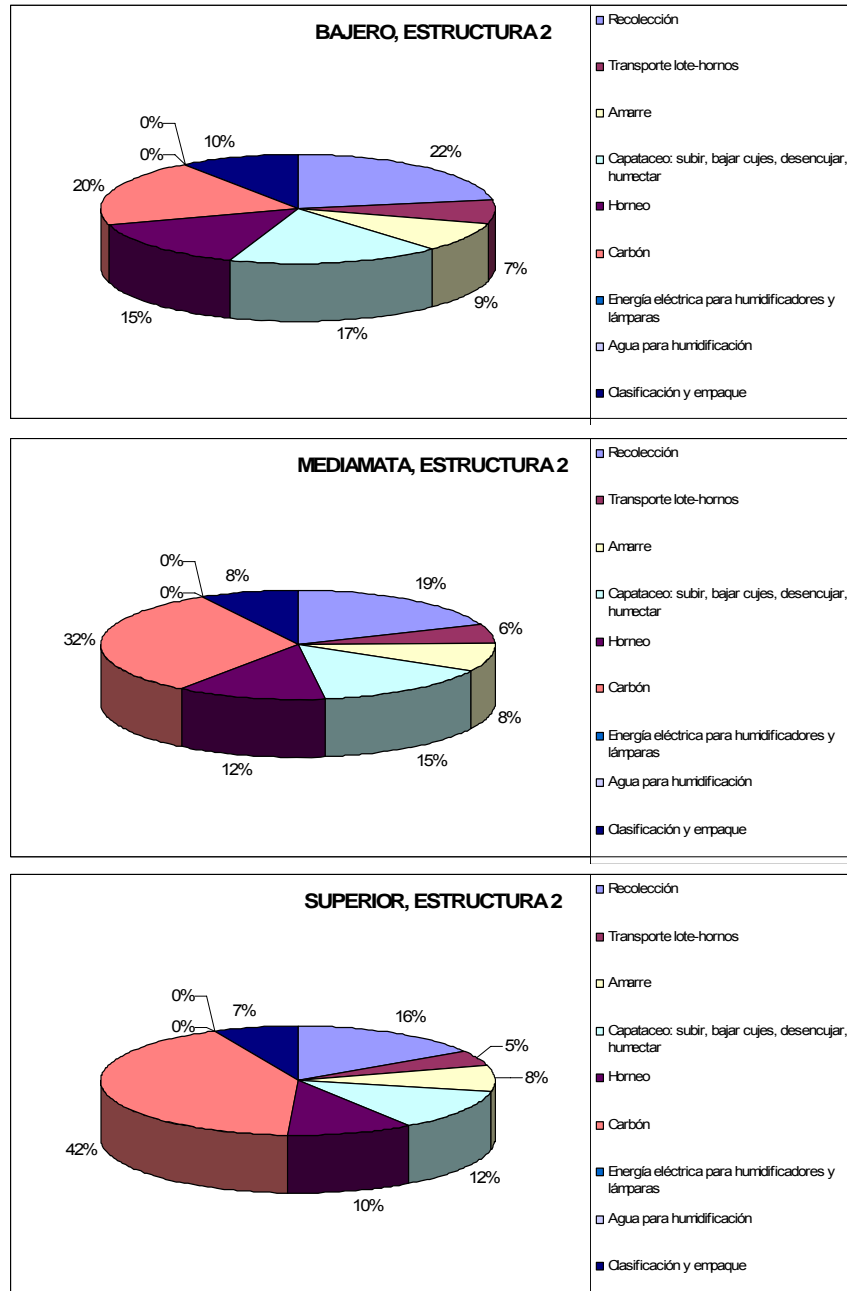
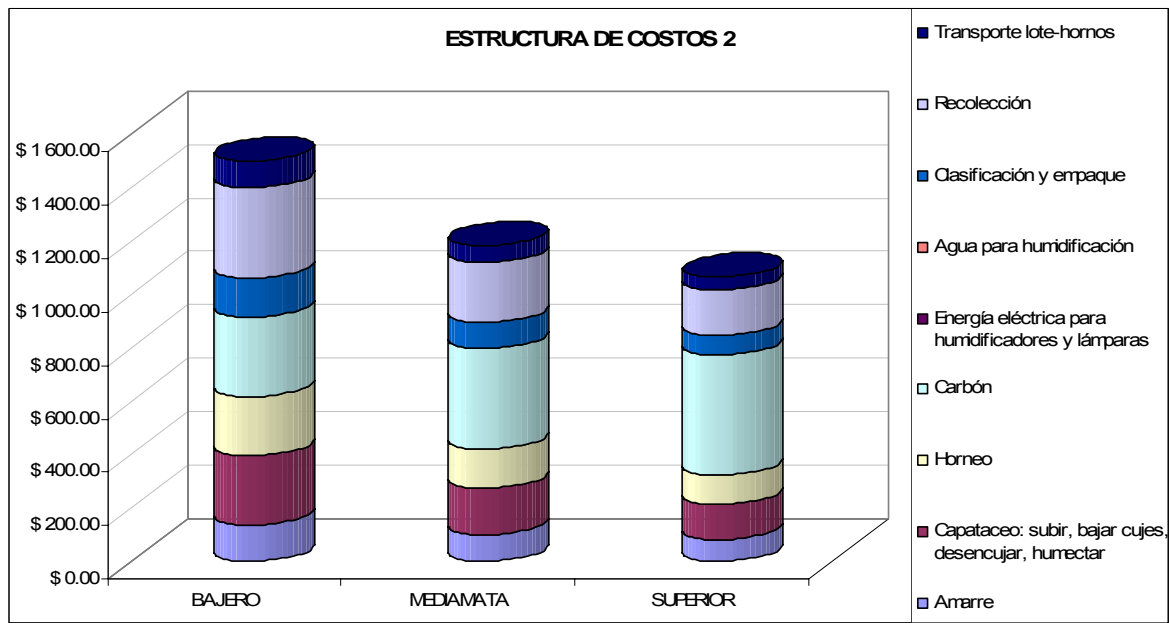
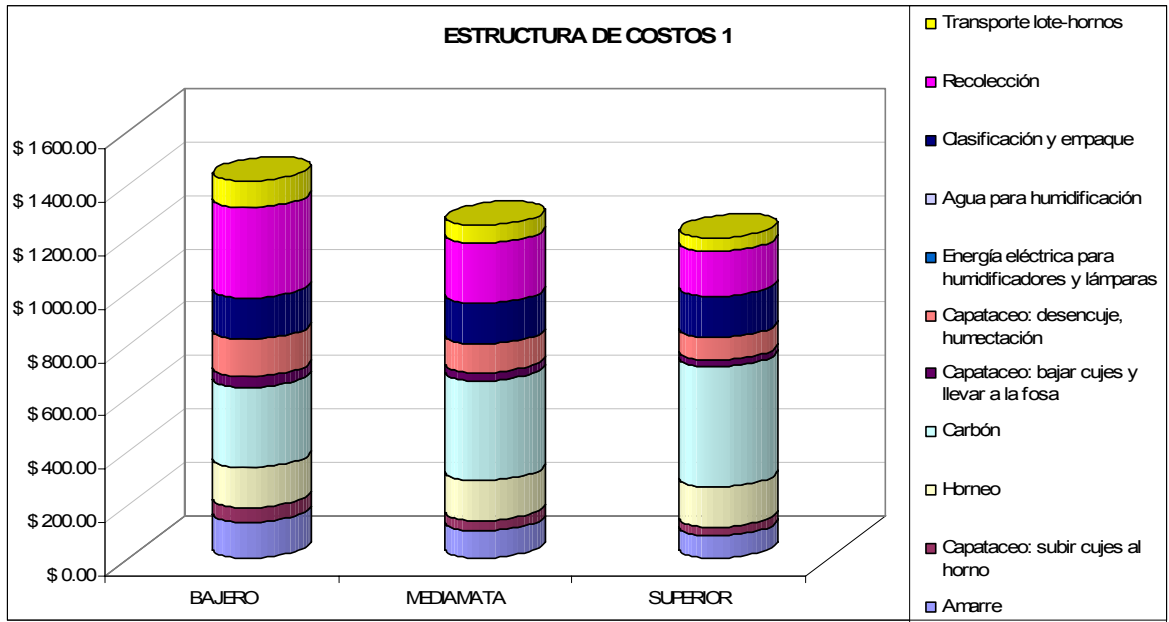


Figura 24 Resumen y comparación de la estructura de costos en el beneficio del tabaco



2.1.4 Inconvenientes en la transferencia tecnológica

La voluntad incondicional que ofrecen las compañías tabacaleras en mejorar la estructura de costos a los agricultores se ve aplacada por dos problemas principalmente: el primero, la problemática energética en los predios tabacaleros (se habla de tanto del carbón como de la energía eléctrica) y en segundo lugar, tan vez la situación más complicada de resolver es la rigidez cultural de los campesinos, a esto sumado que las oportunidades de desarrollo rural en fuentes como las alcaldías municipales y la entidad privada son desviadas a otros sectores ya que muchas veces son escépticas a invertir en el campo y que ven este sector de un modo arcaico y de poca productividad.

❖ Problemática energética

En el apartado anterior se concluye que los mayores costos en el beneficio del tabaco corresponden a los del combustible y los de mano de obra en el campo (recolección, horneado, capataces etc.). El problema energético se puede analizar desde dos flancos: el uso del combustible para secar el tabaco y la disposición de energía eléctrica.

El combustible necesario para generar la temperatura y secar el tabaco, actualmente es el carbón mineral tipo bituminoso (ver Calidad del carbón y análisis de las cenizas) proveniente desde Boyacá y Cundinamarca; con el diseño actual de las hornillas, la combustión de carbón (y muchas veces leña) quizás no es la mejor característica de los hornos de tabaco y por ende es un costo bastante alto; quemar otros combustibles como gas natural es más eficiente con aparatos más sencillos y poco costosos, pero la cantidad necesaria de gas y la lejanía de los

predios tabacaleros desde los centros de abastecimiento de este combustible son altos. El uso del carbón como combustible para los hornos puede ser una solución acertada si se tiene en cuenta que Colombia es el país con mayores reservas de carbón en América Latina, es el sexto exportador de carbón del mundo, con una participación de 6,3% y abastece la demanda interna. El carbón es fácil de transportar y comprar, no necesita tanques o infraestructuras especiales de almacenamiento, el riesgo de explosión es mínimo, no tiene refinación y es económico. La Tabla 6 muestra la proyección del precio interno del carbón según varios escenarios de mercadeo internacional; se observa que el precio del carbón es estable. Así que indudablemente el carbón sigue y seguirá siendo el combustible más utilizado para la aplicación en el secado y curación de tabaco.

A pesar de que el precio de carbón es bajo en boca de mina, el precio ponderado de venta de carbón a los agricultores tabacaleros es mucho más alto (de 150 mil a 200 mil pesos por tonelada) lo que indica que no se están dando facilidades y descuentos de consumo al pedir el carbón de una manera aislada (cada agricultor pide la cantidad de carbón que necesita en función de las hectáreas sembradas y muy pocas veces se hacen alianzas entre los campesinos). Comprar el carbón en grandes cantidades economiza el precio por kilo. Los hornos de secado de tabaco están alejadas de las riveras municipales y el acceso es muy difícil al no poseer vías pavimentadas donde puedan acceder grandes camiones. Generalmente lo que se hace es que el agricultor o los técnicos de la compañía llevan este suministro a los hornos en camiones más bien pequeños. El precio de un kilo de carbón está entre los 150 y 200 pesos, y teniendo en cuenta el poder calorífico del carbón se concluye que cada kilojulio representado en carbón está alrededor los 0.00562 pesos, una energía muy barata comparada con por ejemplo la energía eléctrica, cuyo kilovatio-hora está en 310 pesos en la zona rural, o sea unos 0.0861 pesos por kilojulio eléctrico o el ACPM, que está en 4700 pesos por galón, con un contenido calórico de 139000 Btu por galón, o sea 0.0320 pesos por kilojulio diesel. Esto para

comprobar el por qué los hornos extranjeros importados en las décadas de los 70 y 80 fueron abandonados, usando electricidad y ACPM.

Tabla 6 Tendencia del precio interno del carbón 2004-2005 para el carbón utilizado en el Huila.

AÑO	Boyacá- Cundinamarca					
	Dolares* /Ton			Pesos* / Ton		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
2004	29,91	29,91	29,91	71.475	71.475	71.475
2005	28,59	17,49	12,32	68.329	41.792	29.442
2006	28,03	17,03	12,32	66.985	40.695	29.442
2007	27,25	16,39	12,32	65.111	39.167	29.442
2008	27,16	16,32	12,32	64.895	38.991	29.442
2009	27,02	16,20	12,32	64.565	38.722	29.442
2010	25,62	15,06	12,32	61.229	36.001	29.442
2011	24,23	13,93	12,32	57.895	33.282	29.442
2012	23,50	13,33	12,32	56.152	31.860	29.442
2013	23,02	12,95	12,32	55.020	30.938	29.442
2014	22,91	12,85	12,32	54.739	30.708	29.442
2015	22,87	12,82	12,32	54.645	30.632	29.442
2016	22,72	12,70	12,32	54.293	30.345	29.442
2017	22,62	12,61	12,32	54.047	30.144	29.442
2018	22,70	12,68	12,32	54.240	30.301	29.442
2019	22,74	12,72	12,32	54.347	30.388	29.442
2020	22,58	12,59	12,32	53.965	30.077	29.442
2021	21,31	12,32	12,32	50.916	29.442	29.442
2022	20,82	12,32	12,32	49.752	29.442	29.442
2023	20,86	12,32	12,32	49.860	29.442	29.442
2024	20,93	12,32	12,32	50.011	29.442	29.442
2025	20,91	12,32	12,32	49.980	29.442	29.442

Fuente: UPME

Figura 25 Principales yacimientos de carbón en explotación en Colombia

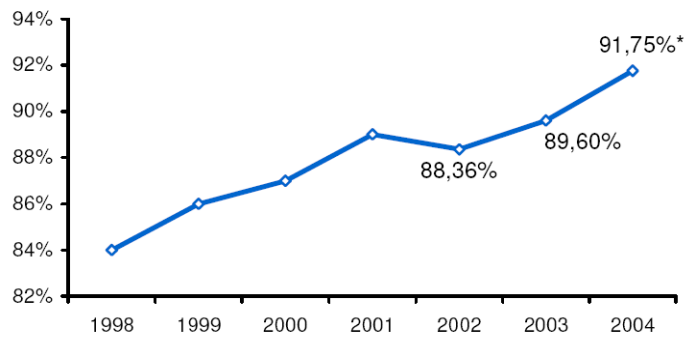


Fuente: UPME

El segundo flanco en los inconvenientes energéticos tiene que ver con los requerimientos de energía eléctrica en las fincas para implementar tecnologías

nuevas. Los predios cafeteros llevan años de adelanto comparado con los del tabaco, ya que las políticas de electrificación rural para estas zonas eran de vital importancia para la economía regional y del país. Por ello en Colombia era casi imposible pretender colocar sistemas con ventilación forzada en los hornos de tabaco como en los modelos de curación de otros países como Brasil, Argentina o los Estados Unidos; en las fincas tabacaleras la energía eléctrica era escasa y por ende el único medio era transferir el calor desde los gases al tabaco utilizando el fenómeno de la *convección natural* (ver Transporte térmico).

Figura 26 Cobertura de energía eléctrica nacional en las zonas interconectadas



Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética

Los resultados preliminares según la UPME muestran que, a diciembre de 2004, la cobertura total de servicio de energía eléctrica era de 91,75%; es decir, 8,57 millones de familias tenían acceso a este servicio. Estos estudios tienen en cuenta 4,65 habitantes por familia y una proyección de 43,43 millones de habitantes en el Sistema Interconectado Nacional. La disponibilidad de energía eléctrica es ahora mejor que hace diez años.

❖ *Inconvenientes culturales*

Aunque los rendimientos en la producción primaria de tabaco presentan una tendencia creciente por encima del promedio mundial, son inferiores a los presentados por Estados Unidos. Esto obedece a diferentes factores, entre otros, a la baja absorción de tecnologías por parte de algunos agricultores, al cultivo de algunas variedades en tierras no aptas, la deficiencia en agua para riego²¹, la baja utilización de la capacidad de siembra de ciertas parcelas, la poca utilización de insumos en algunos cultivos y la resistencia a modificar prácticas de cultivo susceptibles de cambios hacia la eficiencia²². Es difícil cambiar la mentalidad de un campesino que tiene años de experiencia y desde entonces ha trabajado de una forma ineficiente pero que le ha funcionado y le ha dado ingresos estables, sin tener en cuenta que el problema de la competitividad reside en la migración hacia las tendencias actuales eficientes. La falta de educación incrementa esta barrera y son pocos los que se interesan en ensayar nuevas tendencias y nuevas tecnologías. Los altos costos, las cargas económicas y laborales a los campesinos cada vez es más presionante y puede causar escepticismo en el tema de la transferencia tecnológica.

2.2 HORNOS DE TABACO EN EL MUNDO

En el contexto internacional se han hecho grandes avances en los sistemas Bulk-curing ya que se ha demostrado que económicamente son más factibles, consumen

²¹ Pese a que el tabaco es un cultivo que demanda poco agua y se adapta a terrenos pobres (ventaja atractiva para los parceleros), muchas zonas tabacaleras se encuentran en una desventaja topográfica por la necesidad de riego, lo que limita la calidad del tabaco.

²² Cadena del Tabaco. Agrocadenas 2004

mucho menos combustible²³ y la mano de obra requerida se reduce drásticamente; la tendencia actual en el tema de la curación de tabaco es la implementación de hornos y tecnologías de tipo Bulk-curing. El sistema Bulk-curing difiere en gran parte con el sistema Flue-cured en el sentido que en este último sistema el tratamiento que se le hace al tabaco es prácticamente hoja por hoja, mientras que en el sistema Bulk-curing, el proceso de curado y sus anexos (amarre, desencuje, clasificación) se hace a granel. Esto trae ventajas de todo tipo, comenzando con un mayor rendimiento de los hornos Bulk-curing (kilos de tabaco por metro cúbico, kilos de combustible por kilo de tabaco, jornales por kilo de tabaco, kilos de tabaco por hora de proceso). También vienen equipados con sistemas semiautomáticos de control del proceso, equipo electrónico y alarmas, los cuales hacen que el proceso de curado sea más independiente de las condiciones humanas. Aún así, a pesar de los grandes beneficios de los hornos Bulk-curing, el proceso de conversión es también lento desde hornos Flue-curing debido a las altas inversiones y el problema el empleo. Existen industrias especializadas en fabricar hornos a granel²⁴ y accesorios para adicionar a los hornos convencionales como en la Figura 27 y Figura 28: quemadores, unidades de quemado con ventiladores, sistemas de control de ventilaciones, termostatos etc. El uso de hornos de tipo Bulk-curing en Colombia no es ajeno: se han importado hornos de este tipo pero no fueron aceptados por los agricultores porque 1) no se adecuaban al contexto energético nacional (usaban aceite Diesel o electricidad, lo que disparaba los costos de operación) y 2) la amortización de las infraestructuras de curación era muy lenta y costosa.

Los hornos convencionales, que aún se usan en los países ejemplares como los Estados Unidos y Brasil, son de características muy similares a los de Colombia

²³ El consumo se mide en kilos de combustible por kilo de tabaco seco

²⁴ Ver ejemplos como Bulktobac, Ventobacco, Losse-lief

pero varían en detalles como el tamaño y posición de la hornilla, número de tubos del intercambiador de calor y materiales de construcción. Otras características fueron comúnmente copiadas como la forma en U de la tubería de calor que está inscrita en el piso del horno y la posición de las ventilaciones.

Figura 27 Quemadores de gas tipo Bulk-curing para conversión de hornos convencionales

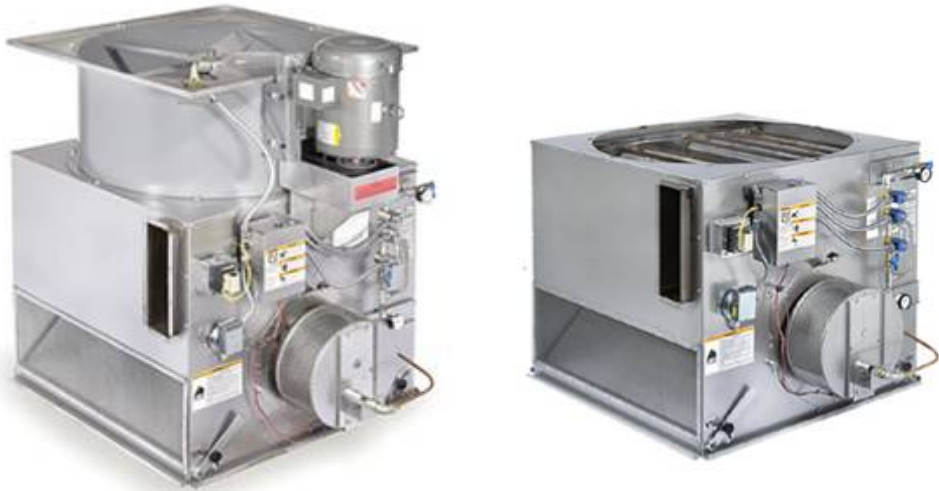


Figura 28 Sistemas de control y termostatos para conversión de hornos convencionales

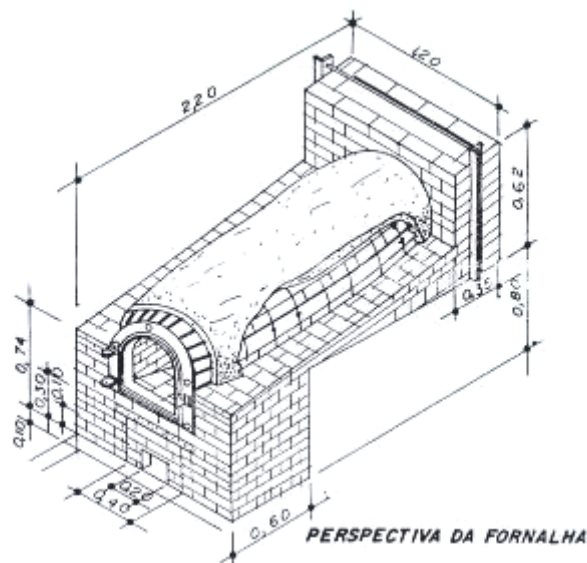


Figura 29 Tubos de intercambio de un horno convencional brasileiro



En las figuras siguientes se citan varias fotos y planos de hornos y hornillas de tipo convencional o Bulk-curing de varios países. La conversión aproximada en capacidad de tabaco entre un horno convencional a uno bulk-curing es de 6 metros de largo del horno bulk-curing por cada 3 hectáreas de un horno convencional.

Figura 30 Plano (metros) de una hornilla a leña de un horno convencional brasileiro para 750 varas



Fuente: Meridional de Tabacos LTDA.

Figura 31 Foto de la hornilla convencional de Brasil



Fuente: Meridional de Tabacos LTDA.

Figura 32 Horno hornilla para un horno de 12 metros tipo Bulk-curing a leña en Argentina



Fuente: PROTABACO S.A.

Figura 33 Hornilla convencional de Colombia. Horno de capacidad 2,5 hectáreas



Las hornillas brasileras están por debajo del nivel del suelo y son más pequeñas comparadas con las de Colombia con el objetivo de minimizar las pérdidas al ambiente. Además la compuerta en estas últimas es muy rústica, aumentando las pérdidas.

En cuanto a los combustibles, en Brasil se maneja una política de reforestación muy estricta para las zonas tabacaleras, y es por eso que se usa leña; Argentina tiene el gas muy barato y usa mayoritariamente este combustible. En los Estados Unidos el mayor combustible para curación de tabaco es el Fuel-oil y en Colombia mayoritariamente carbón térmico, el cual es el combustible en mayor abundancia, más fácil de conseguir, de transportar, almacenar y es el combustible más económico actualmente.

3 PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO EN EL DISEÑO DE HORNOS CONVENCIONALES

Este capítulo abarca la primera parte cuantitativa del proyecto de investigación. Detectados de modo cualitativo las causales de pérdidas energéticas vistas en el apartado 2.1.1 Características del los hornos de tabaco, se inicia un diagnóstico calculando cantidades en pérdidas desde el punto de vista energético.

El proceso de rediseño abarca un reto adicional comparado con el diseño lineal o “desde cero”, ya que implica medir el estado actual de la infraestructura, en este caso, el estado energético. Para fijar un norte en la proposición de tecnologías en mejora y rediseño de los hornos, es necesario diagnosticar el estado energético de los mismos, donde se estudia cada proceso de interacción calórica del horno; seguido a esto, concluir el flujo de energía o balance energético que indicará los porcentajes de pérdida o ganancia en cada uno de estos procesos, y, según los factores críticos más susceptibles de mejora, se propone un abanico de posibilidades concluyendo en la implementación de prototipos clave para solucionar el problema de ineficiencia energética, tanto a corto como a largo plazo.

3.1 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LOS HORNOS

Para poder calcular las diferentes pérdidas de energía y el flujo energético en la operación de los hornos de tabaco, es necesario:

- 1) Listar los procesos y factores susceptibles de diagnóstico y que, de un modo ineficiente disparan el consumo de combustible y deterioran la calidad del tabaco, así como establecer las variables del monitoreo tales como temperaturas, humedades y los puntos del horno donde se van a medir. Las variables implicadas y los factores susceptibles de diagnóstico se tabulan en la Tabla 7.
- 2) Estudiar e implementar los instrumentos de medición (tipo, calibración, rangos de medición) en los puntos estratégicos para la toma de datos.
- 3) Diseñar formatos y plasmar ordenadamente las variables en el monitoreo de toma de datos.
- 4) Analizar los factores y variables mediante cálculos que concluyan en un balance energético.

3.1.1 Factores y variables de diagnóstico

Para medir la cantidad de calor implicada en cada uno de los anteriores procesos, se debe medir diferentes variables como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Variables a medir en el diagnóstico de los hornos de tabaco

Factor a diagnosticar	Variables a medir y lugar de medición
Combustión y cultura de horneo ²⁵	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de la hornilla y/o temperatura de los gases de combustión en el primer tramo de tubería. • Dimensiones de la hornilla. • Consumo de carbón por hora. • Cultura: tiempo entre atizadas, almacenamiento del carbón,

²⁵ La cultura de horneo es ajeno al diseño particular de los hornos. Sin embargo, afecta enormemente el consumo de combustible en la fuente de generación de calor, es decir, en la hornilla.

	<p>tamaño del carbón en la alimentación de la hornilla.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calidad del combustible. Análisis próximo del carbón. • Emisiones de CO, CO₂ y O₂. Análisis ORSAT. • Cantidad de carbón inquemado en las cenizas.
Transferencia de calor por los tubos	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura superficial en la tubería de intercambio de calor en diferentes puntos.
Aislamiento Térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (interna y externa) en las paredes del horno. • Espesores de pared. • Condiciones ambientales (temperatura-humedad).
Hermeticidad y Flujo de aire	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de las ventilaciones. • Etapa de curado.
Uniformidad del los parámetros de curación	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones termo-higrométricas en diferentes puntos en el volumen de la cámara. • Temperatura del tabaco.
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de material particulado, SO_x y NO_x. Análisis ORSAT.

3.1.2 Instrumentos de medición en el diagnóstico de los hornos

En los proyectos de investigación se recomienda hacer una síntesis de los aparatos con los que fueron tomados los datos de las tablas de diagnóstico para poder reproducir con una mayor fidelidad una posterior toma de datos y llegar a resultados coherentes. Para las tomas de datos se espera en lo posible que los instrumentos sea económicos y/o que sean de la compañía. En la Tabla 8 se muestran las variables a medir para diagnosticar los factores. En el ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN se muestran las especificaciones técnicas y la descripción de cada equipo e instrumento. Algunos instrumentos especializados se contrataron (Tabla 9).

Tabla 8 Variables e instrumentos de medición utilizados en la toma de datos

Variable a medir	Instrumento(s) utilizado(s)	Rango de medición
Temperatura de los gases de combustión	Termocupla tipo J	0° C – 700°C
Consumo de carbón por hora	Balanza análoga y reloj de pulso	Balanza de 0 a 10 kg.
Tiempo entre atizadas	Reloj	Reloj de pulso
Tamaño del carbón	Flexómetro Análogo. Calibrador	0m – 5m. 0cm - 10 cm
Temperatura superficial de la tubería	Pirómetro infrarrojo digital	0°C – 300°C
Temperatura superficial de las paredes	Pirómetro infrarrojo digital	0°C – 300°C
Espesores de pared	Calibrador	0cm – 10 cm
Apertura de las ventilaciones	Flexómetro Análogo	0m – 5m
Temperatura de la cámara	Sensor termohigrómetro UMMI	0°C – 250°C
Humedad de la cámara	Sensor termohigrómetro UMMI	0% - 100%
Temperatura del tabaco	Pirómetro infrarrojo digital	0°C – 300°C
Dimensiones del horno	Flexómetro Análogo	0m – 5m

Tabla 9 Variables e instrumentos especializados para diagnóstico de los hornos de tabaco

Variable a medir	Instrumento y compañía que lo utilizó
Cantidad de carbón inquemado en las cenizas	Mufla. Ingeominas
Emisiones y análisis de gases de combustión	Analizador ORSAT. INAMCO S.A.
Calidad del combustible carbón	Bomba de calor. Ingeominas

3.1.3 Formatos de medición y tomas de datos

Dos de los tres monitoreos a hornos de curación Flue-cured fueron hechos por la compañía PROTABACO S.A. en el año de 2004 y 2006 y un monitoreo hecho por la Universidad Surcolombiana en convenio de cooperación técnica con la Gobernación del Huila. Estos monitoreos se consideran como una muestra representativa de los hornos debido a su gran diversidad de diseño y diversidad geográfica.

El primer muestreo de datos para un diagnóstico lo hizo el Ing. Nelson Hernández en el municipio de Fonseca (Guajira) con la compañía PROTABACO S.A. en el año 2004, en donde se tomaron datos de temperaturas y humedades de diferentes puntos del horno, tal como lo muestra la Tabla 10. La segunda toma de datos se hizo en el municipio de Yaguará (Huila) en Junio de 2006, haciendo el monitoreo del horno con el formato de la Tabla 11. Los dos monitoreos hacen parte de proyectos de mejora a los hornos de tabaco en los que se compara la operación “normal” (hornos testigo con tiro natural) con la operación “mejorada” (hornos con recirculación, tiro forzado) que se dio lugar en marco de la implementación de los prototipos de recirculación RAF en Fonseca 2004 y RHT en Yaguará 2006 (ver 4.1 SISTEMA RECIRCULADOR RHT).

Los puntos donde se hicieron las mediciones en el más reciente diagnóstico a los hornos de tabaco en Yaguará (Huila, Junio y Julio de 2006), se muestran en la Figura 34 y la Figura 35.

Figura 34 Esquema isométrico de los puntos de medición de las fronteras y los sensores UMMI en pruebas de Yaguará

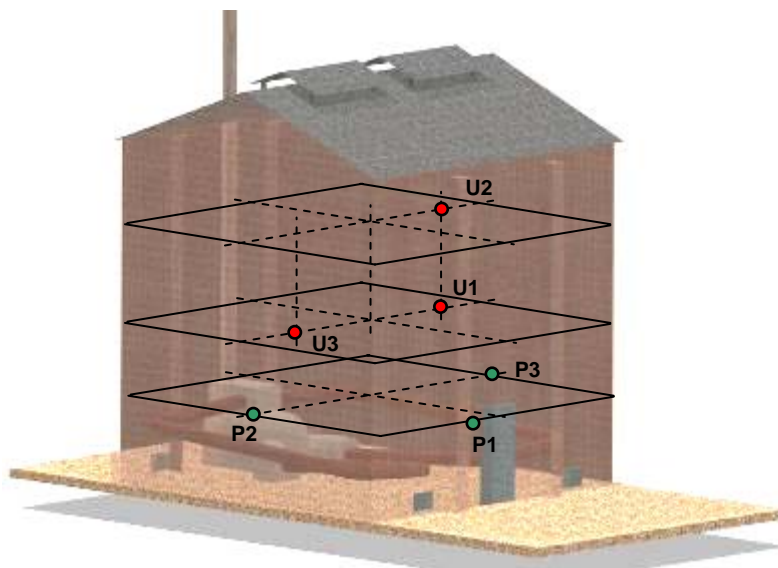


Figura 35 Esquema de planta de los puntos de medición sobre los tubos y paredes en pruebas de Yaguará

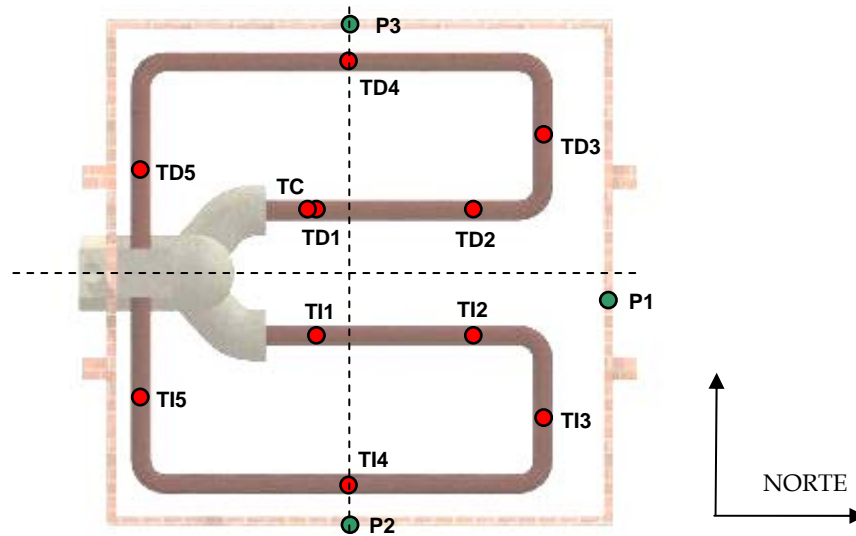


Tabla 10 Formato toma de datos proyecto en Fonseca (Guajira) 2004

Fecha		Etapa	Proceso(Hrs)	Ambiente	Temperatura	
Hora					Humedad	
Clima	Seco	Normal	Lluvioso	Viento	Moderado	
					Fuerte	

CONDICIONES INTERNAS EN LA CAMARA DE SECADO

Ubicación	Centro	C. INTER	F. INF	F. INTER	F. SUP	T. INF	T. INTER	T. SUP	PROM
Temp °F									
Humedad									

TEMPERATURA EN LOS TUBOS DE INTERCAMBIO DE CALOR

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	PROM
Derecho											
Izquierdo											

TEMPERATURAS EN LAS FRONTERAS DE LA CAMARA DE SECADO

Ubicación	Frontal	Puerta	Derecha	Izquierda	Fondo	Piso	Techo	PROM
Interna								
Externa								

OTROS							
Ubicación	Tabaco	Ventilaciones	Inferiores		Chimenea	Interna	
Temp °F			Superior			Externa	
Observaciones:							

Tabla 11 Formato toma de datos proyecto en Yaguará (Huila) 2006

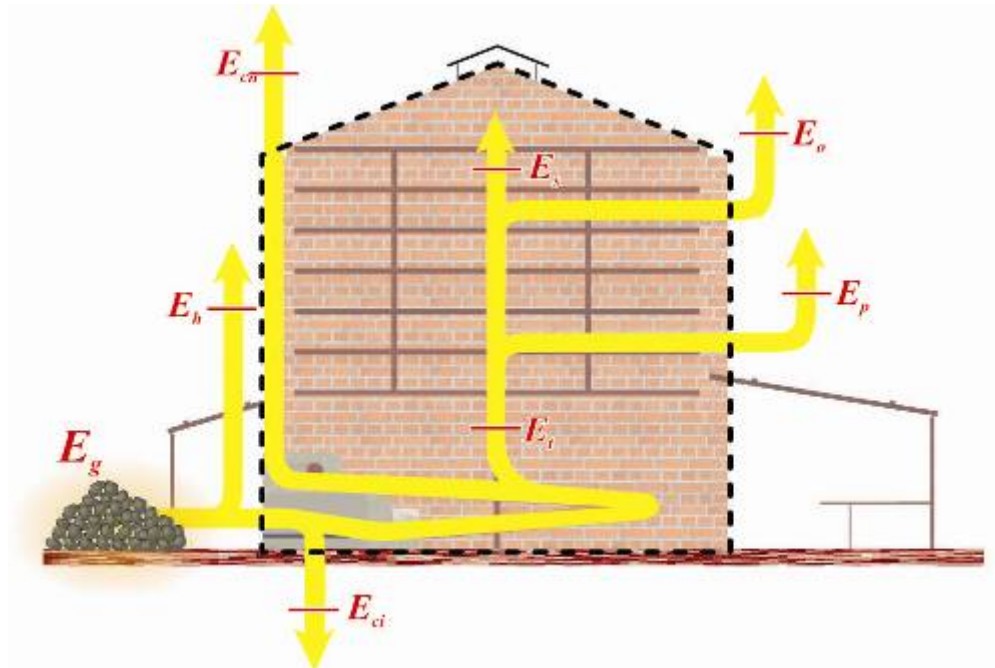
DATOS	FECHA		
	HORA		
	HORNO	TESTIGO	PRUEBA
	ETAPA		
CONDICIONES DE CURADO. UMMI	SITIO	TEMP.	HUMEDAD
	U1, DER.ABAJ.		
	U2, DER.ARR.		
	U3, IZQ.ABAJ		
TEMPERATURA TUBOS. PIROMETRO	SITIO	DERECHO	IZQUIERDO
	TC		-----NA-----
	TD1, TI1		
	TD2, TI2		
	TD3, TI3		
	TD4, TI4		
TEMPERATURA DE PAREDES Y DEL TABACO. PIROMETRO	SITIO	INTERNA, T_{pi}	EXTERNA, T_{po}
	FRONTAL, P1		
	LATERAL, P2		
	HORNO SGTE, P3		
TABACO, TT			
AMBIENTE	TEMPERATURA, T_{amb}		
	HUMEDAD		
	VIENTO	SEVERIDAD	
		DIRECCION	
	SOL Y LLUVIA		

OPERACIÓN DEL HORNO	VENTILES	SUPERIORES	
		INFERIORES	
	RECIRCULADOR	VENTILACION	
		FLAPS	

3.1.4 Análisis de los factores y las variables

Es muy importante a la altura de este tema conocer el flujo de energía que hay en los hornos. En la Figura 36, la Ecuación 1 y la Ecuación 2 se resume esta distribución que se explica a continuación.

Figura 36 Flujo de energía en un horno de tabaco



- 1) E_g : Energía disponible o potencial contenida en el carbón con su poder calorífico.
- 2) E_{ci} : Energía desperdiciada en carbón inquemado que pasa a las cenizas como desecho.

- 3) E_t : Energía transmitida desde los gases a la cámara de tabaco.
- 4) E_{ch} : Energía perdida en la chimenea a causa de la alta temperatura.
- 5) E_p : Energía perdida en las paredes del horno a causa del aislamiento.
- 6) E_h : Energía perdida al ambiente por radiación y convección en la hornilla.
- 7) E_s : Energía útil ideal necesaria para curar y secar el tabaco.
- 8) E_o : Otras pérdidas de energía no contempladas o imposibles de calcular a falta de datos. Estas son: pérdidas en el techo y en el piso.

Ecuación 1 Energía en la corriente principal del flujo de calor

$$E_g = E_{ci} + E_h + E_t + E_{ch}$$

Ecuación 2 Energía transmitida a la cámara

$$E_t = E_s + E_p + E_o$$

Teniendo en mente los factores de pérdida energética de la Tabla 7, se estudia cada uno de ellos en una forma cuantitativa soportado con los datos tomados en los monitoreos a los hornos de tabaco.

❖ *Combustión y cultura de horneo*

En este apartado se va a hablar de los diferentes factores de ineficiencia en la hornilla, fuente de calor. Por ser una actividad indispensable en la producción de tabaco, debe ser estudiada: su operación, el diseño mismo de las parrillas y las condiciones fenomenológicas propias de la combustión del carbón. No es suficiente con que los elementos componentes de las infraestructuras de tabaco estén adecuados para generar las condiciones termodinámicas y los parámetros de curación. Los operarios de los hornos u *horneros* (como se suelen denominar

comúnmente) hacen operaciones que atentan contra el ahorro de combustible; ellos han adquirido los conocimientos de horneo empíricamente. Actualmente PROTABACO S.A. y las demás compañías tabacaleras de Colombia están trabajando para calificar a los operarios de todas las labores del beneficio por medio del SENA.

Se puede citar algunos factores de tipo operacional que afectan el consumo de combustible al momento de hornear y se ve reflejado en resultados de análisis ORSAT, consumo global de carbón, carbón inquemado en las cenizas.

Tabla 12 Objetos de estudio en la generación de calor y combustión.

Factor	Objeto de estudio	Implicaciones de ineficiencia
Factor operacional o de cultura	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de carbón de tamaño variable. • La frecuencia y forma para atizar la hornilla. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo global de carbón • Grandes cantidades de carbón inquemado en las cenizas. • Emisiones de particulado sólido y otros contaminantes. • Baja temperatura en la hornilla
Factor diseño de la hornilla	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño y diseño de la parrilla. • Tamaño el hogar • Tamaño y tiro de la chimenea. • Aire de combustión. 	
Factores fenomenológicos de la combustión	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del carbón. • Relación y mezcla de aire y combustible. 	

- *Carbón de tamaño variable*

Normalmente la concepción de hornero está en colocar bloques grandes de carbón en la primera etapa de horneo (amarillamiento). A partir de que se abren las ventilaciones, es decir a partir de la etapa de marchitamiento, para subir la temperatura se colocan terrones de menor tamaño, o de lo contrario se trituran fácilmente en la hornilla debido a la alta temperatura.

En la Figura 37 se observa el tamaño común del carbón que se usa para la etapa de amarillamiento, con el fin de sostener la temperatura de la cámara en un tiempo prolongado. Un terrón de aproximadamente 22 kg se consume en tres horas, facilitando la labor del hornero en otras áreas u otros hornos. En la Figura 38 se observa carbón de tamaño más fino, se quema más rápido con el objetivo de subir temperatura dentro de la cámara. Cuando los carbones son más finos, la parrilla se congestiona más, el espacio para el acceso de aire disminuye así aumenta el tiro de la chimenea²⁶ (ver Tamaño y tiro de la chimenea). Por lo general, los administradores de las fincas tabacaleras no exigen un tamaño determinado de carbón, casi siempre reciben el combustible recién sacado de la mina sin ningún tipo de tratamiento o cuidado de transporte; el peso del mismo carbón hace que los bloques que están en la parte inferior del contenedor que los transporta se triture y llegue *ripio* o fino a los hornos. Recibir un carbón grueso es bastante bueno ya que disminuye la cantidad de desperdicio y es ideal para la etapa de amarillamiento, pero un carbón ripio es bastante problemático según el manejo que se le da actualmente: se quema muy rápido por el mayor área de combustión de los finos incandescentes y también porque las parrillas no están diseñadas para recibir un carbón fino, generalmente los finos de carbón pasan directo a las cenizas y de paso la parrilla se congestiona impidiendo el paso de aire por tiro natural, aumentando el porcentaje de carbón inquemado en las cenizas.

En los sistemas industrializados de quemado de carbón se usa carbón triturado, con un tamaño de partícula muy fino y que le confiere una mezcla de aire-

²⁶ El tiro se define como el potencial de flujo (medido en presión) que se crea al haber una diferencia de densidades (por diferencia de temperaturas) entre los gases calientes de la combustión y el aire ambiente.

combustible más íntima al proceso de combustión. Este sistema requiere que el carbón pulverizado sea homogenizado, libre de impurezas, el uso de boquillas para inyección del carbón pulverizado y por ende, un sistema de bombeo, un sistema de admisión de aire y un sistema de retorno de cenizas. Las ventajas en este sistema radican en la eficiencia de la combustión. La desventaja está en la inversión inicial que dudosamente sea atractiva para los productores tabacaleros.

Figura 37 Tamaño de carbón colocado en la parrilla para secar en etapa de amarillamiento

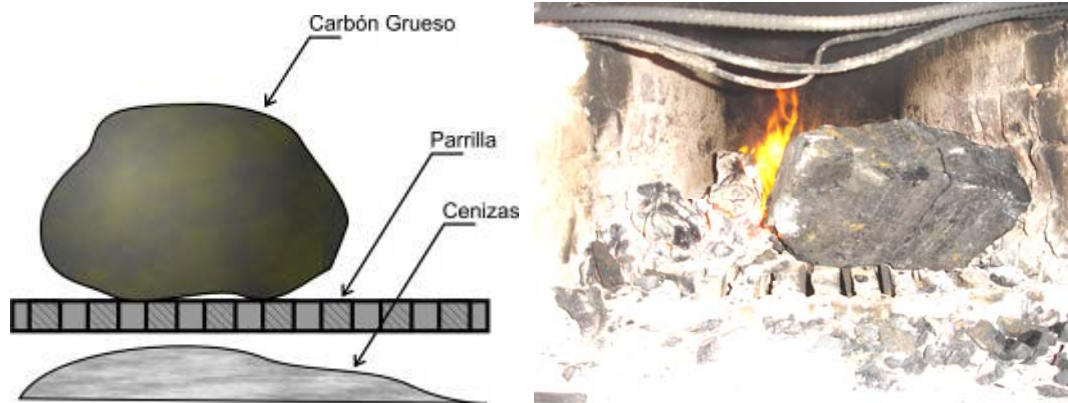
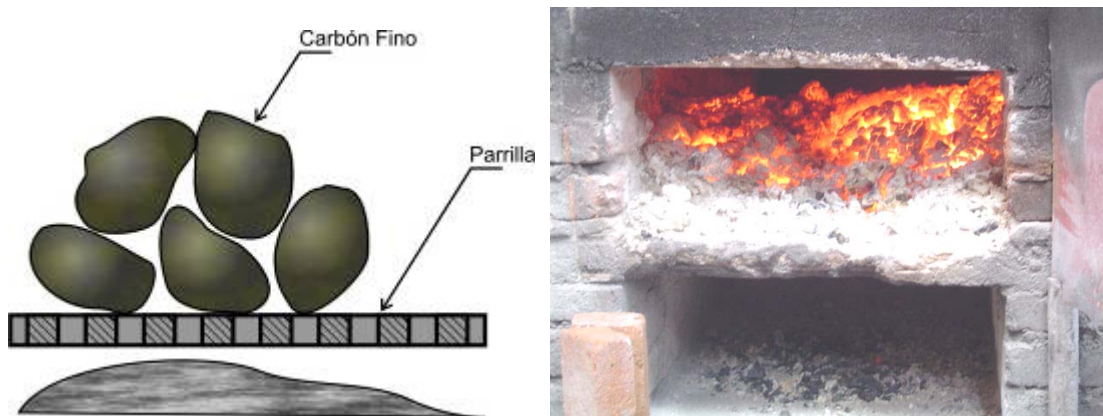


Figura 38 Tamaño de carbón colocado en la parrilla para elevar temperatura



En las observaciones hechas en las pruebas de monitoreo, el horno modular tipo Bulk-curing (ver ANEXO F. IMPLEMENTACIÓN DE HORNOS DE CURACIÓN TIPO BULK-CURING EN COLOMBIA y el monitoreo de Yaguará, se concluye que el tamaño del carbón debe estar entre mínimo entre dos y tres veces el tamaño de separación entre las varillas o rieles de la parrilla para evitar congestiones (ahogamiento de la llama) y que el carbón inquemado no pase a las cenizas.

- *Frecuencia y forma para atizar la hornilla*

Los horneros acostumbran a atizar más o menos cada tres horas en la etapa de amarillamiento, mientras que en las demás etapas demoran entre media hora y hora y media. Muchos horneros tienen trabajos diversos como tareas de desencuje y clasificación cuando las baterías de hornos son pequeñas; cuando las baterías de hornos son grandes, los horneros sólo se dedican a atizar los hornos. Debido a que no hay métodos de control automático o semiautomático, los horneros no se percatan de lo que está sucediendo dentro del horno y es por eso que muchas veces el tabaco se enfría o suceden incendios. *El tabaco nunca se debe enfriar*, ya que esto provoca una menor transferencia de vapor de agua desde el tabaco al aire de proceso debido a la alta humedad relativa²⁷ y por ende la hoja de tabaco “se mancha” o se “corre de humedad” como comúnmente se le denomina a este fenómeno; este tabaco se coloca de un color café oscuro que no se quita así ascienda de nuevo la temperatura. Los horneros cuando ven un bajón de temperatura, recurren a equipar o agregar carbón a la hornilla de una forma indiscriminada para subir rápidamente la temperatura, y más si se han quedado dormidos o se ha olvidado la tarea. Subir rápidamente la temperatura en la cámara

²⁷ La humedad aumenta cuando disminuye la temperatura

a una razón mayor de 2°F/h también es indeseable, ya que el tabaco empieza a *sudar* más rápido a la capacidad de extracción de humedad de la cámara y el tabaco también termina por mancharse. Esto ocurre comúnmente en las horas de la madrugada donde se equipa el horno cada media hora, es incluso cada veinte minutos si el clima no es favorable para sostener la temperatura.

El hecho de equipar la hornilla de una forma indiscriminada trae muchas consecuencias desfavorables para el consumo de combustible; en primer lugar, la hornilla queda saturada de carbón y la mezcla de aire/combustible se hace muy baja (poco aire, mucho combustible), esto combinado con el tiro de la chimenea hace que se forme humaredas bastante incómodas y peligrosas ambientalmente como se muestra en la Figura 40. En un horno convencional, debido a que la transferencia de calor externa a los tubos es bastante ineficiente (convección natural) se puede suponer que así como en la hornilla se genera una temperatura de hasta 800°C, los gases de combustión salen también muy calientes en la chimenea desperdiciando energía y carbón; en segundo lugar, la cantidad de hollín que se desprende en la hornilla y que queda en las paredes de la tubería dificulta la transferencia de calor haciendo que los gases salgan aún más calientes (ver Transferencia de calor por los tubos).

En etapas de alto consumo (marchitamiento y secado de lámina), atizar la hornilla cada hora y media y equipar con 30 o 40 kilos de carbón es tan malo como equipar cada 20 minutos con una cantidad menor de carbón, ya que cada apertura de la puerta de la hornilla se pierde calor al ambiente.

Un ensayo hecho en hornos convencionales arroja resultados como los que se ven en la Figura 39. Cuando se atizó más seguido (secciones B-C y D-E, grafica roja cada media hora) la rata másica subió (gráfica negra) con equipadas de menor

tamaño para (por ejemplo, se pasó de atizadas de doce kilos cada hora a tres atizadas de cuatro kilos cada veinte minutos) y por el contrario, lo que sucede en las equipadas entre F y G, que aumenta el tiempo entre atizadas (gráfica roja a dos horas) y la rata másica disminuye (gráfica negra).

Con el diseño actual de las parrillas de los hornos convencionales es recomendable tener equipadas de casi dos horas para etapas de sostenimiento con carbones grandes (por ejemplo zona F-G) y para subir temperatura, equipar el horno más seguido (cada 45 minutos o 1 hora) con carbones finos pero respetando lo que se dijo en cuanto al tamaño del carbón, carbones que se consumen rápidamente y que cada equipada se haga con poca cantidad de carbón.

Los que específicamente sucede en los puntos A, B y D de la Figura 39, casualmente en horas de la mañana, es lo que no se debe hacer: colocar grandes cantidades de carbón fino en una sola equipada. Esto aumenta rápidamente la temperatura en la cámara (ver picos de consumo y temperatura). Se confía que al colocar esa gran cantidad de carbón se logra una estabilidad por un tiempo prolongado pero se observa que rápidamente desciende la temperatura por que el carbón se ha consumido muy rápido, y lo que sucede es lo que sucede en la foto de la Figura 40, el carbón y la alta temperatura generada (ambos) se desperdician por la chimenea.

Figura 39 Ensayo hecho en horno convencional. Resultado toma de datos y gráfica UMMI.

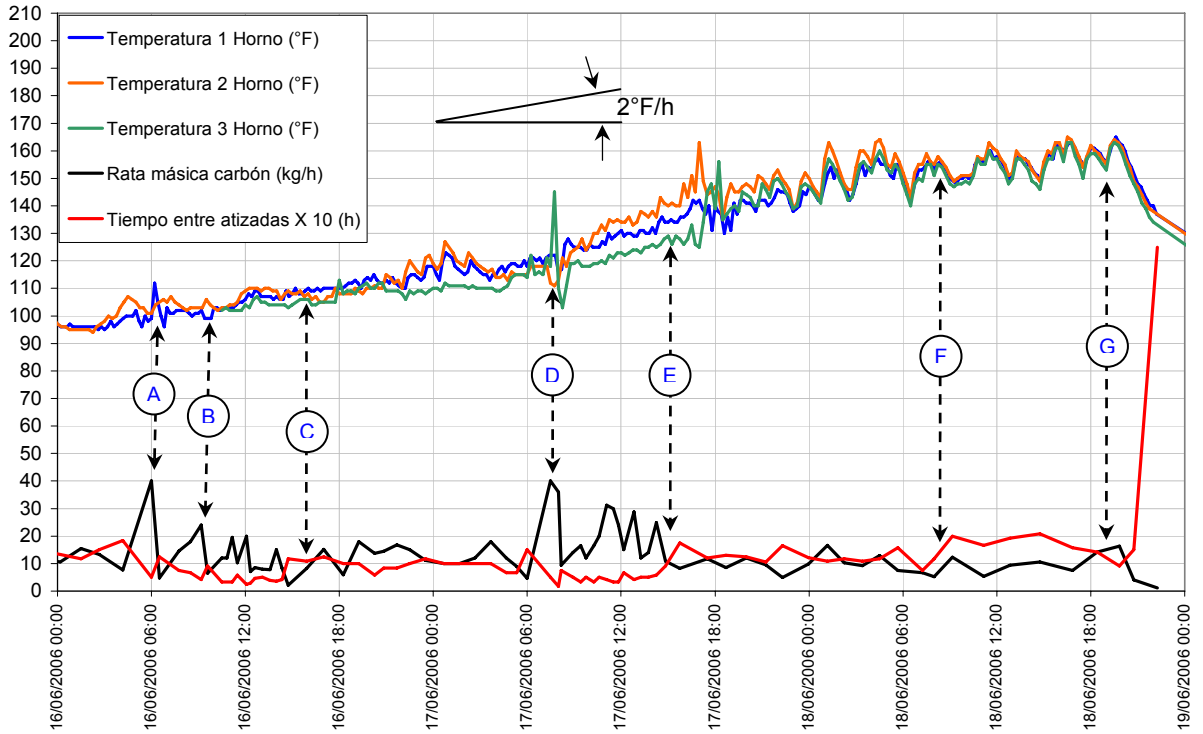


Figura 40 Formación de humos negros en la chimenea



La forma de atizar tiene también un efecto dañino en el consumo de combustible. Para atizar las hornillas se usan varas de hierro o palas con mangos metálicos; el atizado reacomoda los carbones incandescentes y los que no se han quemado aún

para dar un mayor acceso de aire que viene desde las separaciones de la parrilla y lograr puntos favorables de combustión. Concretamente lo que se hace es “golpear” el cabrón ardiente hacia abajo contra la parrilla, ocasionando que algunos bloques se desintegren y pasen a las cenizas sin terminarse de quemar. Para ello, la mejor forma de atizar no es golpeando hacia abajo sino reacomodando los carbones hacia los lugares donde ya se ha quemado el carbón, formando un lecho de carbones incandescentes en toda la extensión de la parrilla.

- *Tamaño y diseño de la parrilla*

Las parrillas están hechas de hierro fundido en su mayoría. La separación entre varillas es muy variada haciendo que el consumo de combustible sea diferente en hornos de la misma capacidad. En PROTABACO S.A. se tienen planos del estándar de hornos convencionales pero que no son llevados al pie de la letra por razones simplemente culturales de del contexto regional en donde se construyen. Cada constructor dimensiona el horno de acuerdo a los parámetros generales de construcción como altura, ancho, largo, separación entre barrederas y tamaño de los tubos de intercambio; otras dimensiones varían acorde al constructor.

Hay un método empírico para calcular el tamaño de parrilla aproximado dependiendo de la potencia térmica a generar y el tipo de combustible. Este método lo da la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) en un paper de secado de granos y calentamiento del aire. Este cálculo se comparará con el tamaño real de las hornillas de los hornos de tabaco.

El tamaño de la parrilla se puede calcular mediante la Ecuación 3, donde S_p es el tamaño de la parrilla (m^2), m_c es la masa de combustible que se ha de consumir

(kg/h) y S_c es la tasa de combustión (kg/h m²). Si se trata de leña, paja, bagazo de caña, quemados en horno con parrilla plana, con carga manual y aire forzado, la tasa de combustión varía entre 150 y 300 kg/h m². Si se trata de carbón, quemado en horno con parrilla plana, con carga manual y aire forzado, la tasa de combustión varía entre 200 y 300 kg/h m². La razón R entre la superficie libre S_l de la parrilla y la superficie total S_t fluctúa entre 0.2 y 0.5 si se trata de parrilla con carga manual, y entre 0.1 y 0.3 si se trata de parrilla con carga mecánica²⁸. Es lógico entender que si hay más aire forzado, la tasa de combustión S_c es mayor y por lo tanto el tamaño de la parrilla puede disminuir. En el caso de los hornos, el tiro de aire lo da la chimenea. Asimismo, la FAO recomienda calcular el volumen del hogar según la Ecuación 6. El cálculo del volumen útil del horno V depende de la potencia Pot necesaria para calentar el aire y de la tasa de liberación de energía K , que varía entre 175 y 233 kW/m³, en el caso de leñas, pajas, bagazo de caña y carbón. Una mayor tasa de liberación de energía K puede disminuir el tamaño del hogar.

Tabla 13 Rata másica de combustible promedio en función de las etapas de curado

Etapa	Rata másica de carbón (kg/h)
Amarillamiento	5
Marchitamiento	12
Secado Lámina	21
Secado Vena	15

Ecuación 3 Cálculo del tamaño neto de la parrilla según la FAO

$$S_p = \frac{m_c}{S_c}$$

²⁸ Secado de granos a altas temperaturas – calentamiento del aire. www.fao.org

Ecuación 4 Relación entre la superficie libre y la superficie total de la parrilla

$$R = \frac{S_l}{S_t}$$

Ecuación 5 Cálculo de la superficie total de la parrilla

$$S_t = S_l + S_p$$

Ecuación 6 Ecuación para calcular el volumen del hogar

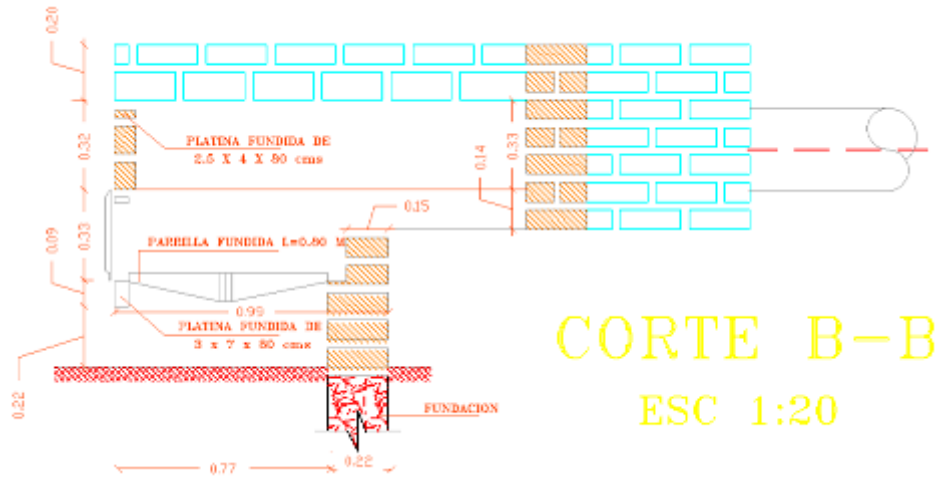
$$V = \frac{Pot}{K}$$

En función de las etapas de curado, la relación m_c es la estimada en la Tabla 13. La etapa crítica es la de secado de lámina, y por lo tanto es el criterio de cálculo. La potencia Pot para secar el tabaco se puede estimar con los datos de la Tabla 24 y la Tabla 13, dando 180 kW para el secado de lámina.

Tabla 14 Resultados del cálculo del tamaño de parrilla

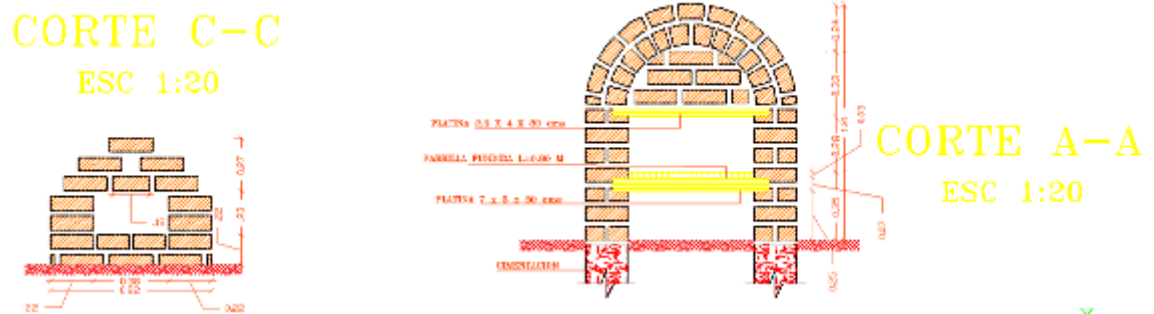
Input	Name	Output	Unit	Comment
.35	R			Relación entre la superficie libre y la total (entre 0.2 y 0.5 con carga manual; entre 0.1 y 0.3 con carga mecánica)
22	m_c		kg/h	Rata másica de carbón a utilizar
250	S_c		kg/(h*m ²)	Tasa de combustión (para carbón, entre 200 y 300; para leña, entre 150 y 300)
	S	.088	m ²	Superficie neta de la parrilla
	S_l	.047	m ²	Superficie libre de la parrilla
	S_t	.135	m ²	Superficie total de la parrilla
205	K		kW/m ³	Tasa de liberación de energía (entre 175 y 233)
180	Pot		kW	Potencia requerida para el curado/secado
	V	0.878	m ³	Volumen del hogar

Figura 43 Plano de corte lateral de la hornilla convencional



Fuente PROTABACO S.A. San Gil

Figura 44 Corte frontal y posterior de la hornilla convencional



Fuente PROTABACO S.A. San Gil.

La quema de combustibles sólidos ofrece dificultades de contacto íntimo entre el aire y el combustible, pues la combustión es un fenómeno de superficie. Esta deficiencia se puede mejorar aumentando la turbulencia y afinando el combustible, con lo cual se eleva el costo operativo.

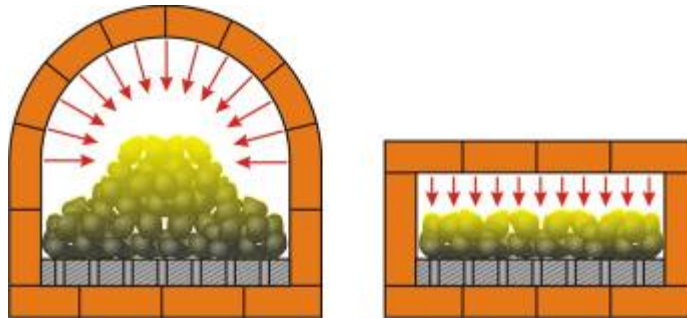
Los datos de la Tabla 15 sugieren que la parrilla es muy grande mientras que el tamaño del hogar es un 20% más pequeño que el recomendado según la FAO. Al mismo tiempo, con el tamaño de parrilla que se tiene actualmente sugiere que la

tasa de combustión es muy baja como si se estuviera quemando combustibles de menores contenidos calóricos como leña. Esto indica que la hornilla está sobredimensionada para el tipo de combustible que se usa mayormente -carbón- y esta condición (5 veces el tamaño recomendado de la parrilla) puede repercutir en cantidad exagerada de combustible quemado si no se acompaña de una buena transferencia de calor desde los gases al tabaco (tema que será tratado en el apartado Transferencia de calor por los tubos), y también en un excesivo aumento de la temperatura en el secado del tabaco.

Las separaciones entre los elementos de la parrilla (varillas o rieles) deberían ser menores ya que el carbón por su naturaleza frágil se fragmenta en pedazos más pequeños que pueden pasar por las separaciones de la parrilla sin quemarse. Sin embargo, una separación de parrilla muy pequeña puede generar ahogamiento de la llama.

Una observación hecha en el diseño de algunas parrillas es la forma arqueada. Los planos de dibujo de las hornillas coinciden con la forma ideal de construcción de la hornilla. Sin embargo, se encuentran algunas hornillas que tienen forma arqueada y eso aumenta la ineficiencia de la combustión con el hecho que tiene que ver con el efecto de apantallamiento a la radiación. La Figura 45 muestra a la izquierda una hornilla en forma arqueada, donde se dan puntos poco favorables en el fondo de la masa de carbón ya que la radiación apunta con mayor probabilidad en centro o foco del arco, mientras que a la derecha, una parrilla plana quema el carbón de un manera más homogénea y además, reduce el área expuesta de la parrilla al ambiente.

Figura 45 Forma de la hornilla y su efecto de apantallamiento



- *Tamaño y tiro de la chimenea*

El tamaño y tiro de la chimenea tiene repercusiones de dos tipos: uno ambiental (emisiones de tipo particulado por la falta de aire) y otro de cantidad de combustible quemado, que está regulada por la cantidad de aire de la combustión. La norma nacional obliga a que el tamaño mínimo de la chimenea debe ser de quince metros (decreto 02/82 del Ministerio de Salud) requisito que ningún horno de tabaco en Colombia cumple.

A medida que el proceso de curado da lugar a mayor temperatura, la hornilla se equipa con más carbón aumentando la resistencia al flujo, pero también el tiro de la chimenea aumenta por el aumento de temperatura de los gases, quedando o no compensada la admisión de aire comparada con la que realmente se necesita (relación estequiométrica). Los gases de chimenea que tienen color negro podrían estar causados por una relación deficiente de aire/combustible (más combustible y menos aire del estequiométrico) o una pobre mezcla de los mismos.

En las tablas siguientes se tabulan los resultados del estudio isocinético de los gases de chimenea hecha en el municipio de Rivera (Huila) en dos procesos de curado completos, análisis que se hizo bajo dos modos de operación del horno en

estudio: el primero, como horno convencional (tiro natural) y con el recirculador RAF (tiro forzado, ver 4.1.1 Proyecto RAF y ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS ORSAT, Análisis Orsat).

Tabla 16 Datos geométricos del conducto de chimenea

Dato	Unidades	Valor	Min. Salud. Dec. 02/82 CAM	Cumple
ALTURA	Metros	12	15	NO
SECCION	Circular en metros	0.24	-	-

Tabla 17 Condiciones generales de chimenea en tiro natural

Datos	Unidades	Valor
Flujo volumétrico en chimenea	m ³ /min	22.96
Flujo volumétrico a 20 °C	m ³ /min	14.35
Temperatura	°C	174.63
Velocidad	m/seg	8.46
Humedad	%	3.71

Tabla 18 Condiciones generales de chimenea en tiro forzado

Datos	Unidades	Valor
Flujo volumétrico en chimenea	m ³ /min	27.03
Flujo volumétrico a 20 °C	m ³ /min	16.64
Temperatura	°C	181.5
Velocidad	m/seg	9.96
Humedad	%	3.47

Para comparar el tiro real tabulado en las tablas anteriores, se calcula primero la relación estequiométrica de aire teórica en función de las diferentes etapas del proceso de curado y su consumo promedio (ver Tabla 19 y Tabla 20). También son necesarios los resultados del análisis próximo del carbón para conocer el porcentaje de los diferentes elementos constituyentes (ver Tabla 23 en el apartado Calidad del carbón y análisis de las cenizas).

Tabla 19 Cálculo de la relación de aire teórico para combustión de carbón

Input	Name	Output	Unit	Comment
ANALISIS PROXIMO DEL CARBON				
78.13	C		%	Porcentaje en peso de C
5.2	H		%	Porcentaje en peso de H
.67	S		%	Porcentaje en peso de S
.94	N		%	Porcentaje en peso de N
11.6	O		%	Porcentaje en peso de O
4.31	φ		%	Porcentaje de humedad
.8787	ρ_{aire}		m ³ /kg	Volumen de aire húmedo por kg de aire seco a las condiciones atmosféricas. T=27°C; RH=45%
BALANCEO. CANTIDAD EN MOLES PARA LA REACCION				
200	<i>a</i>		%	Cantidad de aire teórico para la combustión ²⁹
	<i>mol_C</i>	65.108	mol	C+O2 -> CO2
	<i>mol_H2</i>	26	mol	2*H2+O2 -> 2*H2O
	<i>mol_S</i>	.209	mol	S+O2 -> SO2
	<i>mol_N2</i>	.335	mol	-
	<i>mol_O2</i>	3.625	mol	-
PESOS DE AIRE POR KILOGRAMO DE COMBUSTIBLE				
	$W_{a_{teorico}}$	10.325	kg	Aire teórico por kg de carbón seco
	$W_{a_{real}}$	20.651	kg	Aire real con el exceso/defecto de aire
	$W_{a_{wc}}$	19.760	kg	Aire real por kg de carbón húmedo (wet coal)
	$V_{wa_{wc}}$	17.363	m ³ /kg	Volumen de aire húmedo por kilogramo de carbón húmedo

Ecuación 7 Cantidad de aire teórico seco para combustión en función de los componentes químicos del combustible

$$W_{a_{teorico}} = \frac{1.44(8C + 24H + 3S - 3O)}{100}$$

²⁹ Recomendación del libro Termodinámica Aplicada, de Juan Francisco Maradey, para carbón sólido pulverizado. Para carbón sin pulverizar, la FAO recomienda una mezcla más rica en aire para dar mayor probabilidad de mezcla entre oxígeno y combustible.

Ecuación 8 Cantidad de aire con compensación de exceso de aire

$$Wa_{real} = Wa_{teorico} \frac{\alpha}{100}$$

Ecuación 9 Cantidad de aire real con compensación de humedad

$$Wa_{wc} = Wa_{real} \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)$$

Ecuación 10 Volumen de aire húmedo por kilo de combustible

$$Vwa_{wc} = \rho_{aire} Wa_{wc}$$

Tabla 20 Cantidad de aire teórico de combustión calculado para las diferentes etapas del proceso

Etapas	Rata másica de carbón (kg/h)	Cantidad de aire teórico de combustión a temperatura ambiente
Amarillamiento	5	1.444 m ³ /min
Marchitamiento	12	3.472 m ³ /min
Secado Lámina	21	6.077 m ³ /min
Secado Vena	15	4.340 m ³ /min

El cálculo anterior indica que el tiro dado por la chimenea está muy por encima del recomendado en todas las etapas. El exceso de aire no es suficiente para garantizar que el carbón se mezcle íntimamente con los finos de carbón; igualmente se presentan rastros de hollín. Las dos condiciones fundamentales para la combustión son que exista una mezcla íntima entre el combustible y el comburente y que haya una temperatura mínima de ignición.

- *Análisis ORSAT*

El análisis ORSAT es una de las herramientas de diagnóstico más poderosas para cualificar las características de la combustión (completa e incompleta) y la factibilidad ambiental del proceso (emisiones al ambiente). Los resultados se muestran en el ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS ORSAT.

Las emisiones se estudiarán en el apartado Impacto Ambiental. Los resultados ORSAT para el horno convencional muestran una nula concentración de monóxido de carbono, para lo cual se deduce que la combustión de carbón en el horno y en la etapa de curado en la que se midió fuera una combustión completa. Sin embargo, esto no es coincidente con el hecho de que haya tanto material particulado en los gases. Esto quiere decir varias cosas:

- ✚ Que el carbón que se quema (sin contar el que sale como material particulado por la chimenea o el que se pierde junto con las cenizas) combuste muy bien generando pocas cantidades de CO.
- ✚ El carbón que no se quema y que pasa a la chimenea es el arrastrado por el aire en exceso y los gases de combustión, posiblemente por el poco tiempo de residencia que tiene en la hornilla debido a tamaño pequeño tamaño del hogar (ver Tamaño y diseño de la parrilla).
- ✚ Los datos ORSAT fueron tomados en etapas de baja temperatura donde no hay casi carbón inquemado en las cenizas y no se ve humos negros en la chimenea (Figura 40).

En conclusión, más que disminuir el tiro de la chimenea (cantidad de aire de combustión), lo que hay que hacer es mezclar mejor el aire con el combustible.

- *Temperatura generada en la hornilla*

Uno de los parámetros para cualificar la lejanía o cercanía del proceso de combustión ideal con el real es el cálculo de la *temperatura de flama adiabática*. Además, este parámetro nos da un soporte de diseño de futuras hornillas y para explicar degradaciones desde el punto de vista metalúrgico. Los datos tomados en los monitoreos de hornos donde se midieron las temperaturas de los diferentes puntos en la superficie de los tubos y la temperatura de salida de los gases de la hornilla nos ayudan a correlacionar y estimar la temperatura de los gases no sólo en la hornilla sino en cualquier punto. La Figura 47 muestra la ecuación de la línea de esta correlación.

Figura 46 Instrumentos de toma de datos para correlacionar la temperatura de los gases y la de la superficie en los tubos de intercambio de calor

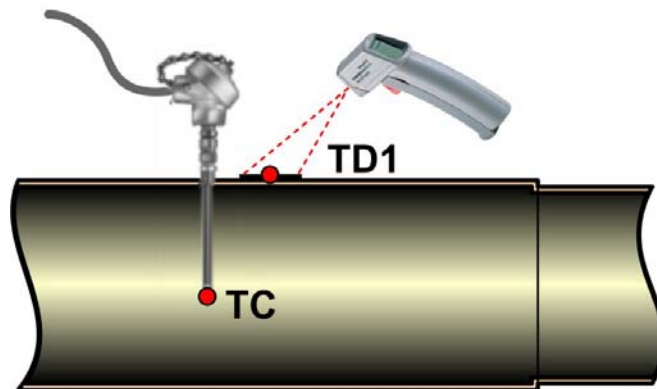


Figura 47 Curva de correlación entre la temperatura superficial de los tubos y la de los gases

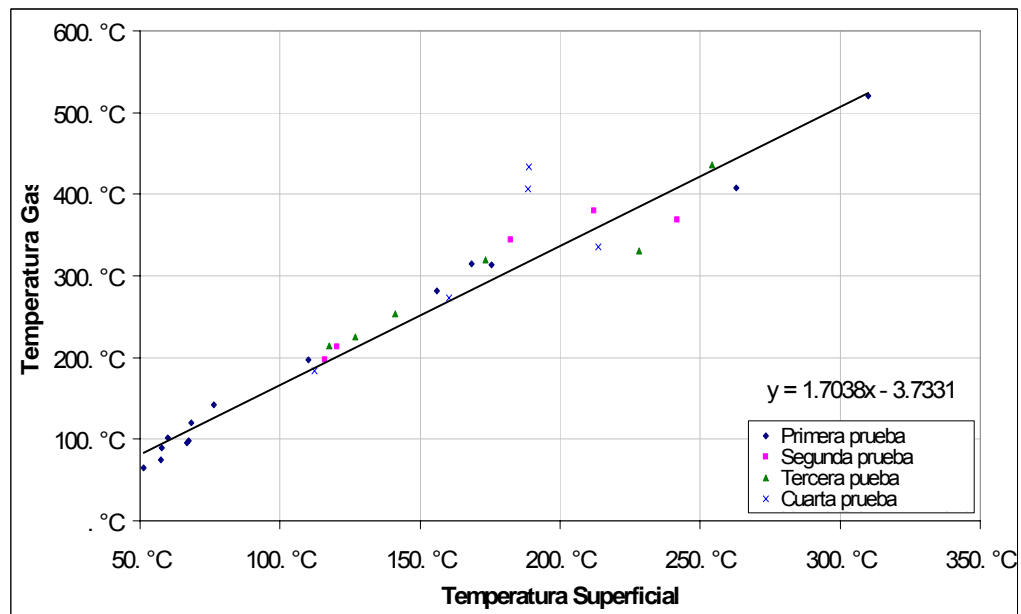
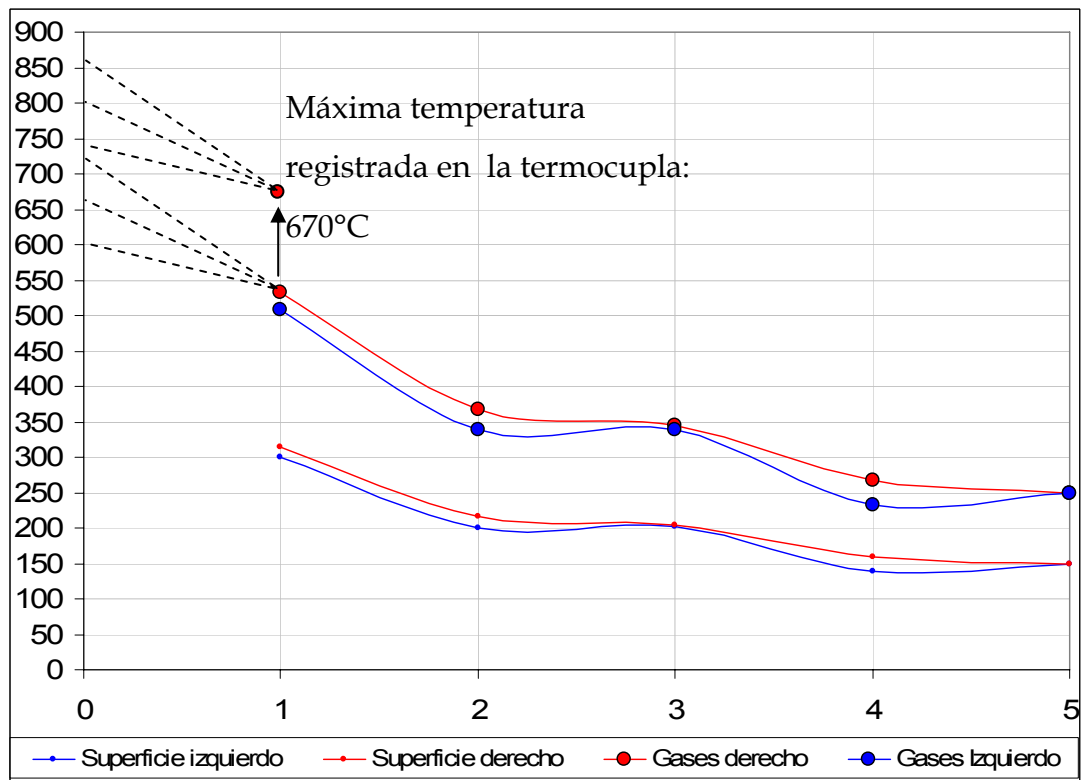


Figura 48 Estimación de la temperatura de los gases a lo largo de la tubería y de la temperatura en la hornilla

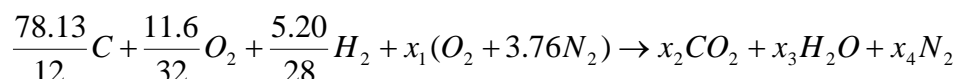


Para estimar la temperatura de la hornilla se usa un método de extrapolación gráfico ya que los instrumentos (ver ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN) no permitían una medición directa de los gases en la hornilla. Se prolonga la pendiente del perfil de temperatura de los gases como lo muestra la Figura 48. Hay una alta probabilidad de que en el trayecto de los gases desde hornilla a los tubos de intercambio de calor no pierdan temperatura ya que la hornilla está hecha de ladrillo macizo y recubierto de una gruesa capa de cemento, y por eso se dibujan varias pendientes. La distancia desde la hornilla (punto 0 en la gráfica) al punto 1 de medición es aproximadamente la misma distancia del punto 1 de medición al punto 2. La máxima temperatura registrada con la termocupla en todos los ensayos fue de 670°C, y, acorde al método gráfico, *la máxima temperatura que se puede generar en la hornilla se estima en 860°C* y suponiendo que hay transferencia de calor aceptable desde la parrilla hasta el primer tramo de tubería debido a la alta radiación. Si este último fenómeno no se tiene en cuenta, la máxima estaría muy poco por encima de los 700°C.

Para contrastar estos resultados con los teóricos, se puede calcular la *temperatura de flama adiabática*.

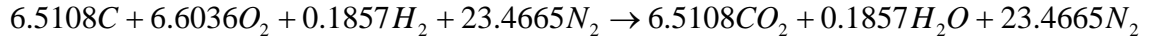
La reacción química de combustión de carbón según los componentes principales de la Tabla 23, por cada kilogramo de carbón queda así:

Ecuación 11 Reacción de combustión del carbón bituminoso sin balancear



El balance de la ecuación para el carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno da los siguientes resultados: $x_1 = 6.2411$, $x_2 = 6.5108$, $x_3 = 0.1857$, $x_4 = 23.4667$.

Ecuación 12 Reacción estequiométrica balanceada de la combustión del carbón



La temperatura de flama adiabática se logra cuando la entalpía de los reactivos se iguala con la de los productos, sin pérdidas de calor ni trabajo se logra la temperatura máxima teórica, $H_{react} = H_{prod}$.

Ecuación 13 Cálculo de la entalpía de los productos

$$\sum N_{react} (\overline{h}_f^o + \overline{h} - \overline{h}^o)_{react} = \sum N_{prod} (\overline{h}_f^o + \overline{h} - \overline{h}^o)_{prod}$$

Donde \overline{h}_f^o es la entalpía de formación en el estado de referencia estándar (298 K), \overline{h}^o es la entalpía sensible en el estado de referencia estándar y \overline{h} es la entalpía de la sustancia en el estado en que se encuentra.

Tabla 21 Entalpías de las sustancias participantes en la reacción de combustión

Sustancia	Entalpía de formación en estado estándar \overline{h}_f^o (kJ/kmol)	Entalpía en el estado de referencia \overline{h}^o (kJ/kmol)
C (s)	0	-
O ₂	0	8682
H ₂	0	8468
N ₂	0	8669
H ₂ O (g)	-241820	9904
CO ₂	-393520	9364

Fuente: Termodinámica de Cengel

Sustituyendo los valores en la Ecuación 13:

$$0 = 6.5108(-393520 + \overline{h_{CO_2}} - 9364) + 0.1857(-241820 + \overline{h_{H_2O}} - 9904) + 23.4667(\overline{h_{N_2}} - 8669)$$

Ecuación 14 Ecuación final de cálculo de la temperatura de flama adiabática

$$6.5108\overline{h_{CO_2}} + 0.1857\overline{h_{H_2O}} + 23.4667\overline{h_{N_2}} = 2873275.1163$$

Tabla 22 Entalpía de los productos de la combustión en función de la temperatura

Temperatura (K)	Entalpía (kJ/kmol)		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂
2500	131290	108868	82981
2550	134368	111565	84814
2600	137449	114273	86650
2650	140533	116991	88488
2700	143620	119717	90328
2750	146713	122453	92171
2800	149808	125198	94014

Fuente: Termodinámica de Cengel

La temperatura de flama adiabática calculada para una reacción de combustión ideal según la Ecuación 14 y Tabla 22 es de 2540 K o **2266.85°C**, lo que indica que el proceso de combustión llevado en los hornos de tabaco se aleja bastante del ideal. Esta lejanía puede ser causada por las mismas razones que se concluyen en los numerales anteriores: pobre mezcla de aire-combustible, demasiado exceso de aire, bajo control de la combustión y diseño de la hornilla. Sin embargo, llegar a estas temperaturas supone un reto de diseño desde el punto de vista de los materiales y control de la combustión.

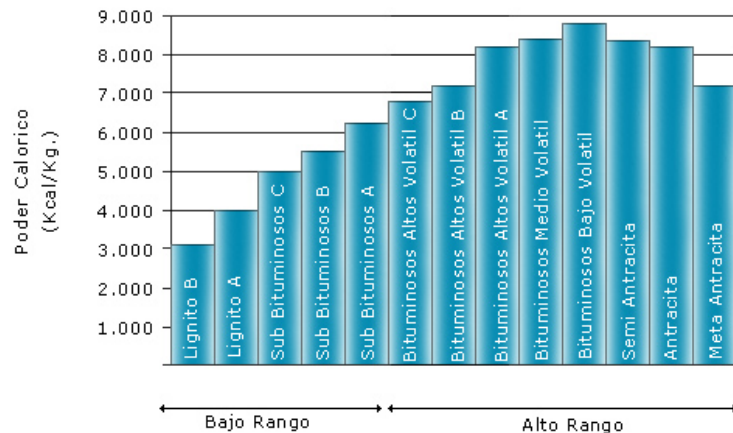
- *Calidad del carbón y análisis de las cenizas*

La condición del carbón es otro parámetro que no se controla el momento de llegar al horno. Los carbones provenientes de estas zonas traen muchas impurezas, y

humedad (Figura 50). Incluso, los horneros no se preocupan por colocar el carbón debajo de tejas o plástico para evitar que se moje cuando llueva: el poder calorífico inferior disminuye aún más por el alto contenido de humedad y el calor que se requiere para evaporarla.

El tipo de carbón que se trae desde las minas se acerca mucho al tipo *bituminoso*, según el análisis sintetizado en la Tabla 24 y comparada con la Tabla 26. Las normas ASTM fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como *carbones de bajo rango* aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg., en este rango están los carbones denominados subbituminosos y los lignitos. En los *carbones de alto rango*, con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg., se incluyen los carbones bituminosos y antracitas (Figura 49). Para nuestro caso, el carbón es de alto rango.

Figura 49 Clasificación de carbones según la ASTM



El problema del carbón inquemado en las cenizas es el indicador más contundente de la ineficiencia de la combustión. Las mejores soluciones para este inconveniente se listan en el numeral 3.3 ÁRBOL DE POSIBILIDADES DE MEJORA.

Tabla 23 Análisis elemental del carbón y las escorias hecha por Ingeominas

SUSTANCIA	PESO MOLECULAR	% EN PESO EN CARBON	% EN PESO EN ESCORIAS
CARBONO	12	78.13	53.34
HIDROGENO	1	5.20	0.36
NITROGENO	14	0.94	0.90
AZUFRE	32	0.67	ND
OXIGENO	16	11.60	ND
CENIZAS	ND	3.46	44.28
TOTAL	ND	100	100
HUMEDAD RESIDUAL % EN PESO		4.31	1.02

Tabla 24 Análisis próximo del carbón en muestra secada al aire

Humedad residual, % en Peso	4.31
Material Volátil, % en peso	32.18
Cenizas, % en peso	3.46
Carbono fijo (Calculado), % en peso	60.15
Azufre total, % en peso	0.67
Poder calorífico bruto, kJ/kg (kcal/kg)	31107 (7430)

En la muestra como se recibe: Humedad total, % en peso: 7.95%. Ingeominas






Tabla 25 Análisis próximo de las cenizas de un horno de tabaco


Humedad residual, % en Peso	1.02
Cenizas, % en peso	44.28
Material inquemado, % en peso	54.70
TOTAL	100 %

Fuente: PROTABACO S.A. San Gil

La Tabla 25 muestra un análisis hecho a las cenizas por medio de Ingenominas.

Tabla 26 Calidades del carbón mineral según instituto de carbón de Oviedo (España)³⁰

Rango		C fijo (%)	Humedad (%)	Materia Volátil (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Antracita		86 - 98	< 3	< 5	23 -33
Bituminoso(Hulla) (bajo, medio y alto en volátiles)		45 - 86	5 - 10	10 - 30	24-35
Sub-bituminoso		35 - 45	15 - 30	30 - 40	20-21
Lignito		25 - 42	40 - 60	40 - 50	10-20
Turba		< 25			



mayor contenido en C fijo, mayor poder calorífico
AUMENTO DEL RANGO
 menor humedad, menor contenido en materia volátil

Figura 50 Rastros de arcilla en el carbón y carbón ripio



³⁰ <http://www.oviedo.es/personales/carbon/index.htm>

❖ *Transferencia de calor por los tubos*

El fenómeno principal de transferencia de calor desde los gases hacia la cámara es la convección natural. Los cálculos hechos en el apartado anterior Temperatura generada en la hornilla sirven para estimar la cantidad de calor generado en la hornilla y posteriormente el porcentaje de ese calor que se transfiere al tabaco. En el presente título se calculará los diferentes parámetros de transferencia de calor desde los gases hasta la cámara de tabaco como son: coeficientes de convección forzada dentro de los tubos, conductividades térmicas de los materiales de las tuberías, resistencia térmica generada por la película de hollín, coeficientes de radiación -sobretudo en los primeros tramos de tubería- y coeficientes de convección natural en la superficie externa de los tubos.

En un intercambiador de calor cualquiera, los gases van perdiendo energía como resultado de la transferencia de calor al fluido frío (o de proceso) a medida que van recorriendo la tubería. Suponer una temperatura promedio en la tubería genera un error de estimación bastante grande. La mejor forma de calcular la transferencia de calor por medio de la tubería es el tomar secciones más pequeñas o *diferenciales* en dirección de la caída de temperatura y aplicar las leyes de la transferencia de calor a cada uno de los segmentos (ver Figura 51). Debido a que se quiere combinar varias leyes de transferencia de calor en un solo segmento, usar correlaciones, repetirlas a lo largo de toda la tubería, sumar, iterar y volver a realizar los cálculos para el siguiente instante de tiempo, es más cómodo realizar un programa de computación que resuelva dichos cálculos y realice gráficas con los datos de interés. Muchas propiedades de los materiales (conductividad, calor específico, emisividad etc.) son función de la temperatura, y para ello se utilizó MATLAB® de Mathworks que ofrece una ayuda inigualable en la programación, cálculo y representación de los datos.

Antes de entrar a la programación del código, en la Figura 52 se representa un esquema del diferencial de tubo y las leyes que se aplican sobre él.

Inicialmente se tiene la temperatura de los gases $T_g(1)$ tan pronto salen de la hornilla, estimación hecha en el apartado Temperatura generada en la hornilla lo cual es un dato de entrada de los cálculos. Los fenómenos de transferencia de calor dentro de los tubos son la *convección forzada* Q_1 y la *radiación* Q_2 . Estos dos sistemas de transferencia de calor se suman para dar el calor total transferido Q . El hollín y el espesor de la tubería aumentan la resistencia a la transferencia de calor, lo cual se tuvo en cuenta colocando temperaturas diferentes en la superficie interna T_{si} y la superficie externa T_{so} . El fenómeno de transferencia de calor en la parte externa de los tubos es la *convección natural* Q_3 ; se desprecia el fenómeno de radiación externamente, ya que éste prácticamente empieza a tener valores significativos por encima de los 400°C . Debido a que la temperatura de un diferencial no difiere mucho a la del siguiente, se desprecia la transferencia de calor entre los dos. A causa de la pérdida de energía de los gases, el diferencial a $T_g(x)$ tendrá siempre mayor temperatura que el diferencial siguiente $T_g(x + dx)$.

Figura 51 Modo de seccionar la tubería para el cálculo de la transferencia de calor

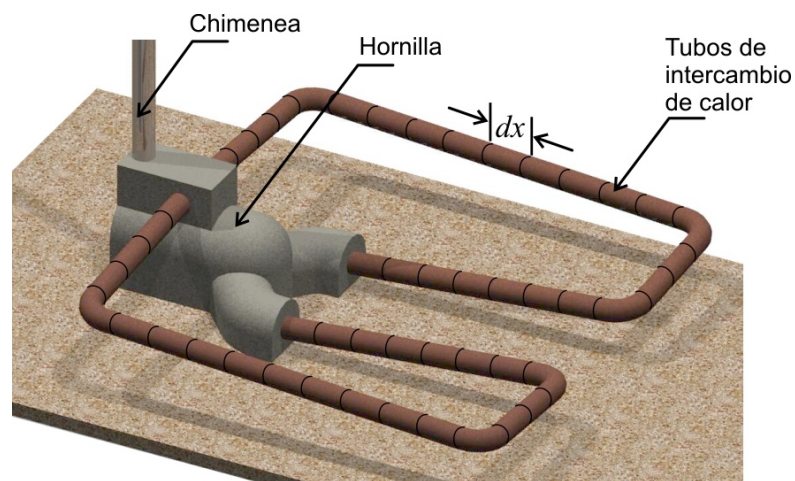
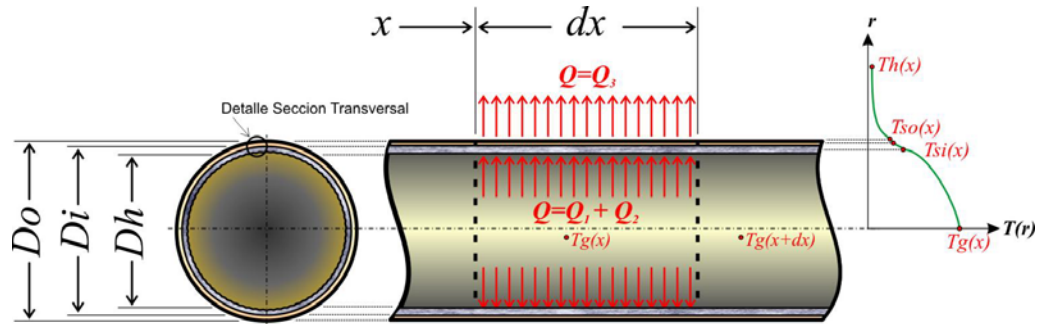


Figura 52 Leyes de transferencia de calor en los tubos y perfil de temperaturas



Matemáticamente, cada cantidad de calor se expresa con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 15 Transferencia de calor por convección forzada dentro de los tubos

$$Q_1 = h_{\text{int}} A_{\text{int}} (T_g - T_{si})$$

Ecuación 16 Transferencia de calor por radiación de cuerpo gris dentro de los tubos

$$Q_2 = \frac{(\varepsilon_s + 1)}{2} \sigma A_{\text{int}} (\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_{si}^4)$$

Ecuación 17 Transferencia de calor por conducción a través de los tubos

$$Q = \frac{2\pi k dx}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} (T_{si} - T_{so})$$

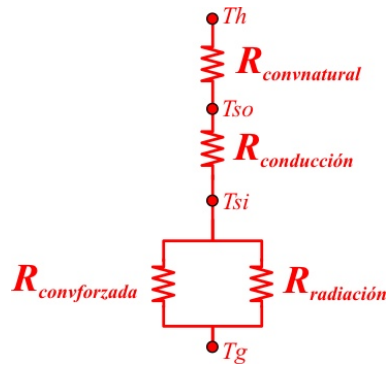
Ecuación 18 Suma de energías por convección forzada y radiación

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_3$$

Ecuación 19 Transferencia de calor por convección natural hacia la cámara de tabaco

$$Q_3 = h_{\text{cn}} A_{\text{ext}} (T_{so} - T_h)$$

Figura 53 Resistencias térmicas en el circuito de transferencia de calor desde los gases hasta la cámara



Los parámetros de entrada al programa de cálculo se listan en la tabla Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 30. La temperatura de los gases son al mismo tiempo función del tiempo, luego $T_g = f(\text{tiempo}, x)$.

Tabla 27 Datos de entrada al cálculo de transferencia de calor en la tubería

Símbolo	Valor	Parámetro	Unidad
D_o	0.25	Diámetro Externo de la tubería	m
t	0.002	Espesor de la pared del tubo	m
th	0.005	Espesor de la película de hollín	m
dx	0.5	Diferencial de longitud del tubo	m
L	12.5	Longitud total de la tubería	m
g	9.8	Gravedad local	m/s ²
p	1	Presión Atmosférica total	atm
q_{gases}	0.28	Flujo volumétrico gases de combustión a la salida de la chimenea (ver análisis isocinético de gases)	m ³ /s

Figura 54 Película de hollín en tramo de chimenea



El hollín se considera carbón inquemado que va con los gases de combustión y se precipita en las paredes internas de la tubería. Éste es buen conductor térmico³¹; sin embargo, los gases de combustión arrastran consigo cenizas y aire, lo que aumenta la resistencia a la conducción. Además, la película de herrumbre u óxidos de hierro en las paredes de la tubería aumenta aún más la resistencia a la conducción, aire queda atrapado entre el mismo hollín apelmazándose por las altas temperaturas y disminuyendo la cantidad de calor transferido (ver Figura 55).

El flujo de cálculo es el que se muestra en la Figura 57. La metodología fue la siguiente: para cada etapa de curado se tomó una temperatura de hornilla $T_g(1)$ y un vector de temperatura superficial T_{so} de modo que el programa calcula el calor transferido dQ en cada diferencial dx , la temperatura en el siguiente diferencial $T_g(x+dx)$ y luego suma los calores diferenciales $Q = \sum dQ$, dando el calor total transferido por cada tubería.

³¹ Conductividad de 98 a 70 W/mK en un amplio rango de temperaturas

Figura 55 Detalle de la sección transversal de la tubería

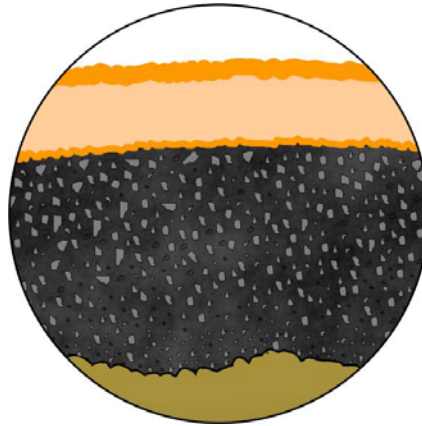


Tabla 28 Fracciones parciales y masas molares de los gases de combustión para cálculo de propiedades

Símbolo	Valor	Parámetro	Unidad
y_{n2}	0.766	fracción molar N_2	
y_{o2}	0.112	fracción molar O_2	
y_{co2}	0.084	fracción molar CO_2	
y_{h2o}	0.0357	fracción molar H_2O	
mm_{n2}	28	masa molar de N_2	kg/kmol
mm_{o2}	32	masa molar de O_2	kg/kmol
mm_{co2}	44	masa molar de CO_2	kg/kmol

Tabla 29 Datos de entrada al programa del cálculo de transferencia de calor. Horno número 1

Etapa Curado	Temperatura promedio hornilla, $T_g(1)$ (°C)	Vector temperatura superficial tubería, T_{so} (°C)	Duración etapa (h)	Rata másica de carbón (kg/h)
Amarillamiento	107.91	Desde [62.28 → 41.16]	71	2.29
Marchitamiento	279.27	Desde [78.73 → 54.84]	10	10.65
Secado Lámina	412.20	Desde [231.65 → 135.12]	40	10.27
Secado Vena	415.15	Desde [233.31 → 136.08]	25	10.58
Total proceso tabaco bajero			146 h	944 kg Carbón

Tabla 30 Datos de entrada al programa del cálculo de transferencia de calor. Horno número 2

Etapa Curado	Temperatura promedio hornilla, $T_g(1)$ (°C)	Vector temperatura superficial tubería, T_{so} (°C)	Duración etapa (h)	Rata másica de carbón (kg/h)
Amarillamiento	267.3	Desde [151.09 → 75.8]	52	6.72
Subida a Marchitamiento	313	Desde [165.8 → 95.36]	9 @ 2°F/h	13.31
Sostén Marchitamiento	377.7	Desde [207.88 → 109.22]	7	13.33
Subida a Secado Lámina	515.5	Desde [290.17 → 143.91]	9 @ 2°F/h	20.84
Sostén Secado Lámina	466.5	Desde [274.17 → 139.75]	3	20
Subida a Secado Vena	415.4	Desde [244.14 → 124.44]	15 @ 2°F/h	10.20
Sostén Secado Vena	373.8	Desde [244.95 → 129.06]	10	6
Total proceso tabaco bajero-mediamata			105 h	1030 kg Carbón

Figura 56 Curva de consumo y de desempeño de horno convencional testigo. Horno 2

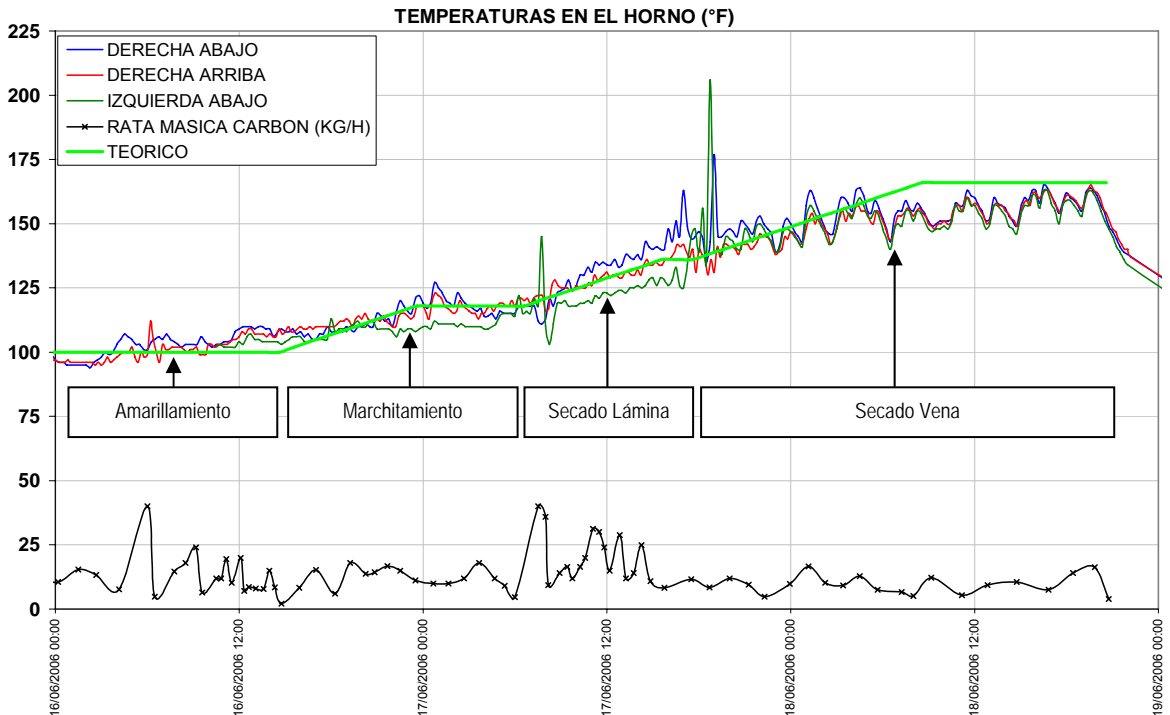
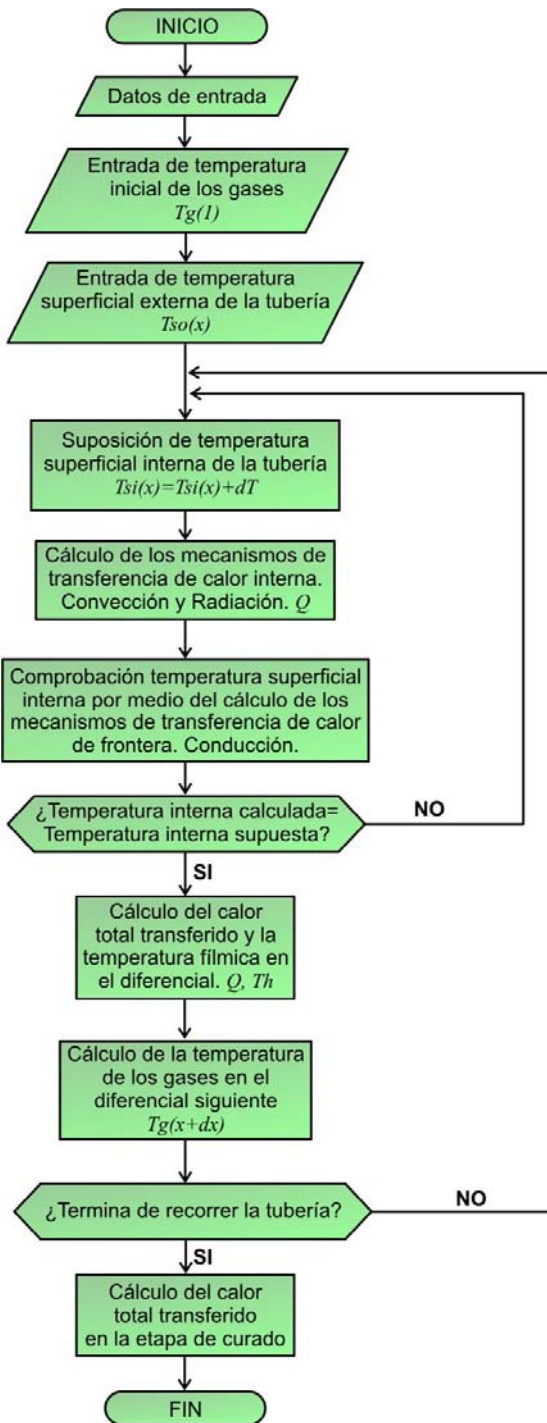


Figura 57 Diagrama de flujo del programa de cálculo de la transferencia de calor por la tubería en una etapa de curado



La Figura 47 Curva de correlación entre la temperatura superficial de los tubos y la de los gases, muestra que a cada valor de T_g le corresponde un valor de T_{so} según los datos medidos con la termocupla y el pirómetro respectivamente. El cálculo requiere suponer inicialmente dos temperaturas e iniciar la estimación del calor transferido; estas temperaturas supuestas en el cálculo fueron $T_g(1)$ y $T_{so}(x)$, datos que se tienen de las mediciones. También se tiene T_h (temperatura del horno) como dato conocido, pero desafortunadamente se ha comprobado que esta temperatura no es uniforme dentro de la cámara, y también supone un reto en la programación, ya que las correlaciones para la convección natural son bastante complejas. Además, para las ecuaciones de cálculo es la temperatura fílmica la que se necesita y no la del horno.

Los resultados de los cálculos son los siguientes:

Figura 58 Perfil de temperatura T_g calculada de los gases para toma de datos horno convencional. Horno 1. Primer proceso del programa

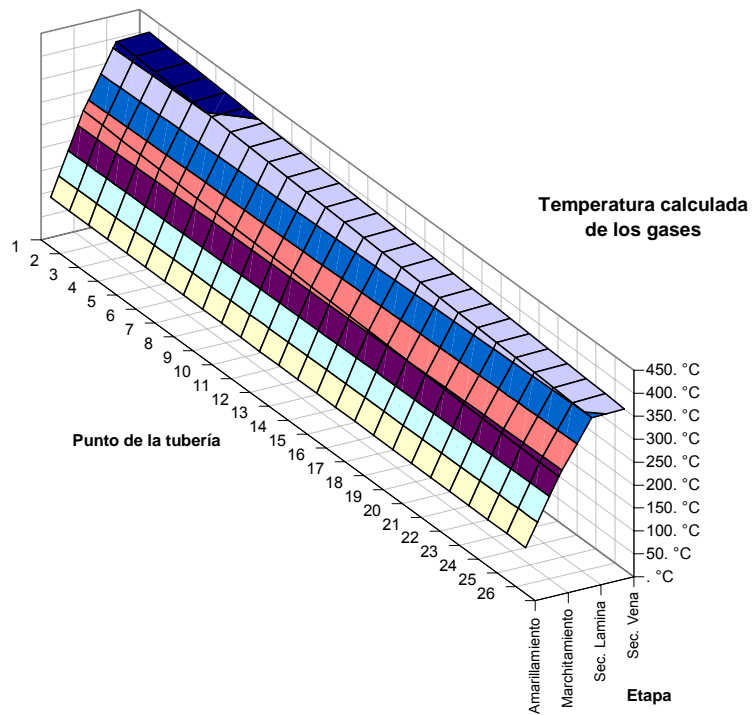


Figura 59 Perfil de temperatura T_g calculada de los gases para la toma de datos del horno tradicional. Horno 2

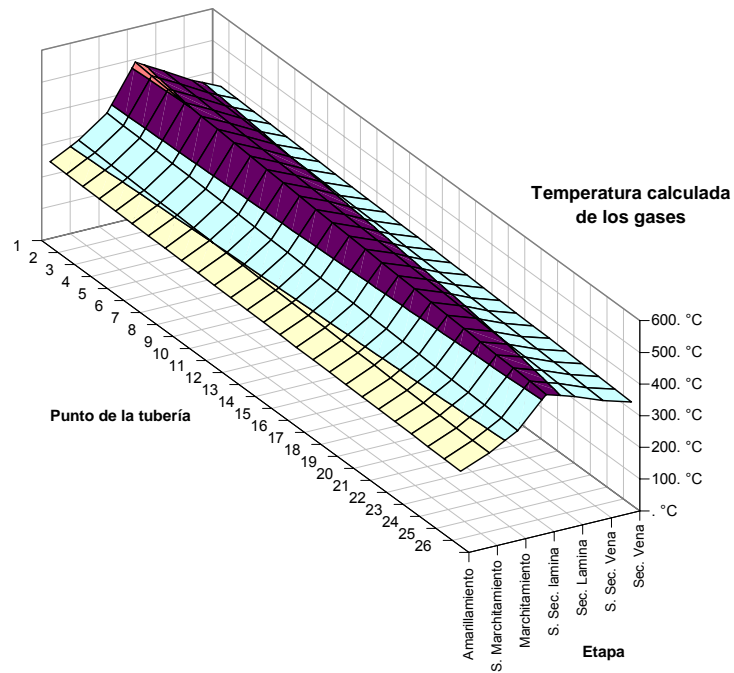


Figura 60 Calor transferido de los gases hacia la cámara en función de la posición de los tubos y la etapa de curado. Horno 1

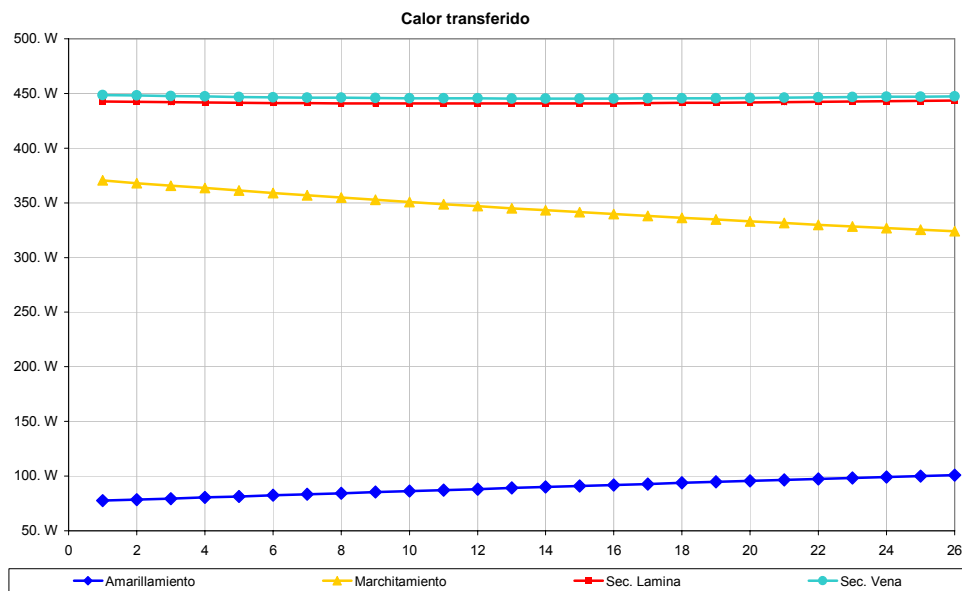


Figura 61 Calor transferido de los gases hacia la cámara en función de la posición de los tubos y la etapa de curado. Horno 2

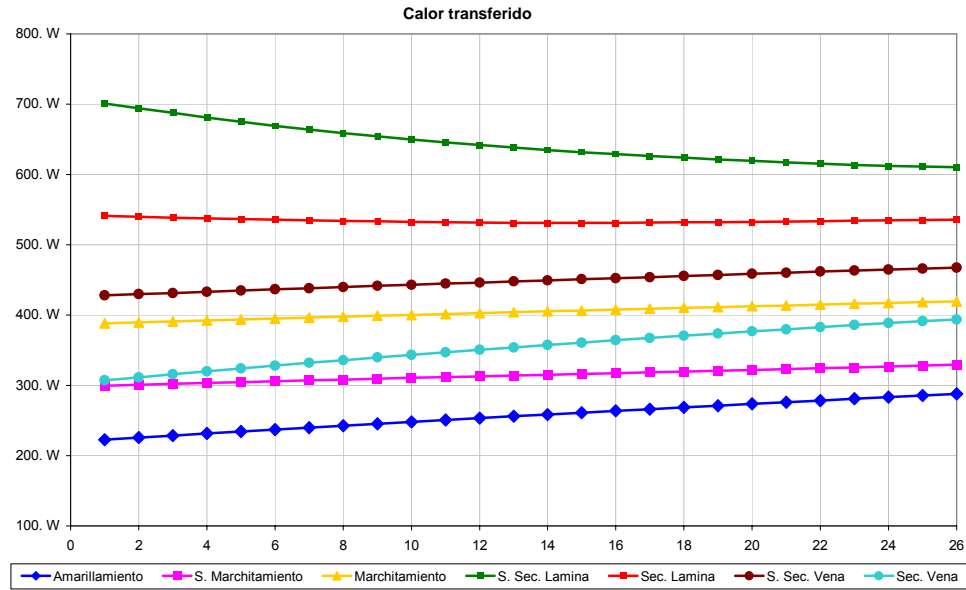


Tabla 31 Resultado de los cálculos de transferencia de calor por los tubos en horno número 1

Etapa	Duración etapa (h)	Rata Másica Carbón (kg/h)	Carbon Total (kg)	Energía Generada ³² E_g (kJ)	Potencia transferida (W)	Energía transmitida E_t (kJ)	E_t/E_g (%)
Amarillamiento	71	2.29	162.59	5057687.13	2759.70	1189386.55	23.52
Sostén Marchitamiento	10	10.65	106.50	3312895.50	8976.72	646323.84	19.51
Sostén Secado Lámina	40	10.27	410.80	12778755.60	11484.87	3307642.56	25.88
Sostén Secado Vena	25	10.58	264.50	8227801.50	11604.95	2088891.00	25.39

Poder calorífico del carbón: 31107 kJ/kg

Tabla 32 Resultado de los cálculos de transferencia de calor por los tubos en el horno número 2

Etapa	Duración etapa (h)	Rata Másica Carbón (kg/h)	Carbón Total (kg)	Energía Generada³² E_g (kJ)	Potencia transferida (W)	Energía transmitida E_t (kJ)	E_t/E_g (%)
Amarillamiento	52	6.72	349.44	10870030.08	6670.38	2497390.27	22.98
Subida a Marchitamiento	9	13.31	119.79	3726307.53	8177.09	529875.43	14.22
Sostén Marchitamiento	7	13.33	93.31	2902594.17	10515.31	529971.62	18.26
Subida a Secado Lámina	9	20.84	187.56	5834428.92	16728.80	1084026.24	18.58
Sostén Secado Lámina	3	20	60.00	1866420.00	13888.77	299997.43	16.07
Subida a Secado Vena	15	10.2	153.00	4759371.00	11656.39	1258890.12	26.45
Sostén Secado Vena	10	6	60.00	1866420.00	9201.06	662476.32	35.49

Poder calorífico del carbón: 31107 kJ/kg

Los resultados de la Tabla 31 y Tabla 32 contienen datos interesantes. En primer lugar se confirma la ineficiencia en la transferencia de calor y las sospechas de por qué los gases salen tan calientes en la chimenea (ver Figura 58 y Figura 59). Máximo el 35.5% de la energía potencial en el carbón pasa hacia la cámara. El otro 64.5% se pierde mediante carbón inquemado, pérdidas de calor en la hornilla y pérdidas en la chimenea a causa de la alta temperatura de salida de los gases. Estos datos son corroborados por las mediciones hechas por la universidad Surcolombiana donde han medido temperatura de los gases de chimenea mayor a

³² Esta energía sería el potencial energético que se tendría si la combustión fuera totalmente eficiente y no hubiera pérdidas en la hornilla. Sin embargo, la máxima eficiencia en combustión de carbón está en 60%.

los 360°C³³. Sin embargo, la eficiencia en la transferencia de calor calculada por dicha universidad se estima alrededor del 3%, contrastando con el modelo de este proyecto donde se estima la eficiencia de la transferencia de calor entre un 15 y 35%.

Otro dato interesante es conocer la variación tan amplia en esta eficiencia y las etapas donde ocurre. La etapa de más alta temperatura en la hornilla es la más ineficiente, mientras que las etapas de menor temperatura en la hornilla ($T_g(1)$) son las más eficientes. La etapa de marchitamiento es la más ineficiente en todos los casos; esto puede ser causado por muchos factores ya mencionados (tiro de la chimenea, aislamiento de las paredes, forma y frecuencia de atizar la hornilla, clima, etc.) pero lo más probable es que la mayor cantidad de pérdidas sea hacia el exterior por la hornilla y la chimenea.

❖ *Aislamiento térmico*

El estudio del aislamiento se puede dividir en dos partes. La primera, el estudio de conductividad térmica los materiales que se utilizan en las paredes de los hornos y su comparación con materiales de aislamiento industriales. El segundo estudio es el de pérdidas por las diferentes fronteras del horno. El clima afecta enormemente el desempeño de los hornos: en las pruebas realizadas en el municipio de Yaguará (Huila), los picos de consumo de combustible se daban entre las dos y cuatro de la madrugada de todos los días, tiempo donde el ambiente es más húmedo y menos

³³ CERQUERA PEÑA, Néstor Enrique. Evaluación del secado en hornos tradicionales de curado de tabaco. Neiva, Marzo de 2006.

caliente. Es así como se recomienda elevar la temperatura en horas de la mañana para evitar altos consumos.

- *Estudio de materiales de aislamiento*

El primer análisis del aislamiento térmico de los hornos de tabaco es el estudio material de las paredes de los hornos. La mayoría de los hornos de tabaco están hechos de ladrillo, unos con ladrillo adoquín macizo y otros de ladrillo H10 o H12, muy pocos están hechos de ladrillo de cemento. Otros hornos están hechos de barro en sus paredes.

Figura 62 Horno de paredes de madera



Figura 63 Hornos de ladrillo de cemento



Figura 64 Horno de ladrillo común de arcilla cocido



Tomando catálogos de fabricantes de estos materiales para construcción se puede estimar la resistencia térmica aproximada para cada configuración de ladrillo.

Figura 65 Dimensiones estándar de un ladrillo convencional de construcción en a) adoquín macizo b) en H de arcilla y c) en H de cemento

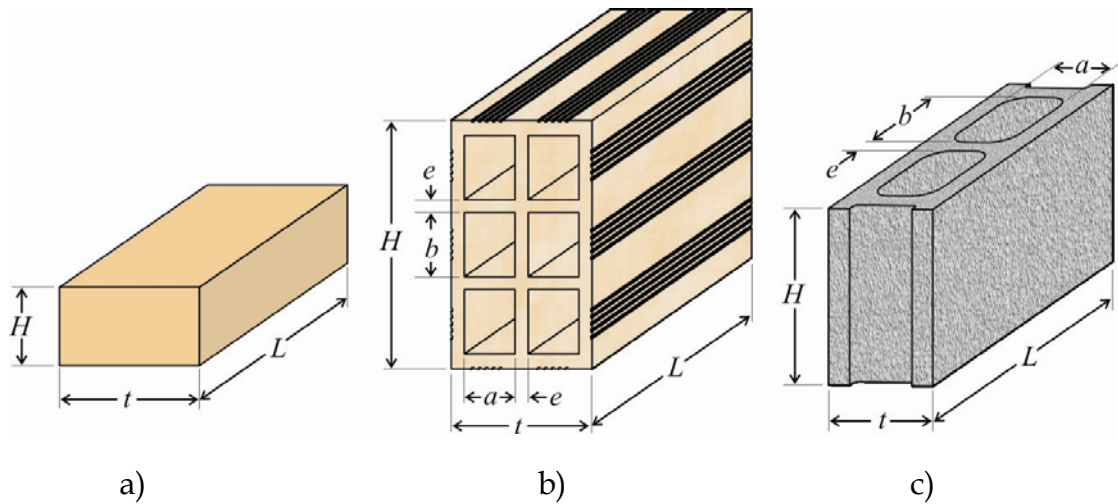


Tabla 33 Medidas principales de los ladrillos de construcción común. Medidas en milímetros

Referencia		H	L	t	e	N_t	N_H	Precio ³⁴	
Cemento	H10	190	390	90	20	1	2	450 \$/unid.	
	H15	190	390	140	25	1	2	580 \$/unid.	
	H20	190	390	190	25	1	2	770 \$/unid.	
Arcilla Cocida	Macizo	3	30	200	100	NA	0	0	11600 \$/m ²
		4	40	200	100	NA	0	0	12600 \$/m ²
		5	50	200	100	NA	0	0	13600 \$/m ²
	H7	195	325	70	15	1	3	450 \$/unid.	
	H10	195	325	95	10	2	3	500 \$/unid.	
	H12	195	325	115	12	2	3	640 \$/unid.	
	H15	195	325	145	12	2	3	800 \$/unid.	

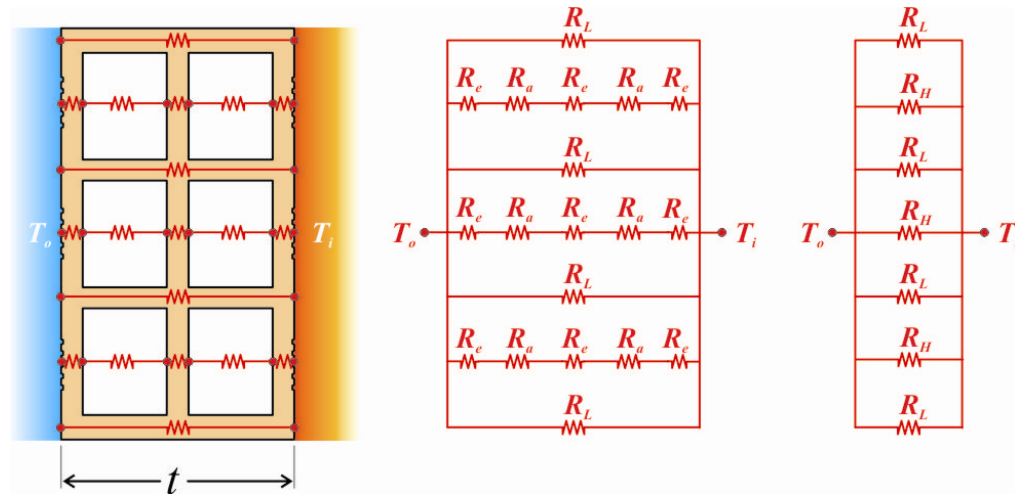
Tabla 34 Conductividad térmica de los materiales de ladrillo más usados en la construcción de hornos de tabaco

Material del ladrillo	Conductividad Térmica k_L (W/mK)
Arcilla Cocida	0.69
Cemento	0.34

Fuente: LIENHARD, John. A Heat Transfer Text book. Appendix A.

³⁴ Precios promedio en el municipio de San Gil en Agosto de 2006

Figura 66 Diagrama de resistencias térmicas y diagrama de resistencias simplificado en el ladrillo



Los ladrillos H10, H12 y H15 de arcilla cocida tienen seis agujeros en su sección para reducir el peso del mismo. El H7 tiene tres agujeros. Ésta característica puede traer una ventaja adicional y es que el aire queda atrapado en los orificios, ayudando a aislar térmicamente por conducción. Esa ligereza estructural ve la necesidad que los hornos se construyan con vigas de amarre y columnas de concreto. De otro lado, los adoquines macizos no tienen esta característica, son pesados y tienen una fuerte resistencia a la compresión y por eso estos hornos son construidos con fuertes columnas de este material reforzando su estructura.

Suponiendo conducción unidimensional y que la conductividad del ladrillo se mantiene constante en función de la temperatura, se puede estimar una conductividad promedio del ladrillo dependiendo de su configuración geométrica. En la Figura 66 se esquematiza el diagrama de resistencias por conducción: R_L es la resistencia térmica de la transferencia de calor a lo ancho de todo el ladrillo por el material sólido en la dirección del espesor t ; R_e es la resistencia térmica por

conducción por el espesor que hay entre las cámaras de aire que hay dentro del ladrillo, así como las resistencias de los extremos del ladrillo ya que todos los espesores son iguales; R_a es la resistencia a la conducción ejercida por el aire (conductividad del aire $k_a=0.03$ W/mK) que queda atrapado dentro del ladrillo y suponiendo que el ladrillo no tiene agujeros por donde el aire escape; R_H es la suma de las resistencias en serie por conducción cuando hay agujeros, que para ladrillo H7 y de cemento es igual a $2R_e+R_a$ mientras que para los otros ladrillos (excepto el macizo) es de $3R_e+2R_a$ según su configuración geométrica. R_{eq} es la resistencia total por conducción equivalente del ladrillo (sumando resistencias en paralelo), que para los ladrillos de arcilla, de cemento y macizo es diferente según la Ecuación 20 y Ecuación 21. N_t y N_H son los números de agujeros en dirección del espesor t y dirección H respectivamente.

Ecuación 20 Resistencia equivalente para ladrillos H7, H10, H12, H15 y H20

$$\frac{1}{R_{eq}} = (N_H + 1) \frac{1}{R_L} + (N_H) \frac{1}{R_H} \quad ; \quad R_H = (N_t + 1)R_e + (N_t)R_a$$

Ecuación 21 Resistencia térmica del ladrillo macizo de arcilla cocida

$$R_{eq} = \frac{t}{k_L HL}$$

La conductividad térmica equivalente (ladrillo+aire) se puede estimar con la Ecuación 22.

Ecuación 22 Conductividad térmica equivalente del ladrillo

$$K_{eq} = \frac{t}{R_{eq} HL}$$

Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35 Resultados del estudio de aislamiento térmico. Costo/Beneficio del material en función del tipo de ladrillo

Referencia		k_{eq} (W/mK)	R_{eq} por unidad (K/W)	Unidades por m ²	R_{eq} por m ² (Km ² /W)	Precio por m ²	Costo/Beneficio	
Cemento	H10	0.119	10.243	13.5	0.759	\$ 6073	8001	
	H15	0.113	16.746	13.5	1.241	\$ 7827	6308	
	H20	0.111	23.161	13.5	1.716	\$ 10391	6055	
Arcilla Cocida	Macizo	3	0.69	0.024	166.7	0.144	\$ 11600	80040
		4	0.69	0.018	125	0.144	\$ 12600	86940
		5	0.69	0.014	100	0.144	\$ 13600	93840
	H7	0.209	5.288	15.8	0.335	\$ 7101	21187	
	H10	0.200	7.481	15.8	0.474	\$ 7890	16640	
	H12	0.197	9.196	15.8	0.583	\$ 10099	17328	
	H15	0.195	11.745	15.8	0.744	\$ 12623	16959	

Veamos la relación costo/beneficio para algunos materiales de aislamiento térmico común y disponible en el mercado en la Tabla 36.

Tabla 36 Materiales para aislamiento térmico disponibles en el mercado

Referencia comercial	k (W/mK)	Presentación	Precio unidad	L (cm)	H (cm)	t (cm)
Lana fiberglass AW referencia 1	0.039	Rollos	\$ 207885	1524	121.9	2.54
Lana fiberglass AW referencia 2	0.039	Rollos	\$ 103943	762	121.9	2.54
Lana fiberglass AW referencia 3	0.039	Rollos	\$ 279115	1524	121.9	2.54
Insul quick referencia 1	0.0346	Láminas semirígidas	\$ 72015	297.18	121.92	3.81
Insul quick referencia 2	0.0346	Láminas semirígidas	\$ 80625	297.18	121.92	5.08
Insul quick referencia 3	0.0346	Láminas semirígidas	\$ 118005	297.18	121.92	7.62
Insul quick referencia 4	0.0346	Láminas semirígidas	\$ 146525	297.18	121.92	10.16
Serie 702 1" espesor	0.033	Láminas	\$ 8340	121.9	61	2.54
Serie 703 1.5" espesor	0.032	Láminas	\$ 12480	121.9	61	3.81

Fuente: www.fiberglass.com.co

Tabla 37 Costo/Beneficio de algunos materiales para aislamiento térmico industrial

Referencia comercial	R_{eq} por m^2 (Km^2/W)	Unidades por m^2	Precio por m^2	Costo/Beneficio
Lana fiberglass AW referencia 1	0.651	0.053	\$ 11190	17182
Lana fiberglass AW referencia 2	0.651	0.107	\$ 11190	17182
Lana fiberglass aAW referencia 3	0.651	0.053	\$ 15024	23069
Insul quick referencia 1	1.101	0.275	\$ 19876	18050
Insul quick referencia 2	1.468	0.275	\$ 22252	15156
Insul quick referencia 3	2.202	0.27	\$ 32570	14789
Insul quick referencia 4	2.936	0.275	\$ 40441	13772
Serie 702 1" espesor	0.769	1.344	\$ 11216	14572
Serie 703 1.5" espesor	1.190	1.344	\$ 16783	14096

La ventaja principal de los materiales convencionales sobre los materiales para aislamiento térmico industrial es la facilidad de construcción; los materiales aislantes térmicos industriales requieren ser empaquetados entre láminas o ser aislados físicamente para evitar precipitaciones de sustancias extrañas y/o tóxicas hacia la cámara de curado de tabaco, cosa que no sucede con los materiales convencionales. Por ello, la relación costo/beneficio para los materiales industriales puede aumentar ya que ellos no tienen soporte estructural, mientras que el ladrillo tiene ambas funciones: aislamiento térmico y soporte mecánico del horno. Por otro lado, los materiales de aislamiento industrial recomiendan espesores mínimos para diferencias de temperaturas que parten desde más o menos $100^{\circ}C$, de modo que el material quedaría sub-utilizado ya que en la aplicación de secado de tabaco la máxima temperatura en la cámara está en $75^{\circ}C$. Estos materiales podían dar un gran ahorro para el aislamiento térmico de la hornilla por ejemplo.

- *Pérdidas por las fronteras*

Un segundo análisis del aislamiento térmico es la estimación de las pérdidas de calor por las fronteras del horno. Los datos tomados en las diferentes etapas de curado pueden ayudar a estimar la transferencia de calor al ambiente como pérdidas de acuerdo a la Ecuación 25.

Ecuación 23 Cálculo de la energía de pérdidas totales por las fronteras del horno

$$Q_{pérdidas} = \sum_{A_{conducción}} \left(\frac{T_{pi} - T_{po}}{R_{eq}} \right) + \sum_{A_{convección}} \left(\frac{T_{po} - T_{amb}}{1/hA} \right)$$

Ecuación 24 Cálculo de resistencia térmica por conducción por metro cuadrado

$$q_{pérdidas} = \frac{Q_{pérdidas}}{A} = \frac{T_{pi} - T_{po}}{R_{eq} A} = \frac{T_{pi} - T_{po}}{\frac{t}{kA}} = \frac{T_{pi} - T_{po}}{\frac{t}{k}} = \frac{T_{pi} - T_{po}}{r_{eq}} \therefore r_{eq} = \frac{t}{k}$$

Este método de cálculo del calor de pérdidas por conducción es más preciso según las mediciones hechas con la toma de datos, ya que calcular las pérdidas por el método de convección se necesitaría conocer la velocidad del aire dentro o fuera del horno para evaluar el coeficiente de convección. Sin embargo, los datos de entrada para estimar la energía de pérdidas por las fronteras como el techo y la hornilla están incompletos, así que hay que suponer coeficientes de convección. Debido a que los hornos tienen diferentes tamaños (Tabla 38), se considera un rango de valores entre los que pueden estar las dimensiones de las fronteras (paredes, puerta etc.). El área de las fronteras del horno de puede calcular y se estima en la Tabla 39.

Figura 67 Dimensiones principales del horno convencional

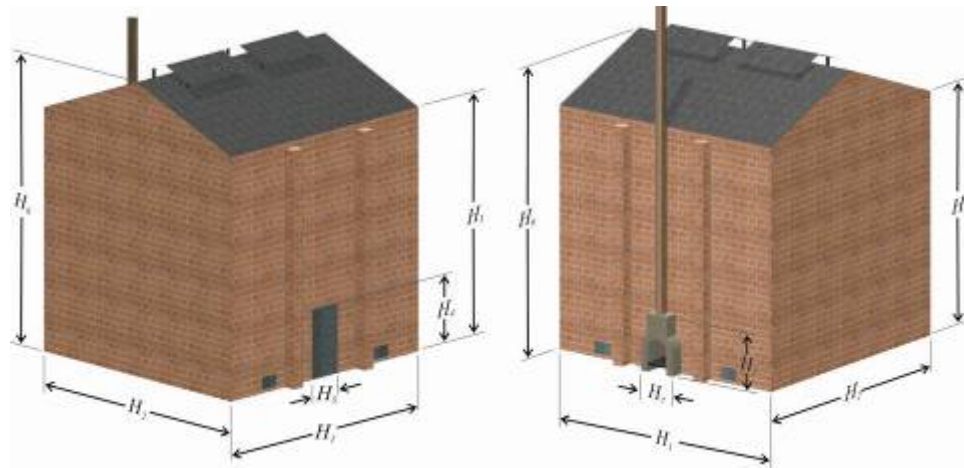


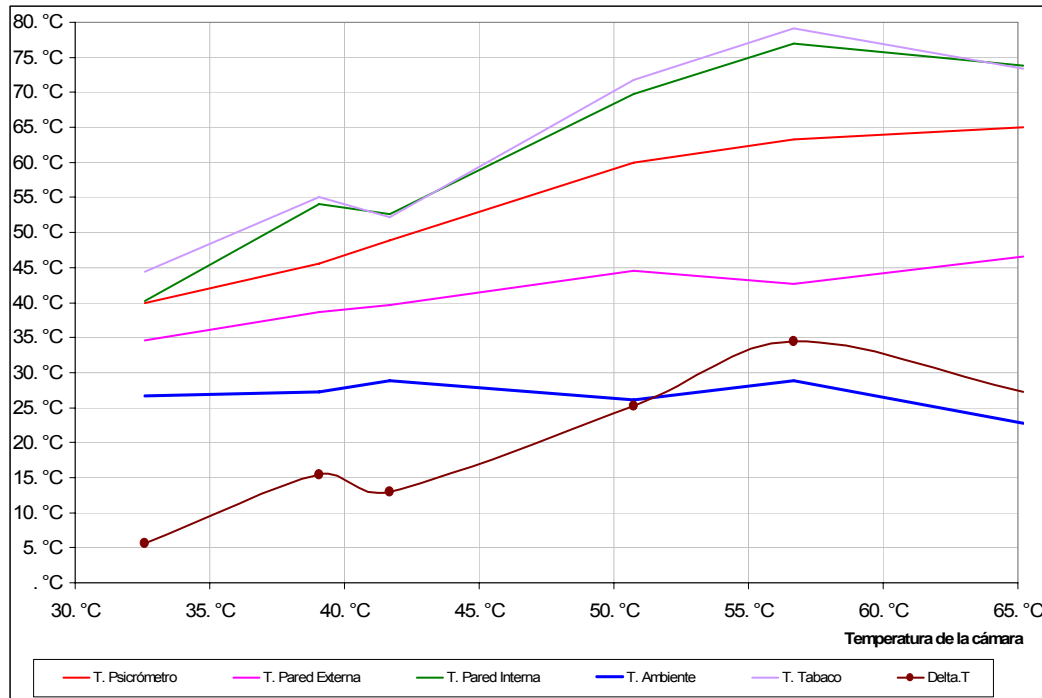
Tabla 38 Medidas máximas y mínimas de los hornos convencionales

Dimensión	Medida Máxima (m)	Medida Mínima (m)
H_1	6	7
H_2	6	7
H_3	5	6
H_4	1.75	1.9
H_5	0.9	1.1
H_6	6.5	7
H_7	0.7	1.3
H_8	1.1	1.8

Tabla 39 Área de las fronteras del horno

Ubicación	Material	Área Mínima (m ²)	Área Máxima (m ²)
Pared Frontal	Ladrillo	28.43	39.91
Pared Posterior	Ladrillo	29.23	39.66
Pared Lateral 1	Ladrillo	34.50	45.50
Pared Lateral 2	Ladrillo	34.50	45.50
Puerta	Lam.Galv.	1.58	2.09
Hornilla	Ladrillo, Hierro	0.77	2.34
Techo	Lam.Galv.	42.14	53.36
Piso	Arena, Arcilla	36.00	49.00

Figura 68 Relación entre las temperaturas de las paredes de ladrillo y tabaco en función de las temperaturas de la cámara y ambiente en el horno número 1 y 2



Para el cálculo de las pérdidas de calor por las fronteras se consideró el caso más crítico de pérdidas al ambiente, que es cuando un horno está operando solo en una batería de hornos³⁵.

a) **Las pérdidas en las paredes** son fáciles de evaluar ya que se tiene la diferencia de temperaturas y la resistencia térmica equivalente del primer análisis con la Ecuación 25. En las mediciones hechas en el monitoreo de hornos en Yaguará (Huila) se encontró que hay una temperatura más alta en la pared a la altura en la que se encuentran los tubos del horno como lo muestra la Figura 69.

³⁵ Se ha encontrado en la toma de datos que dos hornos adyacentes en una batería de hornos pueden intercambiar calor entre sí debido a al pobre aislamiento y que comparten una pared sencilla. Esto puede ser benéfico al minimizar el área expuesta a temperatura ambiente.

Esta temperatura es cerca de un 30% más alta que la del resto de la pared. Para los cálculos, se tomó la temperatura T_{po} en una parte alta donde este efecto no se da.

Ecuación 25 Estimación de la pérdida de calor al ambiente por conducción en una pared del horno

$$Q_{péridap} = \frac{T_{pi} - T_{po}}{R_{eq}}$$

En la toma de datos del Yaguará en el 2006, la batería de hornos monitoreada tenía ladrillo H12. Para esta configuración se calcula las pérdidas por las paredes de ladrillo como lo muestra la Tabla 40 y Tabla 41.

Figura 69 Perfil de temperatura en la pared del horno

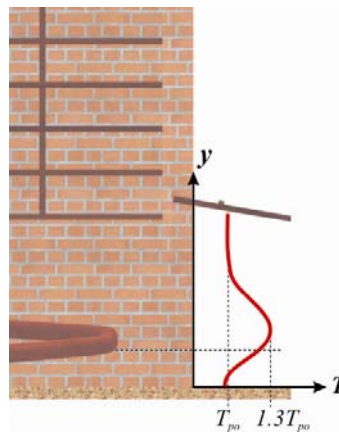


Tabla 40 Pérdidas de calor por la paredes de ladrillo H12 horno convencional en número 1

Etapa	Duración etapa (h)	Temperatura Cámara (°C)	Diferencia de Temperaturas $T_{pi}-T_{po}$ (°C)	Pérdidas en paredes $Q_{péridap}$ (W)	Pérdidas en paredes E_p (kJ)	Energía transmitida E_t (kJ)	E_p/E_t (%)
Amarillamiento	71	37.7	13	3314.92	65377.54	1189386.55	5.50
Marchitamiento	10	47.7	21	5354.87	14874.63	646323.84	2.30
Secado Lámina	40	57.7	34	8669.78	96330.93	3307642.56	2.91
Secado Vena	25	74.4	27	6884.83	47811.31	2088891.00	2.29

Tabla 41 Pérdidas de calor por la paredes de ladrillo H12 horno convencional número 2

Etapa	Duración etapa (h)	Temperatura Cámara (°C)	Diferencia de Temperaturas $T_{pi}-T_{po}$ (°C)	Pérdidas en paredes $Q_{pérdida}$ (W)	Pérdidas en paredes E_p (kJ)	Energía transmitida E_t (kJ)	E_p/E_t (%)
Amarillamiento	52	37.7	13	3314.92	47882.14	2497390.27	1.92
Subida a Marchitamiento	9	42.7	14	3569.91	8924.78	529875.43	1.68
Sostén Marchitamiento	7	47.7	21	5354.87	10412.24	529971.62	1.96
Subida a Secado Lámina	9	52.7	29	7394.82	18487.04	1084026.24	1.71
Sostén Secado Lámina	3	57.7	34	8669.78	7224.82	299997.43	2.41
Subida a Secado Vena	15	66.1	27	6884.83	28686.79	1258890.12	2.28
Sostén Secado Vena	10	74.4	27	6884.83	19124.52	662476.32	2.89

b) Las pérdidas en la hornilla se pueden calcular a partir de los datos calculados en el apartado Temperatura generada en la hornilla, donde se estimó la temperatura de la hornilla en función de las etapas de curado y estimando el *coeficiente de convección natural para placa vertical* y la pérdida de radiación en etapas de alta temperatura; la resistencia térmica por conducción hacia el ambiente en la hornilla es muy pequeña, ya que se usa en la mayoría de los casos una compuerta de hierro de poco espesor.

Para la hornilla, la transferencia de calor es combinada por convección natural y radiación según la Ecuación 26. El cálculo de las pérdidas por la hornilla se hizo bajo algunas suposiciones: primero, el área de la pared de la hornilla se tomó como la de la compuerta de la zona de carbón más la de la zona de las cenizas; segundo, aunque la resistencia a la conducción es despreciable debido a que se usa una

compuerta de hierro de poco espesor, este elemento interfiere en la transferencia de calor por radiación desde el carbón el ambiente, haciendo que la temperatura de la pared externa (hojalata) no sea la misma dentro de la hornilla (Figura 70). En etapas de baja temperatura, la toma de datos del 2004 en el municipio de Rivera (Huila) estimaba que esta temperatura era aproximadamente el 70% de la temperatura del tramo inicial de tubería dentro del horno (ver Figura 70); sin embargo, este valor es muy variable de un horno a otro ya que dichas compuertas están diseñadas de un modo muy diferente, al igual que el área de la pared de la hornilla; por otro lado, el pirómetro no podía registrar temperaturas por encima de los 300°C lo que restringe dicha estimación a altas temperaturas.

Ecuación 26 Pérdidas de calor por la hornilla

$$Q_{hornilla} = hA(T_{paredhornilla} - T_{amb}) + \sigma A(T_{paredhornilla}^4 - T_{amb}^4)$$

Figura 70 Perfil de temperaturas en la hornilla

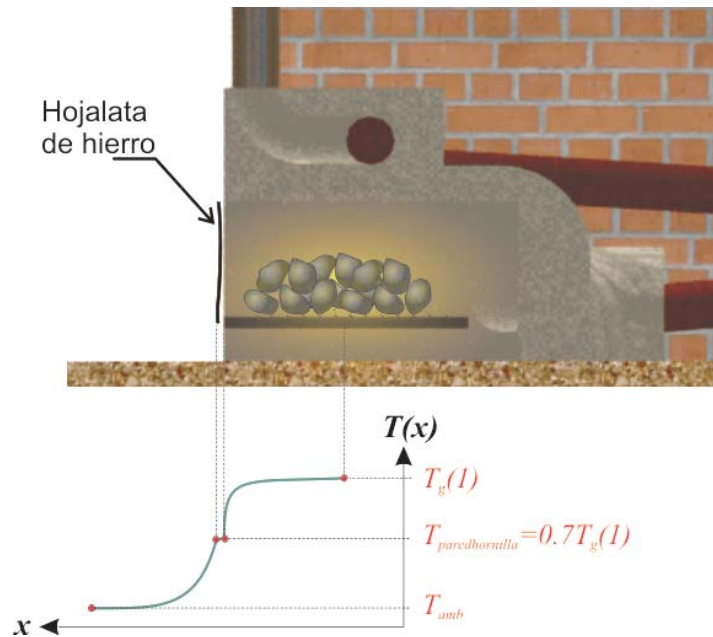


Tabla 42 Pérdidas por la hornilla en el horno número 1

Etapa Curado	Duración etapa (h)	Temperatura pared hornilla (°C)	Coficiente convección natural placa vertical estimado, h_v (W/m ² K)	Pérdida de calor por la hornilla, $Q_{hornilla}$ (W)	Pérdida de calor por la hornilla, E_h (kJ)	E_h/E_t (%)
Amarillamiento	71	75.537	2.736	59.05	15093.40	1.27
Marchitamiento	10	195.489	3.330	302.06	10874.32	1.68
Secado Lámina	40	288.54	9.860	1416.28	203944.55	6.17
Secado Vena	25	290.605	9.875	1431.42	128827.71	6.17

$T_{amb}=25$ °C; $A=0.77$ m²

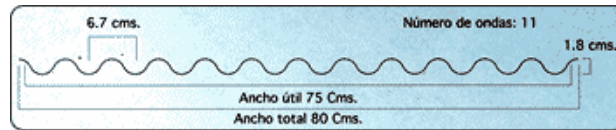
Tabla 43 Pérdidas por la hornilla en el horno número 2

Etapa Curado	Duración etapa (h)	Temperatura pared hornilla (°C)	Coficiente convección natural placa vertical estimado h_v (W/m ² K)	Pérdida de calor por la hornilla $Q_{hornilla}$ (W)	Pérdida de calor por la hornilla E_h (kJ)	E_h/E_t (%)
Amarillamiento	52	187.11	5.076	427.04	79942.35	3.20
Subida a Marchitamiento	9 @ 2°F/h	219.1	5.284	546.43	17704.39	3.34
Sostén Marchitamiento	7	264.39	9.659	1241.73	31291.51	5.90
Subida a Secado Lámina	9 @ 2°F/h	360.85	10.289	1980.81	64178.40	5.92
Sostén Secado Lámina	3	326.55	10.090	1700.87	18369.41	6.12
Subida a Secado Vena	15 @ 2°F/h	290.78	9.862	1430.74	77260.14	6.14
Sostén Secado Vena	10	261.66	9.637	1222.75	44019.06	6.64

$T_{amb}=25$ °C; $A=0.77$ m²

c) Las resistencias en el techo y puerta se pueden estimar con los datos de los planos del horno; el material más utilizado en estas fronteras es la lámina galvanizada, corrugada para el techo y lisa para la puerta. La corrugación de la teja aumenta el área de transferencia que se estimó en 1,05 veces más que el área plana.

Figura 71 Lámina galvanizada corrugada.



Fuente: Acesco

Tabla 44 Parámetros de cálculo para estimar resistencias térmicas en otras fronteras

Parámetro		Valor
Conductividad de la lámina galvanizada ³⁶		64 W/mK
Espesor de lámina	Techo	0.00023 m
	Puerta	0.0012 m

Como se aprecia en la Tabla 46, la resistencia térmica por conducción en las fronteras como el techo y la puerta son muy pequeñas debido al poco espesor y la alta conductividad de la lámina galvanizada. Se puede calcular de manera aproximada el coeficiente de convección natural para la pared interna del horno ó de convección forzada para la pared externa en función de la velocidad del viento promedio de la zona.

³⁶ La lámina galvanizada es una lámina de acero con un recubrimiento de cinc que se puede lograr por diferentes procesos. Esta capa de cinc protege al acero de la corrosión y es muy delgada; para nuestro caso, el espesor de película es de 0.038 milímetros lo cual se puede despreciar por la alta conductividad térmica del cinc (116 W/mK). Ahora, las especificaciones para el sustrato del acero galvanizado lo hace la norma JIS G3141, que para nuestro caso es de acero laminado en frío acercándose a un AISI 1010 según la composición química.

Tabla 45 Cálculo del coeficiente de convección natural en las paredes internas del horno

Input	Name	Output	Unit	Comment
50	T_{sup}		°C	Temperatura superficial de la placa
25	T_{amb}		°C	Temperatura ambiente
3	L		m	Longitud de la placa
9.8	g		m/s ²	Gravedad local
	T_{film}	310.65	K	Temperatura filmica del aire
	h_v	2.112	W/(m ² *K)	Coficiente de transferencia por convección natural para placa vertical
	h_h	4.831	W/(m ² *K)	Coficiente de transferencia por convección natural para placa horizontal
	RaL	2.639E11		Numero de Rayleigh
	NuL_v	392.795		Numero de Nussell para placa vertical
	NuL_h	898.475		Numero de Nussell para placa horizontal
	Pr	.708		Numero de Prantl
	Gr	3.798		Numero de Grashoft
	β	.00337	1/K	Coficiente de expansión térmica del aire
	a	.0000234	m ² /s	Coficiente de difusividad térmica del aire
	ν	.0000166	m ² /s	Viscosidad Cinemática del aire
	k	.0268	W/(m*K)	Coficiente de Conductividad Térmica del aire

Ecuación 27 Resistencia térmica para la transferencia de calor por convección

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

Para placas verticales como la pared, se usa h_h de la Tabla 45, y para placas horizontales se usa h_v . Para placas inclinadas de poca inclinación como el techo y $RaL > 2E11$, pueden aproximarse a una placa horizontal multiplicando g por $\cos(\theta)$, donde $\theta = 21.26^\circ$, luego el coeficiente h_i (placa inclinada) es de 4.659 W/m²K. La resistencia térmica por convección dentro del horno se estima en la Tabla 46.

Tabla 46 Cálculo de resistencias por conducción para otras fronteras

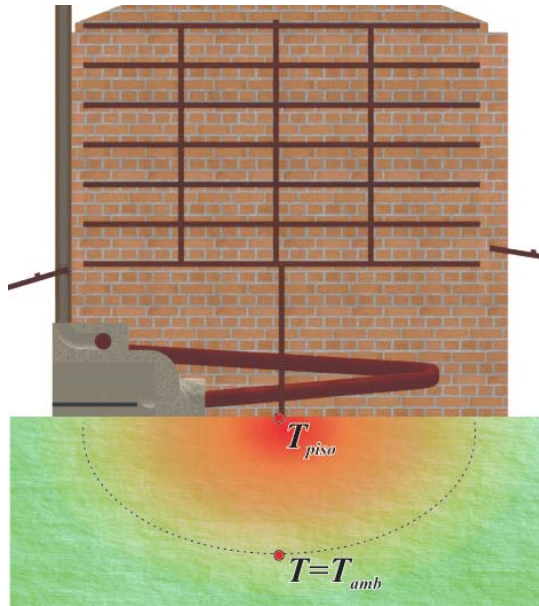
Frontera	Área Promedio (m²)	Resistencia Térmica Equivalente por conducción por m² (Km²/W)	Resistencia Térmica Equivalente por conducción (K/W)	Resistencia Térmica por convección natural (K/W)
Techo	47.75	0.00000359375	7.526E-8	0.004495
Puerta	1.83	0.00001875	1.025E-5	0.2587

La energía perdida por el techo y la puerta no puede ser evaluada directamente a falta de datos pero se puede concluir que hay que tener un mejor aislamiento térmico en estas fronteras. La suma de las resistencias térmicas por conducción y por convección natural (Tabla 46) en el techo es muy pequeña, así que hay gran probabilidad de pérdidas por estas fronteras.

d) Las pérdidas por el suelo no se pueden evaluar por el momento; la única temperatura registrada es la de la superficie del suelo; allí no hay convección, hay conducción pero no se conoce el calor específico C_p del suelo, ya que la energía perdida por esta frontera es la que se necesita para calentar (de una etapa a otra de mayor temperatura) la masa de piso que hay debajo del horno³⁷; en algún punto en la profundidad la temperatura se igualará con la de equilibrio ambiente del suelo acorde a la caída de temperatura por conducción (ver Figura 72). El suelo es una gran masa que se calienta, pero no se conoce su cantidad.

³⁷ Su cálculo se haría mediante la relación de calentamiento $Q_{suelo}=msueloC_p\Delta T$.

Figura 72 Perfil de temperaturas en el suelo de horno



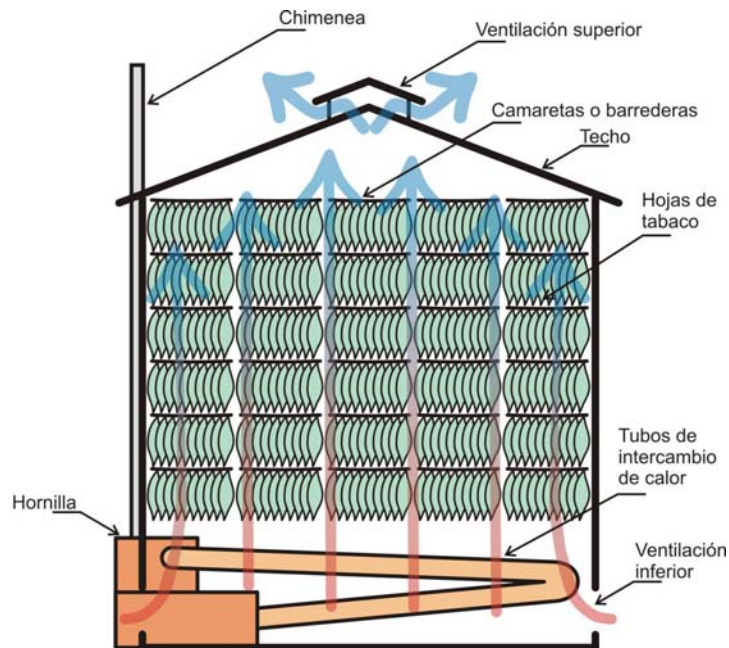
❖ *Hermeticidad y flujo de aire*

La hermeticidad tiene una importancia grande en la etapa de amarillamiento cuando hay que contener humedad; en etapas de secado, las fugas pueden ayudar a evacuar la humedad a la par de la apertura de las ventilaciones. El flujo normal del aire por convección natural es de abajo hacia arriba a causa de la diferencia de densidades del aire de proceso y del ambiente. Sin embargo, en la etapa de amarillamiento el aire de proceso se empieza a ganar humedad como consecuencia del sudamiento de la hoja, se vuelve más pesado y se enfría, lo cual hace que el aire descienda y el papel de la hermeticidad sobre la parte superior del horno es importante. Una fuga 290 cm² (el equivalente a media hoja tamaño carta) puede hacer perder 10% de energía en todo el proceso³⁸.

³⁸ www.bulktobac.com/energy.html

Los materiales para la construcción de los hornos tradicionales ó convencionales son materiales comunes de la construcción. Éstos materiales tienen la ventaja de ser muy económicos, fáciles de conseguir aún en riveras municipales apartadas de las grandes urbes y su facilidad de construcción. La forma como son construidos los hornos no ha sido normalizada en su totalidad aunque existen reglas mínimas de dimensión; los pegues entre el techo y la pared, entre la puerta y su marco, las ventilaciones superiores e inferiores tienen fugas como se muestran en la Figura 8 del apartado Hermeticidad.

Figura 73 Flujo de aire por convección natural en un horno convencional de curación de tabaco



En condiciones normales cuando el aire es ascendente, si se tienen bien cerradas las ventilaciones inferiores y algo abiertas las superiores, no habrá escape de humedad significativo en el horno y tampoco una circulación de aire significativa ya que al mantener cerradas las ventilaciones inferiores no se reemplaza el aire húmedo por aire fresco del ambiente y se empezaría a ver una pérdida de humedad localizada

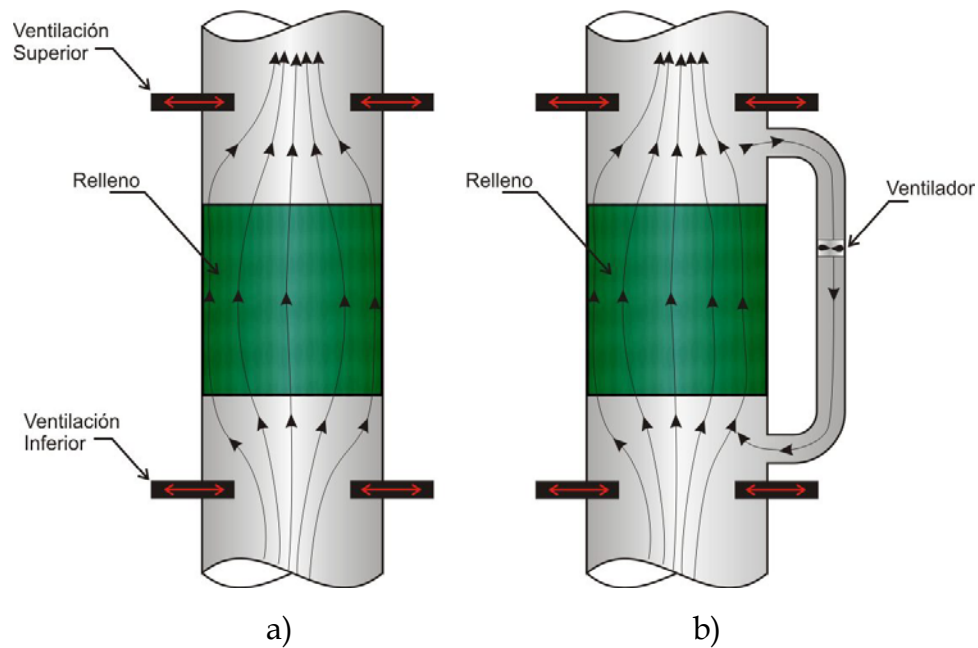
por encima de la masa de tabaco cuando se forme el estado de equilibrio entre las condiciones termodinámicas del aire de proceso y el ambiental. Esto quiere decir que la operación de las ventilaciones superiores no es muy crítica en la etapa de amarillamiento cuando hay un muy buen diseño de las puertas y ventilaciones. Si hay fugas en la parte inferior del horno, especialmente en la zona del plénum, las corrientes de aire empiezan a ascender renovando el aire húmedo por el ambiente que viene seco y la humedad se pierde por las ventilaciones superiores, fenómeno que se ve casi en todos los hornos en las primeras etapas de curado. El aire de proceso muy seco puede generar fijación de color verde en la hoja, cosa que es indeseable en el tabaco.

Para entender mejor qué es lo que sucede con el flujo de aire dentro del horno, se puede hacer una analogía más simplificada mediante el modelo de la Figura 74. El potencial de flujo en ambos casos siempre será la *presión*, que en el caso de los hornos convencionales es la presión atmosférica que empuja el aire hacia arriba sobre el aire menos denso y caliente. La condición del relleno es muy importante para saber lo que pasa con el flujo, tanto en cantidad como en uniformidad; el aire siempre tiende a ir por áreas de poca resistencia al flujo, y es por eso que es muy importante el cargue del horno.

En un horno de tabaco, se establece un buen flujo (importante para secar el tabaco) siempre y cuando estén las tres condiciones siguientes:

- ✚ Las ventilaciones (superiores e inferiores) tengan algún grado de apertura acorde a la etapa que se esté manejando, la rata de secado y el sudamiento de la hoja. En general, es más difícil extraer la humedad de la vena que de la lámina, por tanto se necesita más flujo y menos humedad del aire para secar la vena.

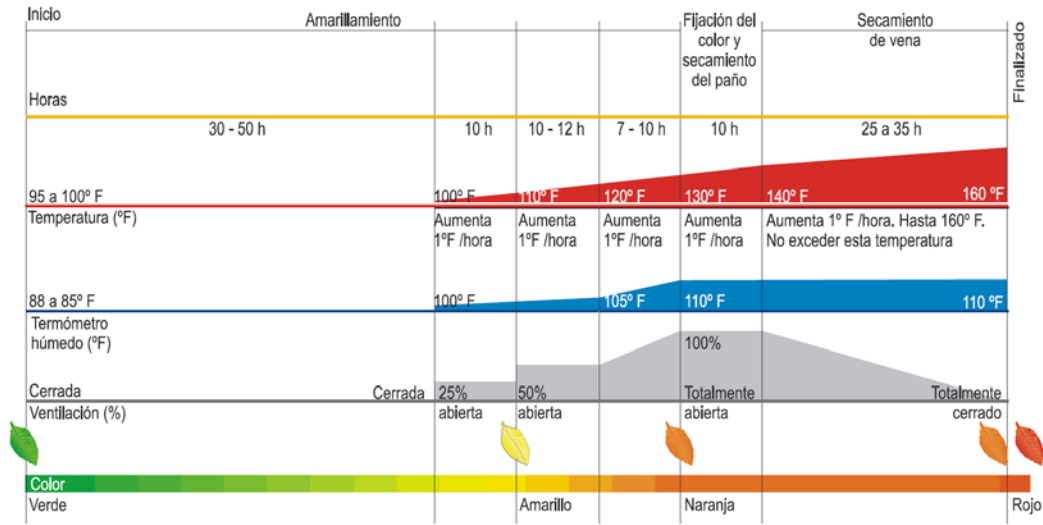
Figura 74 Analogía de flujo entre un horno convencional de tabaco, a) convencional; b) con recirculación



- ✚ Que haya un potencial de flujo que en este caso lo da la diferencia de temperaturas (y por tanto de densidad) entre el aire de proceso y el ambiente.
- ✚ Que el relleno propicie el paso del aire de una manera uniforme y óptima, y para ello es importante cargar muy bien el horno. Una reducción de un 5 o 10% en la cantidad de tabaco en el horno puede ayudar enormemente en el flujo suficiente de aire³⁹.

³⁹ <http://www.cpes.peachnet.edu/tobacco/retrofitinfo.htm>

Figura 75 Estándar de operación de las ventilaciones de un horno convencional.

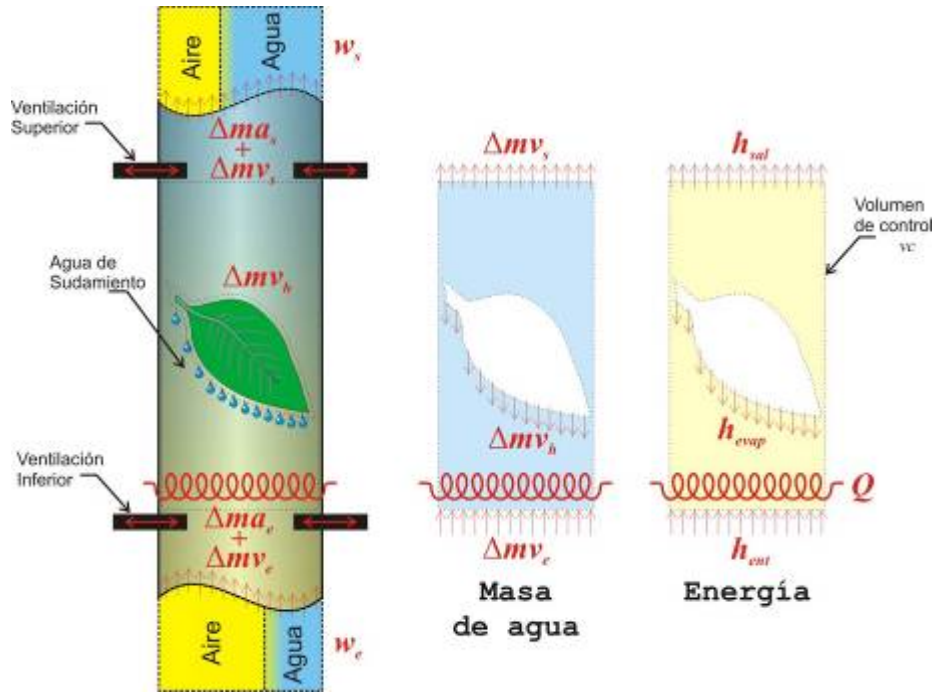


Fuente: Sena, regional Santander. 2005

Una de las etapas de mayor cuidado es la de secado de lámina. En esta etapa es muy importante no dejar enfriar el horno y mantener la ventilación. Cualquier condición que se viole puede acarrear consecuencias muy malas para la calidad del tabaco. Por esto, algunos científicos han recomendado cierta cantidad mínima de caudal de aire para esta etapa. Bennett (1963) recomienda un flujo de aire de al menos 40 pies cúbicos por minuto por cada pié cuadrado de espacio en el piso del horno (esto es 0.0188779 m³/s por cada pié cuadrado de piso de horno) y además una presión estática de 0.5 pulgadas de agua para la misma etapa. Para etapas anteriores, se recomienda una presión estática mayor equivalente a 0.8 a 1 pulgada de agua y 0.1 a 0.3 pulgadas de agua para la etapa final. Cundiff (1983) recomienda 30.7 pies por minuto (0.1524 m/s) de velocidad sobre la hoja para secarla de una manera apropiada. Para compensar variaciones de temperatura y humedad, es preciso tener flujos de aire entre un 10 y 50% mayores a los recomendados⁴⁰.

⁴⁰ Heat-Pump-Dehumidification During the curing of Flue-cured Tobacco. The Georgia Agricultural Experiment Stations. Research Bulletin Number 439. June 2003.

Figura 76 Balance de masa de agua, aire seco y volumen de control para un horno convencional



Un cálculo de la FAO⁴¹ puede estimar la cantidad de caudal presente en el horno. La Ecuación 28 es una ecuación empírica que se usa para calcular la cantidad de aire necesaria para transportar la cantidad de calor y humedad, donde \dot{V} es el caudal en m^3/min , m_Q es el consumo energético requerido para secar el producto en kcal/h , ΔT es la diferencia de temperaturas en $^\circ\text{C}$ entre el aire ambiente y el del proceso y 17 es la constante de Foster.

Ecuación 28 Cálculo del caudal de aire de proceso en el horno de tabaco

$$\dot{V} = \frac{m_Q}{17\Delta T}$$

⁴¹ Secado de granos y secadoras: <http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S03.htm>

Tabla 47 Cálculo del caudal de aire de proceso en función de las etapas de secado

Etapa	Masa de agua a retirar (kg)	Consumo energético ⁴² \dot{m}_Q (kcal/h)	Temperatura del proceso ⁴³ (°C)	\dot{V} (m ³ /min)
Amarillamiento	43.80	43313.18	109.00	32.25
Marchitamiento	346.49	340116.58	127.00	206.26
Secado Lamina	116.02	112707.52	150.00	55.25
Secado Vena	28.83	27590.30	165.00	12.02

Base de cálculo: Tabaco Mediamata; Tamb=30°C.

El caudal en secado de lámina da 0.92 m³/s. Comparando este resultado con el recomendado según el criterio de Bennett, el caudal debería dar 8.585 m³/s; según el criterio de Cundiff y un área base de horno de 42.25m², el caudal debería dar 6.438m³/s. En ambos casos, el caudal de aire presente en los hornos es muy inferior al recomendado. El tiro del aire de proceso por convección natural es muy bajo.

❖ *Uniformidad*

El problema de la uniformidad ha sido el principal dolor de cabeza en la calidad del tabaco ya que se presentan disparidades en la programación de cada punto del horno y en consecuencia temperaturas y tiempos no benéficos para curar el tabaco adecuadamente. Los horneros hacen los mayores esfuerzos por mantener un gran porcentaje de volumen de tabaco en las etapas óptimas y muchas veces se enfrentan ante el dilema de sacrificar zonas donde el tabaco ha estado frío. El ejemplo más claro de la desuniformidad de los parámetros de la curación en la aparición del tabaco clase K4, el cual se genera siempre en los puntos fríos del

⁴² Cálculo a partir de los datos del apartado 3.2.1 Calor teórico requerido para curar tabaco

⁴³ Temperatura promedio teniendo en cuenta los “escalones”

horno cercano a la las paredes y en las esquinas. Los horneros por lo general diagnostican siempre las condiciones del tabaco en estos lugares como punto de referencia para el proceso⁴⁴ y es por eso que muchas veces el tiempo de curado se prolonga más de lo normal esperando a que el tabaco en dichas zonas alcance una buena calidad.

El problema no radica solamente en no tener la temperatura adecuada sino también en mantenerla en el tiempo que es necesario. Un tabaco verde por ejemplo puede producirse por un amarillamiento y marchitamiento muy rápidos; un amarillamiento muy prolongado puede dar una coloración pálida a la hoja; un secado de lámina muy rápido puede precipitar la humedad de la hoja más adelante en la etapa de mayor temperatura, manchándola.

Se ha demostrado que las tuberías no calientan uniformemente y el fenómeno de la convección natural es mayor cuando más caliente está la tubería; en otras palabras, el tiro de aire dentro del horno tampoco es uniforme. Otro aspecto para tener en cuenta es la característica del relleno (o la masa de tabaco en el horno) va cambiando a medida que se va dando el proceso de secado, y si el secado no es uniforme, las condiciones del relleno tampoco lo son. El efecto de no calentar uniformemente es un efecto multiplicativo, ya que, como se dijo en el apartado anterior Hermeticidad y flujo de aire, la resistencia al flujo va disminuyendo a medida que transcurre el proceso, y si hay zonas con secado tardío, es muy probable que en dichas zonas la resistencia al flujo sea más grande.

⁴⁴ Las condiciones del tabaco son muy importantes en el proceso de curado ya que en función de ellos es que se programan las etapas. Estos requisitos son: color, textura, humedad y sebosidad, condiciones que son logradas también con buenas prácticas desde el lote.

La Universidad de Georgia estudió este fenómeno en los estudios de conversión de hornos Fire-cured a Flue-cured estudiando además la incidencia de los parámetros de curación en la generación de nitrosaminas; ellos suponen unos perfiles de temperatura y humedad dentro de la cámara como lo muestra la Figura 77 y la Figura 78.

Figura 77 Perfil de temperatura en la cámara de curado en un horno sin presencia de viento

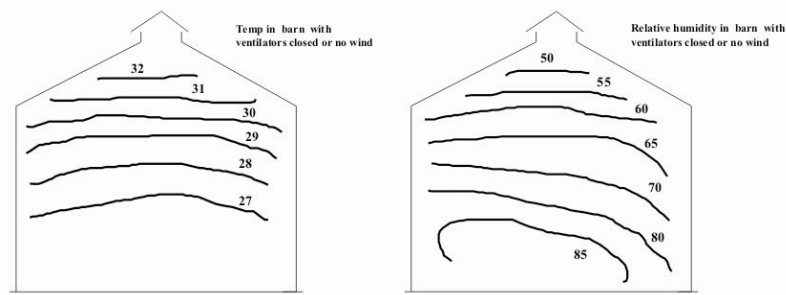
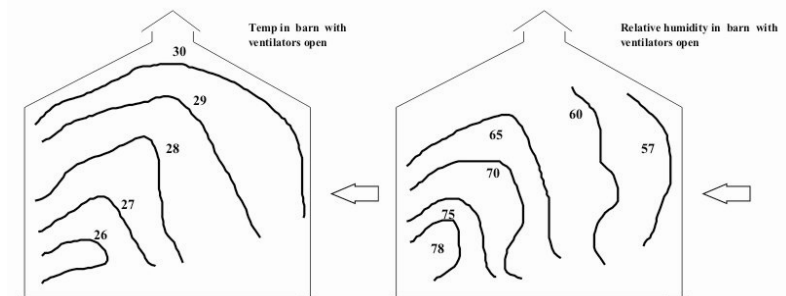


Figura 78 Perfil de temperatura en la cámara de curado en un horno con presencia de viento



Los datos tomados en la superficie de la tubería en la toma de datos del 2004 en el departamento del Huila han concluido coincidentemente que la zona más caliente del horno está en la zona central, tal como se muestra en la Figura 80. Para ello, se recomienda no tener el psicrómetro en la zona central del horno sino un poco más adelante para no medir puntos calientes sino una condición promedio de la cámara.

Figura 79 Ordenamiento espacial de los datos de temperatura superficial en los tubos

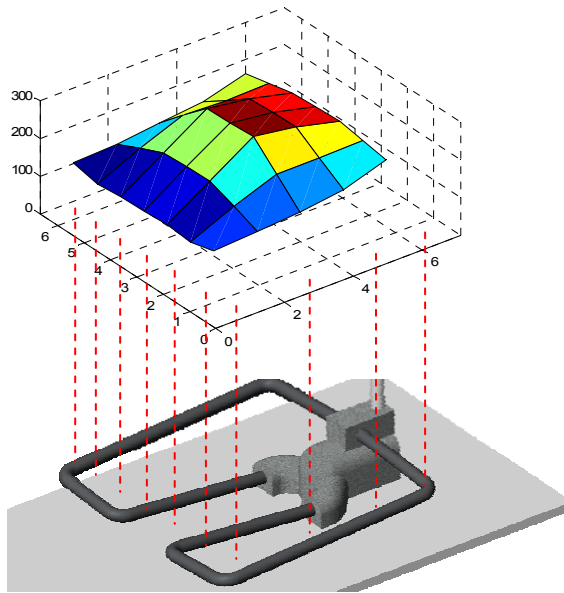
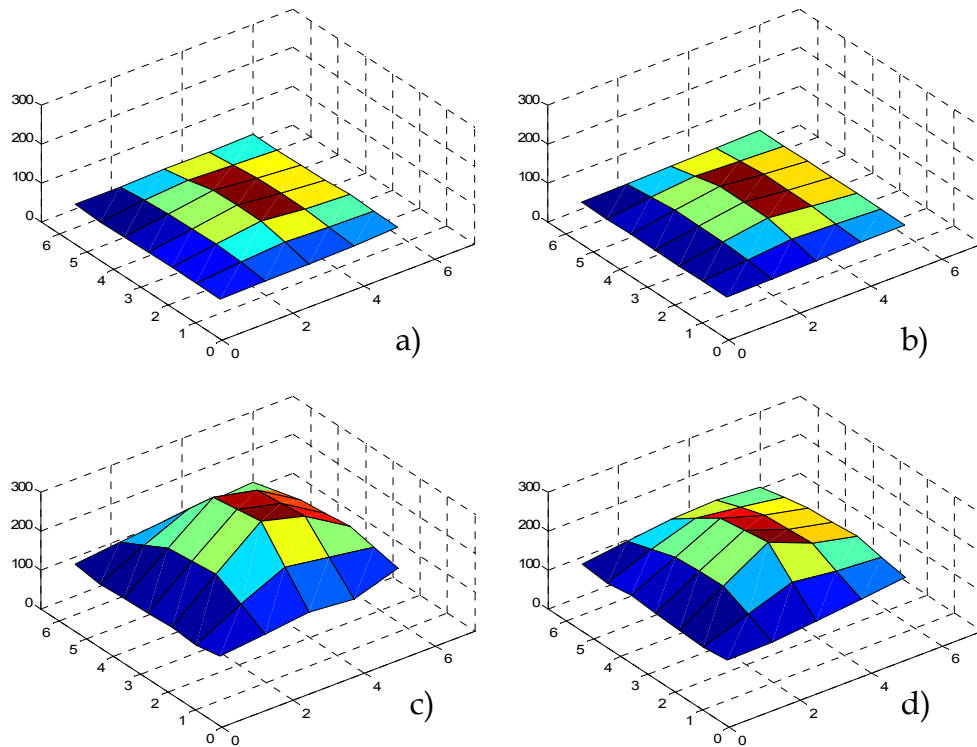


Figura 80 Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) en los tubos en función de las etapas de curado: a) amarillamiento; b) marchitamiento; c) secado de lámina; d) secado de vena.



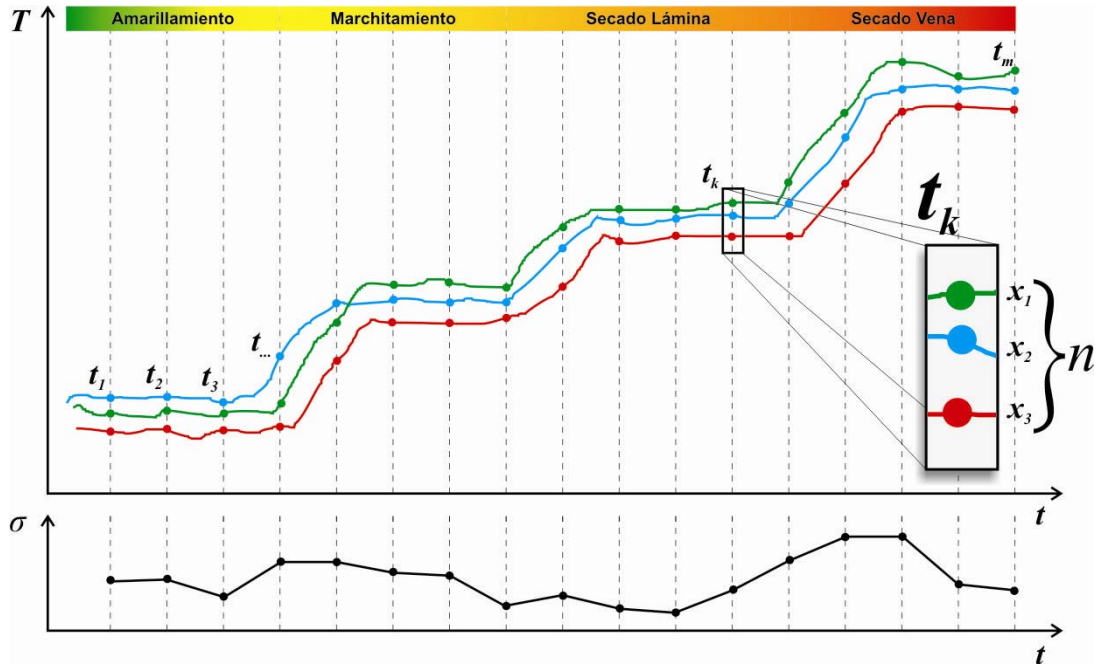
En la teoría de intercambiadores de calor, la caída de temperatura a lo largo de los tubos es una condición necesaria para la transferencia de calor desde el fluido caliente (que en este caso serán los gases de la combustión de la hornilla) al fluido frío (el aire de proceso que está en contacto con el tabaco). Una caída grande de temperatura sería muy benéfica desde el punto de vista energético ya que se estaría usando aún más el potencial de los gases, pero esta condición debería traer otro problema y es de la falta de uniformidad de las condiciones termodinámicas dentro de la cámara. Si los hornos convencionales se siguen trabajando como se trabajan actualmente, debería haber un punto intermedio en la que la relación costo/beneficio está compensada por un ahorro en el combustible y una creciente calidad del tabaco curado con una cámara más uniforme.

Una herramienta estadística puede ayudar a comparar la *dispersión* de las medidas de los puntos dentro de la cámara. Se puede calcular la dispersión con base en muchos parámetros estadísticos, entre éstos están: la desviación media Dm , la desviación típica o estándar σ , la varianza V y el coeficiente de variación CV . Todos ellos ayudan a cuantificar la dispersión de los datos para varios puntos del horno en un momento determinado, teniendo en cuenta que en los ensayos de investigación se han colocado varios sensores UMMI extendidos en varios puntos dentro del volumen de tabaco.

Para continuar vale la pena anotar que estos cálculos no tienen validez significativa si no se comparan con hornos de diferentes características (como hornos Bulk-curing o instalaciones convencionales con recirculación).

La desviación estándar σ se puede calcular por la Ecuación 29, donde n es el número de sensores que se colocaron en la cámara.

Figura 81 Método de cálculo de la dispersión de las temperaturas en el proceso



Ecuación 29 Definición de desviación estándar σ

$$\sigma(k) = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_i - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Ecuación 30 Definición de media o promedio

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n}$$

Para los datos recolectados en los ensayos de Fonseca (La Guajira) en el año 2004, se colocaron seis sensores UMMI y ocho sondas de modo que se colocaron en diversos puntos de la cámara. Para este caso entonces, $n=8$ y m es igual al número de muestras tomadas a lo largo del proceso que fueron $m=23$ (Figura 81).

La Figura 82 y la Figura 83 son datos tomados de un horno convencional; la Figura 84 y la Figura 85 son datos tomados con el proyecto de recirculación RAF

(Recirculador Aire Fonseca, ver 4.1.1 Proyecto RAF). Se puede apreciar que en el horno con recirculación la desviación disminuye, logrando pasar de una desviación de 12 a 3 °F para temperaturas, y de 14 a 7% en humedad relativa. La desviación en todas estas gráficas se muestra con la línea gruesa inferior de color negro.

Figura 82 Distribución de temperaturas en la cámara y desviación $\sigma(x10)$ (°F) para horno convencional

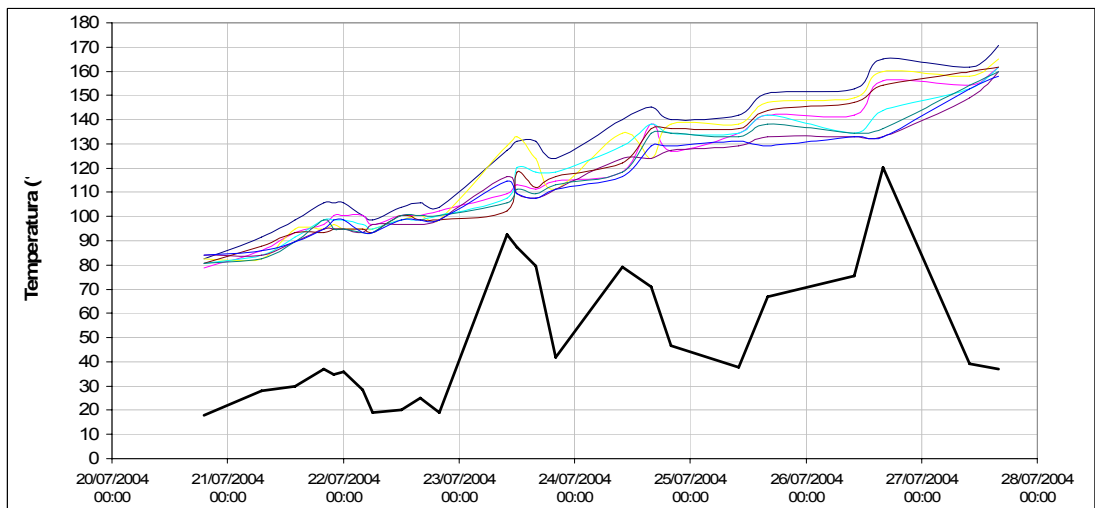


Figura 83 Distribución de humedades en la cámara y desviación σ (%) para horno convencional

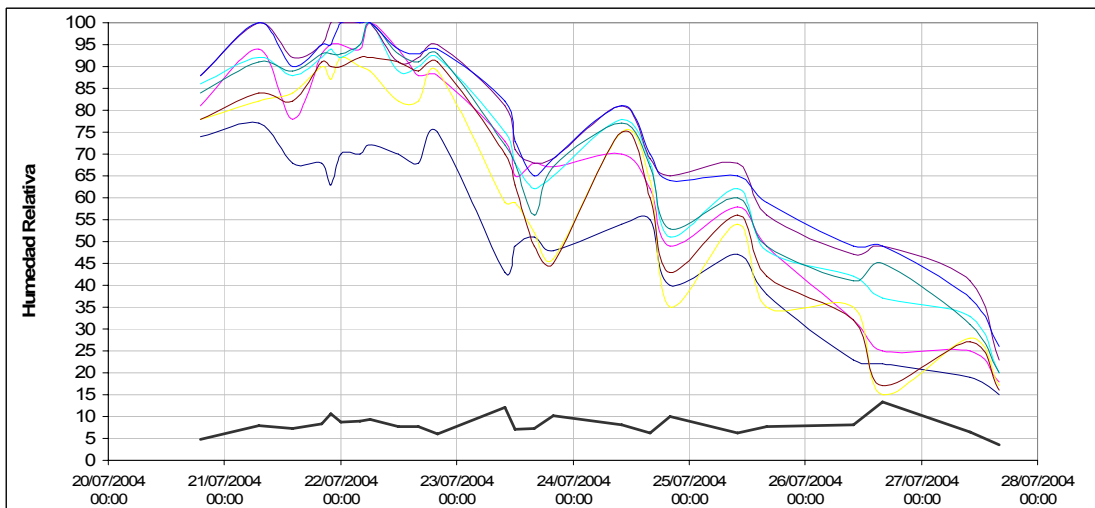


Figura 84 Distribución de temperaturas en la cámara y desviación $\sigma(\times 10)$ ($^{\circ}\text{F}$) para horno RAF

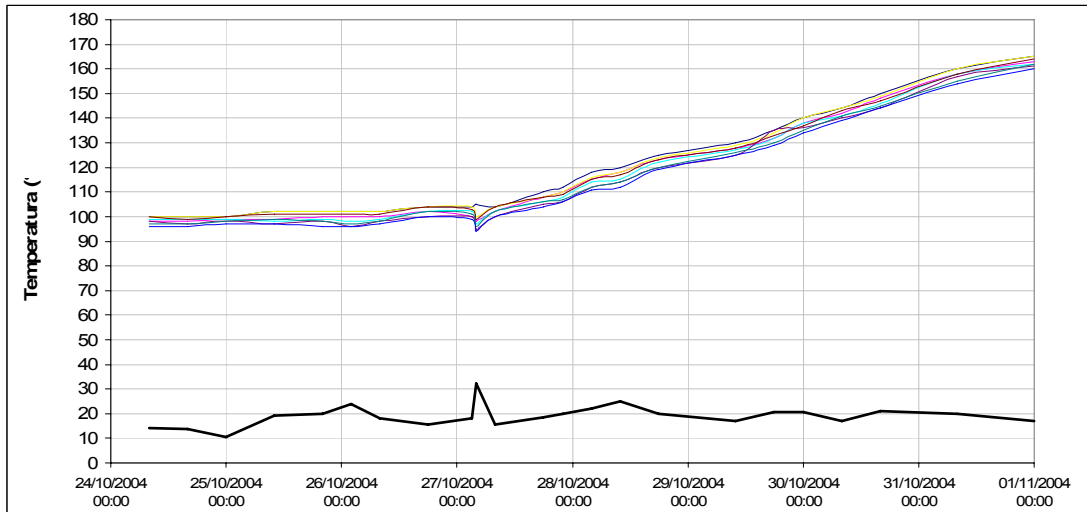
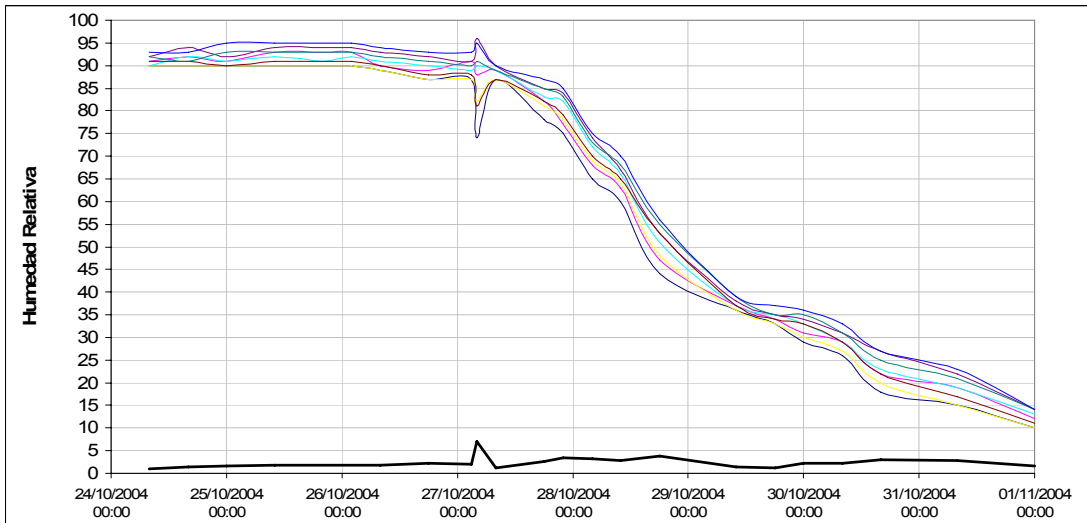


Figura 85 Distribución de humedades en la cámara y desviación σ (%) para horno RAF



❖ *Impacto Ambiental*

Mediante entidades especializadas en el tema, se hizo un estudio isocinético de los gases y análisis ORSAT a los gases de chimenea en el año 2004. El documento completo hace parte de un extenso estudio hecho por la compañía INAMCO

(Ingeniería Ambiental Colombia) el cual se basó en los procedimientos estándares para la realización de los ensayos. Éste estudio se hizo bajo dos tomas de datos, la primera como horno convencional (tiro natural) y la segunda con tiro forzado donde el ensayo del recirculador RAF tuvo lugar (ver apartado 4.1.1 Proyecto RAF). En el ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS ORSAT, Análisis Orsat) se muestran las tablas recopiladas de este informe que reposa en la biblioteca de PROTABACO S.A. San Gil.

Figura 86 Analizador ORSAT colocado en el conducto chimenea



Fuente: INAMCO S.A.

Figura 87 Emisiones contaminantes a la atmósfera



Figura 88 Contaminación del suelo y el ambiente por el carbón

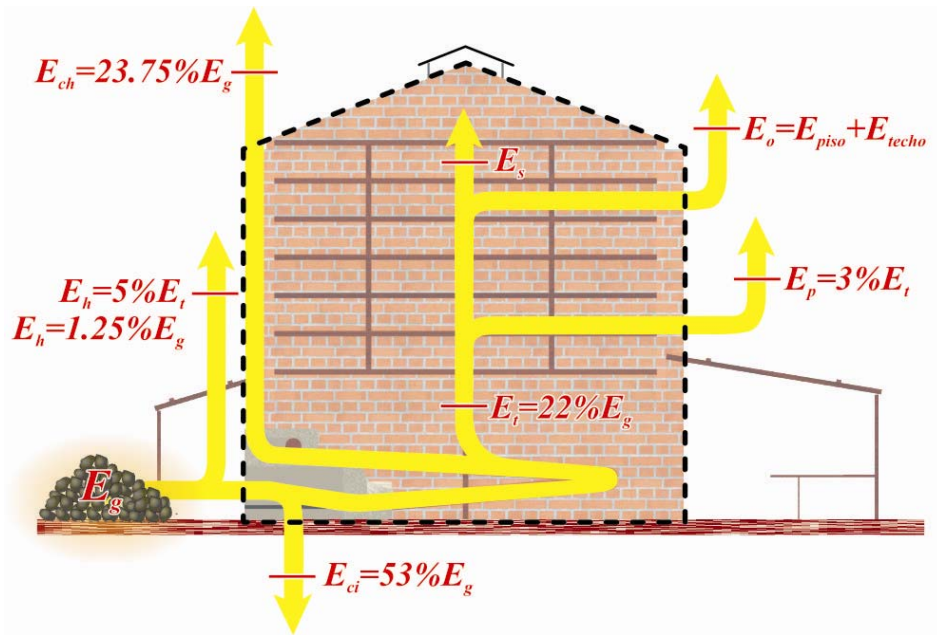


Los hornos de tabaco respetan las normas ambientales excepto la emisión de particulado sólido y la altura de la chimenea. Las formas de contaminación más frecuentes en los hornos son: emisiones de partículas a la atmósfera (hollín), emisiones de otros contaminantes como SO_x y NO_x , contaminación del suelo por las filtraciones de sustancias del carbón que puede afectar las corrientes de agua

cercanas, la contaminación por residuos agrícolas (la miga y socas del tabaco) y el daño al paisaje.

3.2 BALANCE ENERGÉTICO DE UN HORNO DE TABACO VIRGINIA

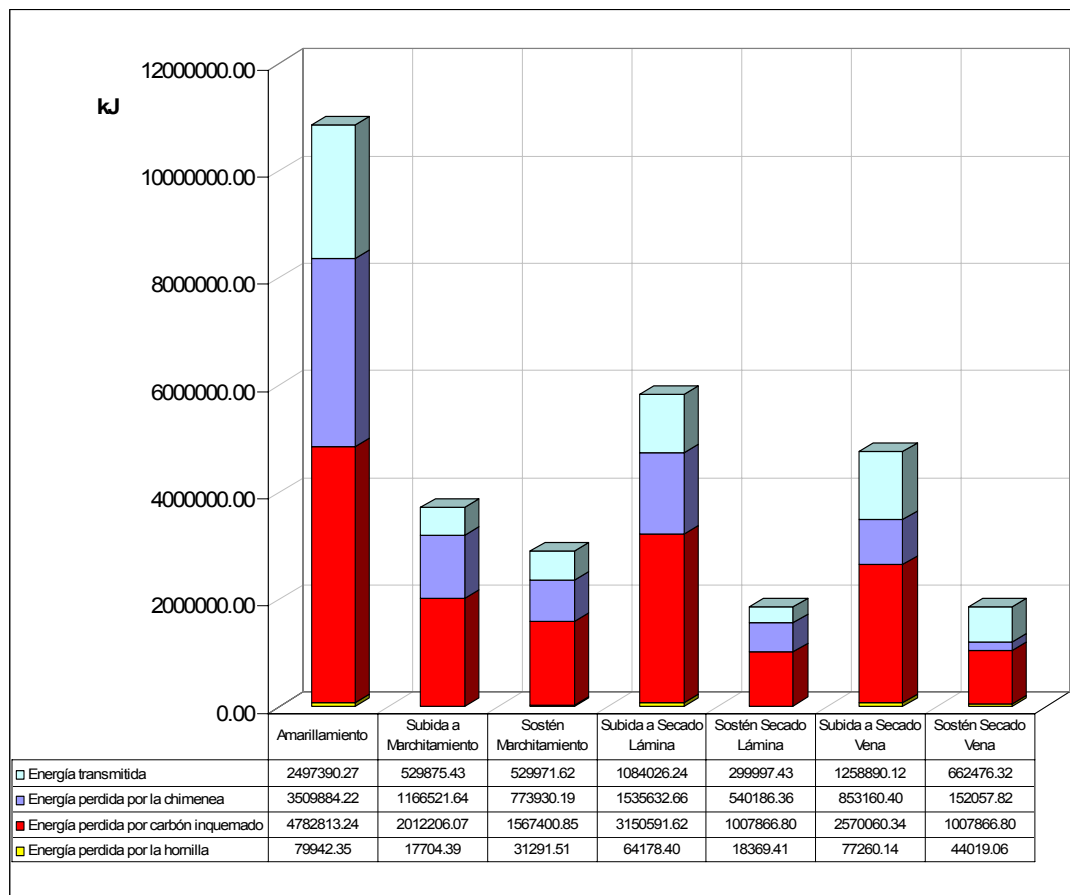
Figura 89 Diagrama de energía en un horno de tabaco



El diagrama de flujo de energía de la Figura 89 muestra esquemáticamente la cantidad de calor que se da en cada uno de los procesos de transferencia de calor, suponiendo que hay un potencial energético E_g del carbón. El análisis de las cenizas de la Tabla 25 de apartado Calidad del carbón y análisis de las cenizas, hecho por INGEOMINAS muestra que el 53% de este carbón no se quema, reduciendo enormemente este potencial. Parte del calor generado se pierde al ambiente por medio de la hornilla (E_h) por radiación y convección hacia el ambiente. Los gases siguen su curso y transfieren el calor E_t a la cámara, del cual sólo un 22% pasa al tabaco y el otro 23.75% se pierde por la chimenea (E_{ch}) a causa

de la alta temperatura de los gases. Un porcentaje pequeño (3%) de la energía transmitida E_t se pierde por las paredes de ladrillo⁴⁵ (E_p); un porcentaje desconocido se pierde por el techo y el suelo (E_o) y el resto lo consume el proceso de curado (E_s). En la Figura 90 se puede apreciar que los máximos consumos ocurren en las elevaciones de temperatura (subidas). La cantidad E_s del proceso de curado se estima en el apartado siguiente 3.2.1 Calor teórico requerido para curar tabaco.

Figura 90 Distribución de la energía potencial del carbón E_g en función de las etapas de curado en el monitoreo de un horno convencional



⁴⁵ Los cálculos fueron hechos para pared de ladrillo hueca, que es el material más común de los hornos. Otras configuraciones de ladrillo pueden variar este porcentaje

Para evaluar la eficiencia de un horno de tabaco es necesario calcular la energía que se necesita para curar la hoja E_s .

3.2.1 Calor teórico requerido para curar tabaco

El calor necesario para curar y secar la hoja de tabaco se puede calcular mediante el conocimiento de la cantidad de agua a evaporar. La hoja de tabaco en el lote tiene entre un 60 y 65% de agua entre sus tejidos, una cantidad de agua relativamente pequeña comparada con la de muchas otras plantas; los procesos de fertilización, cape, deschuponado hacen que la planta convierta toda su energía vital para hacer crecer la hoja, se contribuye a que la cantidad de materia seca sea mayor, logrando que la hoja tenga más cuerpo. Un día antes del proceso de curado, cuando las hojas del piso foliar a recolectar sueltan una coloración amarillenta, es necesario agregar riego para evitar que en el proceso de curado la hoja convierta pobremente los azúcares y dé una coloración grisácea; en este punto, la hoja tiene un 80% de agua, la cual una parte se necesita en el proceso biológico del curado (amarillamiento) en reacciones de hidrólisis para convertir el almidón en azúcar (ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Cambios bioquímicos). Por otro lado, la reacción de conversión de azúcares es una reacción exotérmica. Estas dos últimas condiciones del proceso hacen que calcular el calor requerido no sea exacto para etapa de amarillamiento y parte del marchitamiento donde la hoja está viva.

Para aproximar la cantidad de calor requerido en un proceso de curado, es necesario conocer la curva de secado el producto. Se sabe que la humedad de la hoja pasa de un 80% en la recolección a un 7% en la etapa de secado de vena (ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO,

Etapas), alcanza mas o menos un 9% en equilibrio con el ambiente y finalmente un 17% en el acondicionamiento para la venta.

La Figura 91 muestra la curva de secado del tabaco en función de las etapas. Esta curva nos da la cantidad de vapor de agua que se evapora de la hoja según la Ecuación 31. El calor se puede estimar si se conoce la *entalpía de evaporación* h_{evap} en función de la temperatura del proceso con la Ecuación 32. Si se conoce la base de tiempo Δt se puede directamente conocer la energía necesaria para secar la hoja. Según la FAO, el consumo energético de una secadora convencional tipo torre convectiva es de poco más de 1000 kcal por kilogramo de agua evaporada (4.186 kJ por kilo de agua evaporada). Esta cantidad se compone de la siguiente manera (aproximadamente)⁴⁶:

Tabla 48 Composición del calor requerido para secar alimentos

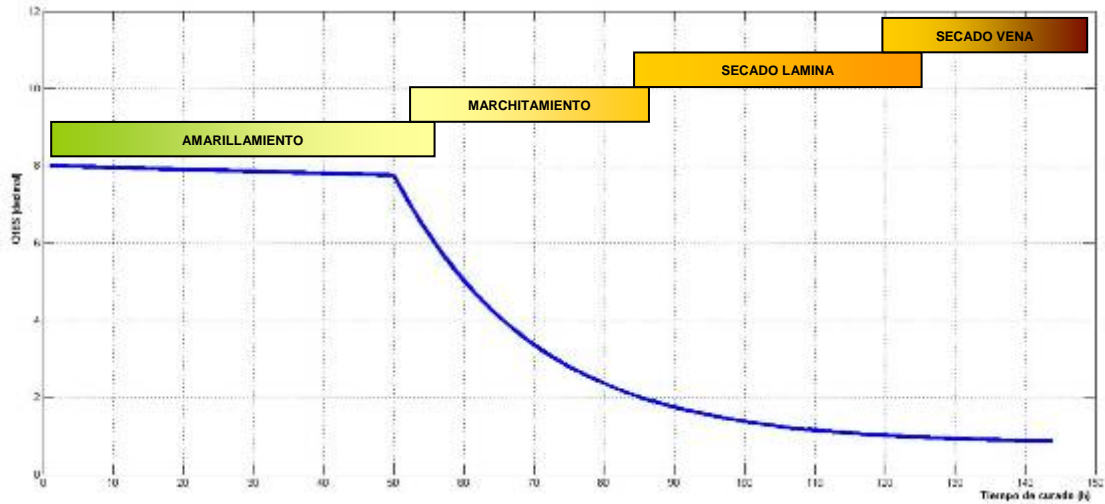
- Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua ⁴⁷	600 kcal
- Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado	300-320 cal
- Pérdida por el calor transportado por el alimento	80 kcal
Total	1 010-1 030 kcal

El cálculo fue realizado mediante un sencillo programa con MATLAB® de Mathworks en donde se crean dos funciones: la primera, para calcular la cantidad de vapor evaporado mediante la curva de secado en función del tiempo y segundo, la entalpía de evaporación en función de la temperatura del proceso. Finalmente el programa multiplica estas dos funciones, siendo la base de tiempo una hora el programa arroja los resultados en [kJ] (Ecuación 32).

⁴⁶ Secado de granos y secadoras. Depósito de documentos de la FAO.

⁴⁷ Este valor se acerca mucho a la entalpía de evaporación del vapor de agua h_{fg}

Figura 91 Contenido de humedad en base seca en función de las etapas de curado



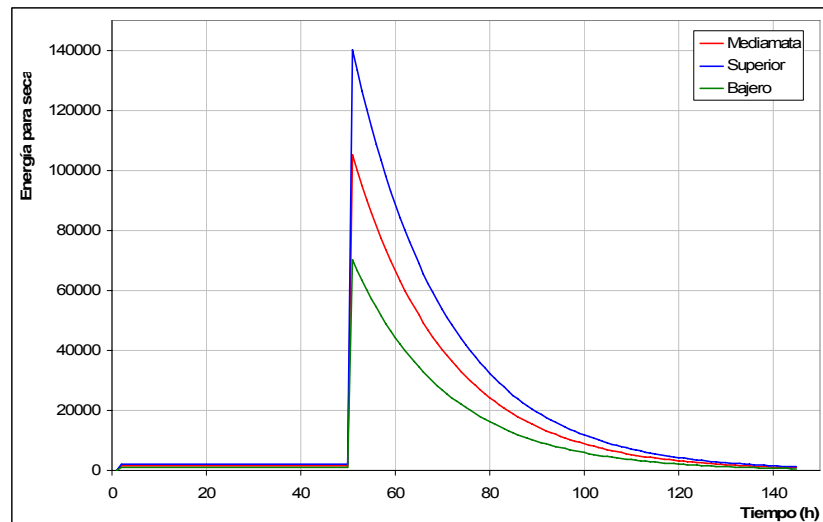
Ecuación 31 Cálculo de la cantidad de vapor retirado de la hoja

$$\dot{m}_{vapor} = m_{seca} \frac{(CHBS(t) - CHBS(t+1))}{10}$$

Ecuación 32 Cálculo de la cantidad de calor requerido para evaporar el agua de la hoja

$$Q[kJ] = m_{vapor} h_{evap} (T(t)) \Delta t$$

Figura 92 Cantidad teórica de energía en kJ necesaria para el secado del tabaco en función del piso foliar



Los parámetros de entrada al programa son los que muestra la Tabla 49.

Tabla 49 Parámetros de entrada para el cálculo del calor requerido para curar tabaco

Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
<i>TiempoTotal</i> ⁴⁸	144	horas	Tiempo total del proceso de curado
<i>Amarillamiento</i>	50	horas	Tiempo de amarillamiento
<i>Marchitamiento</i>	24	horas	Tiempo de marchitamiento
<i>SecadoLamina</i>	30	horas	Tiempo de secado de lamina
<i>CHBS(1)</i>	8		Cantidad de humedad por materia seca, base decimal, inicio proceso
<i>CHBS(tiempo)</i>	0.8		Cantidad de humedad por materia seca, base decimal, fin proceso
<i>masaseca</i>	500	kg	Masa seca de tabaco en bajero
	750	kg	Masa seca de tabaco en mediamata
	1000	kg	Masa seca de tabaco en superior
<i>Patm</i>	101.32	kPa	Presión atmosférica local

La Figura 92 muestra los resultados del cálculo teórico del calor requerido para secar tabaco, E_s . El tabaco superior tiene más contenido de agua y masa seca y por tanto la cantidad de energía para secar es mayor. Se concluye además que el calor requerido para curar tabaco superior es el doble que el necesario para curar tabaco bajero, por tanto es correcto

3.2.2 Estimación de la eficiencia de un horno de un horno de tabaco

Hay dos métodos de evaluación de la eficiencia en cualquier aparato térmico. A primera es un modo directo en donde se evalúa la razón entre en beneficio final (que en el caso es la hoja de tabaco curada y seca) y el consumo energético real suministrado (carbón). La segunda es un modo indirecto, en donde de tienen en

⁴⁸ Estos son tiempos promedios, ya que también varían en función del piso foliar

cuenta todas las interacciones de energía presentes en el volumen de control (teniendo en cuenta fracciones de energía que no necesariamente contribuyen al secado de la hoja) pero que están presentes en cualquier máquina térmica como calor residual a causa de una transferencia de calor incompleta.

Tabla 50 Relación entre la cantidad de energía teórica para secar y la cantidad suministrada al horno

Tabaco	Carbón/Tabaco Seco	Tabaco Seco (kg)	Carbón total estimado (kg)	<i>E_g</i>	<i>E_s</i> (calculado)	<i>E_s/E_g</i>
Bajero	2	500	1000	31107000	1461830.00	4.699
Mediamata	2.5	750	1875	58325625	2192740.00	3.759
Superior	3	1000	3000	93321000	2923690.00	3.132

El cálculo de la eficiencia (modo directo) para un horno según las consideraciones anteriores es de máximo un 5%.

3.3 ÁRBOL DE POSIBILIDADES DE MEJORA

Teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico, se da la necesidad de implementar tecnologías, métodos y procedimientos para mejorar en aspectos que tienen que ver con:

- ✚ Mejoramiento de las actuales infraestructuras de curación y asegurar una mejor eficiencia energética.
- ✚ Implementación de otras tecnologías nuevas en el ámbito de la curación de tabaco.

- ✚ Mejorar la capacitación de los jornales y horneros en el manejo de las infraestructuras y trabajos relacionaos con el lote y los hornos. Manuales de horneo.
- ✚ Estudiar la posibilidad de utilizar fuentes alternas de energía como la biomasa, la energía eólica, solar entre otras, reduciendo los costos que tienen que ver con combustibles.

Para ello, el departamento de Investigación y Desarrollo de PROTABACO S.A. ha hecho convenios de cooperación técnica con la Universidad Nacional, la Universidad Industrial de Santander, el SENA y otras industrias colombianas como INGESEC LTDA. Por medio de estos convenios se han hecho estudios de factibilidad y construcción de diferentes prototipos en pro de mejorar los procesos de curado y la calidad del tabaco. Con el SENA se han hecho capacitaciones y módulos de competencias para calificar a los jornales. Algunos frentes de ataque de las ineficiencias en este estudio ya se han implementado. La Figura 93 muestra las propuestas de mejora hechas por el departamento de Investigación y Desarrollo de PROTABACO S.A. con base en criterios como:

- ✚ Factibilidad económica y funcional.
- ✚ Rápido retorno de la inversión. Inversión baja. Baja relación costo/beneficio.
- ✚ Facilidad de montaje y construcción.
- ✚ Ahorro de energía térmica y eléctrica.
- ✚ Tendencias internacionales.

Para este proyecto y en concertación grupal, se ha decidido por sacar las posibles opciones de mejoramiento de los hornos y caneyes. El tema de la práctica industrial (el cual hace parte este proyecto) se planteó al principio como un estudio generalizado de los sistemas de curación en Colombia, que involucran los sistemas

air-cured, flue-cured y bulk-cured. En los objetivos del anteproyecto se vio la necesidad de particularizar y especificar más a fondo el frente de ataque a la problemática, consolidándose finalmente como un rediseño a los hornos de tabaco Virginia. Estos estudios ven las mejoras de los hornos desde el punto de vista térmico y mecánico (aislamiento, combustión, transferencia de calor, etc.).

La implementación de hornos nuevos supone una inversión más grande que no es atractiva a corto plazo. Además, los modelos Bulk-curing están apenas siendo investigados en la primera fase del convenio de explotación. Otras propuestas de hornos Bulk-curing importados fracasaron por no acoplarse al contexto energético nacional; el uso de ACPM y gas disparaba los costos de producción. El uso de energías alternativas está en propuesta. Modificar algunas características geométricas de los hornos es un problema más sencillo y opciones de mejoramiento que puede ser abordado en otros proyectos más pequeños.

3.3.1 Soluciones inmediatas

Específicamente en este proyecto se trabajaron dos frentes de ataque al problema energético mirando los siguientes puntos:

- ✚ Continuar con la misión y visión de la compañía PROTABACO S.A. como una de las mejores compañías productoras y comercializadoras de tabaco de Colombia atendiendo al mejoramiento de la calidad del tabaco, de sus trabajadores y del entorno.
- ✚ Que los elementos construidos o modificados ataquen gran parte de la problemática total que se mostró en el diagnóstico de los hornos.
- ✚ Los elementos construidos o modificados hagan parte del banco de proyectos de mejora de PROTABACO S.A. donde se da continuidad a los

anteriores proyectos como evolución sistemática del conocimiento o que abran nuevos campos a la investigación en temas de curación de tabaco.

- ✚ Los proyectos que se construyan fueran de tipo *modular*, ya que la compañía PROTABACO S.A. los construyen en el municipio de San Gil por ser un proyecto correspondiente a la UAG (Unidad Agroindustrial) y que posteriormente fuera transportada al sitio de interés, en Capitanejo (Santander) o en algún municipio tabacalero del departamento del Huila.
- ✚ Los prototipos de construcción deben ser ensayados en hornos de propiedad propia y usando el tabaco del lote del agricultor. En caso de daño o disminución de la calidad del tabaco, PROTABACO S.A. indemnizará al propietario del tabaco en una diferencia de precio entre el promedio de la cosecha y el precio de la curación con la mejora.
- ✚ Los prototipos deben ser bastante económicos y muy fácilmente montables, con una invasión mínima a las infraestructuras, ya que la idiosincrasia de los trabajadores tabacaleros no permite incursionar rápidamente con la solución del problema si no se cumplen estos requisitos.
- ✚ Que el tiempo de ensayo no fuera más extenso que el tiempo determinado por las condiciones del convenio entre la Universidad Industrial de Santander y PROTABACO S.A. específicamente con el tiempo de trabajo de su(s) investigador(es). Los prototipos seguirán siendo investigados y/o mejorados en las siguientes cosechas.
- ✚ Tener en cuenta las posibilidades de energía y servicios en las fincas tabacaleras y sus características.

Estas mejoras pueden desde el punto de vista operacional son:

- ✚ Colocar un tamaño de carbón mediano o grande, acorde al tamaño de cada parrilla en particular⁴⁹ y en lo posible, si se puede afinar el carbón, usar aire forzado en la hornilla.
- ✚ Atizar los hornos cada 1.5 o 2 horas en etapa de amarillamiento y cada 30 o 45 minutos para las etapas de mayor temperatura. Atizar con más frecuencia puede ocasionar pérdidas al ambiente por la apertura de la hornilla cada momento, y atizar menos frecuentemente puede hacer caer la temperatura del horno obligando a suministrar grandes cantidades de combustible posteriormente aumentando las posibilidades de tener carbón inquemado, hollín en la tubería y pérdidas de calor por la chimenea.
- ✚ Mantenimiento cada programa para quitar la película de hollín en la tubería.
- ✚ Contratar un tamaño de carbón, en lo posible, grande en la compra.

Las mejoras desde el punto de vista de diseño de los hornos se pueden resumir:

- ✚ El problema energético de los hornos podría solucionarse con modelos de recirculación, los cuales incrementan el caudal de aire generando más turbulencia en el relleno y haciendo menor la dispersión de las condiciones de curado y también, aumentando el coeficiente de convección externa en los tubos.
- ✚ El problema de la mala combustión puede ser atacado mediante: 1) construcción de parrillas más pequeñas (a la cuarta parte, para carbón), lo que implica mejorar la transferencia de calor por la tubería con aletas u otros dispositivos.

⁴⁹ Para parrillas a carbón se puede recomendar un tamaño de bloque dos veces la separación de las varillas de la parrilla, según lo recomendado en las pruebas de horno modular en el municipio de Campoalegre Huila.

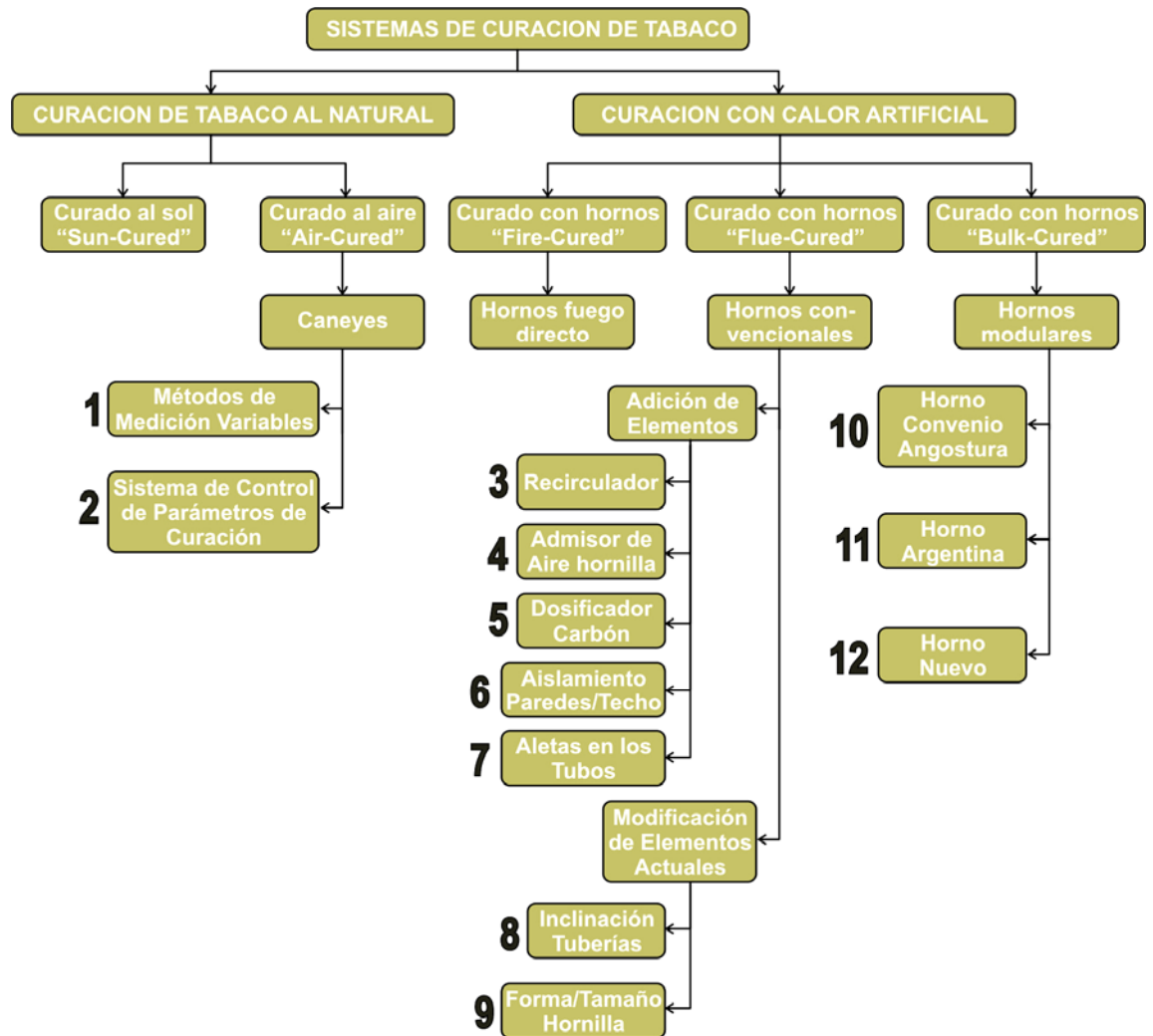
- ✚ Construir el hogar de la hornilla más grande (un 20% más), aumentando el tiempo de residencia de los gases y aumentando la probabilidad de combustión.
- ✚ Construir una chimenea más alta para acoger las normas ambientales; esto aumenta el tiro haciendo que la relación aire-combustible siga en aumento y es menos deseable porque la energía térmica de los gases se invierte calentar más aire desde la temperatura ambiente. Lo mejor es tener un dispositivo en la hornilla que controle el tiro y por tanto el aire de combustión.
- ✚ Construir un dispositivo que dé mayor turbulencia al aire de combustión y ayude a controlar el tiro en la hornilla (disminuyendo el tiro).
- ✚ Para mejorar la transferencia de calor en la tubería, se propone colocar dispositivos mejorando el coeficiente global de transferencia: aletas, ventilación forzada, tubería de mayor diámetro o aumentar la longitud de la tubería.
- ✚ Aislar el techo y la hornilla es una estrategia bastante útil para ahorrar mínimo 10% combustible, así como colocar una compuerta en la hornilla de mayor espesor.
- ✚ Colocar empaques en la puerta y ventilaciones para mejorar la hermeticidad.
- ✚ Utilizar sensores UMMI para evitar entrar al horno, dañando la salud del operario y causando pérdidas de calor en cada apertura de la puerta.
- ✚ Colocar el psicrómetro en un punto intermedio entre los puntos fríos (paredes del horno) y los calientes (centro del horno) y monitorear el mismo desde afuera colocando una ventanilla de vidrio en la puerta.
- ✚ Colocar una forma plana en la parte superior de la hornilla en vez de una forma arqueada para que el carbón se queme más uniformemente.

Tabla 51 Cuadro de posibilidades de mejora en los hornos versus ventajas

	Mejora la combustión	Aumenta transferencia de calor en los tubos	Reduce pérdidas en fronteras	Uniformiza las condiciones de la cámara	Aumenta el flujo de aire de proceso	Bajo consumo de energía eléctrica	Independiza del control humano	Fácil construcción	Baja inversión inicial
Recirculador de aire de proceso		X		X	X	X		X	X
Admisor de aire hornilla	X	X				X	X	X	X
Dosificador de combustible	X					X	X		X
Aislamiento de paredes y techo			X			X		X	
Aletas en la tubería		X				X		X	X
Hornilla Nueva tipo Bulk-curing	X	X		X	X		X		
Hornos Nuevos tipo Bulk-curing	X	X	X	X	X		X		

Con estos puntos se concluyó según la Tabla 51 incluir en este proyecto de investigación los puntos (3) y (4) de la Figura 93 (recirculador y admisor de aire de la hornilla) a modo de soluciones inmediatas al problema de la calidad del tabaco y los costos de su producción, y los puntos (2), (10), (11) y (12) como anexos al tema de investigación que se tratará más adelante y la propuesta de energías alternativas.

Figura 93 Árbol de mejoras en los procesos de curación de tabaco



3.3.2 Soluciones a largo plazo

Los detalles de estas iniciativas fueron parte del tema de investigación y están sintetizadas en el ANEXO F. IMPLEMENTACIÓN DE HORNOS DE CURACIÓN TIPO BULK-CURING y en el ANEXO G. PROYECTO URE Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS.

4 IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES INMEDIATAS

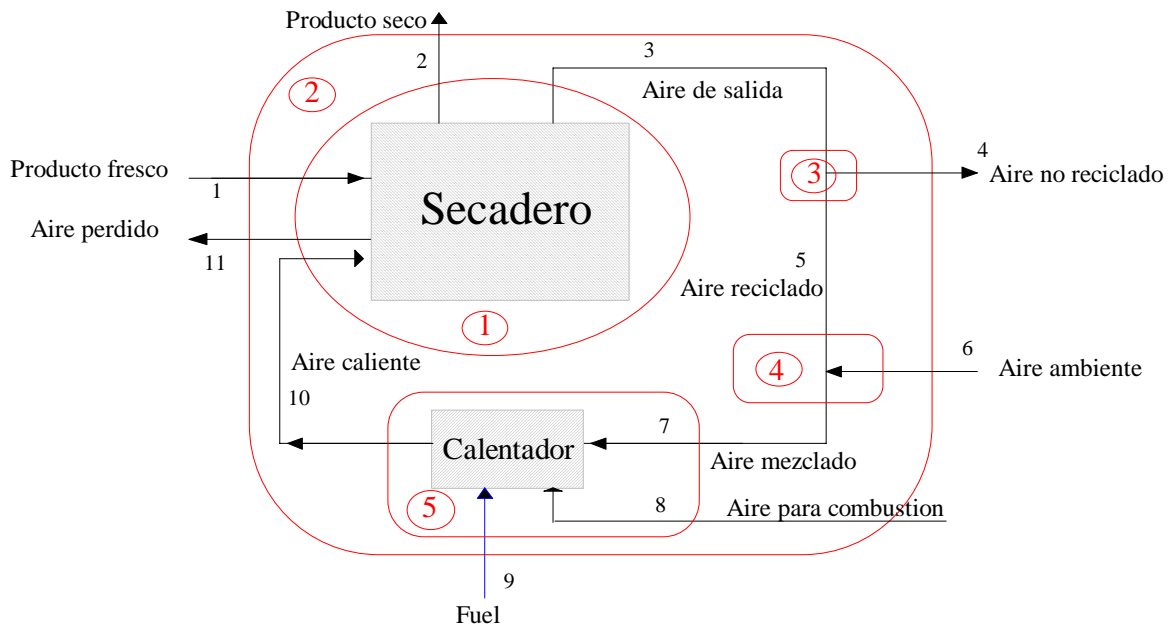
En este capítulo se abordará la parte práctica del proyecto de investigación. De acuerdo a los resultados mostrados en el apartado 3.3.1 Soluciones inmediatas, se describirá el proceso de diseño de los prototipos de *Recirculación de aire de proceso y Admisión de aire de combustión* para la hornilla. Se resume la forma de construcción y montaje de los prototipos en los hornos, la metodología de pruebas hecha para comprobar su eficiencia y por último un cuadro de resultados.

4.1 SISTEMA RECIRCULADOR RHT

El nombre RHT significa Recirculador Horno Tradicional. El sistema de recirculación en los hornos de tabaco en el mundo (ver 2.2 HORNOS DE TABACO EN EL MUNDO) es un método muy práctico de ahorrar energía disminuyendo los requerimientos de calentamiento de aire desde la temperatura de sumidero (en este caso la temperatura ambiental) y la de proceso. Un esquema generalizado de un secadero convectivo cualquiera para secado de alimentos está en la Figura 94. En éstos se aprecia todas las corrientes de aire, materia y combustible presentes en un horno. Si se contrasta el modelo los hornos convencionales de tabaco con el modelo de la Figura 94, se nota que en dichos hornos habrá una ruptura de la corriente número 5 quedando abierta la conexión entre el aire de salida y el aire mezclado. El aire mezclado entonces tendría una condición termodinámica semejante al aire ambiente que estaría a una temperatura mucho menor que el aire mezclado (suposición comprobada si hiciéramos un balance de energía y de masa sobre la mezcla de los fluidos en la cámara de mezcla número 4). Además, la

cantidad de aire ambiente a introducir se haría mucho más grande (y por ende la cantidad de energía requerida) para mantener el flujo de aire necesario sobre el secadero al interrumpirse la entrada de flujo más cálido de la corriente número 5.

Figura 94 Esquema generalizado de un secadero convectivo.



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (España). Herramientas de cálculo en ingeniería de alimentos.

Tabla 52 Corrientes que intervienen en un secadero convectivo generalizado de la Figura 94

Corrientes	Número
Producto Fresco	1
Producto Seco	2
Aire de Salida	3
Aire no Reciclado	4
Aire Reciclado	5
Aire Ambiente	6
Aire Mezclado	7
Aire para la Combustión	8
Fuel	9
Aire Caliente	10
Pérdidas de aire	11

4.1.1 Proyecto RAF

En la compañía PROTABACO S.A. ya se ha trabajado en un prototipo de recirculación concluyendo que es uno de los sistemas que más ataca el problema de la calidad del tabaco y el gasto energético en los hornos. Además del ahorro energético por el simple hecho de recircular el aire, un recirculador aumentaría el coeficiente de convección externa en los tubos del horno. Dicho de un modo más popular, el aire será forzado sobre la superficie de la tubería “robándole” calor. También se logra el aumento de la uniformidad de los parámetros de curación (temperatura y humedad) como fue comprobado en el numeral Uniformidad, disminuyendo la cantidad de tabaco de mala calidad.

El proyecto RAF está mostrado virtualmente en la Figura 96. Éste es de tipo interno y su forma es básicamente prismática. Dentro de él hay uno (RAF 220) o dos (RAF 110) ventiladores axiales SIEMENS dependiendo de las condiciones de energía disponibles en la finca (trifásica o monofásica respectivamente). La característica principal es que intenta “apuntar” el flujo de aire a la primera parte de los tubos (en la salida de la hornilla) aprovechando la alta temperatura de esta zona. También, tiene unos flap o deflectores para regular el caudal de aire recirculado. Uno de los problemas que se tuvo en la operación del recirculador RAF fue la aparición de pintes verdosos en el tabaco a los extremos izquierdo y derecho del horno. Esto quiere decir que había pérdidas de humedad por las fugas y la baja hermeticidad del horno, acompañado de un flujo con falta de uniformidad por el caudal tan angosto en comparación con el ancho del horno.

Figura 95 Esquema del sistema recirculador RAF

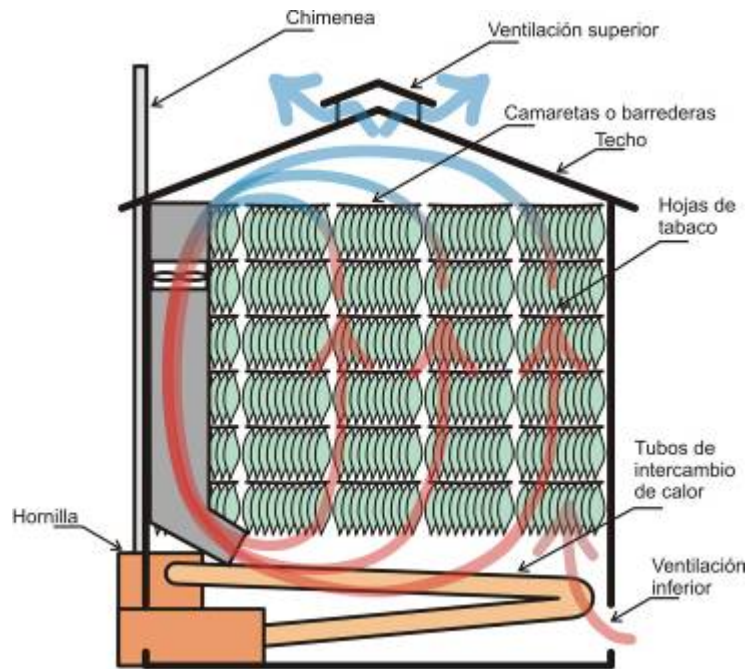


Figura 96 Sistema de Recirculación RAF

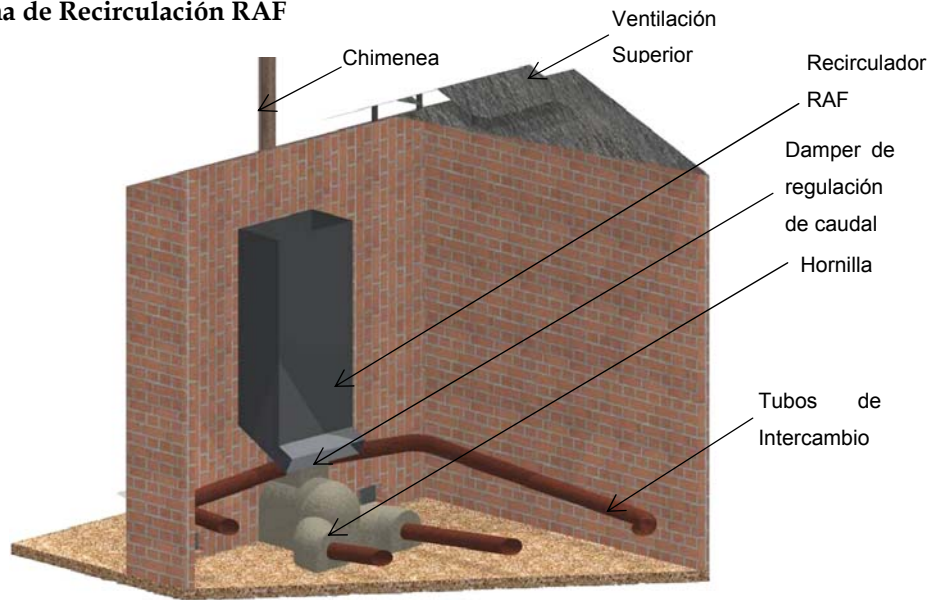


Figura 97 Elementos del recirculador RAF: a) compuertas de entrada de aire fresco; b) cavidades de salida de aire recirculado hacia los tubos; c) flap de regulación de aire recirculado; d) ventiladores axiales SIEMENS monofásicos.



4.1.2 Principio de funcionamiento del sistema RHT

Una mejora ó evolución del sistema RAF es el sistema RHT, que consta de un aparato de mayor complejidad geométrica y es de tipo externo (Figura 99). La forma piramidal y más ancha en la descarga tiene su fundamento en la funcionalidad y criterio de minimizar las pérdidas por flujo del aire.

Figura 98 Esquema del sistema recirculador RHT

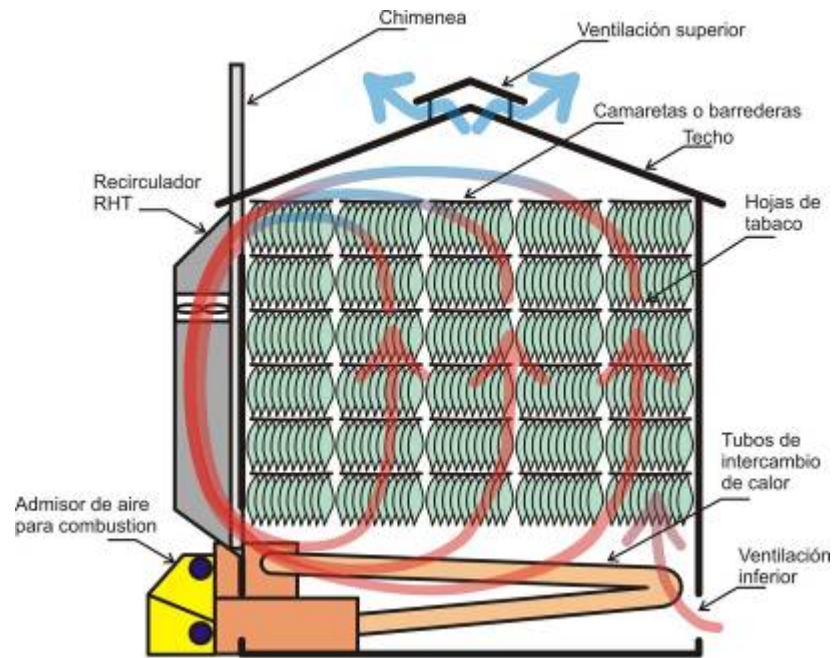
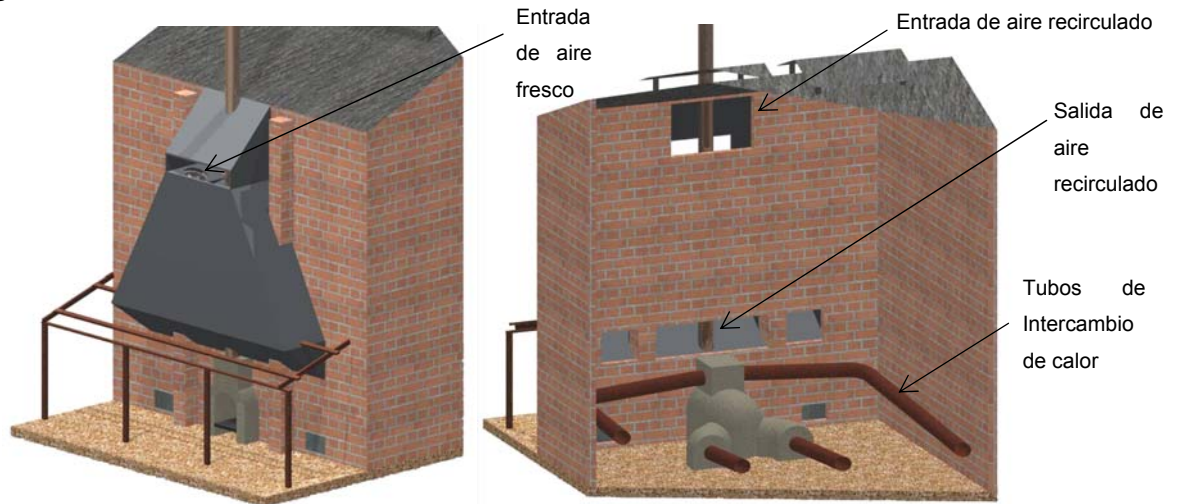


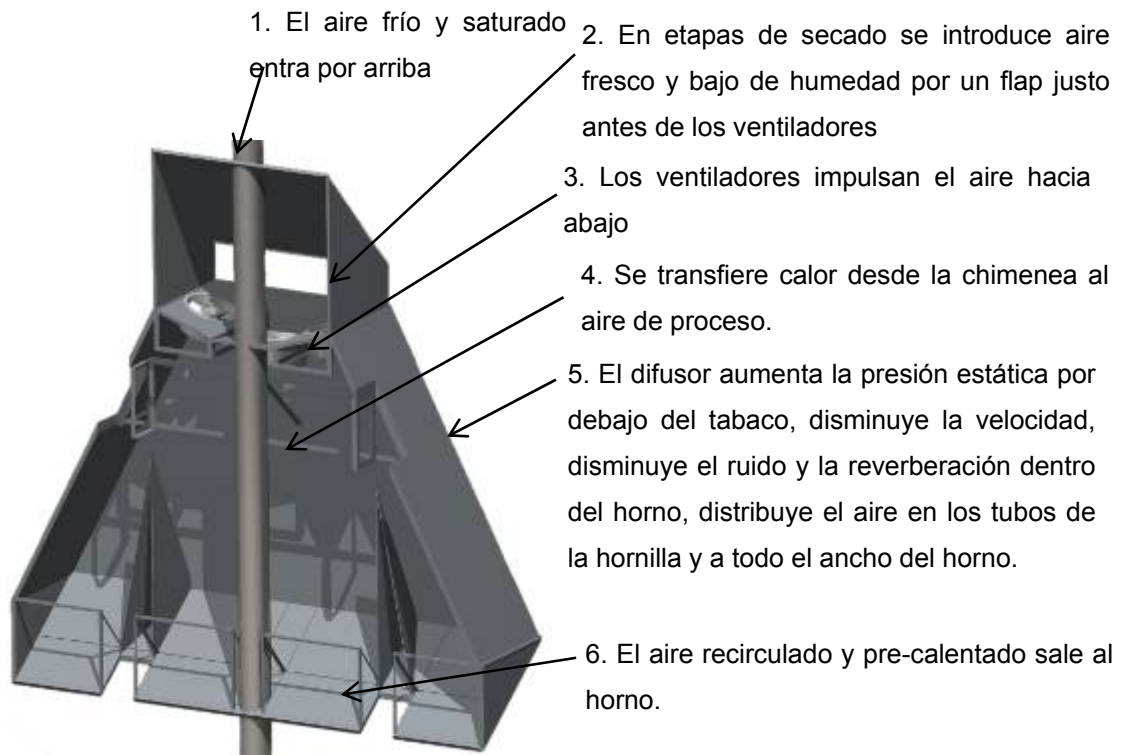
Figura 99 Sistema de Recirculación RHT



Para evitar los inconvenientes del sistema RAF, se pensó entonces en un sistema que tuviera las características que se muestran a continuación:

- ✚ **Sistema que utilizara poco caudal en la etapa de amarillamiento**⁵⁰ sin la necesidad de estrangular el caudal ya que el consumo de energía eléctrica se dispara⁵¹. Para ello, los ventiladores deberían tener una inclinación apuntando siempre a un punto en común y no perder la simetría de flujo (Figura 101).

Figura 100 Funcionamiento del recirculador RHT para hornos de tabaco



- ✚ **Aprovechamiento del calor desperdiciado en la chimenea.** Según el estudio isocinético hecho por INAMCO, la temperatura de los gases de escape es de aproximadamente 180°C (ver Tamaño y tiro de la chimenea); la Universidad Surcolombiana ha medido temperaturas que superan los 360°C

⁵⁰ De hecho el mayor caudal requerido está en etapas de secado del lámina y vena.

⁵¹ Este comportamiento se vio en la operación del flap de regulación de aire del recirculador RAF.

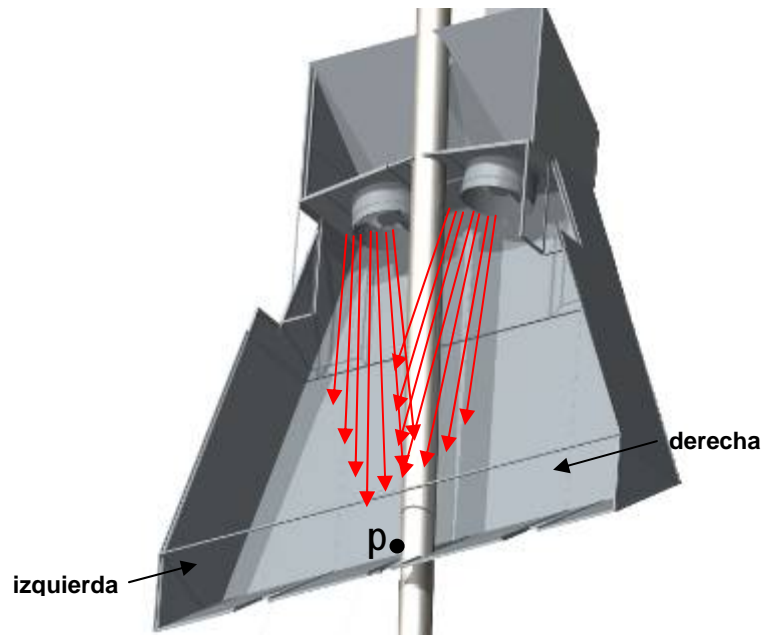
en concordancia con los resultados calculados en el apartado Transferencia de calor por los tubos. La temperatura del proceso de curado es de máximo 80°C (175°F), lo cual hay un potencial de más de 120°C desperdiciado.

- ✚ **No se sacrifica espacio dentro del horno.** Uno de los inconvenientes del sistema RAF era la reducción del espacio dentro del horno y en consecuencia una reducción del rendimiento por hornada. El nuevo sistema RHT no disminuye el rendimiento del horno⁵².
- ✚ **Más fácil de montar porque no hay barrederas, excepto el techo de la hornilla.** El hecho de colocar el recirculador dentro del horno implica una dificultad en el montaje porque las barrederas no se pueden quitar.
- ✚ **El difusor aumenta de la presión estática por debajo del plénum para garantizar la subida del aire.** La característica mecánica más importante en el proceso de curado es la *presión* más que la *velocidad* del aire en el plénum, logrando vencer la resistencia que le ofrece el relleno al paso del aire principalmente en las primeras etapas de curado. Al tener el plénum mayor presión estática, el rendimiento del horno puede subir colocando más varas.
- ✚ **El difusor ayuda a uniformizar la entrada de aire y generar menos vórtices.** El recirculador apunta a la mayor parte de la tubería de calor y no sólo a las zonas más ventajosas.
- ✚ **Aumento del coeficiente de convección.** La corriente forzada tiene la ventaja de aumentar el coeficiente de convección, que para tiro natural⁵³ difícilmente supera los 5 W/m²K.
- ✚ **Menor velocidad del aire a la salida del recirculador.** Esto reseca menos el tabaco en las primeras etapas y provoca menos ruido.

⁵² El rendimiento del horno se mide en kilos de tabaco seco por horno.

⁵³ MILLS, Anthony. Transferencia de calor. Ed. única en español. Pág 305

Figura 101 Simetría de flujo para el uso de un solo ventilador en recirculador RHT



La instalación del recirculador RHT requiere:

- ✚ Cambiar la chimenea por una metálica y/o soldar aletas (láminas) a la chimenea para mejorar la transferencia de calor.
- ✚ Obra civil. Romper la pared posterior del horno.
- ✚ Suprimir las ventilaciones inferiores, o al menos mantenerlas bien cerradas durante etapa de amarillamiento.
- ✚ Hermeticidad en todo el horno para evitar bajas humedades.
- ✚ Sellaje. Aislamiento externo con pintura dieléctrica.

Comparando los modelos de recirculación RAF y RHT, los materiales de fabricación son básicamente los mismos: perfilería angular, lámina galvanizada, ventiladores, tacos, guardamotores, remaches, tornillos, excepto porque el sistema RHT necesita sellarse para evitar pérdidas de humedad. Esto se puede lograr frisando la parte trasera del horno para asegurar la verticalidad en la pared e

instalar el aparato ó, rellenando de cemento los espacios vacíos entre la pared y la estructura. Otras comparaciones entre estos dos sistemas se hacen en la Tabla 53.

Tabla 53 Paralelo comparativo entre el sistema de recirculación RAF y RHT

Sistema RAF 220 y RAF 110	Sistema RHT⁵⁴ 2v7 y 3v5
Las barrederas dificultan el montaje.	Las barrederas no dificultan el montaje.
Más barato (2'800.000.00) y liviano.	Más costoso (2v7: 4'600.000.00; 3v5: 5'900.000.00 con UMMI) y más pesado.
Reducción de espacio disponible en el horno.	No se reduce el espacio disponible en el horno.
Caudal era confinado a salir en unas pequeñas áreas, aumentando el ruido y los vórtices.	Caudal más uniforme a lo ancho del horno.
Consumo de 1,2 kW (RAF 220 trifásico) y 1,4 kW (RAF 110 monofásico).	Consumo de 0,57 kW en RHT 3v5 y de 1,02 kW en RHT 2v7. Ambos trifásicos.
Caudal de 5,27 y 5,86 m ³ /s (RAF 220 y RAF 110 respectivamente).	Caudal de 5,73 y 7,1 m ³ /s (RHT 2v5 y RHT 3v7 respectivamente).
Velocidad de salida 4,6 y 5,2 m/s respectivamente.	Velocidad de salida 2,1 y 2,9 m/s respectivamente.
Relación costo/beneficio alto.	Relación costo/beneficio a la mitad.

4.1.3 Expectativas del prototipo

Los objetivos principales del recirculador son:

- ✚ Ahorrar combustible con el aprovechamiento energético del calor remanente del proceso, de la chimenea y por el aumento del coeficiente de transferencia de calor por convección externa en los tubos.
- ✚ Uniformizar las condiciones de curado aumentando la calidad del tabaco.

⁵⁴ Las abreviaturas RAF 220 y RAF 110 hacen referencia a la tensión eléctrica en voltios de suministro al recirculador. Las abreviaturas RHT 2v7 y RHT 3v5 hacen referencia al número de ventiladores axiales necesarios (antes de la letra "v") y al caudal aproximado de recirculación en m³/s (después de la letra "v").

- ✚ Minimizar la invasión a la estructura y al espacio de la cámara, de modo que pueda ser fácilmente montado, desmontado, transportado y que su reconstrucción sea lo más rápida y económica posible en caso de ser desmontado.
- ✚ Recuperar rápidamente la inversión basado en un diseño con baja relación costo/beneficio.

4.1.4 Criterios de diseño

Teniendo en cuenta los objetivos del prototipo, los criterios de diseño se basaron en los siguientes puntos:

- 1) Caudal de aire recirculado según recomendaciones estándares para curación de tabaco Virginia en etapas de secado de lámina y secado de vena. Selección de ventiladores industriales SIEMENS, deben ser de tipo axial para grandes caudales y bajas presiones y siguiendo el ejemplo de hornos Bulk-cured. Se escogieron marca SIEMENS porque tienen buen soporte técnico, son fáciles de conseguir e instalar, por su economía y requieren poco mantenimiento.
- 2) Dimensiones del horno en estudio. Los hornos pueden diferir en dimensiones y habrá que hacer el estudio dimensional del recirculador para cada horno en particular. Para esto, se creó un programa en MATLAB® de Mathworks en la que se grafica y tabula las dimensiones del recirculador en función de las dimensiones del horno.
- 3) Mínimo desperdicio de material. El programa de generación de dimensiones de la estructura trabaja para que muchas de las medidas estén en función de cortes estándares de lámina galvanizada. Esto es, el programa

trabaja con múltiplos de 1x2 metros ó 1.2x2.4 metros. Éste programa está sujeto a mejoras.

- 4) Materiales comunes como lámina galvanizada lisa calibre 18 y calibre 20 y ángulos en acero HR que ofrecen una muy buena resistencia a la temperatura del proceso, resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y bajo precio.
- 5) Resistencia mecánica a la presión generada por el flujo de aire de los ventiladores, torque de arranque y el peso de la estructura. Anclaje a la pared con espárragos.
- 6) Modularidad de la estructura, ya que la zona de construcción y la zona de ensayo son lejanas.
- 7) Por ser un recirculador externo, se debe estudiar la posibilidad de aislar térmicamente la estructura, forrándola con láminas minerales o pinturas a base de poliuretano. Este cálculo se basa estimando un coeficiente de convección en función de la velocidad promedio y temperatura ambiente de la zona.
- 8) Simplicidad y mínimo costo inicial.

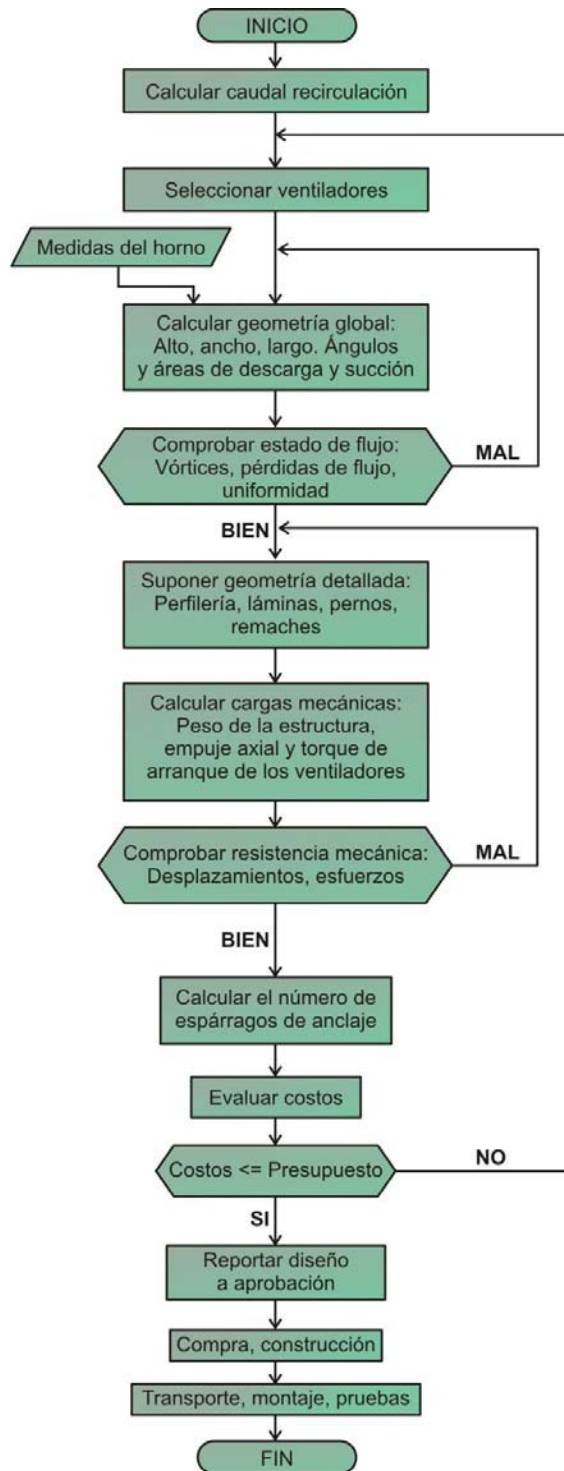
El proceso de diseño del recirculador RHT se muestra en la Figura 102.

Tabla 54 Parámetros de diseño para un horno de tabaco⁵⁵ con tiro forzado

#	Variable	Valor	Unidades	Comentario
1	Caudal de aire en el horno	0.0188779	m ³ /s	mínimo por cada pie cuadrado de horno. Para secado de lámina y a 0.5 pulgadas de agua de presión estática
2	Rata másica de carbón máxima	19	kg/hr	para horno convencional. Para horno modular, son 11 kg/h. Secado de lámina es el crítico.
3	Máxima temperatura de la cámara de secado	175	°F	presentado en secado de vena
4	Presión estática amarillamiento/marchitamiento	0.9	in.water	Promedio de 0,8 a 1
5	Presión estática secado vena	0.2	in.water	Promedio de 0,1 a 0,3
6	Energía mínima	1266.07	kJ	por cada pie cuadrado de piso de horno
7	Velocidad sobre la hoja	0.1524	m/s	para secar de manera apropiada la lámina. Diseñar 10 a 50% por encima para compensar variaciones de humedad y temperatura
8	Calor promedio para evaporar la humedad de la hoja	2588	kJ/kg	por kilogramo de tabaco en verde (sin curar)
9	Capacidad de calor de hornilla	1266	kJ	por cada pie cuadrado de piso de horno
10	Consumo combustible hojas bajas (con 90% agua)	1	Litros	de petróleo por kilo de tabaco en verde (sin curar)
11	Consumo combustible hojas alteras (con 80% agua)	0.42	Litros	de petróleo por kilo de tabaco en verde (sin curar)
12	Poder Calorífico del carbón	31107.924	kJ/kg	usado en Colombia en aplicaciones de tabaco
13	Densidad del carbón	1400	kg/m ³	usado en Colombia en aplicaciones de tabaco

⁵⁵ Heat-Pump-Dehumidification During the curing of Flue-cured Tobacco. The Georgia Agricultural Experiment Stations. Research Bulletin Number 439. June 2003.

Figura 102 Proceso de diseño del recirculador RHT



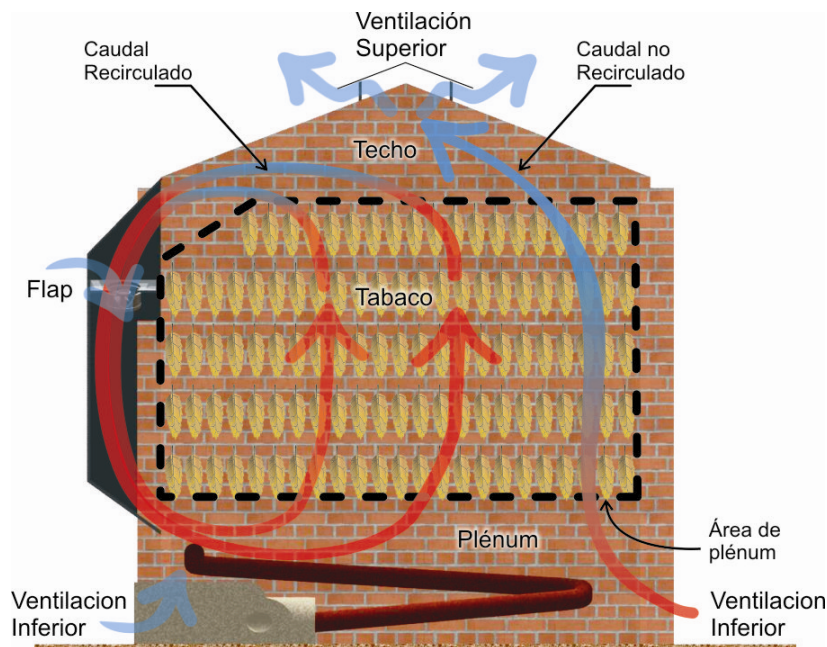
❖ *Cálculo del caudal de recirculación y selección de ventiladores*

El cálculo teórico del caudal para secado de lámina y vena se puede hacer bajo dos criterios: el primero es el *criterio de número de renovaciones por hora* (parámetro # 1 de la Tabla 54: mínimo 40 cfm por cada pie cuadrado de piso de horno a 0.5 pulgadas de agua de presión estática) el caudal de recirculación debe dar:

Ecuación 33 Cálculo del caudal de recirculación según el criterio de renovaciones por hora

$$Q = 0.0188779 \frac{[m^3 / s]}{[ft^2]} * 42.5[m^2] * \frac{10.7639[ft^2]}{1[m^2]} = 8.636[m^3 / s]$$

Figura 103 Esquema de las corrientes de aire de proceso presentes en el horno RHT



Ecuación 34 Balance de masa sobre el aire total de proceso

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{recirculado} + \dot{m}_{norecirculado}$$

Teniendo en cuenta que esto sería si el ventilador estuviera recirculando el 100% del aire en etapas de secado, debe haber un porcentaje de aire que no se recircula y pasa por las ventilaciones superiores para evacuar humedad. Para secado de frutas y tubérculos como la papa, el caudal no recirculado es el 30% del total⁵⁶. Para tabaco, tal porcentaje no se tiene en ninguna literatura; sin embargo, como en amarillamiento la recirculación es del 100%, considerar como caudal en primer criterio de diseño el resultado de la Ecuación 33 no está mal.

El segundo criterio es el de la *velocidad superficial sobre la hoja para que seque correctamente* (parámetro # 7 de la Tabla 54) que es de 30 ft/min. El cálculo se hace con base en la Figura 103 y la Ecuación 35.

Ecuación 35 Cálculo del caudal de recirculación según el criterio de velocidad sobre la hoja

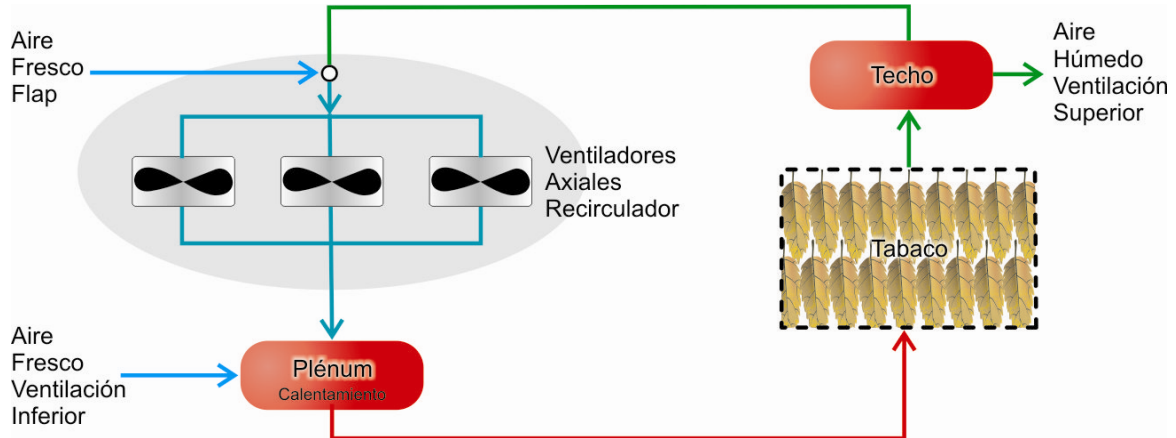
$$Q = vA_{plenum} = 0.1524 \left[\frac{m}{s} \right] 42.5 [m^2] = 6.477 [m^3 / s]$$

Las mismas suposiciones se hacen para éste criterio. Sin embargo, los valores calculados bajo el parámetro # 1 de la Tabla 54 corresponden a hornos Bulk-cured. En efecto, la característica del relleno varía bastante teniendo en cuenta que en los hornos Bulk-cured el tabaco ofrece más resistencia por el modo como se ensarta (en racks); una medida comparativa de este argumento está en la Tabla 55. Se puede aproximar también que la presión estática final en los hornos Bulk-cured es aproximadamente la misma presión estática inicial para los hornos Flue-cured (estimada en 0.3 pulgadas de agua como máximo) según lo tabulado en la Tabla 54

⁵⁶ Universidad Politécnica de Valencia (España). Herramientas de cálculo para ingeniería de alimentos.

y la Tabla 55. Finalmente, el caudal de diseño es el del segundo criterio, dando 6.5 m³/s para secado de lámina⁵⁷.

Figura 104 Esquema de las líneas de flujo de aire para el sistema de recirculación RHT



Colocar más de tres ventiladores aumenta el costo inicial del aparato, luego el prototipo se diseña para uno, dos o tres ventiladores.

Tabla 55 Rendimiento volumétrico (kg tabaco/m³) en los tipos de hornos Flue y Bulk cured con racks

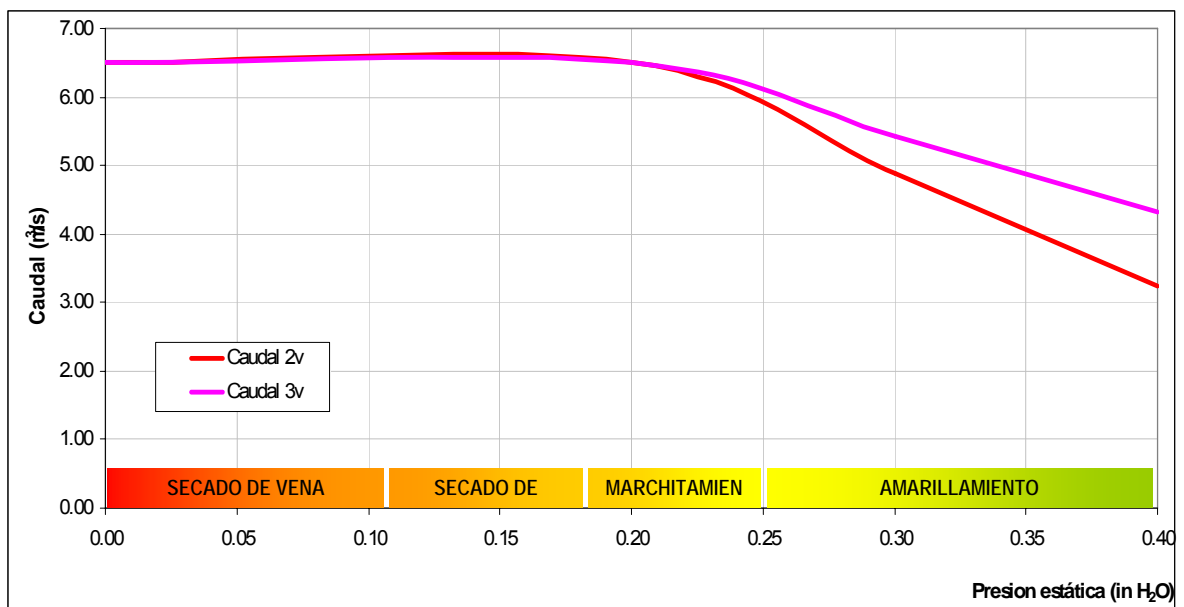
	Horno Flue-cured		Horno Bulk-cured	
	Densidad en verde	Densidad en seco	Densidad en verde	Densidad en seco
Bajero	20.3	3.4	115.0	18.4
Mediamata	33.8	5.1	136.9	21.9
Superior	44.0	6.8	153.3	24.5

En el ensayo de Fonseca (La Guajira), el recirculador permanecía apagado durante la etapa de amarillamiento ya que la baja hermeticidad del horno hacía perder la

⁵⁷ La etapa más crítica para secado de tabaco es la de lámina. La humedad de esta parte de la hoja es muy susceptible a manchar el tabaco.

humedad requerida en esta etapa. Para este caso, en el recirculador RHT se va a colocar dos o tres ventiladores dispuestos de tal modo que se pueda encender uno o dos de ellos para disminuir el caudal en esta etapa y no recurrir a la solución poco práctica de apagar todo el caudal de recirculación y así evitar pérdidas de humedad. En consecuencia, el caudal de amarillamiento será la mitad o las dos terceras partes del caudal calculado respectivamente.

Figura 105 Curva del sistema del conjunto de ventiladores axiales en paralelo



El recirculador RHT se ensayó en una finca⁵⁸ del municipio de Yaguará (Huila) donde la energía disponible es monofásica a 110 voltios. Se selecciona: dos ventiladores monofásicos referencia **2CC2 504-5YA3** cuyas especificaciones técnicas y dimensionales se muestran en la Tabla 58 y Figura 107.

⁵⁸ Kilómetro 7 vía Yaguará – Íquira. Empresa Comunitaria San Francisco.

Tabla 56 Caudal de aire impulsado (m³/s) de ventiladores axiales SIEMENS monofásicos bajo diferentes presiones

Ventilador Tipo	Sobrepresión Estática (in.H ₂ O)					
	0	0.120	0.200732	0.401	0.602	0.802
2CC2 254	0.38	0.25	0.16			
2CC2 314	0.7	0.6	0.53			
2CC2 354	1.01	0.9	0.87	0.5		
2CC2 404	1.45	1.3	1.18	0.9		
2CC2 504	2.93	2.75	2.7	2.4	2.17	1.8

Tabla 57 Selección del ventilador axial SIEMENS monofásico

Ventilador	Ventilador unidad				Ventiladores conjunto					
	Diámetro (mm)	Caudal (m ³ /s)	Pot. (Kw)	Precio Unidad	Cant.	Área (m ²)	Pot. (Kw)	Caudal (m ³ /s)	Precio	Costo/ Beneficio
2CC2 254-5YC3	250	0.38	0.05	\$ 347 800	17	0.834	0.85	6.46	\$ 5 912 600	777974
2CC2 314-5YC3	310	0.7	0.08	\$ 375 500	9	0.679	0.72	6.3	\$ 3 379 500	386229
2CC2 354-5YC3	350	1.01	0.11	\$ 434 300	6	0.577	0.66	6.06	\$ 2 605 800	283800
2CC2 404-5YC3	400	1.45	0.22	\$ 527 400	4	0.503	0.88	5.8	\$ 2 109 600	320077
2CC2 504-5YA3	500	2.93	0.7	\$ 863 600	2	0.393	1.4	5.86	\$ 1 727 200	412642

Figura 106 Selección del ventilador axial SIEMENS y curva de desempeño del diseño

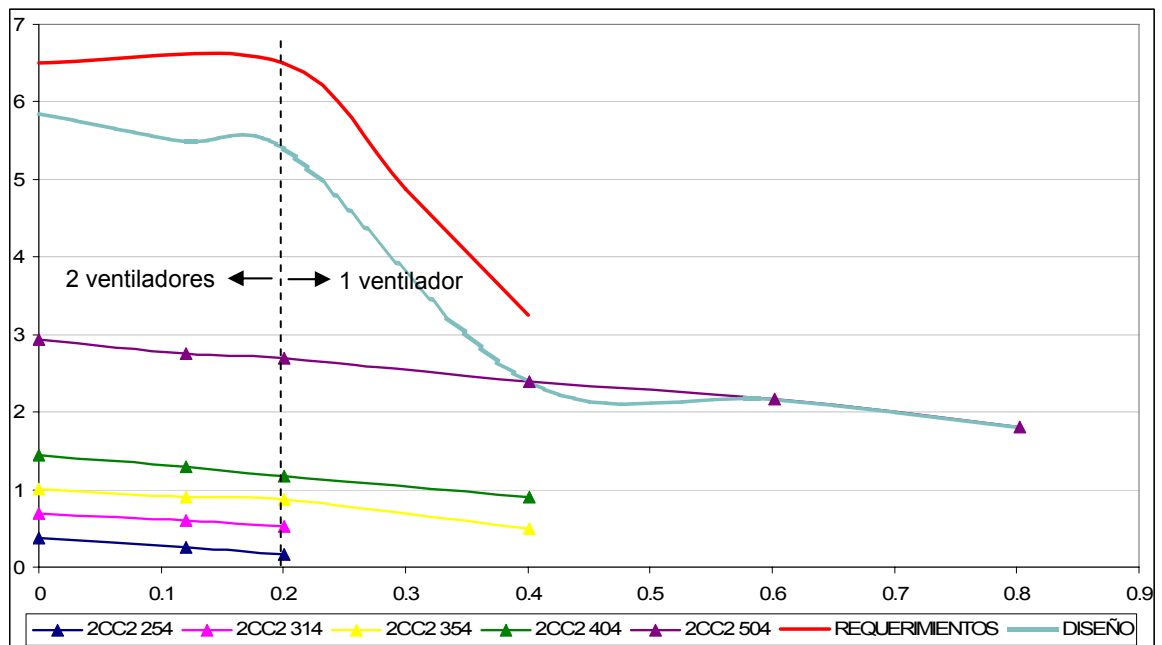
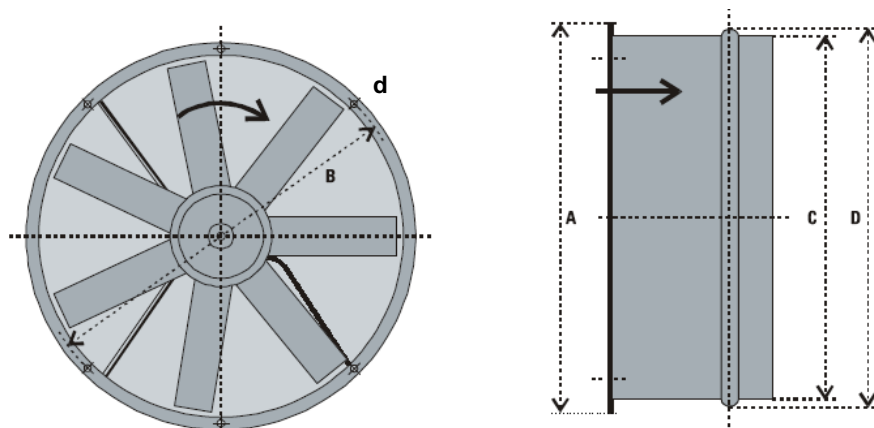


Tabla 58 Especificaciones de catálogo para ventiladores axiales monofásicos SIEMENS

Tipo	Diámetro (mm)	Caudal (m ³ / s)	Potencia (kW)	Nivel ruido dB(A)	Corriente (Amp.)
Con motores monofásicos 110V, 1.800 rpm¹⁾					
2CC2 254 - 5YC3	250	0.38	0.05	62	0.8
2CC2 314 - 5YC3	310	0.70	0.08	65	1.5
2CC2 354 - 5YC3	350	1.01	0.11	68	1.9
2CC2 404 - 5YC3	400	1.45	0.22	74	3.2
2CC2 504 - 5YA3	500	2.93	0.70	78	8.3

Figura 107 Especificaciones dimensionales del ventilador seleccionado



Tipo	A	B	C	D	E	d
2CC2 504-5YA3	554	528	504	518	-	11.5

❖ *Dimensionamiento de la estructura*

Debido a la variedad de tamaños de hornos se hizo un programa en MATLAB en la que se introducen las medidas principales del horno y el programa genera la forma del recirculador (Figura 111). Las medidas del horno objeto del estudio en el municipio de Yaguará (Huila) aparecen sintetizadas en la Figura 108 y Tabla 59. Los puntos de geometría generados por el programa aparecen la Figura 109. Para

conocer más el detalle de dimensionamiento de la estructura mediante el programa, remítase al ANEXO D. CÓDIGOS EN MATLAB DE LOS PROGRAMAS.

Figura 108 Medidas principales del horno para montaje del recirculador RHT

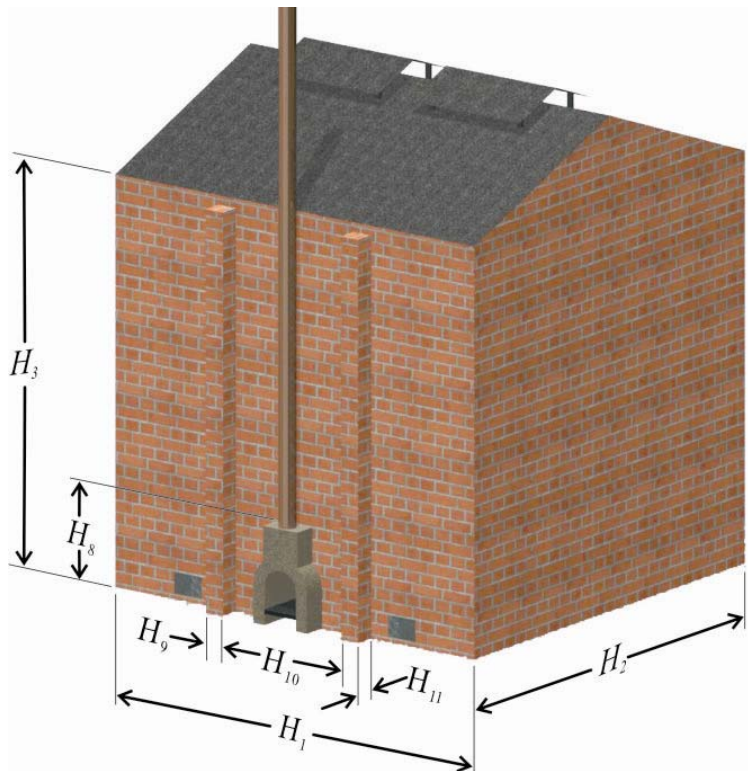


Tabla 59 Medidas de la pared posterior del horno de tabaco

Distancia	Comentario	Valor	Unidad
H_3	Altura Piso-Techo	5.25	Metros
H_8	Altura Hornilla	1.58	Metros
H_9	Ancho Columna	NA	Metros
H_{10}	Separación Columnas (Interna)	NA	Metros
H_{11}	Profundidad de Columnas	NA	Metros
X	Separación interna entre barrederas de madera	0.9	Metros

Figura 109 Puntos de geometría del recirculador RHT

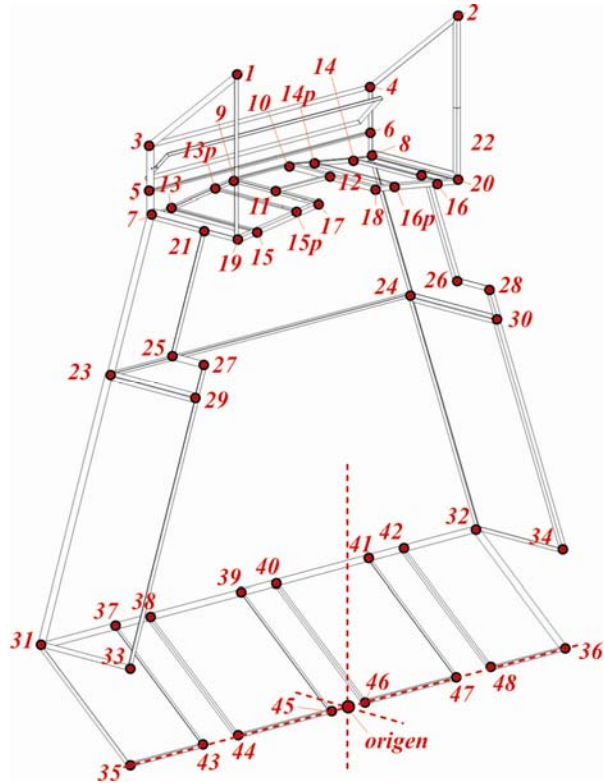


Figura 110 Cálculo de la inclinación de los ventiladores

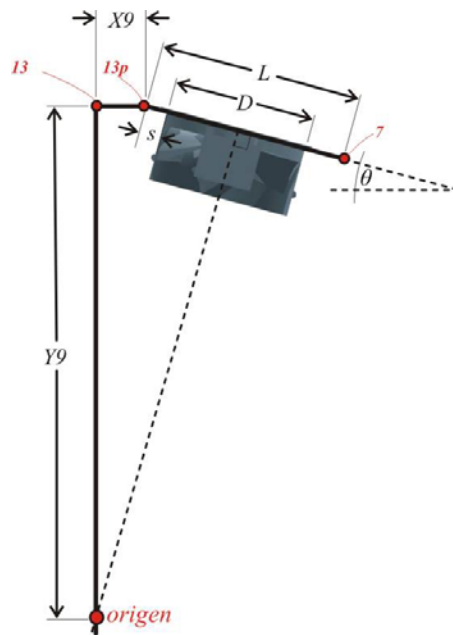


Figura 111 Resultados gráficos del programa de generación de medidas del recirculador para dos configuraciones de horno

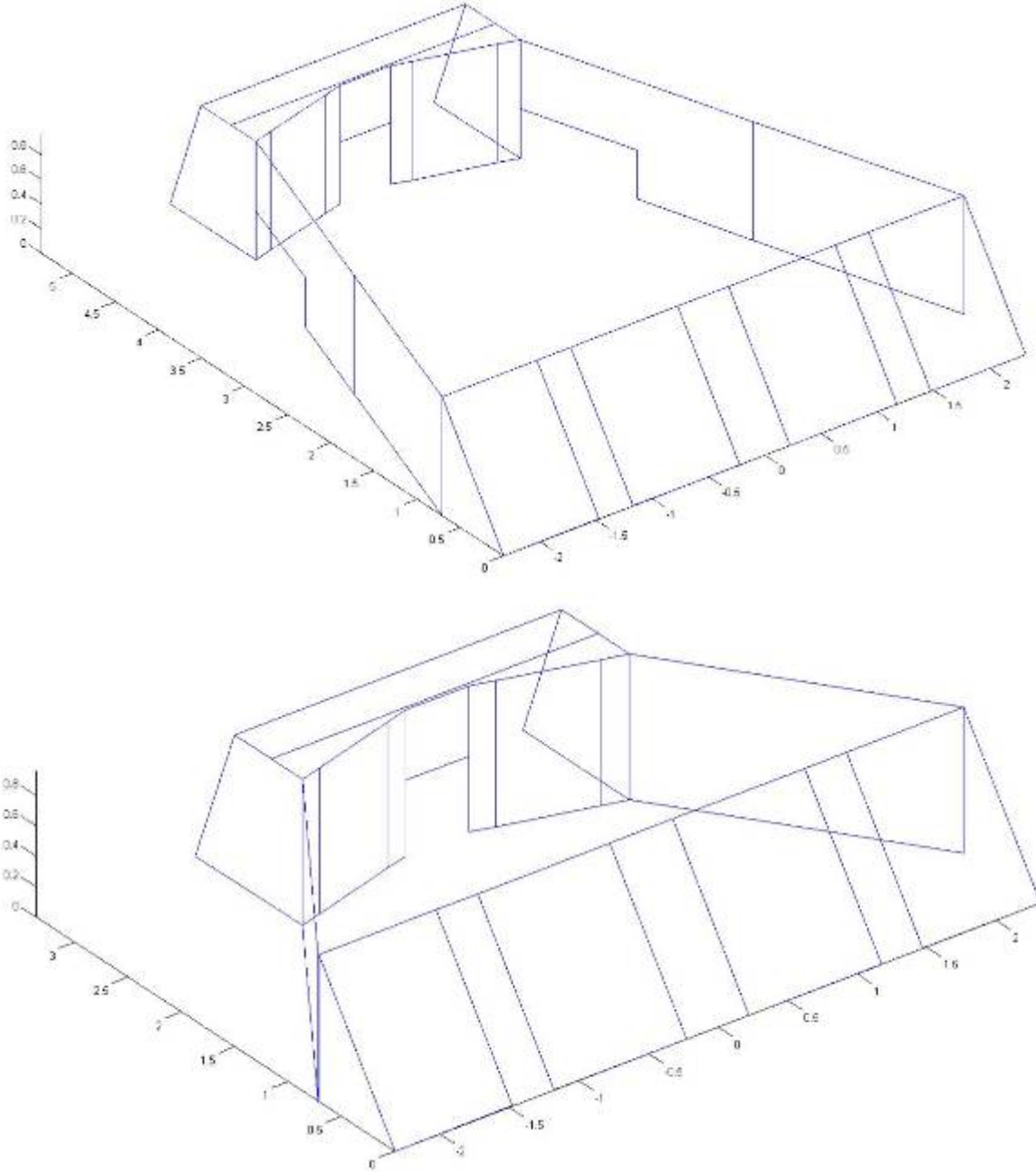
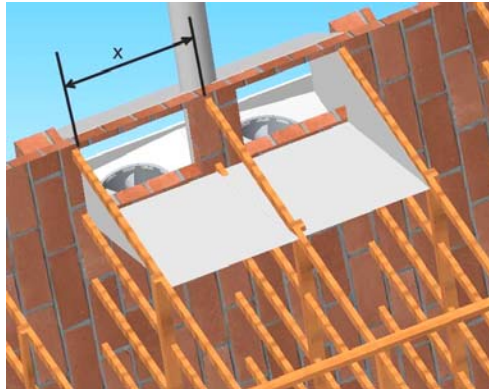


Figura 112 Medida de separación interna de barredera para diseño de ducto de entrada de aire



Finalmente, después de un proceso iterativo se concluye la forma y las medidas de la estructura del recirculador RHT como se muestra en los planos del ANEXO I. PLANOS DE LOS PROTOTIPOS, Recirculador RHT.

❖ *Comprobación de parámetros con sistemas CAE*

Para este prototipo se hizo dos comprobaciones CAE. La primera es la resistencia mecánica; a razón de la gran complejidad de la estructura, se simuló mediante programas estructurales como ANSYS® y SolidWorks®. La segunda comprobación tiene que ver en lo relativo al flujo; se simuló la descarga del aire en el recirculador para chequear por vértices y turbulencias principalmente con el software COSMOS FlowWorks®, partner de SolidWorks®.

- *Comprobación de la resistencia mecánica en ANSYS*

Para comprobar la resistencia mecánica es necesario conocer el peso de la estructura (Tabla 60), el empuje dado por los ventiladores y el torque de arranque de los ventiladores.

Tabla 60 Cálculo del peso de la estructura y del número de espárragos de anclaje

Input	Name	Output	Unit	Comment
1.4	<i>Area_cal18</i>		m ²	Área de lámina galvanizada de calibre 18
22	<i>Area_cal20</i>		m ²	Área de lámina galvanizada de calibre 20
3	<i>Area_cal22</i>		m ²	Área de lámina galvanizada de calibre 22
52	<i>Langulo15</i>		m	Longitud total ángulo de 1,5"
9	<i>Langulo1</i>		m	Longitud total ángulo de 1"
24	<i>Wventilador</i>		kg	Peso del ventilador axial
20	<i>Wpernos</i>		kg	Peso de la tortillería
	<i>Wlamina_cal18</i>	13.65	kg	Peso total laminas calibre 18
	<i>Wlamina_cal20</i>	161.04	kg	Peso total laminas calibre 20
	<i>Wlamina_cal22</i>	18.3	kg	Peso total laminas calibre 20
	<i>Wangulo1plg</i>	14.67	kg	Peso total ángulo de 1"
	<i>Wangulo15plg</i>	95.16	kg	Peso total ángulos de 1,5"
	<i>W</i>	370.82	kg	Peso estimado del recirculador
12	<i>n</i>			Numero de espárragos
.009525	<i>Diametro</i>		m	Diámetro del espárrago
130	<i>P</i>		kg	Fuerza axial por espárrago por torque de apriete
	<i>F</i>	30.901		Fuerza de corte por espárrago por corte puro
	<i>Area</i>	.0000712	m ²	Área transversal del espárrago
	<i>tao</i>	433672.66	kg/ m ²	Esfuerzo de corte sobre el espárrago
	<i>sigma</i>	1824414.44	kg/ m ²	Esfuerzo axial por espárrago
	<i>sigma_eq</i>	1972993.66	kg/ m ²	Esfuerzo Von Mises equivalente
	<i>Alpha</i>			Angulo de hélice de la rosca del espárrago
	<i>Phi</i>			Angulo de filo de rosca del espárrago
0.03	<i>μ</i>			Coefficiente de fricción estático para el perno-tuerca
24000000	<i>sigma_perm</i>			Esfuerzo permisible, según criterio de rotura (Sy) Acero A-36
	<i>N</i>	12.16		Factor de seguridad

Ecuación 36 Cálculo de la potencia y torque del motor

$$Pot(kW) = \frac{T(Nm)N(RPM)}{9950}$$

Tabla 61 Cálculo del torque de arranque y de régimen para el ventilador axial

Condición	Potencia (kW)	Velocidad (RPM)	Torque (N-m)
Régimen (Nominal)	0.7	1800	4.42

Sin embargo, viendo el peso considerable de la estructura (371 kg), podemos despreciar el efecto del torque suponiendo que el torque de arranque puede ser dos o tres veces el torque nominal. El empuje ayudaría a restar peso a la estructural, luego no se tuvo en cuenta en el sistema de cargas de la comprobación CAE.

Figura 113 Representación virtual de la estructura del recirculador RHT: a) Solidworks®; b) ANSYS®

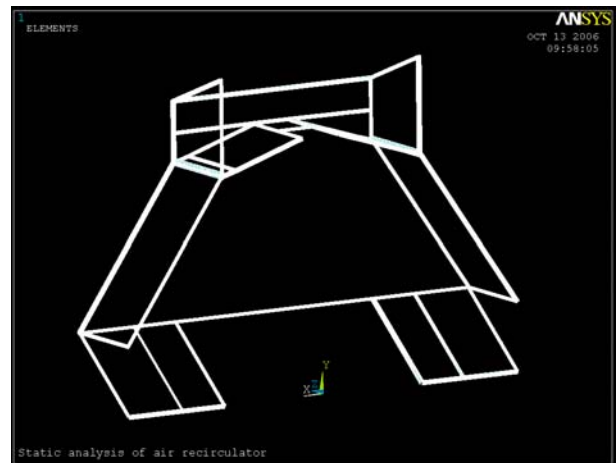
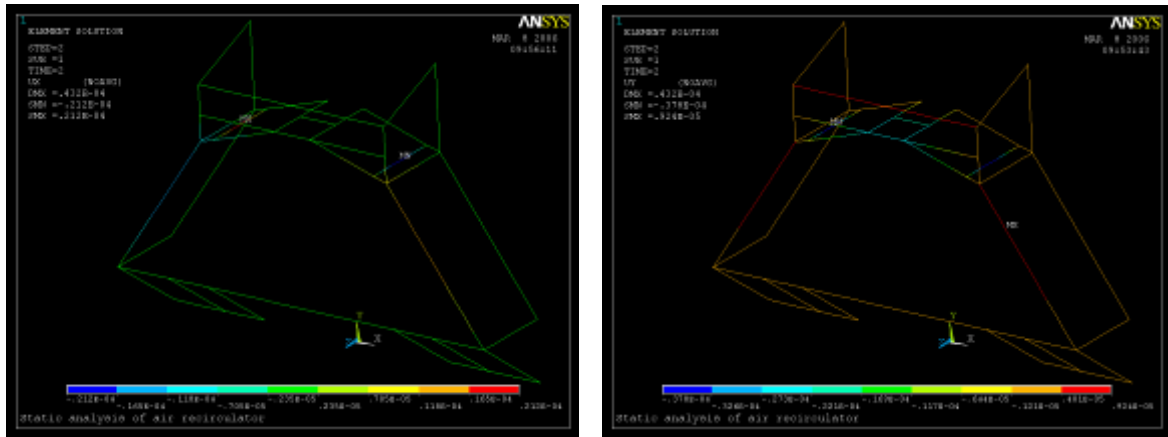


Figura 114 Análisis estructural mediante CAE en ANSYS®



- *Comprobación del flujo de aire recirculado*

Para comprobar la uniformidad de flujo y la aparición de vórtices en la descarga principalmente, se simuló el recirculador en un programa CFD (Computational Fluid Dynamics) como el COSMOS FlowWorks®. La ventaja de estos programas es la capacidad de simular ventiladores y sus curvas de desempeño, datos que otorga el fabricante SIEMENS.

Figura 115 Curva de desempeño del ventilador para simulación

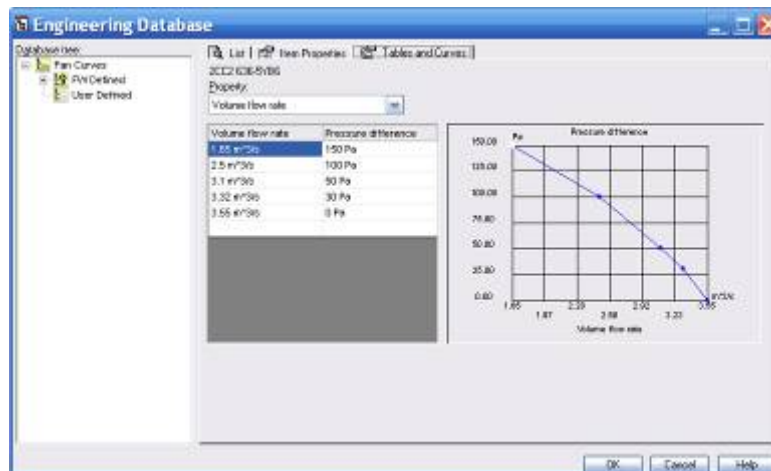


Figura 116 Condiciones iniciales del flujo para el sistema recirculador RHT

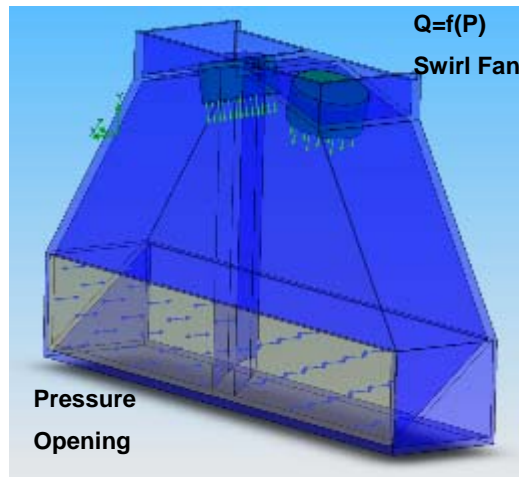


Figura 117 Enmallado de la estructura de descarga del recirculador con el software COSMOS-Flow®

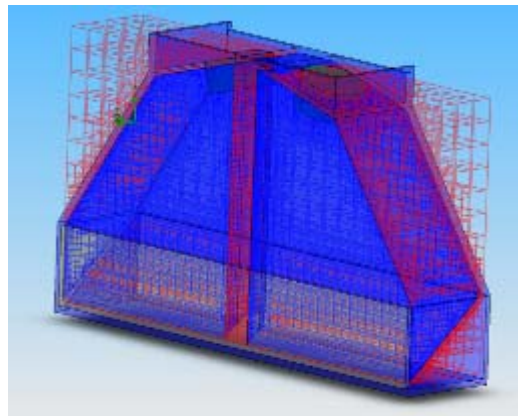
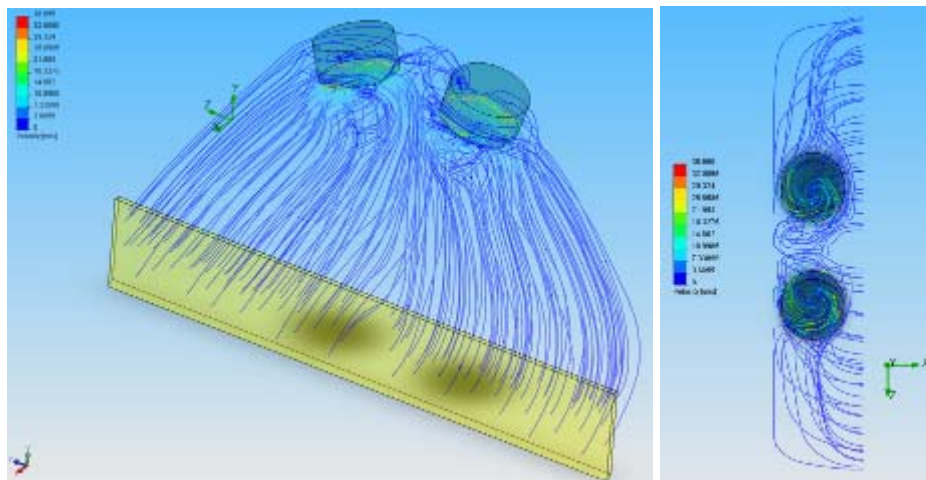


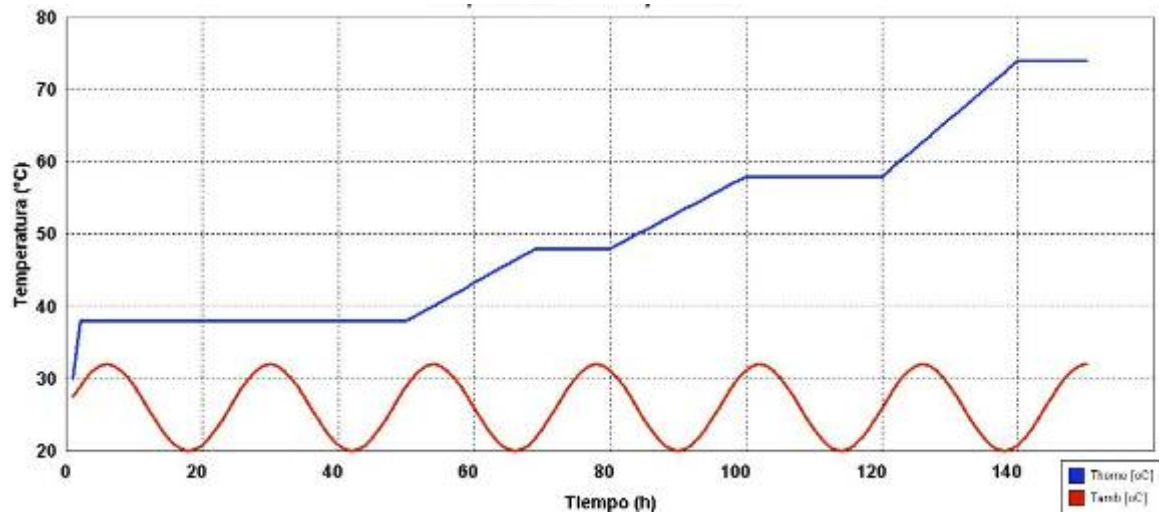
Figura 118 Resultados de la simulación de flujo en el recirculador



❖ *Cálculo de pérdidas por las paredes del recirculador.*

Una de las preocupaciones principales en el diseño del recirculador externo es la necesidad de aislarlo para contener pérdidas al ambiente. Debido a la gran área del recirculador (20 m²) se debe hacer un cálculo estimativo de las pérdidas con la temperatura del proceso, la temperatura ambiente y teniendo en cuenta las resistencias térmicas equivalentes presentes. El hecho de aislarlo involucra un incremento muy alto del costo del prototipo, teniendo en cuenta que, aparte del costo de la manta aislante⁵⁹, la estructura se pone más pesada y compleja en construcción, requiere más lámina galvanizada para empaquetar la fibra y por tanto su relación costo/beneficio se ve menos atractiva. Los coeficientes de transferencia se estiman acorde a resultados de convección natural en la parte externa y convección forzada en la parte interna conociendo el caudal y el área transversal de flujo en el recirculador (Tabla 62).

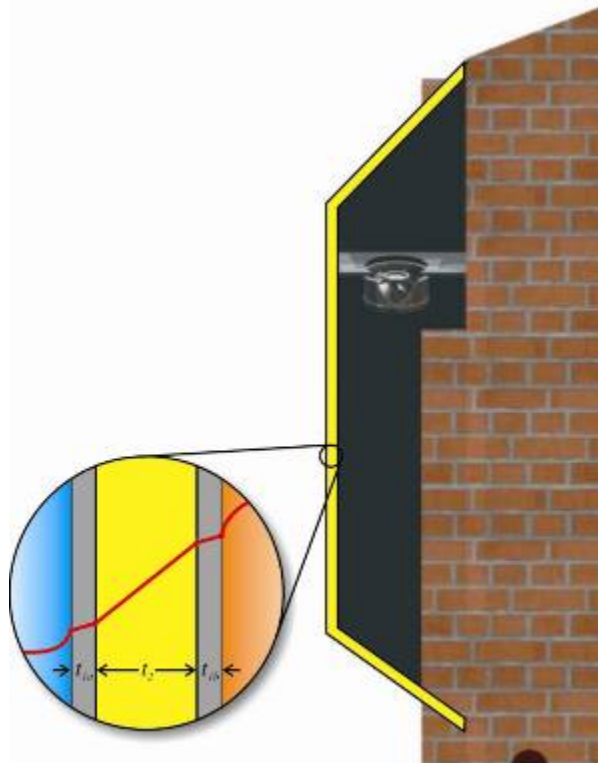
Figura 119 Variación de la temperatura ambiente y del horno para cálculo de pérdidas



⁵⁹ Un metro cuadrado de lana mineral de una pulgada de espesor puede valer entre \$11.000 y \$12.000.

En la Tabla 62 se muestra el resultado del cálculo de los coeficientes de convección externo e interno⁶⁰ estimados y la cantidad de carbón necesario para suplir dichas pérdidas, suponiendo una eficiencia de la transferencia de calor desde la hornilla hasta la cámara del 30% (ver Transferencia de calor por los tubos); el resultado muestra que la cantidad de carbón a suplir por las pérdidas del recirculador es de casi 64 kilos, que no es significativo comparado con los 1500 o 2000 kilos de carbón que consume un proceso de curado convencional.

Figura 120 Configuración de la empaquetadura de fibra mineral para aislamiento del recirculador



⁶⁰ Se supuso una condición muy conservadora de 2.8 m/s de velocidad del aire por dentro del recirculador. Este valor es mucho menor ya que el recirculador tiene un ensanchamiento en el área de flujo, reduciendo la velocidad superficial del aire sobre las paredes del prototipo.

Tabla 62 Cálculo estimado de la cantidad de calor perdido por las paredes sin aislamiento

Input	Name	Output	Unit	Comment
19	A		m^2	Área del recirculador
50	T_{horno}		$^{\circ}C$	Temperatura dentro del horno en le tiempo i
35	T_{amb}		$^{\circ}C$	Temperatura ambiente en le tiempo i
4	h_{ext}		$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficiente de convección del ambiente
4.9	h_{int}		$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficiente de convección dentro del recirculador
	q	1218.76	W	Potencia a suplir por pérdidas (en la hora i del proceso)
	Q	4387569.97	J	Energía a suplir por pérdidas (en la hora i del proceso)
	U	4.27	$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficiente global de transferencia de calor
.0014	t_1		m	Suma de los espesores de la lamina galvanizada
42	k_1		$W/(m \cdot K)$	Conductividad de la lamina galvanizada
0	t_2		m	Espesor del aislante (lana de vidrio AW FiberGlass)
.039	k_2		$W/(m \cdot K)$	Conductividad del aislante
	m	.24	kg/h	Rata másica de carbón a suplir por pérdidas
3E7	h_o		J/kg	Poder calorífico del carbón
.3	n			Eficiencia de la combustión
	$Total_{carbon}$	63.57	kg	Peso total de carbón para suplir pérdidas en el recirculador

4.2 SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE DE COMBUSTIÓN PARA HORNILLAS

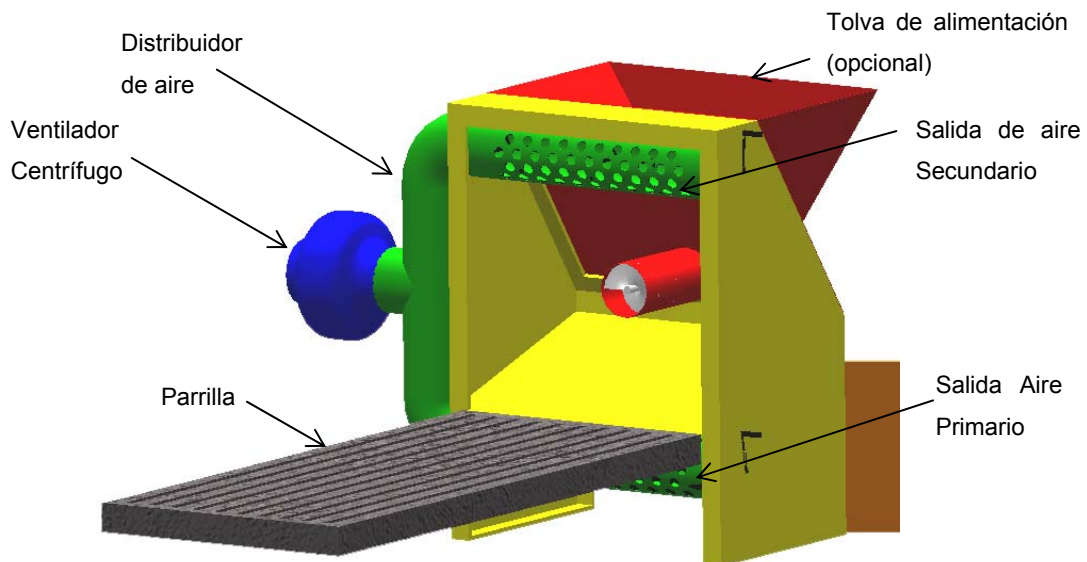
Los problemas más grandes a atacar desde el punto de vista energético en los hornos de tabaco son la combustión y la transferencia de calor a la cámara. Por un lado, como se mencionó en todo el capítulo 3 acerca del proceso de combustión de los hornos, el tiro de aire de combustión no se controla dependiendo de la rata másica de combustible suministrado; por otro lado, la cantidad de carbón

inquemado en las cenizas es muy grande y esto se debe a una pobre mezcla del aire con los finos del carbón en la cámara de combustión. La turbulencia del aire la zona de la combustión es entonces un criterio de diseño para el admisor de aire para las hornillas.

4.2.1 Principio de funcionamiento

En el proceso de combustión se pueden identificar dos tipos de aire: una *aire primario*, cuya función es arrastrar las partículas de combustible a la zona de quemado (hogar) donde se da el proceso de liberación de calor (reacción exotérmica de combustión); el *aire secundario* tiene como función lograr una mayor turbulencia, mezclando íntimamente el aire con el combustible logrando puntos favorables de combustión.

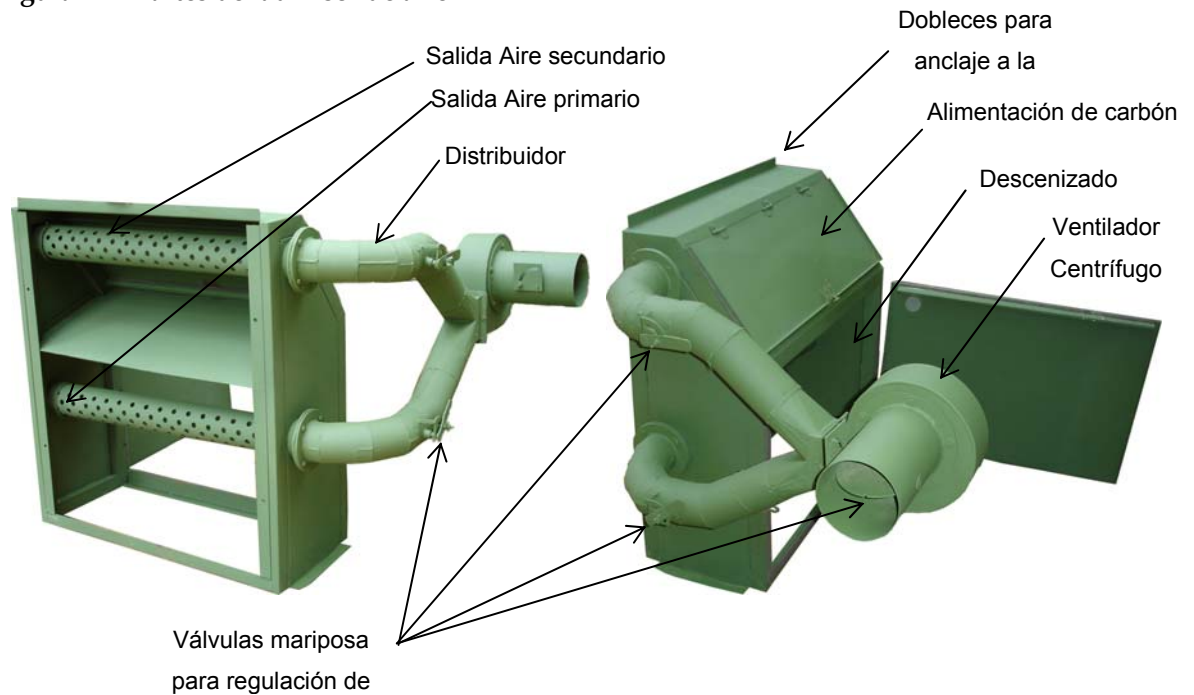
Figura 121 Esquema del admisor de aire para hornillas



Se ve planteada la opción de colocar un dosificador de carbón (Figura 121) en el admisor de aire para independizar la operación de la hornilla del control humano (alimentación de combustible), pero esto requiere más sensores, un motor adicional y más elementos que encarecen el prototipo. El costo es uno de los criterios más delicados en la construcción de los prototipos.

Los agujeros en la salida del distribuidor (de aire primario y secundario) ayudan a que el aire salga con una mayor turbulencia logrando mezclar mejor los finos de carbón con el aire. Además, el admisor de aire debe tener válvulas para regular el caudal de salida a cada uno de los tubos perforados.

Figura 122 Partes del admisor de aire



4.2.2 Expectativas del prototipo

El principal objetivo del prototipo es la reducción de la cantidad de carbón no quemado, muestra que será llevada a laboratorio para cuantificar la cantidad de inquemados en las cenizas. No obstante, la reducción de la cantidad de carbón inquemado en las cenizas no necesariamente implica una reducción significativa del consumo global del carbón si no se tiene en cuenta la cadena energética implicada desde la generación de calor hasta el secado de la hoja de tabaco.

4.2.3 Criterios de diseño

Para mejorar la cantidad de carbón inquemado en las cenizas, el prototipo debe diseñarse bajo los siguientes parámetros:

- 1) Caudal de aire que será de máximo un 250% del aire estequiométrico (teórico). El exceso de aire recomendado para carbón sin pulverizar es de 100% de exceso de aire. Para compensar las pérdidas de flujo, se diseñará para 150% de exceso de aire.
- 2) Aire turbulento. Se colocarán agujeros en la salida de los tubos para tal fin. Este parámetro es difícilmente verificable en la operación real; sin embargo, se comprobará mediante sistemas virtuales CAE para visualizar los puntos de turbulencia más favorables.
- 3) Medidas según el tamaño de la hornilla donde se vaya a instalar.
- 4) Cómoda alimentación de combustible.
- 5) Prototipo sencillo y económico.

❖ *Cálculo estequiométrico y selección del ventilador centrífugo*

Las relaciones matemáticas para el cálculo de la cantidad de aire necesaria para la combustión del carbón se muestran en el numeral Tamaño y tiro de la chimenea, Ecuación 7, Ecuación 8 y Ecuación 9.

Tabla 63 Cálculo del caudal del ventilador mediante relación estequiométrica


Input	Name	Output	Unit	Comment
ANALISIS PROXIMO DEL CARBON				
78.13	C		%	Porcentaje en peso de C
5.2	H		%	Porcentaje en peso de H
.67	S		%	Porcentaje en peso de S
.94	N		%	Porcentaje en peso de N
11.6	O		%	Porcentaje en peso de O
4.31	φ		%	Porcentaje de humedad
.8787	ρ_{aire}		m ³ /kg	Volumen de aire húmedo por kg de aire seco a las condiciones atmosféricas. T=27°C; RH=45%
21	m_{Cmax}		kg/h	Rata másica de carbón máxima en el proceso
BALANCEO. CANTIDAD EN MOLES PARA LA REACCION				
250	a		%	Cantidad de aire teórico para la combustión
	mol_C	65.108	mol	C+O2 -> CO2
	mol_H2	26	mol	2*H2+O2 -> 2*H2O
	mol_S	.209	mol	S+O2 -> SO2
	mol_N2	.335	mol	-
	mol_O2	3.625	mol	-
PESOS DE AIRE POR KILOGRAMO DE COMBUSTIBLE				
	$Wa_{teorico}$	10.325	kg	Aire teórico por kg de carbón seco
	Wa_{real}	25.813	kg	Aire real con el exceso/defecto de aire
	Wa_{wc}	24.701	kg	Aire real por kg de carbón húmedo (wet coal)
	Vwa_{wc}	21.704	m ³ /kg	Volumen de aire húmedo por kilogramo de carbón húmedo
	Qwa	0.1266	m ³ /s	Caudal máximo de aire húmedo ambiental para combustión

Ecuación 37 Caudal de aire del ventilador de combustión según rata máxima de carbón

$$Q_{wa} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{mc_{\max} [kg/h] V_{wa_{wc}} [m^3/kg]}{3600}$$

El caudal de aire de combustión según el primer criterio de diseño es de 0.1266 [m³/s] ó 268.25 [cfm].

Figura 123 Estimación del tamaño del impulsor del ventilador centrífugo



Low-Pressure Blowers											
cfm @ Static Pressure (SP)			Inlet Dia.	Outlet Size, Dia.	Wheel Dia.	Overall Size, Ht. x Wd. x Dp.	Decibels @ 5 ft.	Motor Enclosure	hp	rpm	Amps
1/4"	1/2"	3/4"									
115 VAC, Single Phase, 60 Hz											
515	420	300	6"	7 3/8" x 4 1/4"	6 1/4"	15 5/8" x 15" x 11"	54	ODP	1/6	1750	3.9
1050	960	865	8"	8 1/4" x 5 3/8"	7 3/4"	16 1/2" x 16 1/4" x 13 3/8"	59	ODP	1/3	1750	6.0/3.0
1125	1035	855	9"	10 3/4" x 6 1/2"	9"	18 3/8" x 17 3/8" x 14 1/8"	56	ODP	1/3	1150	7.0/3.5
1870	1710	1500	10"	11 3/4" x 8"	10 5/8"	22" x 20 1/2" x 17 1/4"	61	ODP	3/4	1150	10.0/5.0

Fuente: McMaster Carr

En la Figura 123 se estima el tamaño aproximado del rodete y el motor a conseguir. Para nuestro caso, el tamaño aproximado será de 6 1/4 de pulgada (15.87 cm) y un motor mínimo 1/6 HP a de 1750 RPM.

Figura 124 Especificaciones del motor eléctrico conseguido para el ventilador centrífugo

SIEMENS		1 - MOTOR 1RF3 092-2YB99	
S1	IP23	0.33 HP	Ta -15/40°C FS 1.75
60 Hz	N56J	115 / 230 V	1000msnm
AISL.F	η 47.6	6.3 / 3.15 A.	8.8 Kg
IEC 34	Ia 4.7In	8.0 / 4.0 Afs	BG 090
		COS. φ 0.72	216-259 μF
		Tn/Ta 0.7/1.4Nm	1750 rpm

❖ Dimensionamiento de partes

Igualmente como sucede con el recirculador, las medidas de las hornillas varían de un horno a otro y es entonces necesario adecuar las dimensiones del prototipo al

horno de prueba. Por otro lado, fue necesario la adecuación del ventilador centrífugo en función del impulsor y el motor conseguido en el mercado.

Figura 125 Dimensiones principales de la hornilla para instalación del admisor de aire

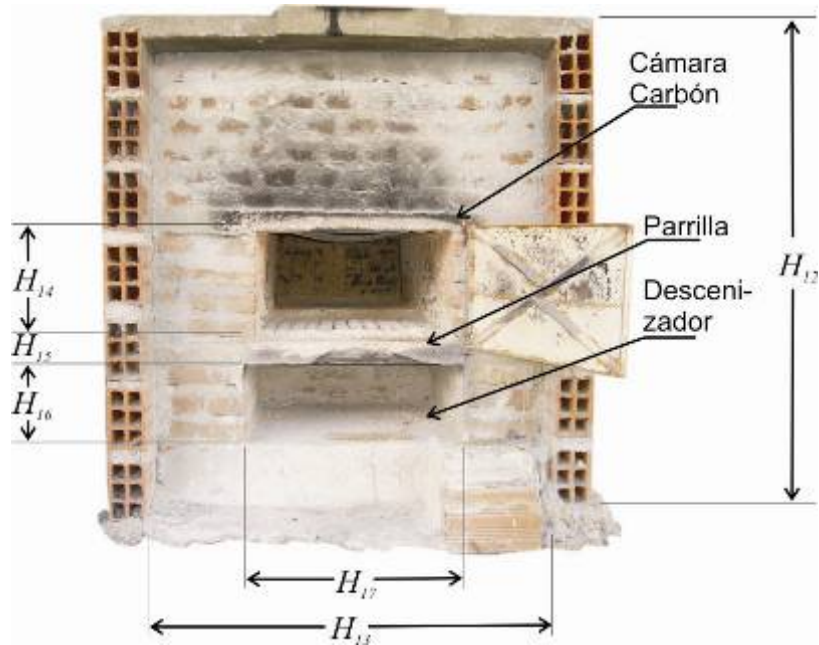


Tabla 64 Medidas de la hornilla de la Figura 125.

Distancia	Comentario	Valor	Unidad
H_{12}	Alto total hornilla	1.58	Metros
H_{13}	Ancho total hornilla	1.55	Metros
H_{14}	Alto cámara de carbón	0.34	Metros
H_{15}	Alto parrilla	0.11	Metros
H_{16}	Alto descenizador	0.27	Metros
H_{17}	Ancho descenizador	0.74	Metros

Los planos finales se encuentran en el ANEXO I. PLANOS DE LOS PROTOTIPOS, Admisor.

❖ *Comprobación con sistemas CAE*

Se hizo dos comprobaciones. En el primero se simula el impulsor a la velocidad del motor con diferentes configuraciones de rodete para evitar vórtices y que diera la cantidad de caudal necesaria para la combustión (Figura 128). La segunda simulación es de la turbulencia generada por la salida de aire (primario y secundario) del admisor de aire para las hornillas (Figura 130).

Figura 126 Impulsor del ventilador centrífugo de 280 cfm



Figura 127 Análisis CFD intermedios para el ventilador centrífugo del admisor de aire

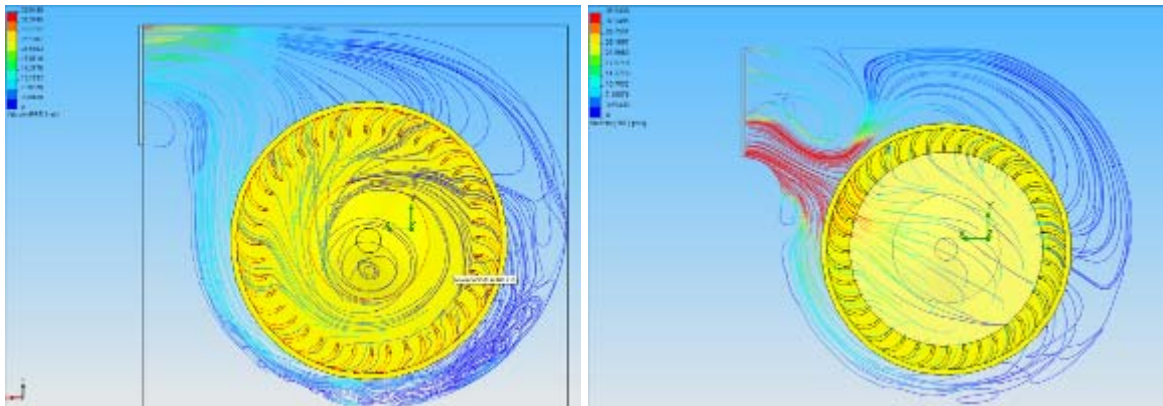


Figura 128 Resultado final satisfactorio del análisis CFD para el ventilador centrífugo

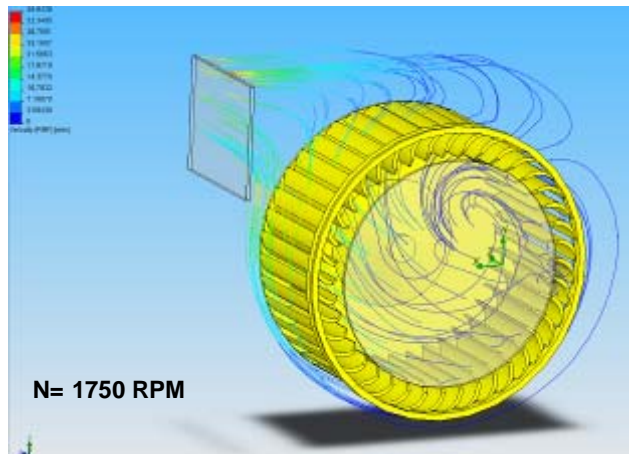


Figura 129 Condiciones iniciales de flujo para el sistema de admisión de aire

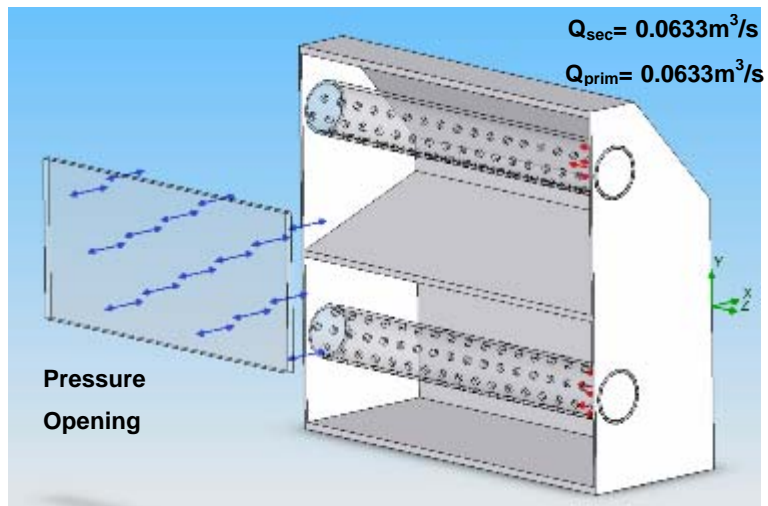
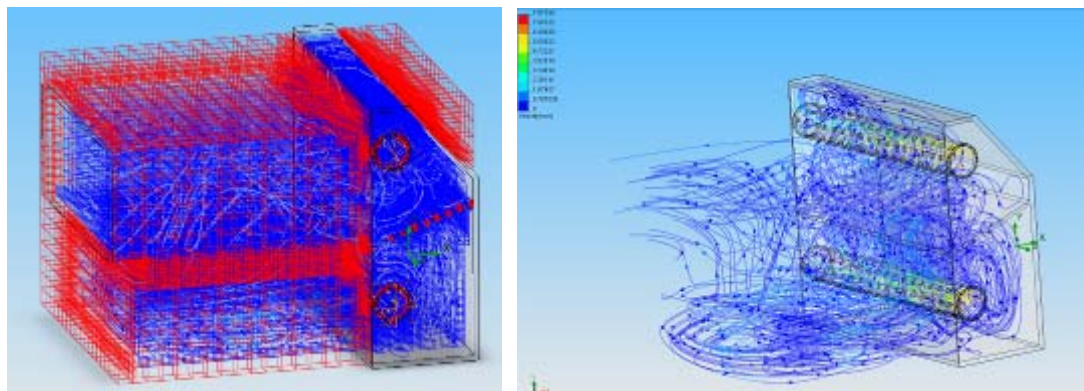


Figura 130 Enmallado y resultados de flujo para el sistema admisor de aire



4.3 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

En la Figura 131 y Figura 132 se sintetiza el proceso de construcción y montaje del recirculador RHT. Los materiales utilizados en la construcción de cada uno de los prototipos se muestran en la Tabla 65 y la Tabla 66, a precios de marzo de 2006.

Tabla 65 Lista de materiales y precios para el recirculador RHT

SISTEMA RECIRCULADOR RHT (MONOFASICA)		PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	CAJA METALICA 4 PUESTOS MONOFASICA PARA TACOS ENCHUFABLES	\$ 10 000	\$ 10 000
1	ROLLO DE CABLE N°.14, 100 m THW (INTEMPERIE) CUALQUIER COLOR	\$ 27 000	\$ 27 000
1	ROLLO DE CABLE N°. 10, 100 m THW (INTEMPERIE) CUALQUIER COLOR	\$ 31 000	\$ 31 000
2	VENTILADORES AXIALES SIEMENS 2CC2 504-5YA3 1800 RPM	\$ 798 080	\$ 1 596 160
1	TACO 1 x 40 AMP	\$ 12 900	\$ 12 900
4	CORTACIRCUITOS AUTOMATICOS ENCHUFABLES SIEMENS Q115 (TACOS)	\$ 10 500	\$ 42 000
		\$ 1 638 160	
1	TERMOCUPLA TIPO J EN ACERO INOXIDABLE CON CABEZAL INDUSTRIAL PEQUEÑO, LONGITUD DEL BULBO 15 cm x 1/4", ROSCA DE CONEXIÓN NPT CON 10 cm ADICIONALES DESPUES DE LA ROSCA DE ACERO INOXIDABLE	\$ 175 000	\$ 175 000
2	RACOR CON ROSCA NPT DE 1/2"	\$ 32 000	\$ 64 000
2	BUSHING PARA SOLDAR EL TUBO	\$ 41 000	\$ 82 000
5	METROS DE CABLE PARA EXTENSION DE TERMOCUPLA	\$ 8 700	\$ 43 500
		\$ 364 500	
1	LAMINAS GALVANIZADAS DE 1x 2 m CALIBRE 20	\$ 38 793	\$ 44 999.88
7	LAMINAS GALVANIZADAS DE 1,2 x 2,4 m CALIBRE 22	\$ 28 448	\$ 230 997.76
3	LAMINAS GALVANIZADAS DE 1 x 2 m CALIBRE 22	\$ 18 966	\$ 66 001.68
3	LAMINA HR 1x2 m CALIBRE 18 PARA CHIMENEA	\$ 40 000	\$ 120 000.00
100	METROS ROLLO DE CABLE REFERENCIA 10 THW (INTEMPERIE)	\$ 862	\$ 99 992.00
9	ANGULOS DE 1,5" x 1/8", 6 m	\$ 30 172	\$ 314 995.68
2	ANGULOS DE 1" x 1/8", 6 m	\$ 10 344	\$ 23 998.08

1	CAJA PORTATACOS 6 PUESTOS	\$ 90 000	\$ 90 000.00
500	REMACHES POP DE 5/32" DE 3/4" DE LARGO	\$ 26	\$ 15 080.00
500	REMACHES POP DE 5/32" DE 1/2" DE LARGO	\$ 26	\$ 15 080.00
3	METROS DE EJE ROSCADO DE 3/8 DE DIAMETRO		\$ 5 000.00
50	TORNILLOS GALVANIZADOS CABEZA HEXAGONAL 5/16" x 1" CON ARANDELA Y TUERCA	\$ 600	\$ 34 800.00
	SOLDADURA		\$ 10 000.00
	PINTURA		\$ 15 000.00
	TUBERIA PVC TIPO SEMIPESADO PARA CHIMENEA (4 m)		\$ 179 000.00
	BROCAS		\$ 7 800.00
			\$ 211 800
	MANO DE OBRA, ANDAMIO, MONTAJE (CON EL ADMISOR)		\$ 2 200 000
	TRANSPORTE (CON EL ADMISOR)		\$ 500 000
			\$ 2 700 000
	OTROS		\$ 200 000
	TOTAL		\$ 5 573 805

Tabla 66 Lista de materiales y precios para el admisor de aire a las hornillas

SISTEMA ADMISION DE AIRE PARA HORNILLAS		PRECIO UNITARIO	TOTAL
3	LAMINAS CR DE 1 x 2 m CALIBRE 18	\$ 43 000	\$ 129 000
1	LAMINA HR DE 1 x 2 m CALIBRE 22	\$ 35 000	\$ 35 000
1	MOTOR MONOFASICO SIEMENS 1/3 HP, REF. 1RF3 092 - 2YB99	\$ 250 000	\$ 250 000
1	IMPULSOR VENTILADOR CENTRIFUGO 280 CFM	\$ 12 000	\$ 12 000
1	ANGULOS DE 1,5" x 1/8", 6 m	\$ 30 172	\$ 30 172
	SOLDADURA		\$ 5 000
	REMACHES CORTOS		\$ 5 000
	TORNILLERIA, VISAGRAS		\$ 8 000
	TOTAL		\$ 474 172

Figura 131 Construcción del recirculador en la planta de desvenado de PROTABACO San Gil (Santander)

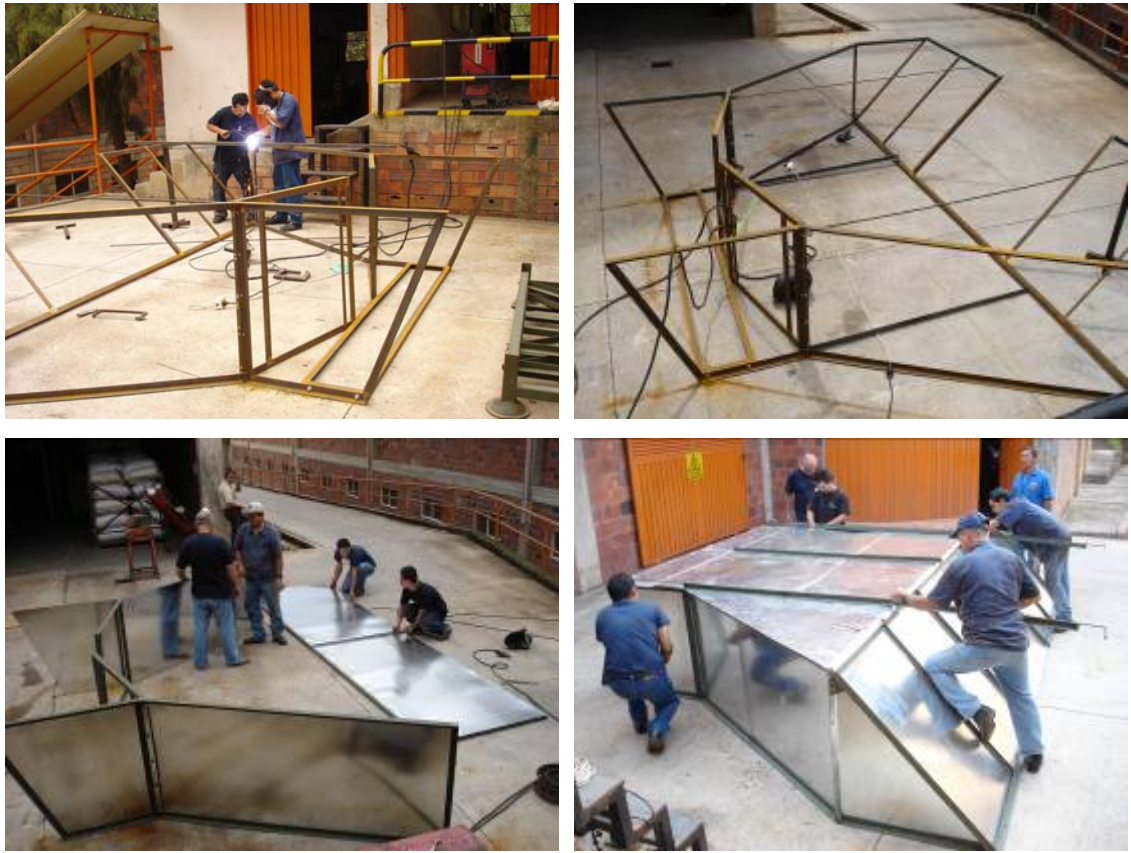


Figura 132 Montaje del recirculador en horno situado en la zona rural de Yaguará (Huila)



(continúa siguiente página)

(continúa) Montaje del recirculador en horno situado en la zona rural de Yaguará (Huila)



Figura 133 Construcción y montaje del admisor de aire para la hornilla



4.4 METODOLOGÍA DE PRUEBAS

El lugar donde se hicieron las pruebas de eficiencia para los prototipos recirculador y admisor de aire de la hornilla tiene las características mostradas en la Tabla 67 y la Tabla 68.

Tabla 67 Parámetros de cálculo para número de hornadas

Parámetro	Valor
Matas por hectárea	20000
Hojas por mata (prom)	22
Hojas por hectárea	440000
Recolecciones por piso	2
Hojas por vara	76 (19 pares dobles)

Tabla 68 Características del lote y la batería de hornos

Área del lote (ha)	5
Número de hornos en batería	3
Variedades sembradas	K326, NC102, PHV50
Rendimiento del lote	2125 kg/ha
Eficiencia del lote	0.7

El cálculo del número de hornadas por horno que tiene lugar en las pruebas por horno es relativamente fácil si se conoce el rendimiento o la eficiencia del lote⁶¹ y la extensión del lote.

⁶¹ La eficiencia o rendimiento del lote de se afectada por problemas fitosanitarios (hongos, plagas, enfermedades), por las malas condiciones climáticas o pobres labores de campo, que reducen la cantidad de hojas por mata y matas por hectárea.

Tabla 69 Cálculo del número de hornadas por horno y distribución de las pruebas

Piso	Varas por horno	Hojas por horno	Hojas por batería	Hojas a curar	Hornadas por horno
Bajero	850	64600	193800	440000	3
Mediamata	1000	76000	228000	440000	2
Superior	1150	87400	262200	440000	2

La metodología de pruebas se hizo de la siguiente manera:

- 1) Se montan ambos prototipos en un solo horno, seleccionando el que tuviese mayor facilidad de acceso a los materiales transportados para el montaje. En la batería de tres hornos se escogió uno de la esquina ya que, para hacer comparaciones (cenizas, calidad del tabaco), el horno más parecido era el del otro extremo.
- 2) Se trabajó el horno de prueba del siguiente modo: una hornada trabajando como horno convencional, dos hornadas trabajando con el admisor de aire solamente y otras dos se trabajó con ambos prototipos. Las dos hornadas restantes se dejan como comodín en caso de imprevistos como arreglo de partes de los prototipos, ausencia de energía eléctrica en la finca, intempestivo bajón de rendimiento del lote entre otros.
- 3) Para cada monitoreo del horno en cuestión, se toman datos de acuerdo a los formatos de toma de datos (ver 3.1.3 Formatos de medición y tomas de datos) cada 4, 6 u 8 horas, dependiendo la rapidez de secado. Además, se registra el consumo de carbón, atizada por atizada.
- 4) En aras de tener un mayor control del proceso, se usa el formato del ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Etapas de curado, y sensores UMMI para tomar decisiones en la operación del horno.
- 5) El tabaco del horno de prueba se clasifica y se vende aparte para tener una mayor claridad de la condición y calidad con que sale el tabaco.

4.5 CUADROS DE RESULTADOS

Los indicadores medibles y verificables planteados en la concepción del proyecto de investigación fueron:

- 1) Reducción de la cantidad de combustible no quemado en las cenizas.
- 2) Reducción del consumo de combustible en peso.
- 3) Uniformidad de los parámetros de curación.

4.5.1 Análisis de las cenizas

Para comparar las dos formas en que fue operado el horno en estudio, se muestras de carbón no quemado del descenizador al final de cada proceso. La primera muestra se tomó del horno del otro extremo al horno en estudio en la misma batería de hornos, con el mismo diseño y tamaño de parrilla pero trabajando sin ningún prototipo. La segunda (derecha de la Figura 136) es la muestra de ceniza trabajando el admisor de aire en el horno convencional. La Figura 135 muestra notablemente que el color de la ceniza es más blanco, símbolo de una mejor combustión y muestra puntos favorables de combustión en la parrilla.

Los resultados de las pruebas a este horno y el horno testigo se muestran en el ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS ORSAT, Análisis de las cenizas. Los resultados concluyen:

- ✚ Se comprueba de nuevo el mismo problema de cantidad de carbón inquemado en la ceniza, corroborando lo mostrado en el apartado Calidad del carbón y análisis de las cenizas, cantidad que está alrededor de 52% en peso.

- ✚ La mejora con el admisor de aire reduce la cantidad de carbón inquemado a un 1, 24% en peso. Esto se logra además teniendo en cuenta las indicaciones de tamaño de carbón adecuado.

Figura 134 Cenizas del horno testigo



Figura 135 Cenizas del horno con admisor de aire



Figura 136 Muestras de ceniza analizadas



4.5.2 Consumo global de combustible

El consumo global de combustible realizado en las pruebas de eficiencia se muestra en la Tabla 71. El ahorro es significativo pasando de un consumo específico de 3.12 en condiciones normales a 1.02 con la mejora hecha con el recirculador y el admisor de aire de la hornilla.

Tabla 70 Cálculo del consumo de carbón por vara

	Varas por horno	Kilos de tabaco secos por horno	Consumo específico	Kilos de carbón por vara
Bajero	850	500	2	1.176
Mediamata	1000	750	2.5	1.875
Superior	1150	1000	3	2.608

Tabla 71 Resultados del consumo de combustible obtenidos en los ensayos de los prototipos

	Prototipo Ensayado		Varas por horno	Carbón			Consumo Específico ⁶²	Tabaco
	Admisor	Recircu- lador		Consumo esperado	Consumo real	Rata Másica Promedio		
HORNO 1	NO	NO	909	1069 kg	993. kg	7.24 kg/h	3.12	BAJERO
HORNO 2	SI	NO	1004	1112 kg	945. kg	6.32 kg/h	2.35	BAJERO
HORNO 3	SI	NO	1046	1962 kg	1030. kg	8.36 kg/h	2.19	MEDIAMATA
HORNO 4	SI	SI	805	1932 kg	649. kg	7.07 kg/h	1.34	SUP.- CORONA
HORNO 5	SI	SI	1010	2323 kg	762. kg	5.64 kg/h	1.02	SUP.- CORONA

Tabla 72 Cálculo del ahorro de combustible por cada uno de los prototipos

	Carbón esperado	Carbón consumido	Ahorro bruto	Ahorro neto prototipos	Ahorro neto promedio	Prototipos
HORNO 1	1069 kg	993 kg	7.10 %	NA	NA	Ninguno
HORNO 2	1112 kg	945 kg	15.01 %	7.90 %	24.15	Admisor de aire
HORNO 3	1962 kg	1030 kg	47.50 %	40.39 %		
HORNO 4	1932 kg	649 kg	66.40 %	59.29 %	59.69	Admisor de aire + Recirculador
HORNO 5	2323 kg	762 kg	67.19 %	60.08 %		

Los cálculos de la Tabla 71 y Tabla 72 concluyen un ahorro del 24% con el admisor de aire y del 35% con el recirculador.

4.5.3 Uniformidad de los parámetros de curación

La uniformidad de los parámetros de curación (temperatura y humedad) en toda la extensión de la cámara ayudada de una buena circulación del aire dentro del horno ayuda a eliminar tabaco de mala calidad. El indicador más importante en este caso es el precio final del tabaco consecuencia de su calidad, pero también se

⁶² Kilos de carbón por kilo de tabaco seco

puede calcular nuevamente la desviación estándar de los registros de los sensores UMMI como en el título Uniformidad.

Tabla 73 Calidad y precio del tabaco curado en hornos convencionales sin reformas

Calidad	Kilos	Precio por kilo	Precio bulto
M3L	190	\$ 4 000	\$ 760 000
M1L	157	\$ 5 250	\$ 824 250
S1L	234	\$ 4 750	\$ 1 111 500
S2L	233	\$ 4 200	\$ 978 600
M2L	129	\$ 4 550	\$ 586 950
BM2O	87	\$ 3 500	\$ 304 500
C2L	56	\$ 3 750	\$ 210 000
TOTAL	1086		\$ 4 775 800
PROMEDIO		\$ 4 397.61	

Tabla 74 Calidad y precio del tabaco curado con el prototipo recirculador RHT

CALIDAD	KILOS	PRECIO POR KILO	PRECIO BULTO
M1L	229	\$ 5 250	\$ 1 202 250
M3L	175	\$ 4 000	\$ 700 000
S1L	244	\$ 4 750	\$ 1 159 000
S2L	234	\$ 4 200	\$ 982 800
TOTAL	882		\$ 4 044 050
PROMEDIO		\$ 4 585.09	

Figura 137 Condiciones sicrométricas de la cámara de secado en horno con tiro natural en función del tiempo

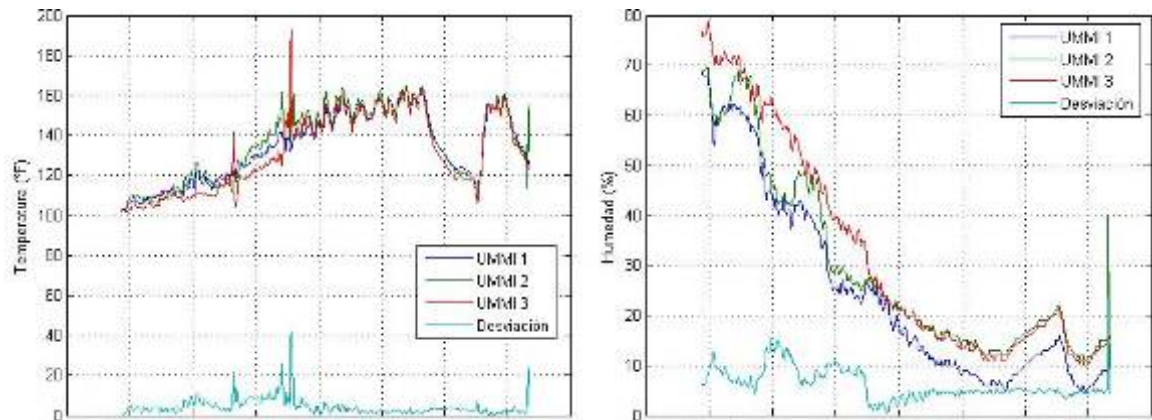


Figura 138 Condiciones sicrométricas de la cámara de secado en horno con recirculador RHT en función del tiempo

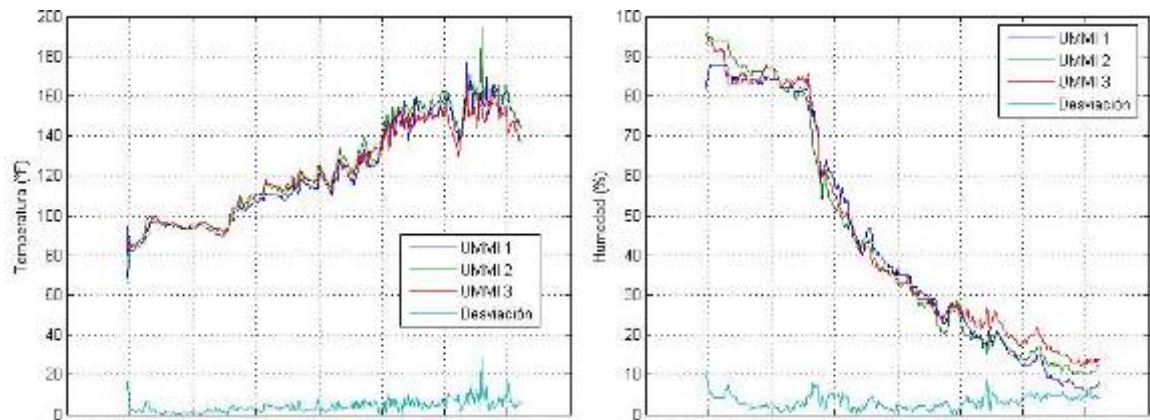
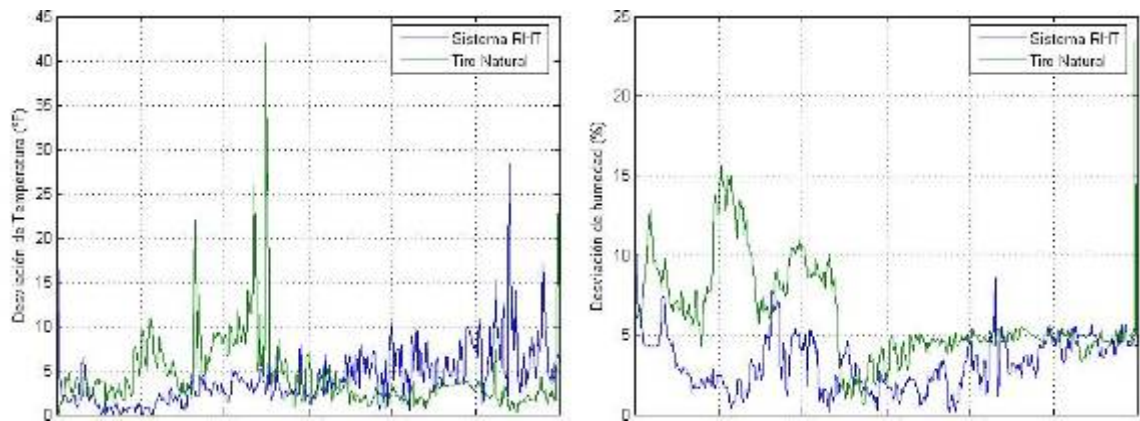


Figura 139 Comparación de las desviaciones estándar entre tiro natural y tiro con recirculador RHT en función del tiempo



La desviación promedio calculada para las temperaturas pasó de 4.323°F del horno convencional al 4.138°F en tiro forzado; la desviación estándar de humedades pasó de 6.207% en horno convencional a 3.254% en horno con tiro forzado. Lo importante es ver en la Figura 139 que la desviación de los parámetros de curación en las primeras etapas es mucho mayor en el horno convencional que con tiro forzado, lo que deja ver que la suposición de la resistencia hidrodinámica del relleno expuesta en el apartado Uniformidad de los parámetros de curación, es disminuida considerablemente.

4.5.4 Aumento de la transferencia de calor por los tubos

Debido al mayor movimiento del aire dentro del plenum, el coeficiente de convección externo en los tubos aumentó. Un indicador de éste fenómeno es la medición hecha de la temperatura superficial de la tubería (Figura 141). El punto de medición número 5 (ver Figura 34 del apartado 3.1.3 Formatos de medición y tomas de datos) muestra que la tubería bajó de temperatura en esa zona, acomodándose a un coeficiente de transferencia mayor. La explicación matemática de éste comportamiento se logra aplicando las leyes de la convección en una porción de tubería y se resume en la Figura 140: los ejes verticales indican la temperatura y la cantidad de calor transferido en función de los coeficientes convectivos interno y externo (plano de planta). Además de ello, se ve una uniformidad mayor en la temperatura de la tubería con el sistema de recirculación RHT.

Figura 140 Temperatura superficial en función de los coeficientes de convección interno y externo de la tubería

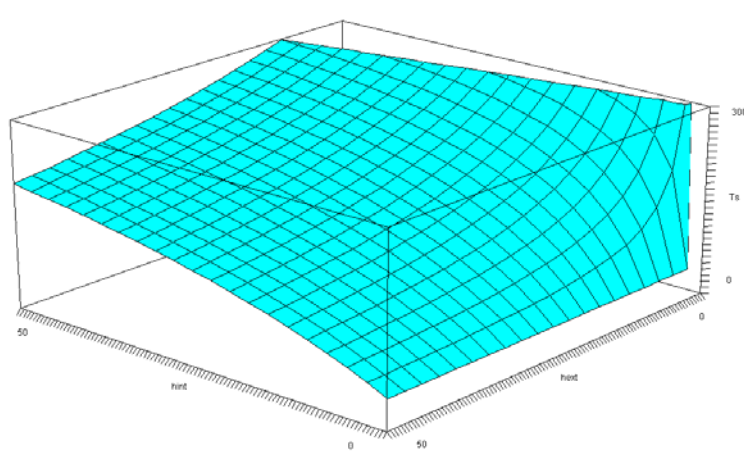


Figura 141 Temperatura superficial de la tubería en los puntos de toma datos. Arriba: horno convencional; abajo: horno con recirculación RHT

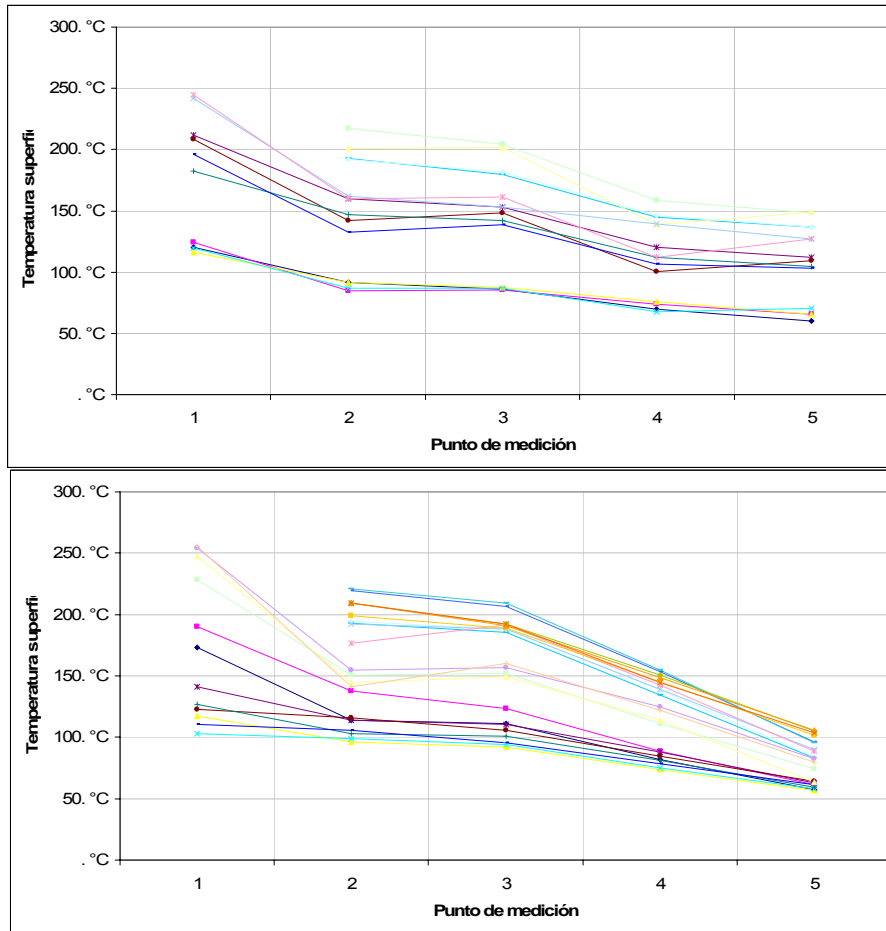
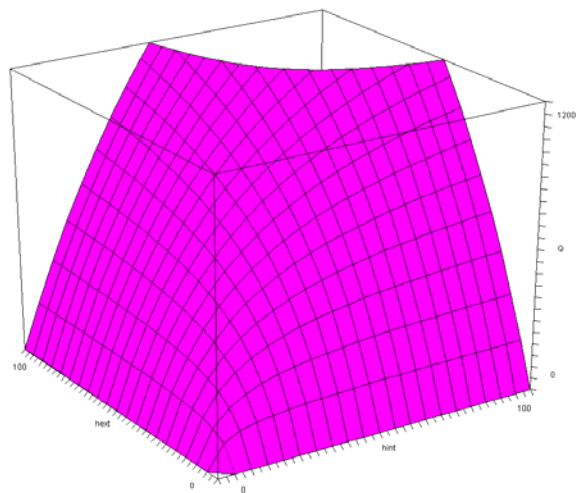


Figura 142 Calor transferido en función de los coeficientes de convección interno y externo de la tubería



4.5.5 Ahorro económico y retorno de la inversión

La amortización de los elementos propuestos se logra aproximadamente en dos años, teniendo en cuenta que en cada programa se hacen entre seis y siete hornadas, y en cada año se hacen dos programas, sumando un total de 14 hornadas por año. Éste retorno de la inversión es relativamente rápida si se tiene en cuenta que un horno cuesta cerca de 13 millones de pesos, el doble de lo que cuestan ambos prototipos (recirculador y admisor de aire para la hornilla) y se financia en un período de cuatro a seis años.

Tabla 75 Cálculo del número de hornadas para recuperar la inversión

			Entradas	Salidas
Costo del prototipo	Recirculador	5 600 000 pesos		\$ 6 080 000 total
	Admisor de aire	480 000 pesos		
Energía eléctrica	Consumo 1 ventilador axial recirculador	6.5 amperios		\$ 100 613 por hornada
	Consumo ventilador centrífugo admisor	4 amperios		
	Factor de potencia motor ventilador axial	0.9		
	Factor de potencia ventilador centrífugo	0.72		
	Tensión de la red	110 voltios		
	Tiempo de amarillamiento	50 horas		
	Tiempo de proceso	168 horas		
	Costo Kilovatio-hora	305 pesos/kilovatio		
Ahorro de combustible	Recirculador	665.625 Kilos/proceso	\$ 167 344 por hornada	
	Admisor de aire	450 Kilos/proceso		
	Precio del carbón	150 Pesos/kilo		
Aumento de la calidad del tabaco	Kilos de tabaco seco por horno	1000 Kilos/proceso	\$ 170 100 por hornada	
	Diferencia de precio del tabaco	189 pesos/kilo seco		
Número de hornadas para recuperar la inversión			26	

Base: Tabaco mediamata; 1875 kg de carbón; 900 kilos de tabaco seco

CONCLUSIONES

- ✚ El proceso más ineficiente en los hornos de tabaco Virginia es la combustión. El problema radica en: 1) no tener la cantidad de aire y la turbulencia necesaria para el proceso de combustión; 2) no usar carbones de tamaño recomendado; 3) no controlar el tiro de aire suministrado por la chimenea; 4) exceder la alimentación de combustible en la parrilla.
- ✚ El proceso de transferencia de calor desde los gases hasta el tabaco es el segundo proceso más ineficiente desde el punto de vista energético.
- ✚ El aislamiento de las paredes no es un aspecto crítico desde el punto de vista en energético para hornos construidos de LADRILLO HUECO. En los hornos de LADRILLO MAZICO la pérdidas son mayores a causa de la mayor conductancia térmica.
- ✚ El problema del aislamiento térmico de la hornilla es también ineficiente: comparando la cantidad de pérdidas por las paredes con las pérdidas por la hornilla, éstas cantidades de calor con casi iguales, lo que significa que a través de la pequeña área de la hornilla se está perdiendo la misma cantidad de calor a través de la gran área de transferencia de las paredes.
- ✚ Las pérdidas de calor por el techo no pudieron ser calculadas, pero hay indicios (cálculos de la resistividad térmica) que apuntan a que éstas son grandes, inclusive más que la cantidad de calor perdida por las paredes.

- ✚ La baja hermeticidad es un imperativo a resolver para hornos con ventilación forzada. Para hornos con tiro natural, la hermeticidad no es inconveniente debido al poco flujo de aire.
- ✚ La mayor circulación de aire presente en los hornos con ventilación forzada, puede ayudar a 1) disminuir el tiempo de curación; 2) disminuir el consumo de combustible 3) uniformizar los parámetros de curación (temperatura y humedad).
- ✚ En los hornos con ventilación forzada, se ve un aumento del coeficiente convectivo sobre la superficie de la tubería a causa del mayor movimiento del aire, mejorando la transferencia de calor.
- ✚ Con ventilación forzada, se podría secar la hoja con una temperatura menor a los 165°F y una pendiente mayor a los 2°F/hora. El poder de secado del aire está condicionado por la humedad relativa, que en los ensayos de recirculación pudo ser llevada a 6%, comparada con el 9 o 10% de los hornos con tiro natural.
- ✚ La uniformidad de los parámetros de curación se logra con un buen cargue y una buena circulación, que puede ser mejorada con la ventilación forzada. El tabaco con ventilación forzada sale más uniforme. Las pruebas muestran un aumento del precio del tabaco en 200 pesos por kilo.
- ✚ Aunque el impacto ambiental no pudo ser cuantificado, el hecho de consumir menos cantidad de combustible implica una disminución de la cantidad de emisiones a la atmósfera por la chimenea.

RECOMENDACIONES

Según las metas generales planteadas en el proyecto, la misión de PROTABACO S.A. y la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER se recomienda:

- ✚ Seguir las líneas de investigación en hornos de tabaco Virginia mediante convenios con las universidades, en pro del mejoramiento de la rentabilidad de los agricultores tabacaleros y mayor calidad del producto a las compañías tabacaleras, grandes generadoras de empleo y tributos a la población colombiana.
- ✚ Concienciar a los agricultores en la importancia de la transferencia de tecnología y la competitividad global del mercado del tabaco.
- ✚ Crear un centro de investigación multidisciplinario financiado por estamentos estatales y privados para sacar adelante propuestas de mecanización y tecnificación agrícola en el sur de Santander y el Huila.

En la operación de los hornos, el proyecto de investigación recomienda:

- ✚ Manejar carbones con un tamaño de más de tres veces la separación de los rieles de la parrilla. Para subir temperatura, manejar esta condición límite y así evitar que el carbón pase a las cenizas como material inquemado.
- ✚ Las pruebas recomiendan atizar cada 45 o 60 minutos en etapas de marchitamiento, secado de lámina y vena y cada 2 o 3 horas para

amarillamiento colocando bloques grandes de carbón (10 a 15 kilos por batch de alimentación de combustible).

- ✚ Usar sensores UMMI para evitar entradas al horno e inspeccionar desde afuera.
- ✚ Usar materiales de la hornilla diferentes a los de cemento, barro y ladrillo ya que ellos presentan grietas y poco aislamiento.
- ✚ Documentar correctamente el monitoreo de los hornos mediante una exhaustiva toma de datos especialmente del consumo de combustible, ya que en la literatura actual parece haber un error de apreciación en el peso del carbón que llega al horno.

En el diseño de los hornos de tabaco Virginia, se recomienda:

- ✚ Tener un suministro de combustible continuo, lo más independiente de la idiosincrasia de los operadores y horneros colocando sistemas semiautomáticos de alimentación.
- ✚ En un sistema de ventilación forzada en la hornilla (admisor de aire) el ventilador debe ser de mínimo 250 cfm de caudal de aire y una parrilla más fina, un diseño que controle el tiro y aumente la turbulencia del aire de combustión dentro del hogar.
- ✚ Aislar el techo y la hornilla. En la hornilla es necesario colocar una compuerta de más grosor o doble capa metálica (apantallamiento) creando una barrera a la transferencia de calor por radiación al ambiente.

- ✚ Para hornos con combustible carbón, reducir el tamaño de la parrilla a la cuarta parte y al mismo tiempo aumentar el tamaño del hogar (en un 20%) y la transferencia de calor por los tubos con aletas o aire forzado.
- ✚ Colocar formas planas en la parte superior de la hornilla y no arqueada para un quemado de carbón más uniforme parecido a un lecho.

BIBLIOGRAFÍA

BENNETT, Roy R.; HAWKS, S.N. y GLOVER, John W. CURING TOBACCO “Flue-Cured”. The North Carolina Agricultural Extension Service (EU). July, 1964.

CORRADINI, Eugenio; CUESTA, Rafael; JIMÉNEZ, María Laura; MUSCO, Julia Maria; SEGESSO, Roberto; ZILOCCHI, Hugo. Caracterización del sector productor tabacalero en la República de Argentina. 3ª edición. Universidad Católica de Argentina. Buenos Aires, 2005.

ESPINAL G., Carlos Federico; MARTÍNEZ COVALEDA, Héctor J.; PINZÓN Nidyan. Agroindustria del tabaco en Colombia. <http://www.agrocadenas.gov.co/home.htm>. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005.

FOX, Robert W. Mecánica de fluidos. 4ª edición.

INCROPERA, Frank. Fundamentos de transferencia de calor y masa. 3ª edición. Año 2000.

LIENHARD, John H. A Heat Transfer Text Book. Massachusetts Institute of Technology (MIT). 3ª edición. Massachusetts, 2005.

MARADEY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica.

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.

MAW, Bryan W. Heat-Pump-Dehumification During the Curing of Flue-Cured Tobacco. University of Georgia. Georgia, 2003.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. Tendencias del el empleo en el sector del tabaco: retos y perspectivas. Oficina Internacional del trabajo. Ginebra, 2003.

PROTABACO S.A. Consideraciones sobre curación de tabaco. Copias minografiadas de la institución.

SUMNER, Paul E. Curing tobacco with heat exchangers.

<http://www.cpes.peachnet.edu/tobacco/curingheat.htm>

<http://www.cpes.peachnet.edu/tobacco/retrofitinfo.htm>.

University of Georgia. Georgia, 2001.

ANEXOS

ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO

Traducido de de: CURING TOBACCO FLUE-CURED. The North Carolina Agricultural Extensión Service

Cambios fisicoquímicos en la hoja de tabaco en sus etapas de curado

La curación de tabaco Flue-cured muestra muchas fallas. Éstas incluyen pintes marrones, pintes verdes, esponjosidad, quemaduras, tejido dañado o podrido, venas sorochas, tabaco hollinado etc.

Se puede reducir o eliminar la mayoría de de estas fallas con una ventilación apropiada y una programación de temperaturas ajustada a la etapa del proceso. Los hornos deben tener ventilaciones inferiores y superiores ajustables. El calor y la humedad son controladas por el apropiado manejo de las ventilaciones y controles de temperatura.

El objetivo en el curado de tabaco es preservar la hoja con el oportuno secado mientras se retiene el potencial de calidad de la hoja curada.

El curado de tabaco es más que secar la hoja. Envuelve cambios químicos y físicos los cuales son necesarios para tener una alta calidad de tabaco adecuado para el productor industrial y el fumador. Se puede entender estos cambios visualizando qué es lo que pasa dentro de la hoja. Esto requiere que se usen controles para influenciar el proceso de curado en la dirección correcta.

Un curado apropiado es un proceso de dos direcciones: un proceso biológico (hoja viva) y un proceso de secado. Una hoja de tabaco madura como tal es tomada de la planta y es un complejo sistema viviente. Ella normalmente contiene de 80 a 90 por

ciento de agua y de 10 a 20 por ciento de materia sólida. Cerca del 25 por ciento de la materia sólida es almidón. El 75 por ciento restante está hecho de numerosos componentes bioquímicos, pigmentos (color), minerales, tejidos de células, etc.

En el curado de tabaco se esfuerza para:

- 1) Mantener viva aloja mientras los cambios biológicos tienen lugar (amarillamiento).
- 2) Parar la actividad enzimática (digestiva) y bioquímica removiendo apropiadamente la humedad de la hoja (fijación de color).
- 3) Preservar la hoja secándola completamente (muerte de la hoja).

Cambios en la etapa de amarillamiento

En la primera etapa del curado (amarillamiento), la hoja debe conservarse viva hasta que los procesos biológicos tienen lugar. Al mismo tiempo, la humedad debe ser removida a una tasa muy lenta sin obstaculizar esos procesos biológicos.

A través de las pequeñas aberturas en la hoja (estomas), un continuo intercambio de gases (oxígeno, dióxido de carbono) y agua tiene lugar.

El oxígeno el cual entra a la hoja durante el proceso de curado es necesario para 1) un apropiado amarillamiento y 2) propiciar la actividad enzimática (digestiva) y la conversión del almidón en el amarillamiento.

El amarillamiento ocurre al tiempo de que la clorofila (pigmento verde de la hoja) se desintegra y desaparece. Los pigmentos amarillos los cuales están inicialmente, son descubiertos y se hacen visibles. La cantidad de pigmento verde en la hoja puede variar con el grado de maduración, la variedad, el clima, la fertilización etc. Sin embargo, la tasa a la cual la clorofila se destruye, va a depender del incremento de la

remoción de humedad y que la temperatura es subida cerca de los 105 y 110°F. Esto es cierto hasta que el contenido de humedad de la hoja se mantenga para tener la hoja viva.

Otro cambio importante en la etapa de amarillamiento es la conversión del almidón en azúcar. Cuando se recolecta y se introduce al horno, la hoja tiene alto contenido de almidón y poco azúcar. A través de reacciones de hidrólisis (combinación con agua), el almidón forma azúcar. A través de la respiración de la hoja, parte de la glucosa es transformada en fructosa. La fructosa puede combinarse con la glucosa para formar sacarosa. Así, la cantidad de almidón decrece con el tiempo y el total de azúcares aumenta.

A pesar de que son independientes una de otra, la conversión de almidón y la descomposición de la clorofila ocurren simultáneamente. Por lo tanto, la desaparición del pigmento verde (etapa de amarillamiento) es generalmente una medida útil y visual de la formación de azúcar. Debe anotarse que las variedades difieren en el grado de amarillamiento que muestran en un momento dado durante esta etapa. Esto debe tenerse en cuenta al juzgar cuándo una hoja es lo suficientemente amarilla para empezar el período de fijación de color.

Una porción de estos azúcares hace combustión (oxidación) y en el proceso se desprende dióxido de carbono que escapa a través de los estomas. La oxidación de los azúcares desprende calor, causa del calentamiento de las pilas de tabaco sin curar en el cobertizo del horno.

Otro cambio físico importante en la etapa de amarillamiento es la pérdida de agua. Bajo condiciones normales, entre un 20 y 30 por ciento del agua debe desaparecer de la hoja (ver curva de secado, Figura 91) durante el amarillamiento. Sin embargo, si la hoja es secada muy rápidamente, puede quedar fijado el color verde y suspenderse ciertos cambios biológicos y químicos. Esto causa una fumada áspera e irritante en el tabaco. Los cambios químicos deseables durante la curación son en

realidad un proceso suavizado que hace la fumada menos fuerte y más dulce y agradable.

El itinerario de temperatura y humedad que se siga durante la etapa de amarillamiento y la duración de ésta, pueden tener una gran influencia en el rendimiento y la calidad del tabaco Virginia. En efecto, la etapa de amarillamiento se considerada con mucha frecuencia como la de más importancia en la curación de tabaco.

Cambios en la tapa de fijación de color (marchitamiento) y secado de lámina

Durante la curación, pueden tener lugar algunos cambios indeseables. En la crítica etapa de secado de la hoja o fijación del color, ocurre frecuentemente que la hoja se vuelve café o se “mancha”. Esto sucede cuando la temperatura de la hoja se acelera o se sube mucho mientras que todavía hay mucha humedad en ella. La oxidación de polifenoles dentro de la hoja será excesiva. Bajo estas condiciones, la hoja puede volverse completamente café en el término de pocos minutos a una temperatura de la hoja de 130°F a 135°F. Para evitar que la hoja se vuelva café o se manche, hay que secar su tejido hasta un nivel de seguridad de aproximadamente el 40% al 50% de humedad, antes de llevar la temperatura del aire más allá de los 130°F.

La impaciencia por lograr el color amarillo deseable, hace elevar la temperatura por encima de los 130°F y 135°F antes del tiempo oportuno.

El “sponge” que es un tinte grasoso que resulta de prolongar demasiado la etapa de amarillamiento, no debe confundirse con el “escaldado café” (tabaco oscuro y quemado) de que se habló antes.

Etapa de secado de vena

El objetivo de esta etapa es “matar” o terminar de sacarle la humedad a la vena y a la hoja para poder conservarla.

Una vez que la hoja está seca, la mayoría de los cambios bioquímicos han cesado. Durante la etapa de secado de vena hay una pequeña pérdida de compuestos volátiles, que trae como consecuencia pérdida de peso, especialmente si se emplea una temperatura muy alta.

La temperatura para “matar” no debe exceder de 160°F a 170°F. De otra suerte, resultará un tabaco chamuscado que se conoce porque presenta una pigmentación roja.

Control de las condiciones de curado

Ya con un conocimiento de algunos de los cambios que tienen lugar en la hoja durante la curación, es más fácil proporcionarle al tabaco las condiciones correctas para cada etapa de la curada.

El hornero maneja la curación controlando tres factores que afectan la hoja: 1) la temperatura del aire, 2) el contenido de humedad del aire, o sea la humedad relativa y 3) movimiento del aire.

Con sistemas de ventilación natural o convencional, estos tres factores no pueden ser controlados independientemente bajo todo tipo de condiciones. Un ajuste para cambiar un factor puede alterar otro. Sin embargo es posible tener un mayor

control de cada factor, con ventilación forzada o que recircule el aire, como el sistema de curación a granel (Bulk-curing).

La temperatura es controlada por la cantidad de calor en el horno. La cantidad de calor requerida para sostener cierta temperatura es determinada por: 1) la cantidad de aire fresco que entra en el horno (ventilación); 2) la temperatura del aire fresco; 3) la cantidad de agua que se evapora en la hojas; 4) lo bien aislado que esté el horno; 5) el volumen y la temperatura del tabaco que hay en el horno.

La humedad relativa que influencia el ritmo de secado es controlada manipulando tanto el sistema de calor como la ventilación. Como hay ciertas limitaciones en la temperatura en varias etapas de la curación, la humedad es controlada en gran manera aumentando o disminuyendo la ventilación. Mientras más se aumenta la ventilación y más aire fresco penetra en el horno, más disminuye la humedad relativa, siempre que se sostenga la temperatura interior.

El aire a más temperatura tiene mas potencial de secado dentro del mismo contenido de humedad. Elevando la temperatura del aire de 85°F a 105°F, casi se dobla la capacidad de retención de agua del aire (humedad relativa). Si el contenido de humedad del aire se sostiene constante con estas temperaturas, la hoja se secará dos vece más rápidamente a la temperatura más alta.

El movimiento o el flujo del aire en los hornos se consigue con ventilación natural o forzada. En la ventilación natural, el aire caliente es más liviano que el frío, lo que hace que el aire caliente se mueva hacia arriba. A medida que el aire caliente fluye hacia arriba, el aire más pesado de afuera presiona por las aberturas de las ventilaciones inferiores y se sitúa en la parte baja, donde se calienta y se eleva. Por lo tanto, la cantidad de ventilación que se obtiene por convección natural depende

del tamaño de la apertura para ventilación, la situación de estas aperturas y la diferencia entre la temperatura interior y la exterior, como también de la altura del horno.

Para la ventilación forzada, se colocan ventiladores en los hornos convencionales en un sistema de distribución de aire en el sistema de curación a granel (Bulk-curing) para forzar el aire caliente a pasar por entre el tabaco y que luego salga por las ventilaciones superiores.

Si el horno es hermético y bien aislado, el ritmo de secado puede controlarse mejor con la ventilación forzada.

Bajo condiciones normales, no es necesario un movimiento muy rápido del aire durante las etapas de amarillamiento y secado de vena, con el sistema de curación convencional. Pero en la curación a granel si es necesario sobre todo en las etapas de secado de la hoja y la vena para asegurar una distribución uniforme del aire y del calor. En la etapa de amarillamiento, es mejor mantener una humedad suficiente en el horno para ayudar a conservar vivas las hojas hasta que estén amarillas.

Durante la etapa de secado de vena debe propiciarse un poco de ventilación después de alcanzar los 170°F. Esto asegura una humedad baja hasta que la mayoría de las venas estén secas, especialmente en los hornos herméticos convencionales y en los de curación a granel. El reducir la ventilación, guarda calor.

En la curación a granel el aire es forzado continuamente a pasar por entre el tabaco durante todas las etapas de la curación, mediante un ventilador de alta capacidad.

Para asegurar un secado satisfactorio y uniforme, la proporción del flujo del aire debe ser por lo menos de 40 pies cúbicos por minuto por cada pié cuadrado de la superficie del piso del horno.

Procedimiento para la operación

Para la curación, lo ideal es contar con un tabaco uniformemente maduro; sin embargo, el tiempo y temperatura durante la etapa de amarillamiento puede ser ajustado hasta cierto punto, para compensar pequeños errores cometidos al juzgar el estado de maduración en el momento de cosecharlo. El amarillamiento es más o menos una continuación del proceso de maduración. Generalmente, la hoja curada que estaba completamente madura y es sometida a un proceso de amarillamiento relativamente prolongado, tendrá un color mas bien anaranjado y será más suave y tendrá más grano que el tabaco cosechado cuando no estaba tan maduro y es amarillado durante menos tiempo.

El horno no debe sobrecargarse en relación con la ventilación y la capacidad de calentar. Debe cargarse lo más uniformemente posible para poder suministrar al tabaco un movimiento uniforme del aire y del calor.

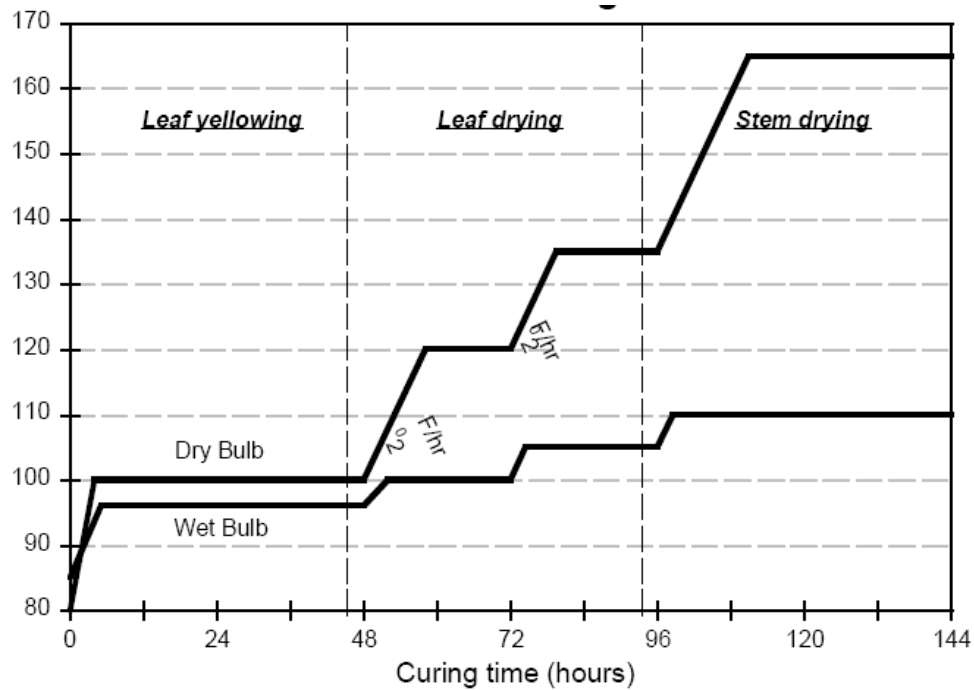
No existe un modelo único de proporciones de temperatura y ventilación que pueda aplicarse a cada horno de tabaco, ya que hay que contar con muchos factores y estos pueden variar considerablemente de una época a otra. Entre estos factores pueden tenerse en cuenta los siguientes:

- 1) Las características de calidad que desean los compradores.
- 2) El grado de maduración de las hojas cosechadas.

- 3) La humedad de las hojas al cosecharlas.
- 4) El cuerpo y la posición de las hojas en el tallo.
- 5) Las características de la variedad sembrada.
- 6) El espaciamiento del tabaco en el horno.
- 7) La temperatura exterior.
- 8) Lo hermético que sea el horno.
- 9) El tamaño de las ventilaciones inferiores y superiores.
- 10) La velocidad del viento en el exterior.

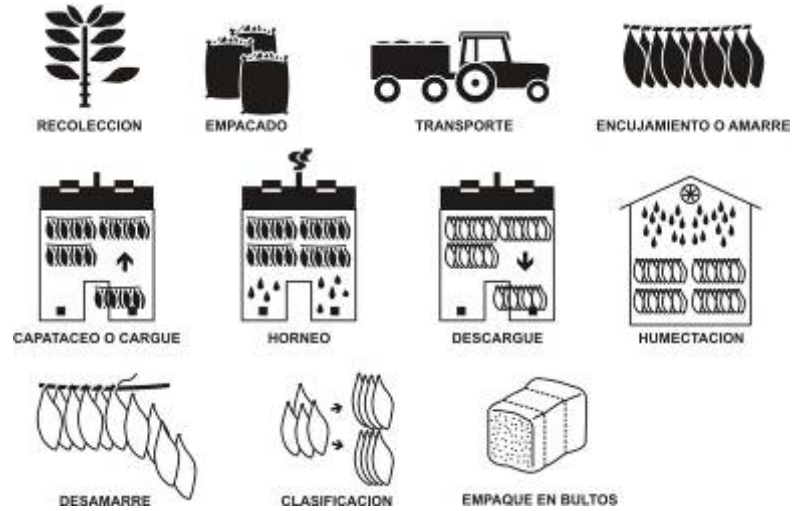
Teniendo que contar con tantas variables, puede verse muy fácilmente por qué no ha sido posible establecer un modelo único o fórmula única para curar el tabaco Virginia. Dentro de las condiciones promedias, puede esperarse que las cartas de curación mostradas en las figuras siguientes den buenos resultados.

Carta de curación de tabaco en hornos Flue y Bulk cured



Beneficio del tabaco

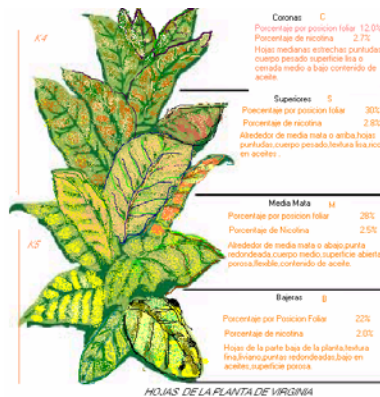
Cadena del beneficio del tabaco



Recolección

La recolección es la práctica mediante la cual se cosecha las plantas u hojas de tabaco que estén físicamente maduras; en la planta de tabaco las hojas empiezan a madurar de abajo hacia arriba y su inicio coincide con el momento de la floración. El punto de recolección lo da la coloración amarillenta de la hoja, símbolo de una saturación de los almidones en la hoja y el máximo contenido de materia seca.

Posiciones foliares en tabaco Virginia.



Maduración de la hoja, recolección y buleto de la hoja de tabaco hoja a hoja



Amarre

Después del proceso de recolección y el transporte en bultos o sacas, la hoja empieza la inanición y comienza a convertir los azúcares. Inmediatamente se corta la hoja del tallo, el proceso es “tejer” las hojas en unas varillas de madera llamadas *cujes* o *varas* para luego colocarlas en las barrederas del horno. Se colocan 18 o 20 pares dobles de hojas por vara. Se pueden necesitar de 7 a 9 amarradores por horno.

Zona de amarre y proceso de amarre en la parte frontal del horno



Capataceo

Consiste en subir las varas de tabaco para el posterior proceso de curado. Éstos deben tener la habilidad de “trepar” por las barrederas para llegar hasta la última. Se debe repartir uniformemente el número de vara amarradas en el volumen del horno para mejorar la uniformidad. El proceso de capataces puede requerir 3 o 4 jornales.

Capataz de amarre subiendo las varas de tabaco a las barrederas del horno



Horneo

Tan pronto se carga el horno, el proceso más delicado del beneficio comienza. Las etapas de curado tienen una duración determinada por la condición del tabaco. Los horneros programan las condiciones de temperatura y humedad operando la cantidad de combustible en la hornilla y las ventilaciones superiores (por dentro del horno) e inferiores del horno (por fuera).

Hornero operando la hornilla y las ventilaciones inferiores



Acondicionamiento

La humectación se requiere para quitar la propiedad “crocante” del tabaco tan pronto se seca la vena y poder transportarla y manipularla en la clasificación. Para lograr la humectación o acondicionamiento del tabaco, se usan humidificadores que hacen aspersión de agua aumentando la humedad relativa del cuarto, humedad que es absorbida por las hojas secas.

Proceso de pre-humectación en el horno y humectación final en la fosa

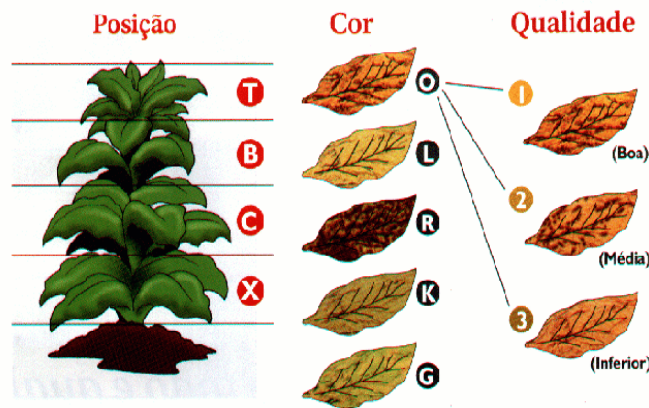


Clasificación

En el tabaco Virginia se debe separar por tres criterios fundamentales:

- Piso foliar: bajero, mediamata, superiores y coronas.
- Grado de madurez: maduro, inmaduro, sobremaduro, pasado.
- Color: limón claro, limón oscuro, naranja, gris, verdoso.
- Cuerpo: liviano, medio, pesado.
- Daño: porcentaje de daño en lámina (0 a 100%).
- Tamaño: Mayor a 50 centímetros, entre 40 y 50 centímetros, entre 30 y 40 centímetros y entre 20 y 30 centímetros.

Posiciones foliares en la clasificación del tabaco



El empaque se hace colocando manillas de tabaco igual, en bultos de entre 15 y 60 kilogramos de peso. El tamaño del bulto debe ser: 70 centímetros de ancho, 80 de largo y 50 centímetros de alto. Las "patas" o parte gruesa de la vena deben quedar hacia el exterior del bulto. Los bultos deben venir sin tapas y bien armados con 3 o 4 cabuyas.

Proceso de clasificación y construcción de bultos de tabaco



ANEXO B. SISTEMAS DE CURACIÓN DE TABACO

El tabaco es una planta herbácea perenne de alta floración que forma parte de la familia de las solanáceas. Es el producto no alimenticio más ampliamente cultivado en el mundo escogido por agricultores de más de 120 países porque se desempeña bajo condiciones climáticas variables y condiciones del suelo adversas, el cual abastece las demandas de muchos mercados en todo el mundo.

La planta de tabaco crece de uno a tres metros en altura y produce de 10 a 20 hojas en su tallo central. Más de 90% del tabaco en el mundo crece entre los 40° latitud norte y los 40° latitud sur; sin embargo, se han encontrado cultivos que crecen a más de 60° latitud norte.

Los indígenas americanos cultivaban el tabaco antes de la llegada de los españoles y recolectaban sus hojas. Para producción comercial, las flores son capadas para que la hoja coja cuerpo y crezcan debajo del tallo que las sostiene. Diferencias en el suelo y clima producen hojas con características específicas y requieren diferentes métodos de cultivo, abono, fertilización, control de plagas y enfermedades, recolección y curado. Todas las variedades del tabaco provienen del género *Nicotiana*; como la principal fuente de tabaco comercial se tiene la familia *Nicotiana Tabacum*. *Nicotiana Rustica* también se usa comercialmente pero en tabaco orientales.

Figura 143 Cultivo de tabaco Virginia en los EU



Figura 144 Agricultor tejiendo varas de tabaco en Cuba



Los cultivadores y productores de tabaco han desarrollado un amplio rango de tipos morfológicos diferentes, desde los de hoja pequeña con características muy aromáticas hasta las altas matas para tabacos para cigarro. Por ello, cada tipo de tabaco es generalmente definido por el método de curación aplicado. La curación es la etapa final de la producción de tabaco. Después de ello, las hojas son vendidas y transformadas en el producto de tabaco final como por ejemplo cigarrillos, cigarros, tabaco para mascar y para pipa.

Uno de los pocos cultivos que requieren del curado lo es el tabaco, constituyendo este proceso un factor de gran significación para la obtención de altos rendimientos y calidad debido a que la composición química que tiene la hoja en el momento de la recolección sufre una serie de cambios en las diferentes fases del curado, dichas transformaciones dependen de la calidad de la materia prima y de las condiciones ambientales tales como: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, y del manejo que el productor realice durante el proceso. Durante el proceso de curado, la humedad de la hoja de tabaco es reducida de un 80 a un 20 por ciento asegurando la preservación del mismo. Por otro lado, los diferentes métodos de curación también enriquecen el aroma natural de la hoja. Como los diferentes productos de tabaco requieren diferentes características de hoja, el distintivo “falovur” de cada tipo de tabaco es la que determina su viabilidad en el uso de los diferentes productos de tabaco.

En los hornos de tabaco, las hojas se deshidratan en un periodo de tiempo. Después de que el proceso de curado se completa y la hoja se ha secado lo suficiente, se introduce aire fresco al horno para aumentar ligeramente su humedad para acondicionarlo al transporte y evitar desmoronamiento.

Hay cuatro métodos usados para curar tabaco para propósitos comerciales. Los métodos más comunes de curación de tabaco son:

- 1) Curación Fire-cured
- 2) Curación Sun-cured
- 3) Curación Air-cured
- 4) Curación Flue-cured
- 5) Curación Bulk-cured

Al conjunto de estos elementos de post-cosecha se le denomina *beneficio del tabaco*. En el ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO, Beneficio, se muestra en detalle el beneficio del tabaco para los sistemas de curación más comunes como el sistema Air-cured, Flue-cured y Bulk-cured.

Los métodos de curación que se dan en Colombia acorde al tipo de tabaco que se siembra son los sistemas Air-cured, Flue-cured y se están implementando sistemas Bulk-cured.

CURADO POR FUEGO O “FIRE-CURED”

El curado Fire-cured fue uno de los principales sistemas de curación para la producción de tabaco para cigarrillos y cigarrillos. Consistía en exponer el tabaco (generalmente en un recinto cerrado) al humo de la combustión de cierta madera que le confería propiedades aromáticas y de “flavour”. Esta característica lo hacía tener una eficiencia energética muy alta ya que el calor de los gases se aprovechaba al máximo. A mediados de los años 40 se descubrió que éste sistema generaba compuestos dañinos como las nitrosaminas por la reacción de los compuestos amínicos alcaloides (entre estos la nicotina) con los elementos producto de la combustión (óxidos de nitrógeno)⁶³, causantes de cáncer y por esta razón se decidió convertir los hornos con el uso de un intercambiador de calor (sistema Flue-curing) que consiste en la adecuación de tubos o cañones saliendo de la hornilla dispuestos en forma simétrica. Son hornos pequeños están contruidos en el piso

⁶³ <http://www.lsc.org/tobacco/farming/growing/curing.html>

El tabaco Fire-cured es generalmente más oscuro en color, es usado en su mayor parte para mezclas del tabaco de pipa, para aspirar, y tabaco para mascar; tienen un azúcar bajo pero un alto contenido de nicotina, y las hojas se curan en una atmósfera encerrada en humo. El tabaco Fire-cured (usando temperaturas muy inferiores comparado con el sistema Flue-cured), puede tomar de unos pocos días hasta 4 semanas.

Figura 145 Horno Fire-curing



CURADO AL SOL O "SUN-CURED"

Las hojas están expuestas al sol para quitar la mayor parte de su humedad antes de ser curadas al aire para completar el proceso. Este tabaco es escaso: de todos los tabacos "Sun-cured", el mejor sabido son los así llamados tabacos orientales de Turquía, Grecia, Yugoslavia, y Balcanes. Un producto más eficiente en mano de obra a cosechar, el tabaco oriental es caracterizado por alto aroma, hojas pequeñas y poco azúcar y nicotina. Por lo general entre más grande la hoja más suave es el aroma. Por lo tanto el tabaco oriental es tan caro para cosechar por muchas manufacturas de tabaco. Los tabacos achinados están a menudo crecidos en terrenos más pobres en la Europa sur y el Oriente Medio. Después del

almacenamiento, se agrega humedad para este tipo de tabaco. El tabaco puro - los cigarrillos turcos contienen 100 % el tabaco oriental no mezclado - o mezclado, oriental es usado en cigarrillos, cigarros puros, tubería, aspiración o tabaco de mascar.

Cultivo de tabaco Sun-cured en Indonesia



CURADO POR AIRE O "AIR-CURED"

El poder de secado lo da el medio ambiente con un mínimo control artificial de la humedad; en este tipo se incluyen el tabaco Burley y tabacos negros. Se usan estructuras abiertas con poco o nada de calor artificial. Las hojas de tabaco se cuelgan en sargas y el objetivo es el mismo, proporcionando las condiciones adecuadas para que la hoja cure y seque. Este procedimiento puede durar de 4 a 8 semanas. Para dar las diferentes etapas del curado al aire, el tabaco de primeras etapas se coloca en las sargas inferiores y a medida que transcurre el proceso, las sargas se van subiendo hasta llegar a la última barredera donde hay poca

humedad; este tipo de secado le da al tabaco secado al aire un color un poco mas marrón o caoba y con un contenido de azúcar menor. El tabaco Burley es el segundo tipo de tabaco más conocido en el mundo, y es propio de América Central y Suramérica. El tabaco Burley, conocido también como tabaco blanco, es usado para hacer cigarrillos con blends aromáticos, mientras que el tabaco Negro es usado para tabaco para mascar y para aspirar. El tabaco Burley es una cepa de tabaco con defecto de clorofila, es una planta un poco más pequeña que la del Virginia y se usa para cigarrillos y cigarros con “flavor” o condimentados.

Sartas de tabaco para curado al aire



CURADO POR HORNOS CONVENCIONALES O “FLUE-CURED”

También conocido como “Flue-cured Virginia” o sólo Virginia. Es el proceso de curado más conocido de curado de tabaco. Es usado principalmente en la industria de cigarrillos y el tipo de tabaco mas común es el Virginia (muchas veces también conocido como tabaco rubio, aunque el tabaco rubio abarca otros tipos como el Burley). El proceso consiste en hacer circular aire caliente a través de las hojas de

tabaco, resultado de un proceso de calentamiento indirecto de la combustión de combustibles. El tabaco “Flue-cured” es secado en un recinto cerrado con un quemador donde se genera el calor dirigido por cañones o tubos extendidos dentro del horno. La temperatura del horno es gradualmente ascendida hasta que las hojas y la vena están completamente secas. El tabaco Virginia debe su nombre al hecho de haber sido empleado por primera vez en este estado norteamericano: es originario del sureste de los EU, y es la variedad de tabaco más sembrada en el mundo. Las variedades curadas del modo “Flue-cured” necesitan de clima caliente, humedad, lluvia, y un terreno más bien arenoso para el cultivo que dura aproximadamente cuatro meses al año. El proceso “Flue-cured” puede tomar cerca de una semana y fija el azúcar en un alto contenido, mientras que el contenido de nicotina está en un grado medio o alto. Las hojas pasan de color verde a una coloración limón-naranja. Hoy en día, los cultivadores han encontrado que el método “Bulk-cured” es más efectivo económicamente debido a la reducción de la mano de obra, a la calidad del tabaco y control que se tiene sobre el proceso.

Hornos convencionales Flue-cured en Brasil



CURADO POR HORNOS “BLUK-CURED” O A GRANEL

La curación a granel o Bulk-curing es muy parecida a la curación convencional: usa fuego indirecto (es decir, los gases de combustión no se mezclan con el tabaco sino hay un intercambiador de calor que calienta el aire) y se usa en tabaco Virginia. La mayor diferencia es que en la curación a granel el tabaco no se amarra en varas sino que se coloca en unos bastidores o canastas de varillas (equivalentes a unas 5 o 12 varas por bastidor, dependiendo el tamaño). Esto trae ventajas ya que la curación Flue-cured tiene un tratamiento “hoja a hoja”, mientras que mientras que la curación Bulk-cured se trata el tabaco a granel.

Bastidores y horno para curado tipo Bulk-cured



Como las hojas son colocadas muy cerca de una de otra en los bastidores (o racks) es necesario forzar el aire con ventiladores a través de la masa de tabaco antes de depender del movimiento natural del aire ascendente como en los hornos

convencionales. Puede ser necesario usar temperaturas y humedades más altas⁶⁴ en los hornos Bulk-curing ya que el aire de proceso es recirculado y se puede llegar a un ritmo de secado más rápido.

La curación a granel ha venido aumentando año por año. Muchos cultivadores han cambiado a este sistema y han encontrado que pueden reducir su trabajo en un 50% ahorrando en mano de obra y combustible. Para muchos cultivadores, la mayor desventaja de la curación Bulk-curing es el costo inicial del equipo.

⁶⁴ Para mayor información acerca de las condiciones de curado, ver ANEXO A. GENERALIDADES ACERCA DE LA CURACIÓN DE TABACO

ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

En los proyectos de investigación es necesario disponer de elementos de medición y análisis calibrados de modo que las pruebas pudieran ser reproducidas en otras ocasiones.

Los instrumentos de medición utilizados para el monitoreo y diagnóstico fueron los siguientes:

- 1) **Termocupla tipo J**, midiendo la temperatura dentro de los tubos en el primer metro de tubería. Esto nos ayuda a estimar el coeficiente de convección interno a los tubos, la temperatura generada en la hornilla y por consiguiente el calor transferido a la cámara. La termocupla viene acompañada con un convertidor análogo-digital que traduce la información enviada desde el sensor como voltaje a un display en el panel frontal del convertidor. La termocupla tiene un rango de temperatura desde 32 a 1400°F (0 a 760°C) hecha de acero inoxidable, y las especificaciones son las siguientes: bulbo de 15 cm de largo (medio diámetro de la tubería del horno) por 1/4" de diámetro, rosca NPT de 3/4" distancia cabezal-rosca de 10 cm para evitar contacto del cable con la superficie del tubo, cinco metros cable encauchetado para termocupla y cabezal de aluminio. El convertidor es de marca SHIMADEN SR71.

Termocupla tipo J colocada en el primer tramo del tubo derecho y convertidor en la pared



Especificaciones SR70 de SHIMADEN

<p>Display Digital display: 7 segments / Measured value (PV) Green LED 4 digits, Set value (SV) Orange LED 4 digits Parameter display: By 7 segment LEDs for PV and SV Action display / colors: 3-type LED lamp indication • Control output (OUT) / Green • Auto tuning (AT) / Green • Alarm (AH and AL / HB) / Red Display accuracy: $\pm (0.5\% \text{ FS} + 1 \text{ digit})$ excluding cold junction temperature compensation accuracy in the case of the thermocouple input. $\pm 5\% \text{ FS}$ for temperatures below 400°C (750°F) of thermocouple B. Display accuracy range: $23 \pm 5^\circ\text{C}$ Display resolution: Depends on measuring range (0.1, 1) Measured value display range: -10~110% of measuring range (-210~680°C for -200~600°C of R.T.D. input) Sampling cycle: 0.5 sec. Setting Setting: By 4 front key switches Setting range: Same as the measuring range. Refer to Table of Measuring Range Codes. Input Type of input / measuring range: Thermocouple, R.T.D. and voltage (mV) input types: Multi-input, Multi-range Refer to Table of Measuring Range Codes. Voltage (V) and current (4~20mA) input types: by code selection Thermocouple: B, R, S, K, E, J, T, N {U, L (DIN 43710)} External resistance: 100Ω max. Input impedance: 500kΩ min. Burnout: Standard feature (up scale) Cold junction temperature compensation accuracy: $\pm 2^\circ\text{C}$ (5~45°C) R.T.D.: JIS Pt100 / JPt100 3-wire type Amperage: Approx. 0.25mA</p>	<p>Lead wire tolerable resistance: 5Ω max. / wire (The 3 lead wires should have same resistance.) Voltage: 0~10, 10~50, 0~100mV DC or 0~1, 1~5, 0~10V DC Input impedance: 500kΩ min. Current: 4~20mA DC Receiving impedance: 250Ω Sampling cycle: 0.5 sec. PV bias: ± 20.0 unit in case the decimal point is included in the measuring range. If not, ± 200 unit. PV filter: 0~100 sec. (0 = without filter) Isolation: Insulated between input and output (not insulated between input and system, SV bias and CT input) Control Control mode: Auto-tuning PID control / On-Off control Proportional band (P): Off, 0.1~999.9% FS (Off setting: On-Off action) Integral time (I): 1~6000 sec. Derivative time (D): 0~3600 sec. (0 sec. setting: PI action) On - Off hysteresis: 1~999 unit Proportional cycle: Fixed to 20 sec. during contact output Fixed to 2 sec. during SSR drive voltage output Control output characteristics: RA / DA selectable (set RA when shipped) Set value function (SF): Off (Off = 0.00) and 0.01~1.00 Control output type / rating Contact output (Y1): SR71: 240V AC 2A / resistive load: 1.2A / dielectric load SR72, SR73 and SR74: 240V AC 2.5A / resistive load: 1.5A / dielectric load Current output (I1): 4~20mA DC / load resistance: 600Ω max. SSR drive voltage output (P1): 15±3V DC (with load resistance at 1.5kΩ) / load current: 20mA maximum Voltage output (V1): 0~10V DC / load current: 2mA maximum Isolation: Isolated between control output and system and input</p>
---	--

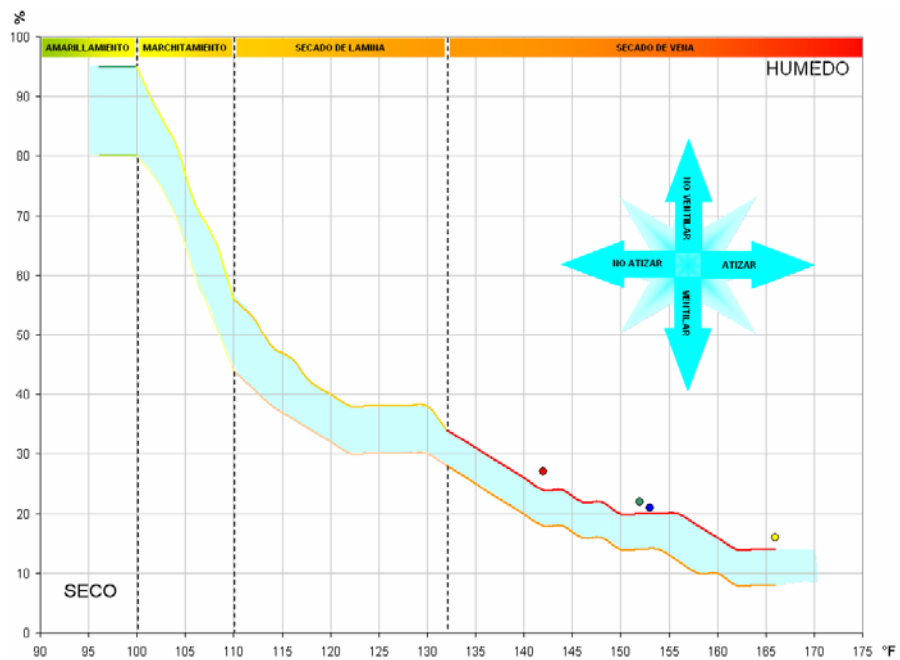
- 2) **Sensores termohigrómetros UMMI**, con capacidad de almacenar datos cronológicamente.

Sensores termohigrómetros: UMMI (arriba) y Taylor (Abajo)



Para controlar mejor los parámetros de curación, se hizo un programa en EXCEL para graficar las diferentes temperaturas y humedades de los sensores UMMI y el rango recomendado por etapa.

Gráfica de control de parámetros del horno con los sensores UMMI



- 3) **Termohigrómetro digital Taylor**, para medir las condiciones ambientales y verificar la incidencia ambiental sobre a operación del honro.

Taylor 1452 Digital Indoor/Outdoor Thermometer and Indoor Hygrometer

- Indoor temperature measuring range: +23°F to +122°F (-5°C to +50°C)
- Outdoor temperature measuring range: -58°F to 158°F (-50°C to +70°C)
- Temperature resolution: 0.1°F/°C
- Indoor humidity measuring range: 20% to 99% RH
- Humidity resolution: 1%
- Power requirements: two AA (1.5V) alkaline batteries, with expected life of 1 year
- Dimensions (with table stand not extended):
3-1/4 inches (83 mm) wide
3-1/4 inches (83 mm) high
1 inch (25 mm) deep

Termohigrómetro Taylor 1452 digital



- 4) **Pirómetro infrarrojo** para medir la temperatura superficial en los tubos de intercambio de calor, la temperatura del tabaco, de las paredes del horno entre otros. Para realizar las mediciones sobre superficies metálicas se colocaron parches de color negro para corregir la emisividad de estas superficies. Para otras superficies no metálicas, no es necesario colocar parches.

Toma de datos de temperatura con el pirómetro en la hornilla



Parches para medición de temperatura en la superficie de los tubos



Especificaciones del pirómetro infrarrojo **RAYNGER® MINITEMP™ RAYMT2**

TEMPERATURE RANGE	0 to 500°F (-18 to 260°C)
ACCURACY AT 73°F (23°C)	±2% or ±3.5°F (±2°C), whichever is greater; For targets at 0 to 30°F (-18 to -1°C), ±5°F (±3°C)
REPEATABILITY AT 73°F (23°C)	±2% of reading or ±3°F (±2°C), whichever is greater
RESPONSE TIME	(95%) 500 mSec
AMBIENT OPERATING RANGE	32 to 122°F (0 to 50°C)
EMISSIVITY	Preset to .95
LASER (MT4 ONLY)	Class II
DISPLAY	7 second hold, LCD backlight, °F or °C selectable
DISTANCE TO SPOT RATIO	8:1
POWER	9V Alkaline or NiCd battery
WEIGHT	0.5 lb (227g)
DIMENSIONS	6 x 4 x 1.5 in (152 x 101 x 38 mm)



- **Applications**

- Automotive
- HVAC
- Electrical
- Food Safety
- Work, home and recreational

- **RAYMT2**

- Emissivity preset at 0.95; 0 to 500°F (-18 to 260°C)

- **RAYMT4**

- Emissivity preset at 0.95; 0 to 500°F (-18 to 260°C)
- FDA & IEC Class II laser warning label in English

5) **Balanza**, para medir el consumo de carbón y estimar la eficiencia el horno convencional comparado con el de recirculación y con un balance energético.

Figura 146 Balanza para determinar el consumo de carbón en el tiempo



Formato de toma de datos del consumo de carbón en la prueba del horno de Yaguará

Fecha y hora	Etapas	TC (°C)	Kg de carbón

- 6) **Voltiamperímetro**, para medir el consumo de energía eléctrica de los ventiladores y el admisor de aire de la hornilla cuando se trata de elementos eléctricos.

Voltiamperímetro de pinza



ANEXO D. CÓDIGOS EN MATLAB DE LOS PROGRAMAS

Para facilitar los cálculos de diagnóstico y otras tareas repetitivas, se creó cuatro programas en código MATLAB para realizar las tareas más fácilmente y generar salidas gráficas personalizadas. Con motivos de orden y presentación, los programas, subprogramas y funciones se encuentran en el CD.

Programa: modelo.m

Objetivo: Calcular la cantidad de transferencia de calor en los tubos

Programa: Performance.m

Objetivo: Generar la curva recomendada de secado del tabaco en función del tiempo por cada etapa

Programa: Puntos.m

Objetivo: Generar la salida grafica del recirculador y la generación de los puntos de geometría para pasar a ANSYS.

Datos de entrada: Medidas del horno y de las láminas galvanizadas

Programa: Reaccion.tkw

Objetivo: Calcular la relación estequimétrica de aire-combustible para la combustión de carbón.

Programa: Uniformidad.m

Objetivo: Calcular la variación estándar de los puntos de medición UMMI para las pruebas de tiro forzado y natural.

Datos de entrada: Archivo espacio de trabajo Uniformidad.mth

**ANEXO E. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS CENIZAS Y ANÁLISIS
ORSAT**

Análisis de las cenizas para el proyecto RHT hecha por Ingemominas

		2006-10-19
LABORATORIOS DE QUÍMICA	INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS	Página 241 de 1
REMITENTE	PROTABACO S. A. Ingeniero Rodolfo Bolaños	
DIRECCIÓN	Km 1 vía San Gil - Barichara, Santander	
E-MAIL	fajara82@gmail.com, rbolanos@protabaco.com.co	
TIPO DE MUESTRA	Cenizas	
SOLICITUD No.	418 de 17/10/2006	
MUESTRA	10252-E	10253-E
REFERENCIA	Muestra 2 Testigo	Muestra 3 Prueba Prototipo Recirculador
<u>Resultados del análisis en la muestra secada al aire:</u>		
Humedad residual, % en peso	1,34	0,14
Materia volátil, % en peso	9,34	1,19
Cenizas, % en peso	47,90	98,62
Carbono fijo (calculado), % en peso	41,42	0,05
Inquemados, % en peso	50,76	1,24
<u>En la muestra como se recibe:</u>		
Humedad total, % en peso	1,43	1,03

Análisis ORSAT

En el año 2004 se contrató a la empresa INAMCO S.A. para determinar las condiciones de salida de los gases de chimenea en un horno convencional en el municipio de Rivera (Huila). Este diagnóstico hacía parte del proyecto de recirculación RAF (4.1.1 Proyecto RAF). Para ello, el análisis se hizo bajo dos modos de operación del horno en estudio: el primero, como horno convencional (tiro natural) y con el recirculador RAF (tiro forzado).

Análisis ORSAT Tiro Natural

Tabla 76 Emisiones contaminantes y comparación con normas ambientales en tiro natural

EMISIONES CONTAMINANTES			NORMAS AMBIENTALES			
EMISIÓN	kg/hr	mg/m ³	kg/hr MIN. SALUD Dec. 02/82 CAM	CUMPLE CAM	mg/m ³ DAMA RES. 1208/03	CUMPLE DAMA
PARTICULAS	0.304	353.22	6.51	SÍ	300	NO
SO₂	0.255	296.18	SIN NORMA	-	600	SÍ
NOx	0.013	15.28	SIN NORMA	-	400	SÍ

Tabla 77 Análisis Orsat de los gases de chimenea en tiro natural

GAS	PORCENTAJE EN CHIMENEA	PORCENTAJE EN AIRE LIMPIO	PESO MOLECULAR	TOTAL (lb / lb-mol)
CO₂	8.8	0.0	44	3.87
CO	0.0	0.0	28	0.0
O₂	11.7	21.0	32	3.74
N₂	79.5	79.0	28	22.26
PM gas				29.88

Análisis ORSAT Tiro Forzado

Tabla 78 Emisiones contaminantes y comparación con normas ambientales en tiro forzado

EMISIONES CONTAMINANTES			NORMAS AMBIENTALES			
EMISIÓN	kg/hr	mg/m ³	kg/hr MIN. SALUD Dec. 02/82 CAM	CUMPLE CAM	mg/m ³ DAMA RES. 1208/03	CUMPLE DAMA
PARTICULAS	0.259	258.95	6.51	SI	300	SI
SO ₂	0.270	270.48	SIN NORMA	-	600	SI
NO _x	0.048	47.60	SIN NORMA	-	400	SI

Tabla 79 Análisis Orsat de los gases de chimenea en tiro forzado

GAS	PORCENTAJE EN CHIMENEA	PORCENTAJE EN AIRE LIMPIO	PESO MOLECULAR	TOTAL (lb / lb-mol)
CO ₂	6.7	0.0	44	2.95
CO	0.0	0.0	28	0.0
O ₂	12.5	21.0	32	4.0
N ₂	80.8	79.0	28	22.62
PM gas				29.57

ANEXO F. IMPLEMENTACIÓN DE HORNOS DE CURACIÓN TIPO BULK-CURING EN COLOMBIA

La tendencia mundial en curación de tabaco es implementar hornos de tipo Bulk-curing; Colombia no se puede quedar atrás en esta tendencia, y menos sabiendo que el sector tabaco es un fuerte generador de empleo, divisas por importaciones y tributos al estado por su comercialización.

Intentando solucionar los problemas de costos en la curación de tabaco Virginia, se han pensado varias alternativas. La primera era la de importar hornos extranjeros con tecnologías de países como Argentina, Brasil y los Estados Unidos. Esta idea tiene muchas ventajas, ya que los hornos extranjeros tienen años de experiencia en el sector tabacalero, son diseños optimizados, tienen soporte técnico y garantía. Años atrás esta iniciativa fue tomada independientemente por agricultores con posibilidades económicas, pero las propuestas no fueron viables operacionalmente porque no se acoplaron al contexto energético nacional. Los impuestos de importación, los costos de montaje y transporte los hacían tener una inversión inicial muy alta y el retorno de la inversión era muy lento; el combustible utilizado era bastante costoso en el contexto colombiano a pesar de que eran eficientes; en fin, esta solución fracasó en sus primeros intentos por mejorar el sistema de curación de tabaco Virginia en Colombia.

La segunda idea es la de implementar y reemplazar por hornos manufacturados en Colombia, con nueva tecnología, eficientes, menos contaminantes y con nuevos materiales. Esta idea se está ensayando en un modelo de horno Bulk-cured en el Centro Agropecuario La Angostura del municipio de Campoalegre (Huila). El

hecho de perder la inversión de un horno convencional -que se estima en unos \$16'000.000.00 para 2,5 hectáreas- e invertir en otro inicialmente más costoso, no es muy atractivo para los agricultores, sabiendo que son ellos mismos los que compran las infraestructuras de curación con financiamiento de las compañías tabacaleras. Con este prototipo se piensa empezar a concientizar a los cosecheros en el ahorro energético y cuidado ambiental, a la par que el proyecto va tomando forma de un modo que finalmente sea económico y comerciable. Son propuestas que a mediano o largo plazo tendrán acogida en la zona y tendrán mejor beneficio que los hornos tradicionales. Este proceso de concienciación se está dando en capacitaciones en proceso de curado, operación del horno modular y a la par, la compañía trabaja en mejora e investigación de este prototipo.

Horno modular Sena Angostura

El primer horno de curación tipo Bulk-curing está siendo implementado

Ventajas

- ✚ Uso de combustible carbón.
- ✚ El ahorro de combustible en un 28%. Se hace más evidente en el horneado de hojas alteras.
- ✚ El ahorro en costos por jornales en 33%. Se da en todo el proceso.
- ✚ El concepto modular agiliza los procesos de financiamiento y construcción.
- ✚ Reducción de las emisiones particuladas al ambiente
- ✚ No se tiene peligro de incendio ya que la cámara de secado es independiente de la del calor y el flujo de aire es hacia arriba.
- ✚ La calidad del tabaco aumenta en promedio 200 pesos por kilo.

- ✚ El esfuerzo físico en los jornales en todos los aspectos disminuye, especialmente en amarre y horneo. La seguridad aumenta.
- ✚ Reducción del área construida en un 18% para hornos.
- ✚ Los controles externos evitan abrir el horno para inspeccionar el tabaco y controlar las condiciones.
- ✚ El proceso de investigación es enriquecido. Hay que seguir investigando y ensayando en busca de nuevas soluciones.
- ✚ Recuperación de la inversión a 9 años.

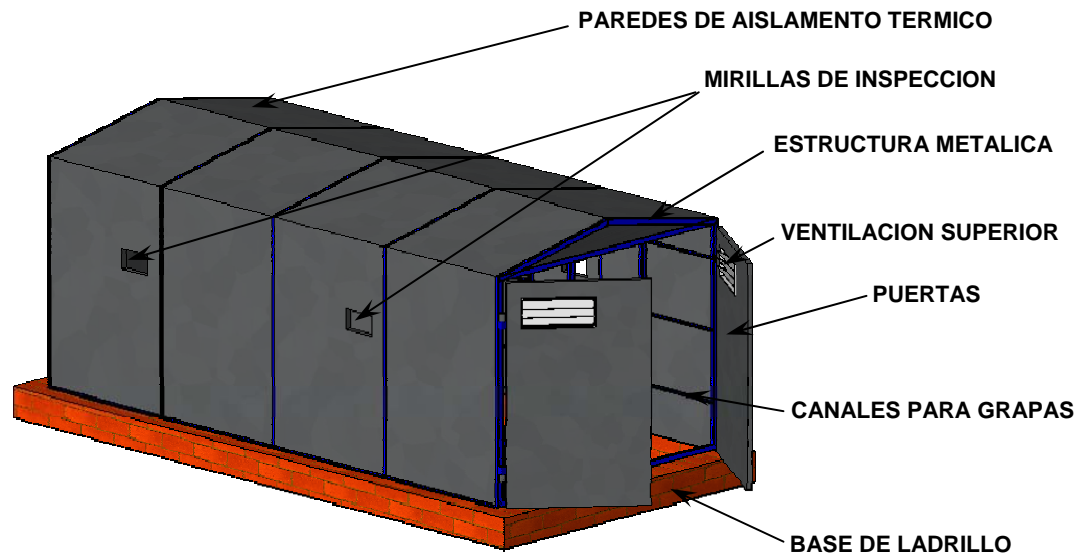
Desventajas

- ✚ El sector rural tiene aún inconvenientes con el suministro de electricidad. Un motor estacionario es necesario para suplir posibles cortes de energía.
- ✚ El costo inicial es mucho mayor que en los convencionales. Esto causa escepticismo en los agricultores.
- ✚ El mantenimiento requiere técnicos mecánicos.

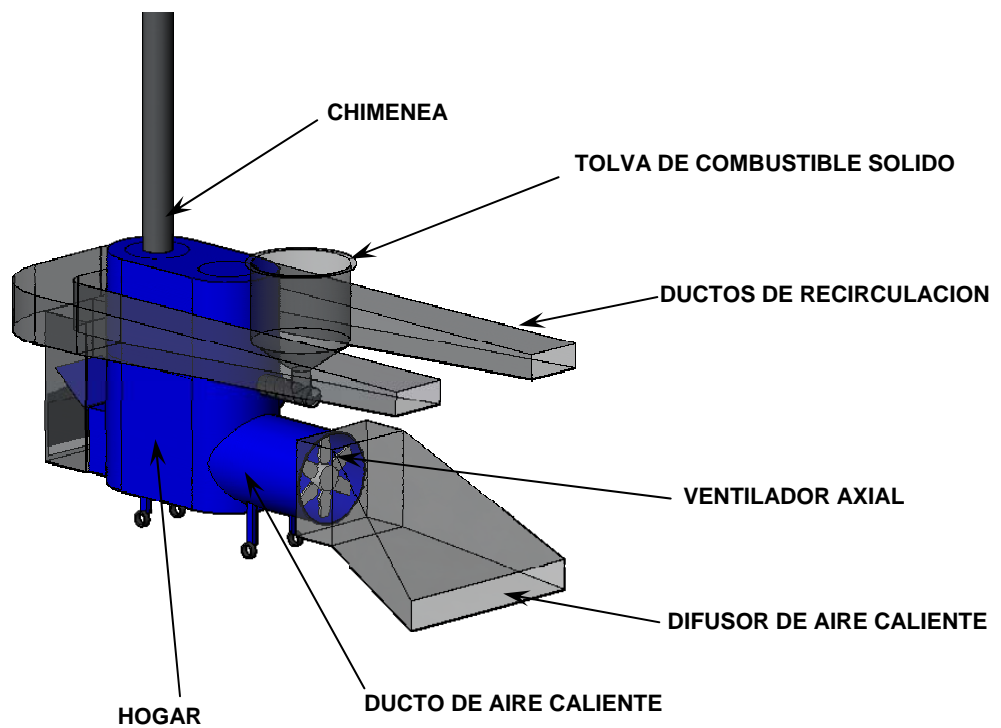
Primer horno modular tipo Bulk-curing en Colombia en el municipio de Campoalegre (Huila)



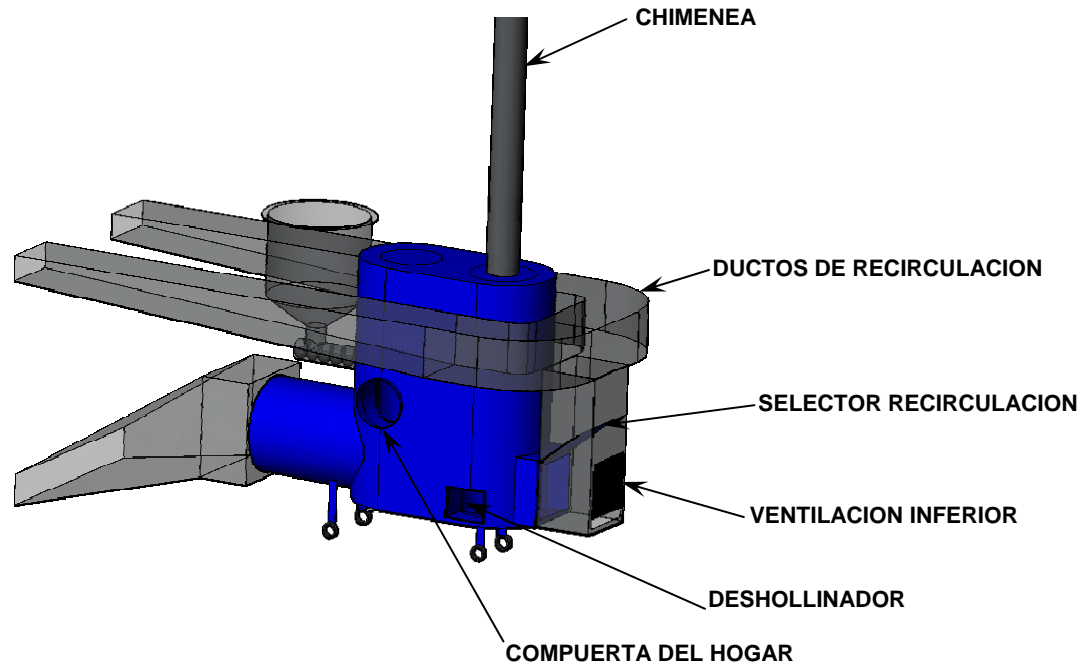
Componentes de la cámara de curado y secado del horno nodular



Componentes de la unidad de generación de calor del horno modular



Componentes de la unidad generadora de calor y recirculación de aire del horno modular



El diseño de los hornos a granel (Bulk-curing) en el mundo no varía mucho de un país a otro. Consta básicamente de una unidad generadora de calor u hogar, la cual transfiere la energía de combustión al aire de proceso que, por medio de ductos, se inyecta a la masa de tabaco gracias aun gradiente de presión que genera un ventilador. En la cámara de curado hay una cubierta exterior aislada térmicamente y en su interior, a manera de barrederas, una estructura para colocar el tabaco a ser curado. Dentro de los tipos de hornos que trabajan con combustibles, hay una chimenea de evacuación de gases de combustión.

Hogar. Es el sitio interno donde sucede la combustión, responsable de la variable temperatura. Consta de una *parrilla*, una *pared de transferencia de calor con aletas* y un *descenizador*. Está recubierta por un material refractario para evitar pérdidas al ambiente. La cámara de curado tiene una pintura a base de poliuretano resistente a la temperatura y humedad.

Ducto de aire caliente. Se ubica el *ventilador axial* que succiona el aire desde la pared exterior del hogar e impulsa el aire caliente al *difusor de aire*. El ventilador es accionado por un motor de 5 HP de potencia, con transmisión por correas y un eje en dos chumaceras. El aire de proceso nunca se mezcla con los gases de combustión. Para ello, el aire de proceso pasa por las paredes externas del hogar y hace la transferencia de calor ayudado por aletas.

Difusor de aire. Conecta y distribuye el aire caliente que va del *ducto de aire caliente* y lo entrega al interior de la *cámara de secado y curado*. Sus funciones son principalmente de distribuir simétricamente el aire caliente de proceso e incrementar el área transversal de flujo para aumentar la presión estática.

Chimenea. Evacua los gases de combustión y da el tiro de la combustión.

Tolva de combustible sólido. Consta de una tolva de combustible sólido, el cual se descarga al hogar promedio de un *tornillo dosificador* tipo sin fin.

Ductos de recirculación. Conjunto de tuberías de sección rectangular que toman el aire saturado y tibio de la *cámara de curado y secado* y lo pasa nuevamente por la zona de calentamiento para ser reintegrado a la cámara.

Selector de recirculación. Suspende o habilita la recirculación de aire. Cuando el selector suspende la recirculación, se recomienda abrir la *ventilacion inferior* para dar entrada al aire fresco del exterior.

Tornillo dosificador de carbón. De material hierro fundido; gira gracias a un motorreductor de $\frac{3}{4}$ de HP el cual tiene un variador de frecuencia instalado para ajustar la velocidad de rotación acorde a la necesidad de incrementar o

decrementar la temperatura. El variador tiene una frecuencia desde 10 hasta 72 Hz. El motor tiene una transmisión por cadena.

Parrilla y descenizador. Son dos aros circulares fundidos ubicados justo debajo del hogar, los cuales tienen la separación correcta entre sus barras para dar la entrada de aire necesaria en la combustión y garantizar de que el carbón no sea muy fino. Un carbón muy fino puede atascar la parrilla evitando la entrada de aire. El descenizador está soldado inferiormente a la parrilla y se usa para sacudir la ceniza.

Deshollinador. Es una cavidad en la unidad de quemado para extraer el hollín o particulado sólido precipitado por el ciclón. El ciclón está justo por debajo de la raíz de la chimenea dentro de la cámara.

Ventilación inferior. Compuerta para graduar la entrada de aire fresco del ambiente o suspenderla. Toma aire fresco del ambiente en las etapas de secado.

Paredes de aislamiento térmico. Son paneles fabricados a manera de emparedado con lámina galvanizada y lana mineral de cuatro centímetros de espesor. La eficiencia del horno depende mucho de la eficiencia en el aislamiento y la hermeticidad. Los paneles vienen remachados entre sí y con la *estructura metálica*.

Estructura metálica. Hecha de acero Hot Rolled, en tubería cuadrada. Son cuadro divisiones a lo largo, tres columnas de izquierda a derecha y tres filas de arriba abajo. Están apernadas con tornillos estructurales de modo que quede fácilmente desarmable.

Canales para grapas. Son perfiles en ángulo, los cuales van atornillados a lo largo de la estructura dando guías para colocar los racks o grapas.

Puertas. Sellan finalmente el horno. También tienen paneles de aislamiento. En su parte superior se encuentran las *ventilaciones superiores*. Se cierran con cerrojo convencional.

Ventilación superior. Están colocadas sobre la puerta a manera de persianas. Se usan para ayudar a extraer humedad en etapas de secado.

Mirillas de inspección. Laterales a la estructura de la cámara de curado y secado. Sirven de ventanilla de inspección y auxiliares para evacuación de aire húmedo.

Racks, grapas o peines. Son estructuras metálicas para grapar el tabaco, los cuales se soportan sobre la estructura de la cámara. Se componen de un marco soporte, un marco con púas que perforan el tabaco y le dan sostén.

Rack y mesa de grapado para ensartar el tabaco de los hornos Bulk-curing



Mesa de grapado. Se usa para organizar el tabaco antes de cerrar o grapar el rack. Tiene una palanca que ejerce presión sobre el marco de púas en la operación de grapado.

Las especificaciones técnicas del horno se muestran a continuación en la Tabla 80.

Tabla 80 Especificaciones técnicas del horno modular

Largo		17 m
Ancho		3,5 m
Alto		2,4 m (6 m con la chimenea)
Cámara de secado		6,5 x 3,5 x 2,4 m
Sala de clasificación		5,5 x 7,5 m base
Motores	Ventilador	5 HP
	Dosificador de carbón	0,75 HP
Capacidad		207 racks (1035 varas) ⁶⁵
Consumo de carbón		Aprox. 850 kg de carbón por hornada
Consumo de electricidad		3,5 kW máximo
Tiempo de curado		150-160 horas, dependiendo el tabaco

Horno Bulk-curing con unidades de quemado importadas de Argentina.

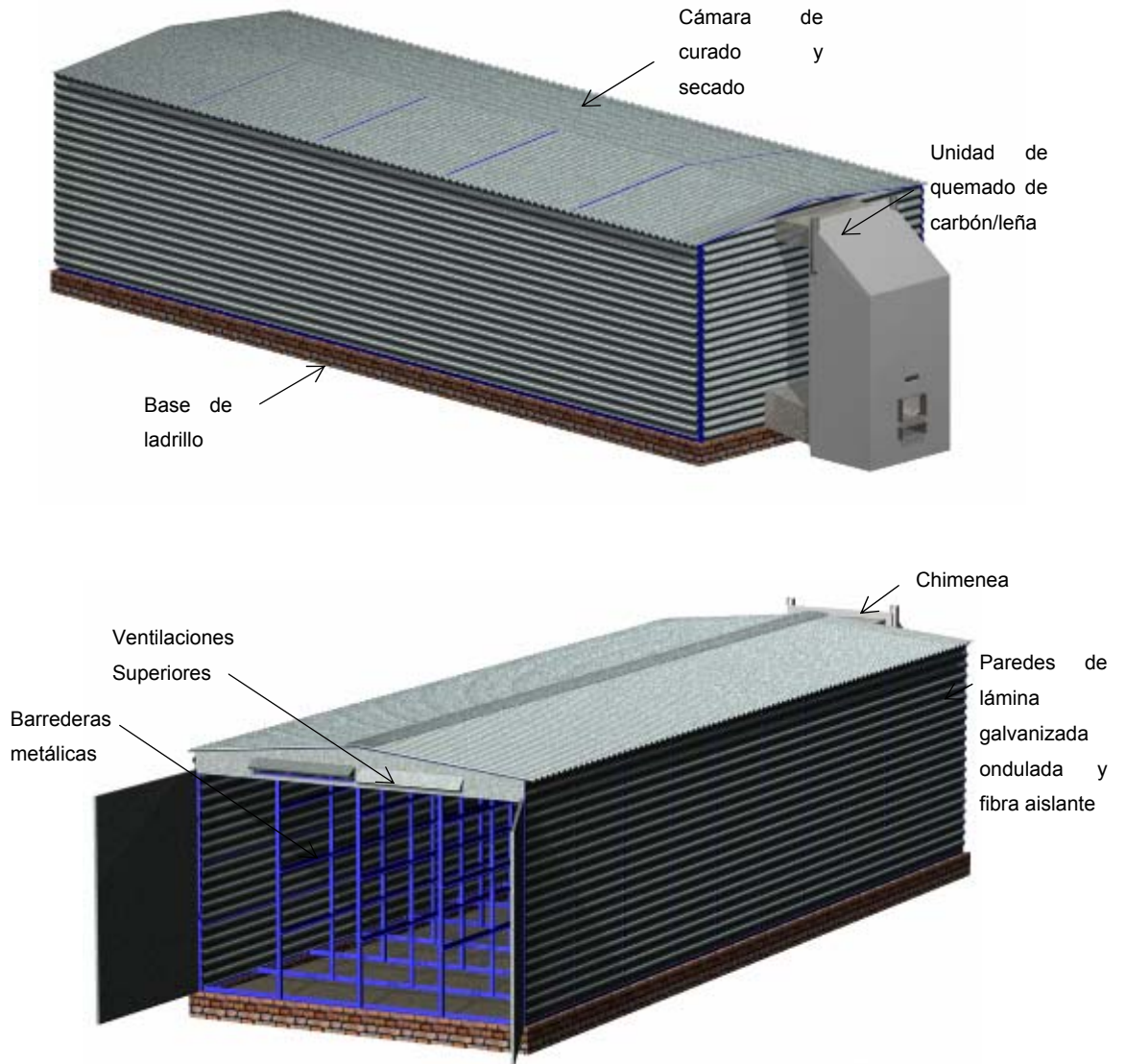
Este proyecto está aún en fase de estudio, en la cual se pretende construir la cámara de curado y secado a partir de dos unidades de generación de calor importadas de Argentina, una para leña y/o carbón y otra para gas.

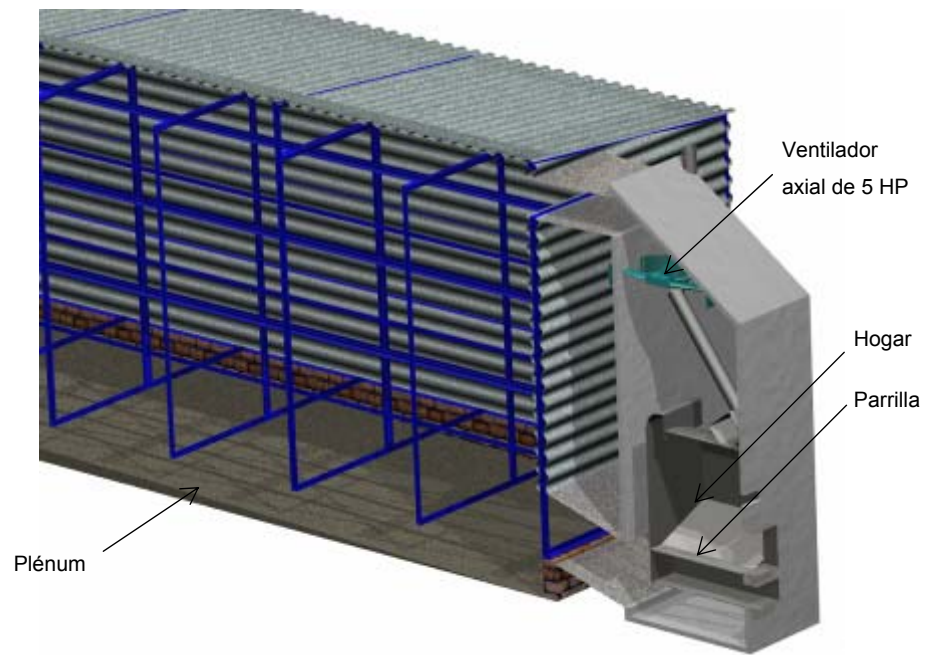
Las especificaciones que se tiene previstas para este diseño son del doble de capacidad del horno modular en convenio con el Ministerio de Agricultura, motor

⁶⁵ El horno se carga con racks, no con varas. Se habla de número de varas para poder compararlo con hornos tradicionales.

de 5HP para el ventilador, 450 racks aproximadamente con una cámara de 12 metros de largo.

Esquemas virtuales de la cámara de curado y secado con quemador importado de Argentina





ANEXO G. PROYECTO URE Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Este proyecto está siendo estudiado mediante convenios de cooperación con Fedetabaco, PRO,TABACO S.A., Philip Morris COLTABACO S.A. y la Universidad Industrial de Santander sede Socorro, para ser propuesto ante Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural o COLCIENCIAS.

Se define como energías alternativas las diversas formas de producción de combustibles, calor ó electricidad mediante procedimientos no convencionales tales como biomasa, radiación solar, energía geotérmica, energía mareomotriz etc., que de un modo eficiente se puede convertir a un fin útil ya sea a un proceso industrial o doméstico. Todos los tipos de energía exceptuando la geotérmica y la nuclear provienen directa o indirectamente del sol; recibimos miles de veces energía por parte del sol que el consumo mundial. La fotosíntesis es el fenómeno más importante (tal vez el único) de aprovechamiento de energía solar en biomasa. Los hidrocarburos son consecuencia indirecta del almacenamiento de la biomasa por un periodo de tiempo prolongado, que puede ser aprovechada finalmente en el proceso de combustión. Aún sin requerir demasiado tiempo, la biomasa es un recurso renovable que puede ser explotado. En muchas ocasiones, la explotación de las energías alternativas es más económica que la de las energías convencionales, son “gratuitas” y la amortización se logra a corto plazo⁶⁶.

⁶⁶ <http://www.emison.com/>

Según los estudios realizados por las empresas tabacaleras, cerca del 90% de la energía necesaria para producir el tabaco se consume en el proceso de curado.⁶⁷ Siendo la producción de tabaco un sistema intensivo en energía térmica, se hace necesaria la búsqueda de la reducción de costos de curado de tabaco mediante dos frentes:

- ✚ Estudio, adecuación y rediseño de los procedimientos actuales de consumo de combustible, haciéndolos más eficientes.
- ✚ Búsqueda de nuevas alternativas energéticas de explotación autosuficiente acorde a las políticas medioambientales que reduzcan el consumo de combustibles tradicionales tales como carbón mineral y leña.

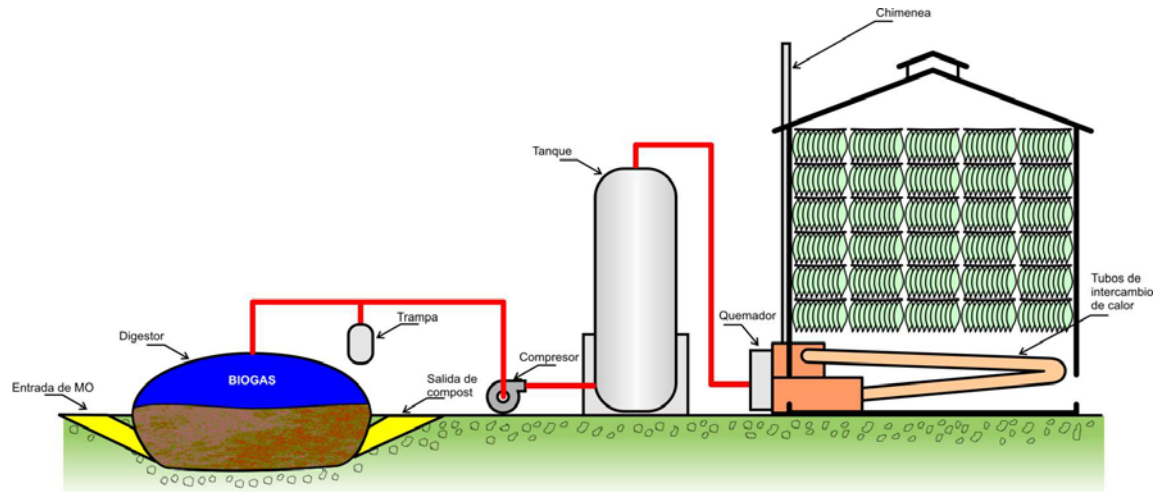
Para el caso de esta investigación con energías alternativas, se desea diseñar un prototipo que utilice energías no convencionales; específicamente hablando, la planta prototipo utilizará algún tipo de desecho municipal o rural al que no se le ha dado una valoración desde el punto de vista energético. Los beneficios inmediatos de la implementación de esta planta son el aprovechamiento de los residuos sólidos como fuente energética y formación de compost, economización de la producción de tabaco con el ahorro de fuentes de energía convencionales (en el caso de Colombia, el carbón y la leña) la generación de energía térmica y/o eléctrica en zonas donde es difícil su obtención sin incurrir algún alto costo, empleo y disminución de la contaminación, de modo que las fincas productoras de tabaco sean vayan convirtiéndose en fundíos autosuficientes energéticamente.

Entre las alternativas que pueden ser construidas están la implementación de: biodigestores, plantas de biometanización y compostaje, incineradores,

⁶⁷ University of Georgia. Mechanization and curing.

fermentadores entre otros. A grosso modo, una planta piloto puede ser como el esquema citado en la siguiente figura.

Esquema del sistema de biodigestión para el horno de curación de tabaco



Según las estimaciones realizadas por PROTABACO S.A., para un proceso de curación se necesitarían entre 550 y 2350 kilos de material orgánico, dependiendo del grado de metanización, el tipo de residuo orgánico y de la eficiencia del horno y del quemador. Esta cantidad de material fácilmente puede ser almacenada en el digestor durante las dos épocas del año en las que no hay curación⁶⁸.

Las ventajas de usar este tipo de energía alternativa son:

- ✚ Permite disminuir la tala de los bosques al no ser necesario el uso de la leña para cocinar.
- ✚ Ahorra costos de combustible y su transporte, ya que el material orgánico es producido en la misma finca.

⁶⁸ Por lo general, el cultivo de tabaco se divide en dos programas al año.

- ✚ Diversidad de usos (alumbrado, cocción de alimentos, producción de energía eléctrica y otros).
- ✚ Produce biofertilizante rico en nitrógeno, fósforo y potasio, capaz de competir con los fertilizantes químicos.
- ✚ Elimina los desechos orgánicos, por ejemplo, la excreta animal, contaminante del medio ambiente y fuente de enfermedades para el hombre y los animales.
- ✚ Recuperación de la inversión rápida (menos de 4 años).
- ✚ Mayor eficiencia de la combustión, ya que el combustible es gaseoso.

Las desventajas son:

- ✚ Para el prototipo propuesto, se necesita un área extensa para colocar el digestor y los tanques de almacenamiento de biogás.
- ✚ Rediseño de los quemadores del horno adaptados a gas.
- ✚ Rastros de azufre en el biogás.
- ✚ Riesgo de incendio ó explosión.

ANEXO H. GLOSARIO DE TERMINOS

ABONADO: Es el proceso de adición de cualquier elemento al suelo con un fin determinado, como nutrición, control de plagas etc.

APORQUE: Es una labor agronómica para cubrir con tierra la parte inferior del tallo cualquier planta (cuello), aumentando la resistencia a los vientos y dando mas oportunidad para que la planta tome humedad y nutrientes del suelo.

AIRE DE PROCESO: En el horneo con calor artificial, es el aire que está en contacto con el tabaco al que se controlan las variables principales como humedad y temperatura. En las primeras etapas, este aire está saturado de humedad manteniendo la hoja viva, en las últimas etapas la humedad baja considerablemente extrayendo la humedad remanente de la hoja de tabaco.

AIRE DE COMBUSTIÓN: En el horneo con calor artificial, es el aire que se mezcla íntegramente con el combustible produciendo una reacción de oxidación rápida (combustión) generando el calor necesario para calentar el aire de proceso mediante un intercambiador de calor.

AMARILLAMIENTO: En la primera etapa del proceso de curado de cualquier tabaco. En esta etapa, se destruye la clorofila y se gasta el material alimenticio de la hoja (el almidón) y se va convirtiendo en azúcar y otros compuestos dependiendo del tipo de tabaco, dándole un aroma suave y dulce para ser fumada.

BARREDERAS: Son vigas hechas de madera en hornos convencionales, sobre las cuales se colocan las varas o cujes de tabaco para ser curadas y secadas.

BENEFICIO DEL TABACO: Comprende los procesos agrícolas al tabaco que van desde la recolección de la hoja (o la mata, dependiendo del tipo de curación) hasta la clasificación del tabaco en bultos (ver Beneficio del tabaco).

BLEND: Es la combinación de las diferentes clases de tabaco y demás elementos como saborizantes, para dar una característica única en cada tipo de cigarro o cigarrillo.

CAMARETA: Vigas de madera sobre las cuales se soportan elementos estructurales del horno como las tejas y las ventilaciones superiores.

CANEY: Infraestructura de curación "Air-cured" para tabaco Burley y negro.

CAPE: Es un proceso agronómico que consiste en cortar la flor de la mata para que la energía y el material alimenticio de la mata de tabaco pase directamente a la hoja, dándoles un mayor tamaño y cuerpo.

CLASIFICACIÓN: Es un proceso post-horneo que consiste en separar hoja por hoja según tres criterios: color, daño y tamaño. Las mejores clases de tabaco tienen poco daño, muy buen tamaño (70-100 cm) y buen color (naranja, limón oscuro, limón etc.)

CONVECCIÓN: Fenómeno de transferencia de energía térmica por medio de un fluido que la transporta.

CONVECCIÓN NATURAL: Es el fenómeno de convección que sucede cuando se establece un flujo de un fluido en un campo gravitatorio debido a la diferencia de temperatura entre el fluido y el medio.

CUERPO: En el tabaco, se denomina cuerpo a la cantidad de materia sólida (es decir son contar el agua) que contiene una hoja. Las hojas bajas tienen menos cuerpo y las hojas superiores o alteras tienen más cuerpo.

CUJE: Es una varilla de madera de unos 0.9 a 1.2m de largo (dependiendo del horno) en las cuales se cuelga las hojas de tabaco amarradas en 18 pares dobles de 2 hojas.

CURACIÓN: Es el proceso del tabaco en el cual se buscan nuevas características a la hoja para ser fumada tales como aroma, suavidad, pérdida de humedad y de clorofila, conservación de aceites, conversión de almidón en azúcar etc.

CURACIÓN "AIR-CURED": Es el proceso de curación que se hace en caneyes o galpones. La curación "Air-cured" no requiere atmósfera artificial, sino que se utiliza el mismo calor ambiente para el curado y secado. Por lo general el tabaco se cuelga en *sartas* cuando la recolección es hoja a hoja y en *cujes* cuando la recolección es mata completa.

CURACIÓN "BULK-CURED": Es un sistema de curación avanzado "a granel" en el cual se usan cámaras dotadas de quemadores de alta eficiencia, ventiladores y un intercambiador de calor. Estas cámaras son más largas que altas y el tabaco se cuelga en *peines* o *racks*.

CURACIÓN "FIRE-CURED": También llamada curación "Dark-fired". Es el sistema de curación utilizado en tabaco para pipas actualmente. Utiliza los gases de combustión generados por algún combustible para curar y secar la hoja. Para tabaco Virginia, la curación pasó de ser "Fire-cured" a "Flue-cured".

CURACIÓN "FLUE-CURED": Es el sistema de curación más ampliamente utilizado actualmente en Colombia para curación de tabaco Virginia. Las cámaras en este tipo de curación son más altas en relación con el área de piso, ya que el aire necesita un tiro natural para poder ser curado (CURADO POR HORNOS CONVENCIONALES O "FLUE-CURED").

CURACIÓN "SUN-CURED": Es un sistema de curación utilizado en ciertos tipos de tabaco únicos de medio y lejano oriente, utilizando la radiación solar.

DESVENADO: Es uno de los principales procesos al tabaco que consiste en separar y dividir la lámina y la vena de la hoja de tabaco en partes pequeñas para la posterior fabricación de cigarrillos y cigarrillos. En este proceso, la hoja de tabaco sufre diversas condiciones de temperatura y humedad lo que lo hace un producto no perecedero. Después, al tabaco se pasa por una etapa de almacenamiento y añejamiento, dando más aroma y suavidad. Se considera el desvenado como un proceso pre-primario en la cadena de producción industrial de cigarrillos. La etapa primaria consiste en fabricar el *blend* (mezclando diferentes clases de tabaco y saborizantes) y el proceso secundario consiste en la fabricación de los cigarrillos como tal.

DESCHUPONE: Es una actividad agronómica que consiste en cortar o inhibir el crecimiento de nuevas hojas desde cierta edad de la planta. El objetivo es que la planta no utilice energía y alimento para hacer crecer nuevas hojas que al momento

de la recolección van a quedar pequeñas, y en lugar de ello, invertir alimento en hacer crecer más las hojas ya desarrolladas.

ENCUJAMIENTO: Es el proceso agrícola que consiste en amarrar con pita las hojas de tabaco en los cujes o varas.

FERTILIZACIÓN: Es una actividad agronómica que consiste en suplir de nutrientes el suelo para un óptimo desarrollo de la mata de tabaco, especialmente de la hoja. Los principales para el tabaco son: 100-120 UI de nitrógeno, 70-90 UI de fósforo, 170-260 UI de potasio, 45-60 UI de azufre, 45-60 UI de magnesio, 0,40-0,80 ppm de boro, 1,5-3 ppm de cobre, 10-25 ppm de manganeso, 2,5-3,5 ppm de zinc. Las relaciones son importantes: calcio/magnesio= 2-4, calcio/potasio=8-17, magnesio/potasio=4,2-16,7 y un ph entre 6 y 7,5.

HORNILLA: Zona del horno donde sucede la reacción de combustión.

HORNO: Infraestructura para curación "Fire-cured", "Bulk-cured" y "Flue-cured".

HUMECTACIÓN: Después del horneado (curación y secado) del tabaco es necesario hacerlo maleable y manejable en la clasificación y venta, ya que en el secado la hoja termina muy "crocante". Para ello, tan pronto termina el proceso de curación es necesario primero enfriar el tabaco a unos 110°F y subir la humedad relativa a un 85-90%, terminando la hoja entre un 15-17% de humedad.

LÁMINA: También llamado comúnmente paño. Es la parte delgada de la hoja como tal, donde están las estomas y ocurre el proceso de fotosíntesis y producción de alimento a gran escala.

MANCHA: Es un defecto del proceso de horneado que ocurre por una caída repentina de temperatura y por consiguiente un crecimiento de la humedad relativa. El remanente sudamiento de la hoja hace que los azúcares se saturen de agua en el proceso de secado y la hoja tenga coloraciones marrón, lo cual le baja calidad.

MARCHITAMIENTO: Es la segunda etapa del proceso de horneado. Es la transición entre el proceso de *amarillamiento* (curación) y *secado de lámina*.

NICOTINA: Compuesto orgánico, un alcaloide encontrado en la planta del tabaco (*Nicotiana tabacum*), con alta concentración en sus hojas. Constituye cerca del 5% del peso de la planta. Es una droga adictiva y tóxica.

NITROSAMINAS: Son compuestos que se forman por la reacción química de los nitritos y las aminas; estos compuestos son indeseables en el tabaco, ya que son compuestos cancerígenos. Los sistemas de curación "Fire-cured" propician más la formación de dichos elementos.

PLÉNUM: Zona del horno comprendida entre la primera barredera (la más baja) y el suelo. Para los hornos esta zona es muy importante ya que allí comienza el intercambio de calor y humedad entre el aire de proceso y el tabaco. Su dimensión adecuada da un buen tiro en los hornos "Flue-cured" y una buena corriente de aire en los hornos "Bulk-cured".

POSICIÓN FOLIAR: Hace referencia a las diferentes posiciones de las hojas en la mata. De abajo hacia arriba son (Virginia/Burley/Negro): bajero (B/X/G1,G2), mediamata (M/C/G3), superior(S/L/G4) y corona (C/T/G5). Las matas bajas

tienen menos cuerpo y tamaño, las superiores son más pesadas y grandes. Cuando se hace un *cape* profundo, no salen hojas corona en la mata.

RACK: Dispositivo metálico para "grapapar" o amarrar el tabaco en sistemas de curación "Bulk-cured".

RHT: Abreviatura es *Recirculador Horno Tradicional* para sistemas "Flue-cured", objetivo principal de este proyecto.

RECIRCULACIÓN: Efecto de introducir el aire de proceso desde el techo hasta el plenum.

RECOLECCIÓN: Acción agrícola de cortar la hoja de tabaco de la mata para almacenarla en pacas, transportarla y luego curarla. Existen dos formas de recolección: hoja a hoja y mata a mata.

SARTA: Para sistemas "Air-cured", la sarta hace referencia a una pita que con la ayuda de una aguja se perfora la hoja atravesándola. De este modo, las hojas de tabaco se colocan en serie y los extremos de la pita se amarran a las barrederas del caney.

SECADO: Proceso de extracción de agua de la hoja a una alta temperatura.

SUDAMIENTO: Efecto que tiene el tabaco en el proceso de curado a causa de la temperatura. Consiste en que las células de la hoja van sacando agua a consecuencia del metabolismo para mantenerse viva.

TABACO BURLEY: Clase de tabaco rubio. Es una cepa con defecto de clorofila y sus características en el cigarrillo son dar un suave aroma y alta nicotina. Su curación se hace al aire y dura de 6 a 8 semanas.

TABACO CUBITA: Clase de tabaco fino para capas (cubiertas) de cigarros.

TABACO NEGRO: Tipo de tabaco denominado también tipo García autóctona de Colombia y se cura en caneyes.

TABACO RUBIO: Clase de tabaco que se cultiva en occidente.

TABACO VIRGINIA: Clase de tabaco rubio que se cura en hornos o estufas en 150 a 190 horas.

VARA: Cuje.

VENA: Parte de la hoja correspondiente a la nervadura o parte leñosa de la hoja. Su función es transporte de savia y alimento desde y hacia la hoja.

VENTILACIÓN INFERIOR: Ventana localizada en la parte baja del horno y por donde entra el aire del ambiente. Tiene una graduación para controlar el porcentaje de apertura.

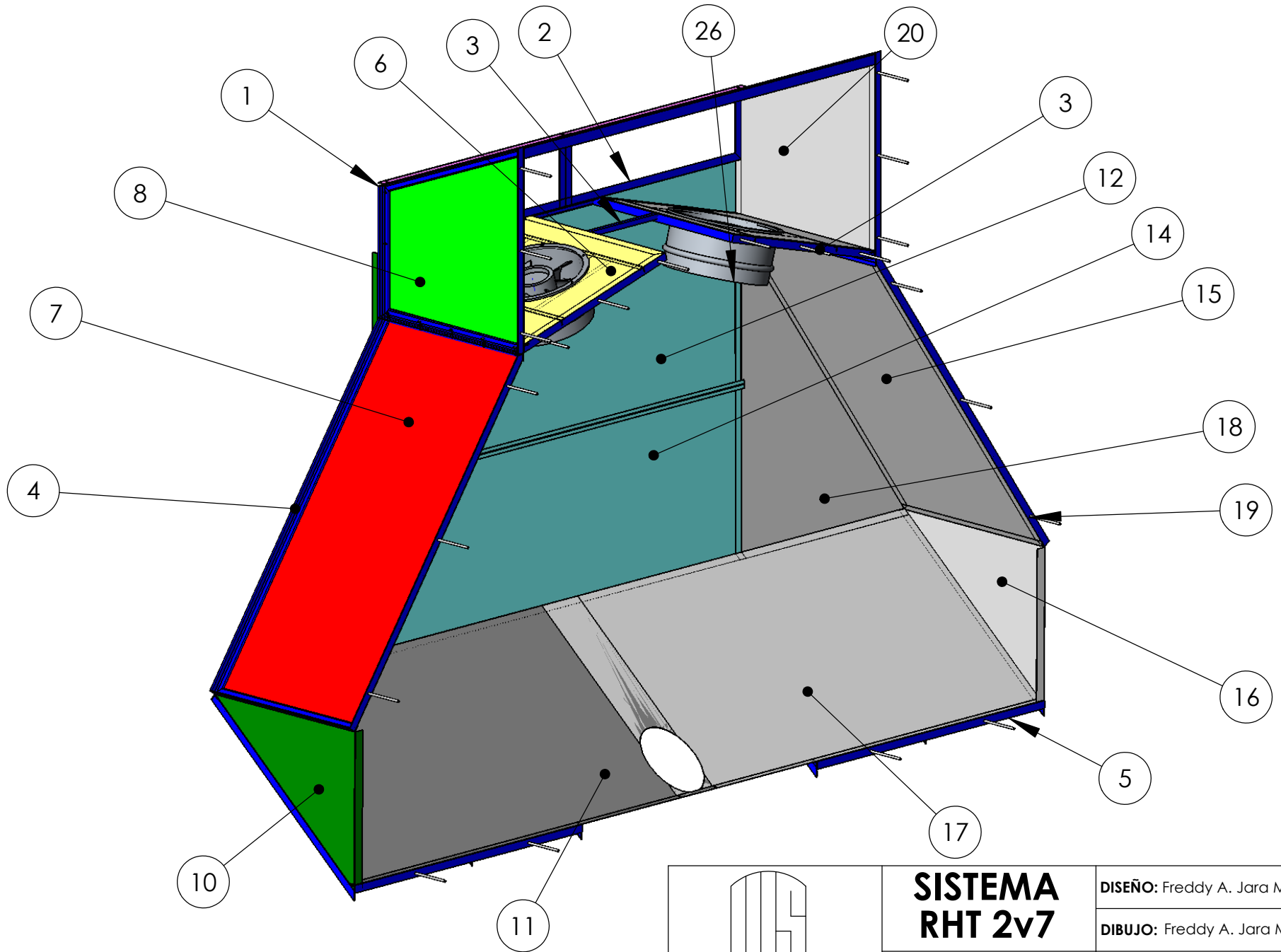
VENTILACIÓN SUPERIOR: Ventana localizada en la parte superior del horno y por donde sale el aire húmedo de proceso.

ANEXO I. PLANOS DE LOS PROTOTIPOS



PROYECTO RHT
Yaguará (Huila)

Nº DE ELEMENTO	NÚMERO DE PIEZA	CANT.
1	RECIRCULADOR RHT 2v7 parte1	1
2	RECIRCULADOR RHT 2v7 parte2	1
3	RECIRCULADOR RHT 2v7 parte3	1
4	RECIRCULADOR RHT 2v7 parte4	1
5	RECIRCULADOR RHT 2v7 parte5	1
6	LAMINA VENTILADOR	1
7	LAMINA LATERAL DIFUSOR	1
8	LAMINA CUPULA LATERAL	1
9	LAMINA CUPULA SUPERIOR	1
10	LAMINA INFERIOR LATERAL DIFUSOR	1
11	LAMINA INFERIOR DIFUSOR	1
12	LAMINA TAPA DIFUSOR SUPERIOR CENTRAL	1
13	LAMINA TAPA DIFUSOR SUPERIOR LATERAL	1
14	LAMINA TAPA DIFUSOR INFERIOR CENTRAL	1
15	SimetríaLAMINA LATERAL DIFUSOR	1
16	SimetríaLAMINA INFERIOR LATERAL DIFUSOR	1
17	SimetríaLAMINA INFERIOR DIFUSOR	1
18	SimetríaLAMINA TAPA DIFUSOR SUPERIOR LATERAL	1
19	SimetríaRECIRCULADOR RHT 2v7 parte4	1
20	SimetríaLAMINA CUPULA LATERAL	1
21	HFBOLT 0.3125-18x0.75x0.75-C	26
22	SQBOLT 0.3750-24x8x8-N	22
23	2CC2 504-5YA3	1
24	REFUERZO PARTE1	1
25	SimetríaLAMINA VENTILADOR	1
26	Simetría2CC2 504-5YA3	1
27	SimetríaREFUERZO PARTE1	1



RECIRCULADOR RHT 2v7
Lista de partes



**SISTEMA
RHT 2v7**

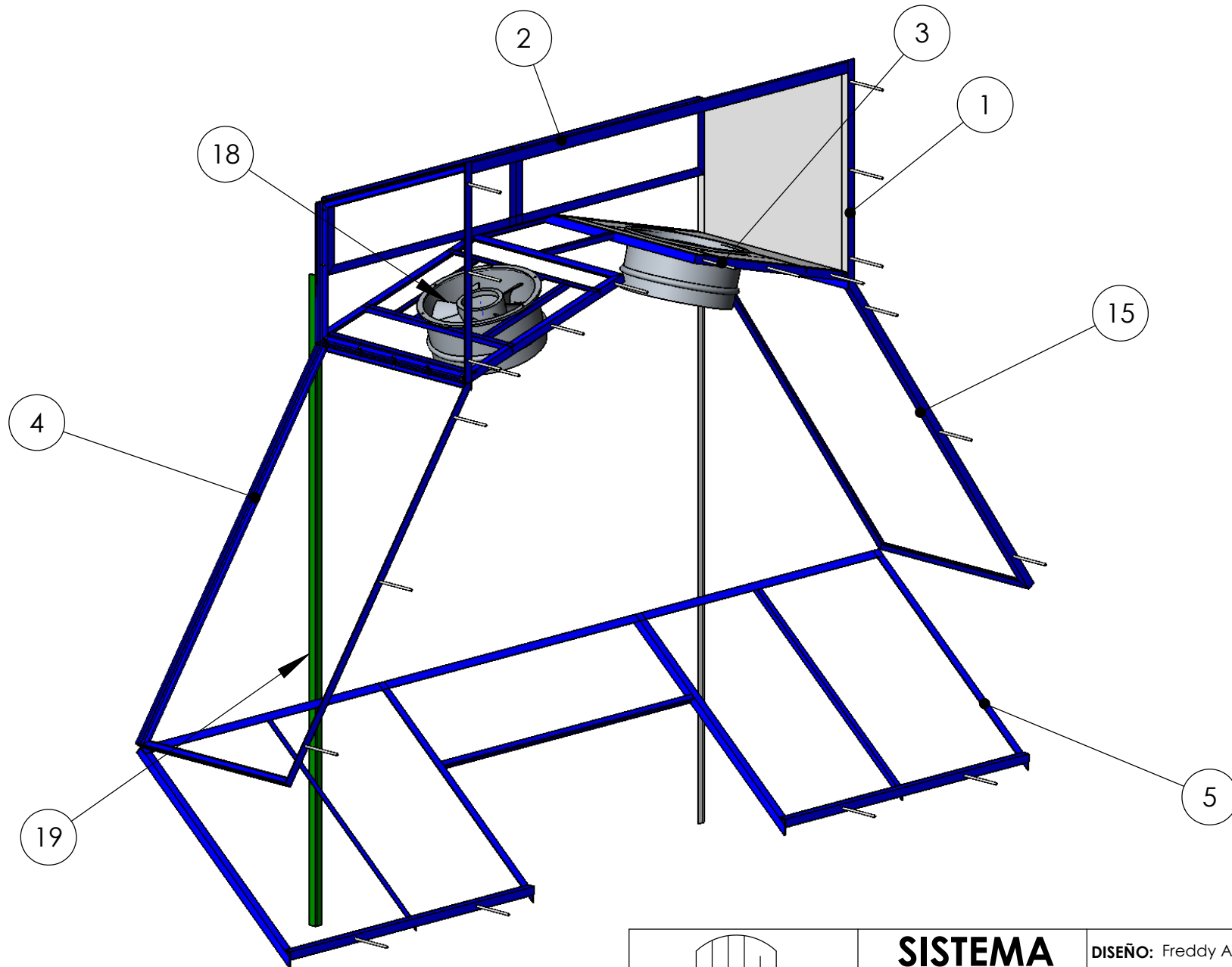
Lista de
componentes
ESCALA: 1:25

DISEÑO: Freddy A. Jara M.

DIBUJO: Freddy A. Jara M.

FECHA: Febrero de 2006

PLANO: 1 de 4



RECIRCULADOR RHT 2v7
Estructura



UNIVERSIDAD
 INDUSTRIAL DE
 SANTANDER

**SISTEMA
 RHT 2v7**

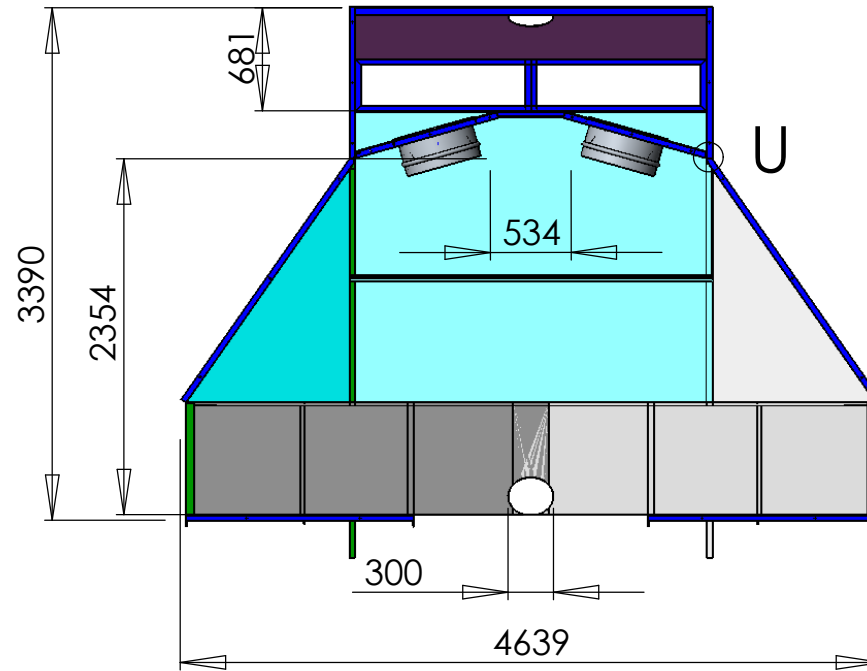
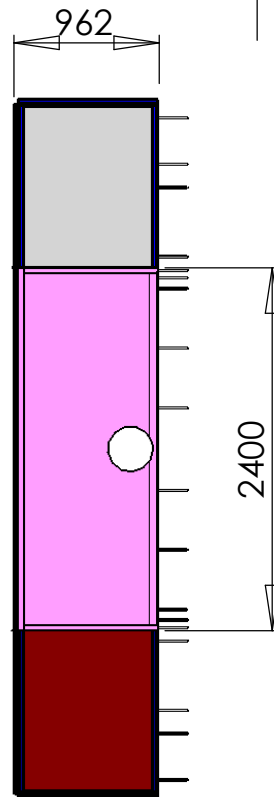
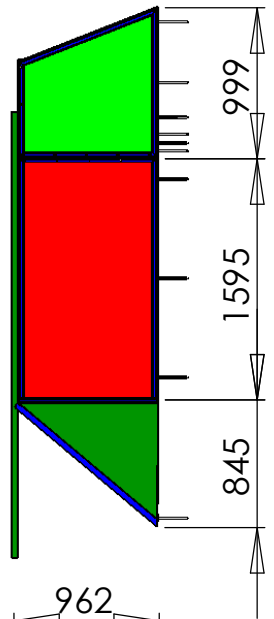
Lista de
 componentes
 ESCALA: 1:25

DISEÑO: Freddy A. Jara M.

DIBUJO: Freddy A. Jara M.

FECHA: Febrero de 2006

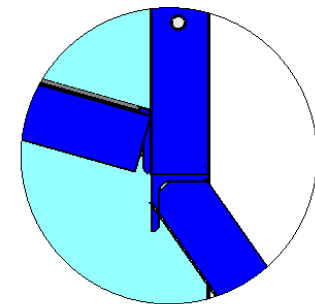
PLANO: 2 de 4



RECIRCULADOR RHT 2v7

Vistas principales

DETALLE U
ESCALA 1 : 5



UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

SISTEMA RHT 2v7

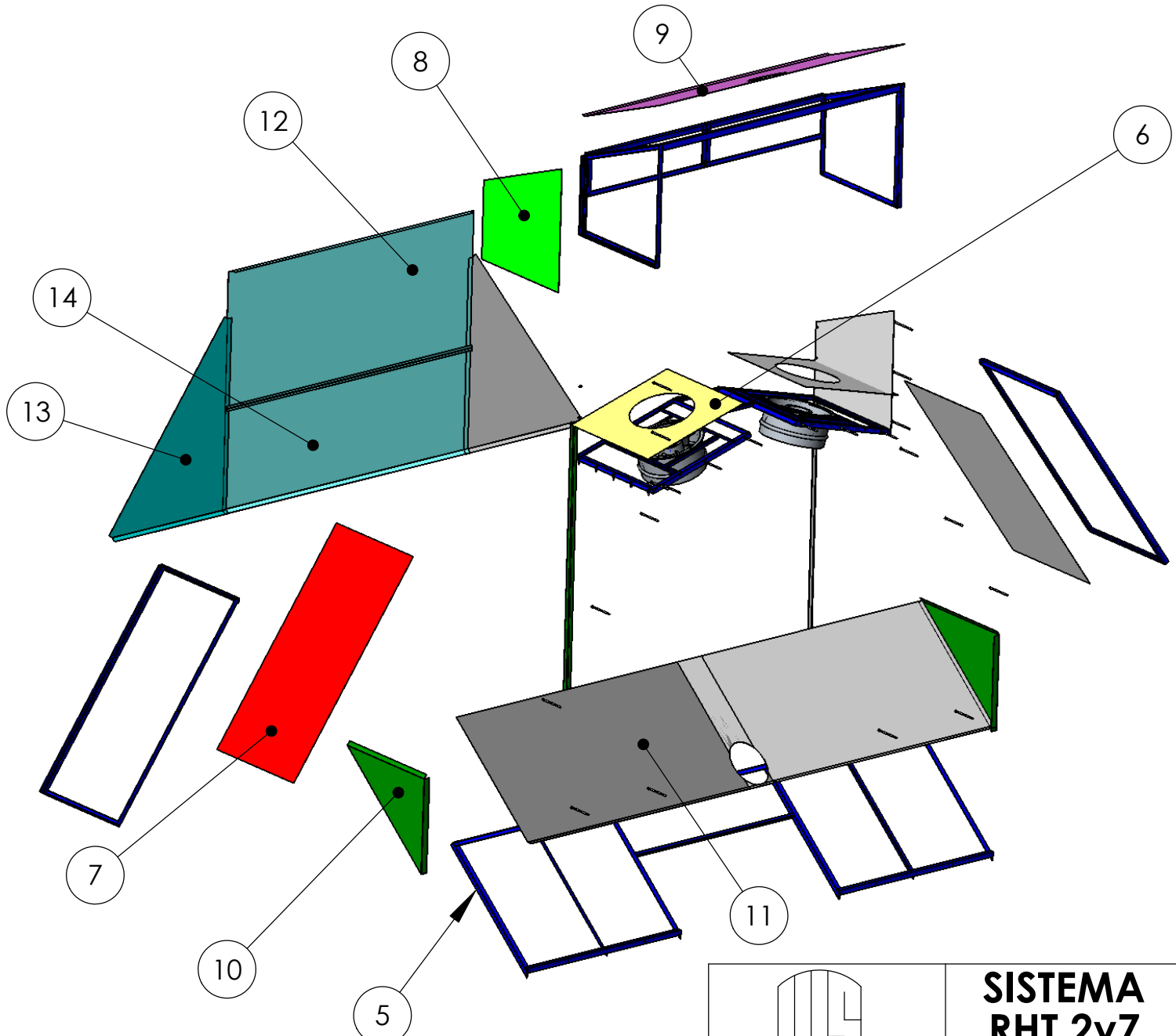
Vistas
principales
ESCALA: 1:50

DISEÑO: Freddy A. Jara M.

DIBUJO: Freddy A. Jara M.

FECHA: Febrero de 2006

PLANO: 3 de 4



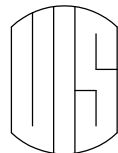
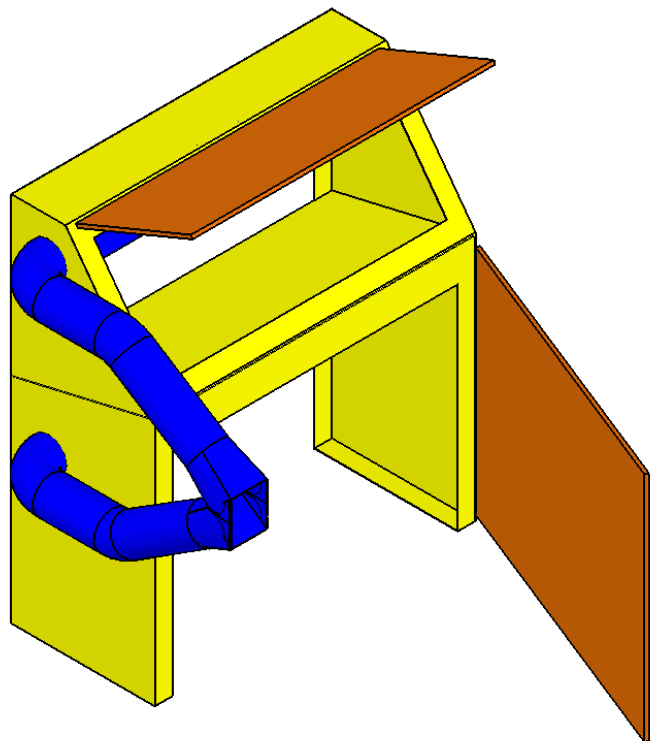
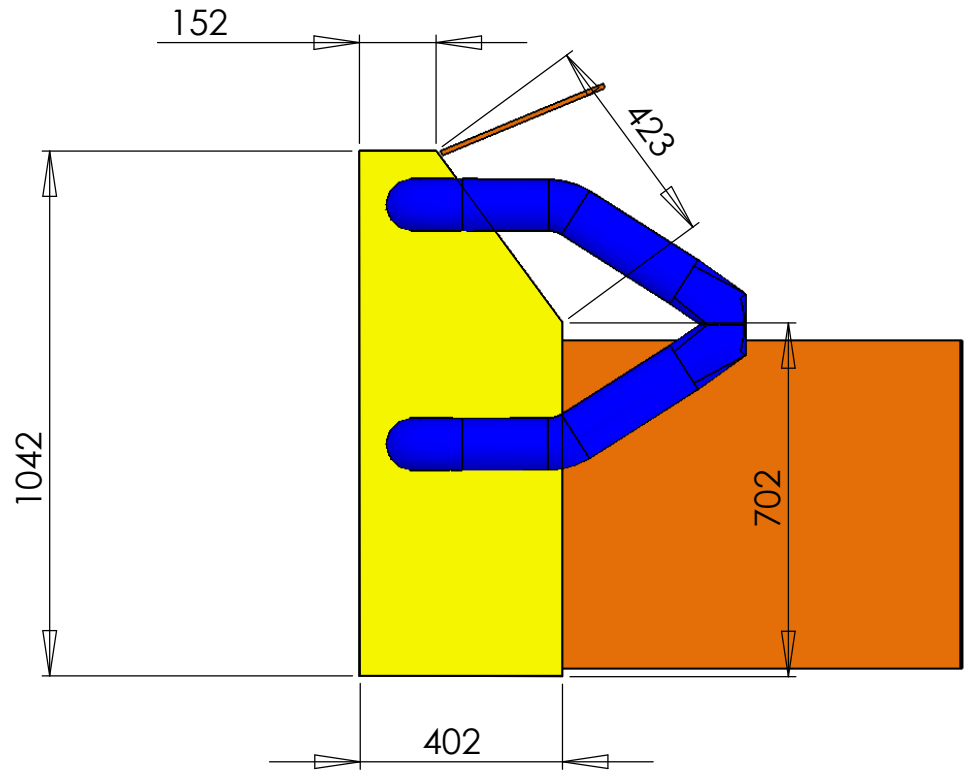
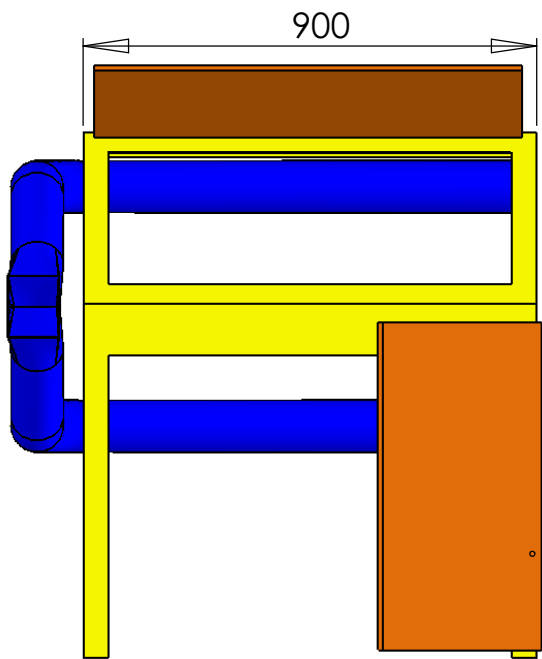
RECIRCULADOR RHT 2v7
Vista explosionada



**SISTEMA
RHT 2v7**

Lista de
componentes
ESCALA: 1:45

DISEÑO:	Freddy A. Jara M.
DIBUJO:	Freddy A. Jara M.
FECHA:	Febrero de 2006
PLANO:	4 de 4



UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

**ADMISOR DE
AIRE PARA
HORNILLAS**

Vistas
principales

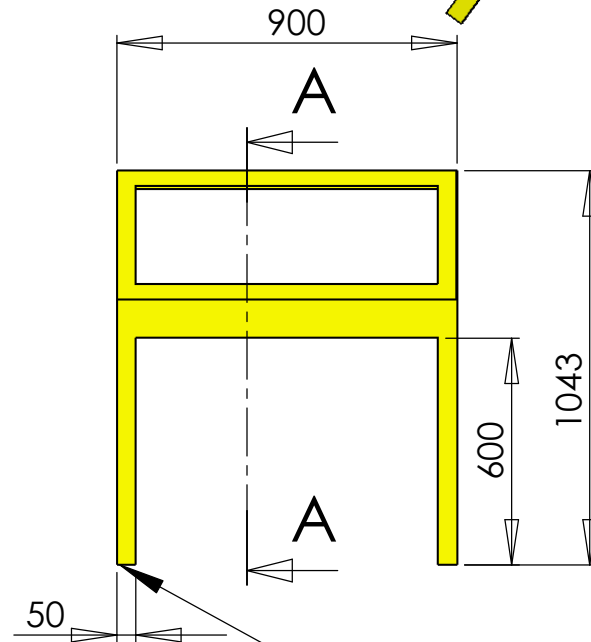
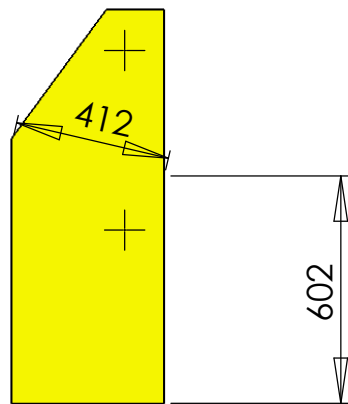
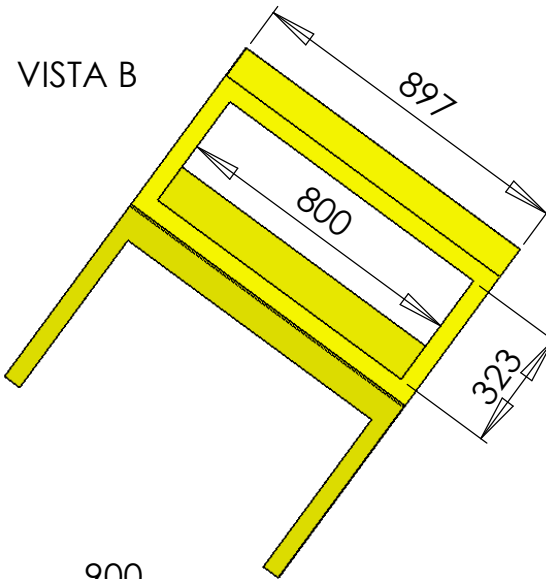
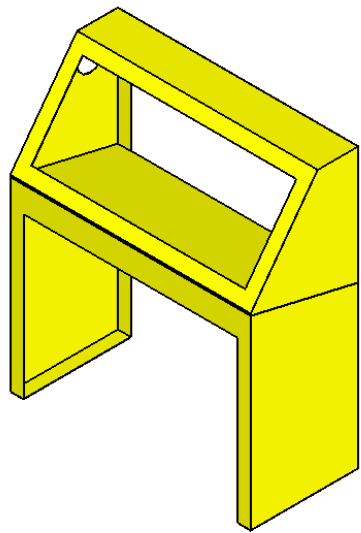
ESCALA: 1:15

DISEÑO: Freddy Jara

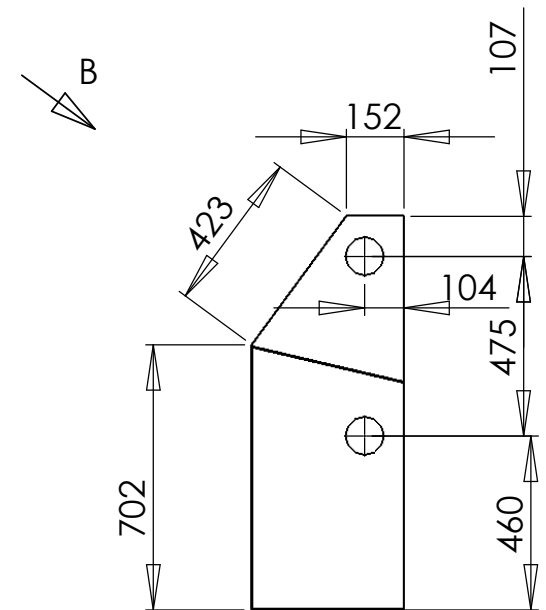
DIBUJO: Freddy Jara

FECHA: Mar. 22/06

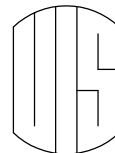
PLANO: 1 de 2



SECCIÓN A-A



Todos los dobleces iguales



UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE
SANTANDER

**ADMISOR DE
AIRE PARA
HORNILLAS**

Camara
Ventilador
ESCALA: 1:20

DISEÑO: Freddy Jara

DIBUJO: Freddy Jara

FECHA: Mar. 22/06

PLANO: 2 de 2