



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**AUTOR: AGUILAR NARVÁEZ, CARLOS NELSON**

**TEMA: REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE  
SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD DE 45 M<sup>3</sup>, PERTENECIENTE  
A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA.**

**DIRECTOR: DR. DELGADO, REYNALDO**

**CODIRECTOR: ING. TERNEUS, FRANCISCO**

**SANGOLQUÍ, ENERO 2014**

## CERTIFICADO DE ELABORACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado **“REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HORNO DE SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD PARA 45 METROS CÚBICOS, PERTENECIENTE A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA”** fue desarrollado en su totalidad por el señor Carlos Nelson Aguilar Narváez, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

**Dr. Reynaldo Delgado**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Francisco Terneus**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2014-01-31**

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, CARLOS NELSON AGUILAR NARVÁEZ

DECLARO QUE

El proyecto de grado titulado, **“REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD DE 45 M<sup>3</sup>, PERTENECIENTE A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA.”**, ha sido desarrollado en su totalidad con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el texto del documento, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

---

Carlos Nelson Aguilar Narvárez

Sangolquí, 31 de enero de 2014'

## AUTORIZACION

Yo, CARLOS NELSON AGUILAR NARVÁEZ

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD DE 45 M<sup>3</sup>, PERTENECIENTE A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 30 de abril de 2014.

---

Carlos Nelson Aguilar Narvárez

CI: 171651579-4

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos,

A mis padres que con su esfuerzo y dedicación han logrado que no me falte nada y pueda cumplir mis sueños.

A mis hermanos, porque juntos hemos luchado contra las adversidades que nos has dado la vida.

## AGRADECIMIENTO

A Gabriel Chauvin, amigo y colega, que a través de sus palabras me ayudó a canalizar mis conocimientos y dudas.

Al Dr. Delgado por su dureza al momento en las revisiones para no dejar lagunas en el proyecto.

A Francisco Terneus por la practicidad de sus consejos.

Al Ing. Fernando Aguilar por sus constante apoyo en área de tecnología.

Finalmente se agradece a PROMARA CIA. LTDA., por brindar todo el apoyo posible para la ejecución del presente proyecto.

La manera más fácil de ser feliz es siguiendo tus sueños

El Autor

A la única persona que se no puede decepcionar es a uno mismo

Gabriel Chauvin

Solo se vive una vez, pero si lo haces bien una vez es suficiente.

Joe E. Louis

# INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DE ELABORACIÓN.....	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	II
AUTORIZACION .....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
INDICE DE CONTENIDOS .....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE ECUACIONES.....	XII
INDICE DE TABLAS .....	XIV
RESUMEN.....	XVI
REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD DE 45 M <sup>3</sup> , PERTENECIENTE A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA.....	XVII
ANTECEDENTES .....	XVIII
JUSTIFICACIÓN .....	XIX
ALCANCE.....	XXI
OBJETIVO GENERAL.....	XXV
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XXV
<b>1 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1 PARÁMETROS DE SECADO DE MADERA .....	1
1.1.1 CARÁCTERÍSTICAS DE LA MADERA .....	1
1.1.2 HUMEDAD EN LA MADERA .....	6
1.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA.....	7
1.1.4 PRINCIPIO DE SECADO DE MADERA EN HORNOS.....	10
1.1.5 CONDUCCION DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA EN HORNOS CONVENCIONALES.....	19
1.2 ESTUDIO DE VARIABLES Y PARÁMETROS PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICAS EN HORNOS 26	
1.2.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO.....	26
1.2.2 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	30
1.3 GENERALIDADES SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN .....	36
1.4 GENERALIDADES SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	38
<b>2 ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>39</b>

		vii
2.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE PROCESO .....	40
2.1.1	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	45
2.2	SELECCIÓN DEL CONTROL DEL PROCESO DE SECADO .....	45
2.2.1	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	48
2.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE OPERACIÓN .....	49
2.3.1	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	51
2.4	SELECCIÓN SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN .....	52
2.4.1	<i>Material tubería y accesorios</i> .....	52
2.4.2	<i>Marca De equipos</i> .....	53
2.4.3	<i>Proveedor de materiales</i> .....	56
2.4.4	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	56
2.5	SELECCIÓN SISTEMA DES-HUMIDIFICACIÓN .....	56
2.5.1	<i>Marca de equipos</i> .....	57
2.5.2	<i>Proveedor de equipos</i> .....	58
2.5.3	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	58
2.6	SELECCIÓN SISTEMA DE VENTILACIÓN .....	59
2.6.1	<i>Material conductos</i> .....	59
2.6.2	<i>Marca de Equipos</i> .....	60
2.6.3	<i>Proveedor de materiales</i> .....	61
2.6.4	<i>CONCLUSIÓN</i> .....	61
<b>3</b>	<b>REDISEÑO</b> .....	<b>62</b>
3.1	NORMAS A SEGUIR .....	62
3.1.1	<i>NORMAS DE diseño</i> .....	62
3.1.2	<i>NORMA DE pruebas</i> .....	62
3.1.3	<i>NORMAS DE documentacion</i> .....	63
3.2	ESTADO ACTUAL DEL HORNO .....	64
3.2.1	<i>ANTECEDENTES TÉCNICOS</i> .....	64
3.2.2	<i>INSPECCIÓN DE LAS INSTALACIONES</i> .....	68
3.2.3	<i>Equipos instalados</i> .....	72
3.2.4	<i>PLANOS ACTUALES</i> .....	72
3.2.5	<i>CREACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN</i> .....	73
3.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	74
3.3.1	<i>Unidades utilizadas</i> .....	74
3.3.2	<i>GENERALIDADES</i> .....	74
3.3.3	<i>selección de perfiles estructurales</i> .....	77
3.4	DISEÑO Y SELECCIÓN DE ACCESORIOS FALTANTES .....	77
3.4.1	<i>CARGAS TÉRMICAS ACTUAles y del rediseño</i> .....	77



3.4.2	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	80
3.4.3	PÉRDIDAS DE CALOR DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO .....	83
3.4.4	rediseño SISTEMA De ventilación .....	88
3.4.5	rediseño SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN .....	123
3.4.6	sistema de control y registro .....	128
1.2	MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN .....	129
3.4.7	Mantenimiento .....	130
3.4.8	Operación .....	130
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>131</b>
4.1	ADECUACIONES DE INFRAESTRUCTURA .....	131
4.1.1	Recubrimiento de paredes .....	131
4.1.2	Recubrimiento de piso .....	131
4.1.3	Adecuación de cámara de secado .....	131
4.1.4	Reinstalación de puerta de acceso .....	132
4.2	MONTAJE DE EQUIPOS .....	133
4.2.1	Sistema de humidificación .....	133
4.2.2	Sistema de des-humidificación .....	136
4.2.3	Sistema de ventilación .....	136
4.2.4	Equipos de medición .....	138
4.3	ANÁLISIS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	139
4.3.1	Pre-comisionado .....	139
4.3.2	Comisionado .....	140
4.3.3	Puesta en marcha .....	140
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....</b>	<b>142</b>
5.1	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	142
5.1.1	Costos de materiales .....	142
5.1.2	Costos de equipos .....	145
5.1.3	Costos de implementación .....	148
5.1.4	Costos de operación u explotación .....	148
5.2	ANÁLISIS FINANCIERO .....	151
5.2.1	Análisis de mercado .....	151
5.2.2	Calculo de depreciación de la maquinaria .....	152
5.2.3	Calculo del VAN .....	156
5.2.4	Calculo del TIR .....	157
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>159</b>

		ix
6.1	CONCLUSIONES.....	159
6.2	RECOMENDACIONES.....	160
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>162</b>
	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>164</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>168</b>

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA REDISEÑO SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE .....	XXIII
FIGURA 2: ESQUEMA REDISEÑO SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	XXIV
FIGURA 1.1: CORTES EN LA MADERA.....	2
FIGURA 1.2: RELACIÓN DE LA HUMEDAD CON LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA LA ESPECIE SEQUIA SEMPER VIRE. SEGÚN (STAMM, 1929).....	9
FIGURA 1.3: ESQUEMA CARTA PSICROMÉTRICA.....	16
FIGURA 1.4: CAPA LÍMITE EN FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO .....	19
FIGURA 1.5: SECADO POR EVAPORACIÓN, CICLO ESQUEMÁTICO (SEGÚN BOLLMAN, 1984) .....	22
FIGURA 1.6: CÁMARA DE SECADO Y SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	26
FIGURA 1.7: ESQUEMA PARA TRABAJO DE FLUJO EN EL HORNO DE SECADO DE MADERA .....	29
FIGURA 1.8: DIAGRAMA BÁSICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN. ....	38
FIGURA 3.1: ESQUEMA SISTEMA DE CALENTAMIENTO .....	64
FIGURA 3.2: ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE MADERA DENTRO DEL HORNO .....	65
FIGURA 3.3: CORTE LONGITUDINAL QUE MUESTRA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE QUE SE ENCUENTRA EN EL PISO DEL HORNO .....	65
FIGURA 3.4: LLEGADA DE MADERA AL RECINTO DE ACOPIO.....	66
FIGURA 3.5: APILAMIENTO DE MADERA (TABLONCILLO).....	67
FIGURA 3.6: CONTROL DEL QUEMADOR .....	68
FIGURA 3.7: VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL HORNO.....	69
FIGURA 3.8: DIFUSIÓN DE VAPOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES Y TECHO.....	69
FIGURA 3.9: ESTADO DE TUBERÍA Y CONDUCTOS .....	69
FIGURA 3.10: DETERIORO DE PAREDES POR GASES DE COMBUSTIÓN .....	70
FIGURA 3.11: PANDEO DE VIGA LONGITUDINAL Y DEFORMACIÓN DE VIGA TRANSVERSAL.....	70
FIGURA 3.12: CORROSIÓN EN COLUMNAS .....	70
FIGURA 3.13: CORROSIÓN EN COLUMNAS .....	71
FIGURA 3.14: DETERIORO DEL PRODUCTO POR SECADO RÁPIDO.....	71
FIGURA 3.15: EJEMPLO PRESENTACIÓN DE PLANOS .....	73
FIGURA 3.16: CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL.....	76
FIGURA 3.17: CONEXIÓN VIGA COLUMNA.....	76
FIGURA 3.18: FOTO FRONTAL DEL HORNO .....	78
FIGURA 3.19: COMPOSICIÓN DE LA PARED DEL HORNO .....	82
FIGURA 3.20: PUERTAS DEL HORNO .....	82
FIGURA 3.21: COMPOSICIÓN DE LA PUERTA .....	83
FIGURA 3.22.- SISTEMA DE CALENTAMIENTO. ....	84
FIGURA 3.23: ESQUEMA DE CALENTAMIENTO REDISEÑO.....	86

	<b>xi</b>
FIGURA 3.24: ESQUEMA CODO DE 90° .....	89
FIGURA 3.25: ACCESORIO PARA SISTEMA DE DUCTOS.....	94
FIGURA 3.26: CAÍDA DE AIRE .....	99
FIGURA 3.27: ENVOLVENTE DE AIRE.....	100
FIGURA 3.28: NUMERACIÓN EN EL CONDUCTO ANTIGUO.....	111
FIGURA 3.29: REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	119
FIGURA 3.30: PROPIEDADES DEL AIRE .....	119
FIGURA 3.31: SALIDAS DE AIRE (REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN) .....	120
FIGURA 3.32: MALLADO REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN .....	121
FIGURA 3.33: CURVAS SIMULACIÓN SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	121
FIGURA 3.34: VISTA DE PLANTA FLUJO DE AIRE EN EL REDISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN .....	122
FIGURA 3.35: VISTA LATERAL SIMULACIÓN REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN .....	122
FIGURA 3.36: VISTA TRASERA SIMULACIÓN REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN .....	123

## INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1.1: DENSIDAD ANHIDRA .....	5
ECUACIÓN 1.2: DENSIDAD NORMAL.....	5
ECUACIÓN 1.3: DENSIDAD EN EL PSF .....	5
ECUACIÓN 1.4: DENSIDAD RELATIVA ANHIDRA.....	5
ECUACIÓN 1.5: DENSIDAD RELATIVA NORMAL .....	5
ECUACIÓN 1.6: DENSIDAD RELATIVA BÁSICA.....	5
ECUACIÓN 1.7: CONTENIDO DE HUMEDAD MÁXIMO .....	7
ECUACIÓN 1.8: CONTENIDO DE HUMEDAD MÁXIMO .....	7
ECUACIÓN 1.9: CONTENIDO DE HUMEDAD MÁXIMO .....	7
ECUACIÓN 1.10: CONTENIDO DE HUMEDAD.....	8
ECUACIÓN 1.11: CONTENIDO DE HUMEDAD.....	9
ECUACIÓN 1.12: ECUACIÓN DE ESTADO DE GAS IDEAL.....	14
ECUACIÓN 1.13: ECUACIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA .....	14
ECUACIÓN 1.14: ECUACIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA .....	14
ECUACIÓN 1.15: ECUACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA .....	15
ECUACIÓN 1.16: ECUACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA .....	15
ECUACIÓN 1.17: ECUACIÓN DE CARRIER .....	17
ECUACIÓN 1.18: ENERGÍA DE FLUJO .....	28
ECUACIÓN 1.19: ENERGÍA DE FLUJO .....	28
ECUACIÓN 1.20: ENERGÍA DE FLUJO .....	28
ECUACIÓN 1.21: TRABAJO DE FLUJO.....	28
ECUACIÓN 1.22: ENERGÍA TOTAL DE FLUJO .....	29
ECUACIÓN 1.23: ENERGÍA SIMPLIFICADA DE FLUJO .....	30
ECUACIÓN 1.24: LEY DE FOURIER.....	31
ECUACIÓN 1.25: CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL .....	31
ECUACIÓN 1.26: CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL .....	31
ECUACIÓN 1.27: CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL .....	32
ECUACIÓN 1.28: LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON.....	32
ECUACIÓN 1.29: RESISTENCIA ELÉCTRICA .....	34
ECUACIÓN 1.30: ANALOGÍA ELÉCTRICA DE CONDUCCIÓN .....	34
ECUACIÓN 1.31: ANALOGÍA ELÉCTRICA DE CONVECCIÓN.....	34
ECUACIÓN 1.32: COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	34
ECUACIÓN 1.33: TASA DE CALOR .....	34
ECUACIÓN 3.1: POSTULADO DE KELVIN .....	87
ECUACIÓN 3.2: CAUDAL PARA UN CONDUCTO .....	91

	xiii
ECUACIÓN 3.3: CAUDAL DE UNA DERIVACIÓN .....	91
ECUACIÓN 3.4: DIÁMETRO EQUIVALENTE .....	93
ECUACIÓN 3.5: PÉRDIDA DE PRESIÓN .....	95
ECUACIÓN 3.6: PÉRDIDA DE PRESIÓN POR UNIDAD DE LONGITUD .....	96
ECUACIÓN 3.7: CÁLCULO DE PRESIÓN ESTÁTICA .....	97
ECUACIÓN 3.8: CUDAL TOTAL DE CIRCULACIÓN .....	107
ECUACIÓN 3.9: RELACIÓN DE VOLUMEN TOTAL PARA VOLUMEN DE INGRESO .....	108
ECUACIÓN 3.10: VOLUMEN TOTAL EN FUNCIÓN DE LA IMPULSIÓN .....	108
ECUACIÓN 3.11: VOLUMEN TOTAL EN FUNCIÓN EDE LA IMPULSIÓN Y VELOCIDAD DE ENTRADA.....	108
ECUACIÓN 3.12: ECUACIÓN PARA CÁLCULO DE LA VELOCIDAD .....	108
ECUACIÓN 3.13: DIÁMETRO HIDRAÚLICO .....	109
ECUACIÓN 3.14: ECUACIÓN DE GENERAL PARA CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA .....	110
ECUACIÓN 3.15: ECUACIÓN DE COLEBROOK .....	110
ECUACIÓN 3.16: ECUACIÓN SIMPLIFICADAPARA CÁLCULO DE PERDIDAS EN CLIMATIZACIÓN .....	110
ECUACIÓN 3.17: ECUACIÓN SIMPLIFICADA PARA CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA POR UNIDAD DE LONGITUD .....	113
ECUACIÓN 3.18: CÁLCULO DE PRESIÓN ESTÁTICA EN CONDUCTOS .....	114
ECUACIÓN 3.19: ECUACIÓN DE DARCY .....	123
ECUACIÓN 3.20: ECUACIÓN DE HAZEN - WILLIAMS .....	124

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: PROPIEDADES FÍSICAS DEL CHANUL .....	3
TABLA 1.2: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CHANUL .....	3
TABLA 1.3: (CONTINUACIÓN) PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CHANUL.....	4
TABLA 1.4: DENOMINACIÓN DE LA MADERA DE ACUERDO A SU (CH) .....	8
TABLA 1.5: PRESIÓN DE VAPOR SATURADO Y HUMEDAD ABSOLUTA.....	18
TABLA 1.6: PROGRAMA DE SECADO PARA TABLONCILLO (E=3 CM) DE CHANUL.....	25
TABLA 2.1: MATRIZ DE RECHAZO DE ALTERNATIVAS.....	41
TABLA 2.2: MATRIZ SIN PONDERACIÓN MATEMÁTICA PARA SELECCIÓN DEL TIPO DE SECADO.....	43
TABLA 2.3: MATRIZ CON PONDERACIÓN MATEMÁTICA DE SELECCIÓN DEL TIPO DE HORNO.....	44
TABLA 2.4: MATRIZ DE RESULTADOS DE SELECCIÓN DEL TIPO DE HORNO.....	45
TABLA 2.5: MATRIZ SIN PONDERACIÓN MATEMÁTICA DE CONTROL DEL PROCESO .....	46
TABLA 2.6: MATRIZ CON PONDERACIÓN MATEMÁTICA DE CONTROL DEL PROCESO .....	47
TABLA 2.7: MATRIZ DE RESULTADOS DE CONDUCCIÓN DEL PROCESO.....	48
TABLA 2.8: MATRIZ SIN PONDERACIÓN MATEMÁTICA DEL TIPO DE CONTROL.....	49
TABLA 2.9: MATRIZ CON PONDERACIÓN MATEMÁTICA DEL TIPO DE CONTROL .....	50
TABLA 2.10: MATRIZ DE RESULTADOS DEL TIPO DE CONTROL.....	51
TABLA 3.1: TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PERFILES ESTRUCTURALES .....	76
TABLA 3.2: ESTIMACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS (DISEÑO ACTUAL) .....	79
TABLA 3.3: ESTIMACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS (DISEÑO ACTUAL) .....	79
TABLA 3.4: ESTIMACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS (REDISEÑO) .....	79
TABLA 3.5: ESTIMACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS (REDISEÑO) .....	80
TABLA 3.6: PROPIEDADES FÍSICAS UTILIZADAS PARA LA LOZA.....	81
TABLA 3.7: PROPIEDADES FÍSICAS PARA LAS PAREDES .....	81
TABLA 3.8: PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL DE LAS PUERTAS.....	82
TABLA 3.9: PROPIEDAD DEL COMBUSTIBLE.....	85
TABLA 3.10: EFICIENCIA TÉRMICA (ACTUAL Y DEL REDISEÑO).....	87
TABLA 3.11: OBTENCIÓN DE LONGITUD EQUIVALENTE EN CODOS RECTANGULARES .....	95
TABLA 3.12: VELOCIDADES LÍMITES PARA CONTRARRESTAR RUIDO EN LAS BOCAS DE IMPULSIÓN.....	103
TABLA 3.13: DIMENSIONES DEL CONDUCTO DEL DISEÑO ANTIGUO.....	112
TABLA 3.14: VALORES DE PÉRDIDA DE CARGA POR CONDUCTO.....	113
TABLA 3.15.- DUCTOS DEL REDISEÑO Y SU NUMERACIÓN.....	117
TABLA 3.16: PÉRDIDAS DE CARGA PARA EL REDISEÑO.....	118
TABLA 3.17.- PROPIEDADES DE ENTRADA Y SALIDA .....	120
TABLA 3.18: PÉRDIDAS DE PRESIÓN PARA EL DISEÑO ANTIGUO.....	125
TABLA 3.19: CÁLCULO DE CAUDAL DE INGRESO.....	125

	XV
TABLA 3.20: PRESIÓN Y CAUDAL, SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN (DISEÑO ANTIGUO).....	127
TABLA 6.1: COSTO DE TUBERÍA.....	143
TABLA 6.2: COSTO ACCESORIOS DE TUBERÍA.....	143
TABLA 6.3: COSTO DE VÁLVULAS.....	144
TABLA 6.4: COSTO PARA CONSTRUCCIÓN DE DUCTO (ACERO GALVANIZADO).....	145
TABLA 6.5: COSTO BOMBA DE AGUA.....	146
TABLA 6.6: COSTO VENTILADOR CENTRÍFUGO .....	146
TABLA 6.7: COSTO CALENTADOR DE AGUA .....	146
TABLA 6.8: COSTO TANQUE ALMACENAMIENTO AGUA .....	147
TABLA 6.9: COSTO EQUIPOS DE MEDICIÓN .....	147
TABLA 6.10: COSTO MANO DE OBRA .....	148
TABLA 6.11: COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	149
TABLA 6.12: COSTO DE COMBUSTIBLE .....	150
TABLA 6.13: COSTO DE MANTENIMIENTO.....	150
TABLA 6.14: DEPRECIACIÓN ANUAL DE LA BOMBA DE AGUA .....	153
TABLA 6.15: DEPRECIACIÓN ANUAL DEL VENTILADOR.....	154
TABLA 6.16: DEPRECIACIÓN ANUAL DEL CALENTADOR DE AGUA .....	154
TABLA 6.17: DEPRECIACIÓN ANUAL DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA .....	155
TABLA 6.18: DEPRECIACIÓN ANUAL DEL MATERIAL PARA CONDUCCIÓN DE FLUIDO.....	156
TABLA 6.19: FLUJO DE CAJA (CÁLCULO DEL VAN) .....	157
TABLA 6.20: FLUJO DE CAJA (CÁLCULO DEL TIR) .....	158



## RESUMEN

El presente proyecto partió de un análisis y evaluación de la cámara de secado y sus respectivos sistemas, el cuál mostró sus resoluciones mediante un informe escrito. El siguiente paso fue diseñar el proceso de secado, lo cual, permitió obtener las condiciones de operación para el horno. Una vez que se obtuvieron las condiciones de operación para el proceso de secado se procedió a rediseñar los sistemas. Para cada sistema se siguió el procedimiento habitual de diseño (diseño conceptual, proyección de pérdidas, dimensionamiento de equipos, diseño de detalle e implementación). Una vez que se realizaron los planos de detalle para cada sistema del horno se procedió a la adquisición de materiales y equipos. Después de obtenidos los materiales y equipos, estos se chequearon y, se ejecutó la instalación de cada sistema (humidificación, ventilación y des-humidificación). Una vez instalados los equipos se procedió a la inspección de las instalaciones sin haber energizado los sistemas (pre-comisionado). Después del pre-comisionado se procedió a energizar el proyecto y, de la misma manera, realizar una inspección mediante los sentidos, para evitar fugas y sonidos indeseables (comisionado). Luego de completar estos dos procedimientos (pre-comisionado y comisionado) se secó una porción de madera y se realizó las pruebas correspondientes de funcionamiento (puesta en marcha). Para finalizar, una vez obtenido los datos de secado, se hizo una inspección al 100% de la madera seca, para ver en qué porcentaje se cumplieron los objetivos planteados.

### **Palabras claves**

Horno de secado, proceso de secado, ventilación, humidificación, secado de madera.

## **ABSTRAC**

The present Project began with an evaluation and analysis of the kiln drying chamber and its respective systems, in this part of the Project, a report of the installations was done and presented to the owners. The next step was to design the drying process with which was be able to obtain the operating conditions. Once the operating conditions was obtained the systems design took place. To accomplish the design of each system the common process on mechanical engineering design was follow (conceptual design, estimate the loss of charge, equipment dimensioning, detailed design and construction). When the detailed engineering was finished the following process was to obtain the construction materials and equipment for the implementation. Once this action was finished to get forward a checking of the equipment was done to assure the quality of them and after of all this steps the implementation took place. As soon as the implementation had finished, all the systems were compared to be accord with the detailed design. After this sight checking all the equipment were energize to make sure there was no leaks or annoying noises. Finally when all the procedures was approved the drying test began to guarantee that the objectives of the Project were accomplished.

### **Key Word**

Kiln dryer, Wood drying, ventilation, humidification, drying process

# REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO DE SECADO DE MADERA, CON CAPACIDAD DE 45 M<sup>3</sup>, PERTENECIENTE A LA FÁBRICA PROMARA CIA. LTDA.

## ANTECEDENTES

Debido a que en la industria se buscan las mejores soluciones para un problema dado, la ingeniería se ha vuelto un campo muy competitivo.

El tiempo y los costos, de diseño y construcción, de dichas soluciones son fundamentales al momento de la ejecución de un proyecto, por lo que optimizar los recursos y reducir el impacto ambiental es de suma importancia para la industria ecuatoriana.

El uso de la madera para recubrimiento de pisos, data desde hace muchos años atrás, proceso que se realizaba rústicamente sin más que sólo la colocación de la madera sin tomar en cuenta ciertos aspectos técnicos que son importantes para la duración de dichos pisos. Aproximadamente en los años setenta estos aspectos fueron tomando importancia dentro de la industria maderera, ya que los mismos, son parámetros importantes para definir su calidad y duración.

Uno de los parámetros más importantes para asegurar la duración del piso es el contenido de humedad de la madera, que debe ser del 12% al 14% para la ciudad de Quito y sus alrededores, según (Peralta, 2006), ya que es aquí donde se comercializa la misma. Al principio la extracción de la humedad se daba por medios naturales, como la exposición al sol, pero desde hace algunos años atrás esto ha cambiado con la implementación de hornos para secado, los cuales funcionan con combustibles fósiles, en donde los más usados son el Diesel y el Gas Licuado de petróleo, además de otras fuentes de energía.

## JUSTIFICACIÓN

Al verse amenazada la industria de colocación de pisos de madera en el Ecuador por el aumento en la importación de productos como el piso flotante, la industria se ve obligada a la reducción de costos de producción dentro de la empresa, en particular la reducción en el costo de secado, debido a que es el proceso más caro dentro de la fabricación de tabloncillo.

Las diferentes empresas de aserrado de madera, 600 a nivel nacional, según se investigó por (Aguilar, 2011) , sin importar su tamaño, actualmente se manejan en su gran mayoría por técnicas artesanales, si bien la normativa vigente en el medio lo permite sin mayor inconveniente, (Aguilar, 2011, pág. 40), pero no está por demás mejorar e implementar procesos con un avance tecnológico que permita crecer a la industria con pasos acelerados, ya que, Según (Aguilar, 2011), las empresas de aserrado de madera se han reducido en un 15% para el año 2011.

Un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA), realizado por (Aguilar, 2011, pág. 40), revela que una de las fortalezas de la empresa es la calidad de los productos ofrecidos y una debilidad es el uso de herramientas y maquinaria antigua en procesos productivos. Teniendo en cuenta estos factores además de la oportunidad que se presenta por el crecimiento del mercado forestal a nivel local, se decide desarrollar el proyecto de rediseño e implementación del horno de secado de madera de la empresa PROMARA CIA LTDA.

El proyecto se lo realiza por el deterioro físico que se muestra en el horno, después de haber realizado el análisis y diagnóstico de las instalaciones. Además de que, luego del proceso de secado, se notó algunas fallas en el producto terminado.

Para mostrar una justificación tangible para la realización del proyecto a continuación se presenta los costos de secado y las pérdidas por no calidad.

**Tabla 1: Costo mensual de la no calidad**

AÑO	MES	Costos Piezas Rechazadas	Costo Concesiones
2012	ABRIL	\$ 1.008,00	\$ 526,00
2012	MAYO	\$ 1.050,00	\$ 551,00
2012	JUNIO	\$ 1.036,00	\$ 545,00
2012	JULIO	\$ 1.092,00	\$ 570,00
2012	AGOSTO	\$ 980,00	\$ 513,00
2012	SEPTIEMBRE	\$ 966,00	\$ 507,00
2012	OCTUBRE	\$ 1.092,00	\$ 570,00
2012	NOVIEMBRE	\$ 938,00	\$ 495,00
2012	DICIEMBRE	\$ 854,00	\$ 450,00
2013	ENERO	\$ 910,00	\$ 475,00
2013	FEBRERO	\$ 882,00	\$ 463,00
2013	MARZO	\$ 840,00	\$ 437,00
<b>PROMEDIO MENSUAL</b>		<b>\$ 982,55</b>	<b>\$ 515,00</b>
<b>COSTO ANUAL</b>		<b>\$ 11.648,00</b>	<b>\$ 6.102,00</b>

Fuente: PROMARA CIA.LTDA.

**Tabla 2: Costo trimestral de la no calidad**

AÑO	TRIMESTRE	Costo por piezas rechazadas	Costo por concesión
2012	T2	\$ 3.094,00	\$ 1.622,00
2012	T3	\$ 3.038,00	\$ 1.590,00
2012	T4	\$ 2.884,00	\$ 1.515,00
2013	T1	\$ 2.632,00	\$ 1.375,00
<b>PROMEDIO TRIMESTRAL</b>		<b>\$ 9.016,00</b>	<b>\$ 4.727,00</b>
<b>COSTO ANUAL</b>		<b>\$ 11.648,00</b>	<b>\$ 6.102,00</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

**Tabla 3: Costo Anual por mala calidad**

VALORES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTOS UNITARIO	COSTO TOTAL
Lotes Rechazados	piezas	832	\$ 14,00	\$ 11.648,00
Inspección al 100%	horas	1152	\$ 2,00	\$ 2.304,00
Concesiones	piezas	6102	\$ 1,00	\$ 6.102,00
<b>Costo anual de la no calidad</b>				<b>\$ 20.054,00</b>

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

En la Tabla 3: Costo Anual por mala calidad, se puede observar las pérdidas que ha tenido la empresa en el último año funcionamiento del horno.

Con el rediseño e implementación del horno se espera reducir los costos por mala calidad en aproximadamente un 17% a partir de una reducción del 30% en el número de piezas rechazadas.

La realización del proyecto ofrece una oportunidad de crecer en el sector empresarial de manera que se pueda competir en el mercado nacional.

## **ALCANCE**

Como se sabe el principal objetivo de una empresa es aumentar sus ganancias o por lo menos mantenerlas en equilibrio, de acuerdo a la situación económica de nuestro país. Es por eso que toda empresa desarrolla proyectos para aumentar o mantener sus utilidades.

El presente proyecto tiene como fin el rediseño e implementación del horno de secado de madera de 45 metros cúbicos (dimensiones máximas encontradas 2.5 x 0.23 x 0.032 [m]) de la empresa PROMARA Cía. Ltda., esto logrará reducir los costos de la no calidad en aproximadamente el 17%,

a partir de una reducción del 30% en el número de piezas rechazadas, por fallas en el secado artificial.

Cabe recalcar que el propósito del proyecto es utilizar un 80% de medios físicos (mecánicos) y un 20% de medios electrónicos para el funcionamiento y control del horno, ya que de esta manera se reducirán costos de inversión. Por lo tanto, el proceso de secado necesitará la asistencia parcial de un obrero.

La especie de madera a ser secada es el “chanul” y el corte, con dimensiones promedio de 2.5 x .20 x .030 m, es el llamado tabloncillo. Esta madera es considerada dura y tiene un espesor aproximado de 30 (mm). El secado debe ser el adecuado y eliminar tensiones internas para que posteriormente, la madera, no sufra daños en el aserrado.

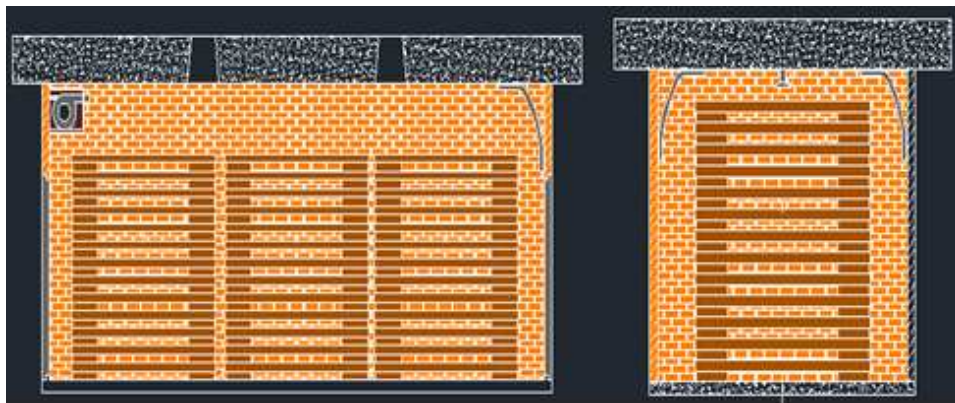
Dentro del alcance del proyecto está el análisis y diagnóstico de las instalaciones de la cámara de secado, El rediseño e implementación de los sistemas fundamentales que contiene un horno convencional de secado artificial de madera, la selección de instrumentos para el sistema de control y registro, el montaje de equipos y, por último, el análisis y prueba de funcionamiento.

Dentro de la inspección visual se tomó en cuenta las fallas estructurales y de mampostería que tenía la cámara de secado para su evaluación. Se realizó un informe al final de esta tarea. Cabe recalcar que las dimensiones de la cámara no cambiaron. Según dictó el informe del estado actual del horno, se realizó un rediseño y selección de perfiles estructurales, más no un análisis, ni diseño de soldaduras. Dicho informe dictó las necesidades primordiales para el montaje de los equipos.

Lo que concierne al rediseño e implementación de los sistemas fundamentales que contiene un horno convencional de secado de madera,

se refiere específicamente al sistema de ventilación, sistema de calentamiento, sistema de humidificación y sistema de des-humidificación o extracción de aire, el cuál se diseñó en conjunto con el sistema de ventilación.

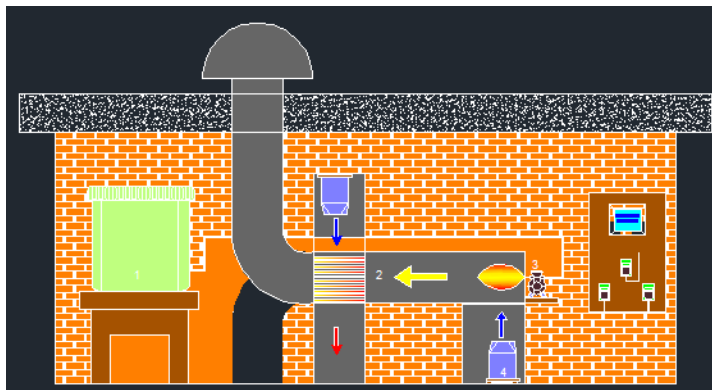
Para el sistema de ventilación o distribución de aire se realizó un análisis computacional, el cual permitió ver la distribución de temperatura y humedad dentro del horno. En esta sección no se realizó cambios, en lo que se refiere al tipo de sistema, más bien se pensó en implementar planchas de acero galvanizado para asegurar una distribución homogénea del aire, dentro del horno. Ver Figura 1.



**Figura 1: Esquema Rediseño sistema de distribución de aire**

Para el sistema de calentamiento se realizó un análisis térmico, con un diseño simple que no tenga cambios muy pronunciados de acuerdo a la configuración actual del ducto. El objetivo principal en el rediseño de este sistema fue que el aire de ingreso al horno no lleve los residuos de la combustión del diesel. Ver Figura 2.





**Figura 2: Esquema rediseño sistema de calentamiento**

Ya que los ductos del sistema de humidificación se encontraron instalados, lo que se va hizo es seleccionar de manera adecuada los rociadores. Una vez seleccionados los rociadores se procederá a su instalación.

El sistema de des-humidificación o extracción de aire consta de ventilas que permitan la salida del aire de acuerdo a los requerimientos de humedad dentro del horno.

Para el control y registro se seleccionó e instaló equipos para la medición y registro de humedad relativa del aire y temperatura dentro del horno, a más del contenido de humedad de la madera. La instalación de estos equipos fue muy importante, debido a que se utilizaron para la inspección del programa de secado. .

Las pruebas de funcionamiento y toma de datos del rediseño se realizaron para una sola carga de secado. La medición mediante instrumentos fue del contenido de humedad de la madera, la temperatura y la humedad relativa del aire dentro del horno. Mientras que las fallas de secado que provocan el rechazo total de la pieza de madera se la realizó por medio de una inspección visual, por parte del obrero más experimentado de la fábrica y su respectivo administrador.

Para finalizar se elaboró un manual de uso para inspección del programa de secado y recomendaciones para mantenimiento del horno.

## **OBJETIVO GENERAL**

Identificar, analizar y solucionar los problemas existentes en el horno convencional de secado artificial de madera de “chanul” con corte de tabloncillo perteneciente a la empresa PROMARA CIA. LTDA.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Elaborar un informe técnico, a partir de una inspección visual y cálculo estructural, que muestre los problemas de infraestructura existentes en el horno que se deben solucionar antes de la implementación de cualquier equipo.

Rediseñar e implementar los sistemas fundamentales que contiene un horno convencional de secado de madera, para cumplir el programa de secado recomendado por (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), para la madera de chanul. (Rediseñar e implementar el sistema de ventilación; Rediseñar e implementar el sistema de humidificación; Rediseñar e implementar el sistema de des-humidificación; Seleccionar y adquirir los equipos para el control de temperatura y humedad relativa dentro del horno).

Reducir las fallas de secado que ocasionan el rechazo total de la pieza, en un 30%, en una carga de 2400 tabloncillos de madera seca madera.

# 1 MARCO TEÓRICO

## 1.1 PARÁMETROS DE SECADO DE MADERA

Antes de establecer los parámetros de secado, se deben definir algunas características de la madera como el tipo de corte, la especie y las dimensiones.

### 1.1.1 CARÁCTERÍSTICAS DE LA MADERA

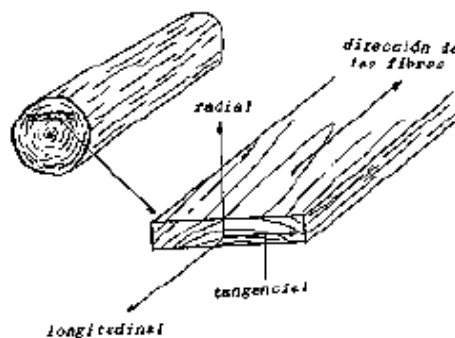
La especie de madera que se va a secar es el comúnmente llamado chanul, cuyo nombre científico es *Humiriastrum Procerum*. El chanul tiene un color marrón rojizo con manchas oscuras y su olor es ligeramente avinagrado, cuando está fresco; A pesar de su brillo medianamente bajo, tiene una textura fina.

#### 1.1.1.1 Corte de la madera

La madera, misma que se extrae de un tronco, tiene cuatro tipos de corte, el transversal, el tangencial, el radial y el oblicuo. (Ver Figura 1.1)

La madera, con tipo corte de tabloncillo, es la que se va a secar en el horno de la empresa PROMARA CIA. LTDA., la misma tiene medidas aproximadas de 250x20x3.0 cm.

Para la madera con corte de tabloncillo se consideran tres tipos de corte. Según la experiencia de los obreros en la fábrica, los cortes considerados son:



**Figura 1.1:** Cortes en la madera

**Corte longitudinal:** es el corte con dirección longitudinal al eje del tronco.

**Corte tangencial:** es el corte con dirección tangencial a los anillos de crecimiento.

**Corte radial:** es el corte con dirección radial a la sección transversal del tronco. Este corte es el más estable ante el cambio de humedad.

Es muy importante conocer el tipo de corte con el que se extrae la madera, porque es un factor que influye en el origen de grietas y rajaduras, en la misma, durante el secado.

#### 1.1.1.2 Propiedades Físicas y Mecánicas

La madera de chanul crece en bosques de colina o elevaciones bajas, con suelos sin inundaciones de formación vegetal (bosque húmedo tropical), esto significa que en su estructura contiene un alto porcentaje de humedad.

El secado de madera de chanul es moderadamente difícil de realizar al aire libre, debido a que es una especie de madera, clasificada como dura, y que proviene de árboles, cuyo crecimiento lento, aumenta su densidad y, por

ende, sus propiedades mecánicas. Por esta razón se utiliza hornos de secado convencional para lograr un contenido de humedad adecuado. En la Tabla 1.11 se distinguen las propiedades físicas del chanul.

**Tabla 1.1: Propiedades físicas del chanul.**

DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	MADERA EN ESTADO VERDE	MADERA SECA AL AIRE	MADERA ANHIDRA	MADERA BÁSICA
	1.08	0.87	0.84	0.69
CONTRACCIÓN NORMAL (%)	TANGENCIAL	RADIAL	VOLUMÉTRICA	T/R
	5.8	3.6	9.4	1.61
CONTRACCIÓN TOTAL (%)	11.1	7.4	28.5	1.50

Fuente: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Chanul.pdf>

Notar en la tabla anterior el término “Estado Verde”, este es, una de las denominaciones que se le da, a la madera, dependiendo de su contenido de humedad, en este caso cuando la humedad es 100% o mayor. En la **Tabla 1.4**, se encuentra la nomenclatura para diferentes contenidos de humedad. Los términos como “anhidra” o básica se verán en las secciones subsecuentes.

Luego de la aclaración anterior, notar que en la Tabla 1.2 y **Tabla 1.3**, se presentan las propiedades mecánicas de la madera, de acuerdo a su contenido de humedad.

**Tabla 1.2: Propiedades mecánicas del chanul**

CONDICION CH%	FLEXIÓN ESTÁTICA			COMPRESIÓN				
				PARALELA			PERPENDICULAR	
	ELP Kg/cm <sup>2</sup>	MOR Kg/cm <sup>2</sup>	MOE 10 <sup>3</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	ELP Kg/cm <sup>2</sup>	MOR Kg/cm <sup>2</sup>	MOE10 <sup>3</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	ELP Kg/cm <sup>2</sup>	MOR Kg/cm <sup>2</sup>
VERDE +30%	567.8	891.2	136.2	410.4	480.4	-----	53.8	----
SECO AL AIRE 12%	936.8	1471.2	183.1	632.0	764.3	-----	100.4	----

Fuente: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Chanul.pdf>

ELP: Esfuerzo en el límite proporcional

MOR: Módulo de ruptura

MOE: Módulo de elasticidad

**Tabla 1.3: Propiedades mecánicas del chanul (Continuación)**

CONDICION CH%	DUREZA Kg			CIZALLADURA Kg/cm <sup>2</sup>		TENACIDAD Kg-m	
	Rad	Tan.	Ext	Tan	Rad	Tan	Rad
VERDE +30%	545.7	534.5	647.5	110	95	3.14	3.49
SECO AL AIRE 12%	828.8	823.9	1049.9	129	93	3.68	4.17

**Fuente:** <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Chanul.pdf>

#### 1.1.1.2.1 Densidad

Como se sabe la madera es un material poroso y fibroso y, dentro de sus cavidades se aloja la humedad. Dicho así, la densidad se vuelve una propiedad muy importante porque permite calcular el volumen, poroso y fibroso, de la madera y, consecuentemente, el contenido de humedad en la pieza o leño de madera, como se verá en las siguientes secciones.

Sin embargo, antes de definir *porosidad* y *fibrosis* se debe tener muy claro el concepto de densidad y densidad relativa. La densidad es la magnitud física que mide el peso de un cuerpo en un espacio determinado, mientras que la densidad relativa es la relación entre la densidad de la madera y la densidad del agua como se ve en la sección posterior.

Convencionalmente la densidad se calcula mediante la relación masa-volumen a un mismo contenido de humedad, sin embargo, debido a que la madera es un material *higroscópico* (se hincha y contrae al ganar o perder

humedad, respectivamente), se definen entonces, tres valores distintos para el cálculo de densidad, tal y como se muestra en las ecuaciones posteriores a este párrafo.

$$DA = \text{Densidad Anhidra} = \frac{\text{masa seca al horno}}{\text{volumen seco al horno}} = \frac{m_o}{V_o} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$DN = \text{Densidad normal} = \frac{\text{Masa al 12\% de CH}}{\text{Volumen al 12\% de CH}} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$DF = \text{Densidad en el PSF} = \frac{\text{Masa al 30\% de CH}}{\text{Volumen al 30\% de CH}} = \frac{m_f}{V_f} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

#### 1.1.1.2.2 Densidad Relativa

En términos generales la densidad relativa es la relación entre la densidad de la madera y la densidad del agua ( $D_a = 1$  en  $\text{g/cm}^3$ ). Se realiza esta comparación, debido a que el agua se considera una sustancia pura.

Se dijo en la sección anterior que la densidad es la relación masa-volumen a un cierto contenido de humedad. Sin embargo según (KOLLMAN & KOTE, 1938), en la investigación de productos forestales, la relación masa-volumen se da mediante la proporción entre la masa seca al horno (anhidra) y el volumen a un contenido de humedad específico. Siendo este el precedente, se precisa, a continuación, los tipos de densidad relativa.

$$DRA = \text{Densidad Relativa Anhidra} = \frac{m_o}{V_o * D_a} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$DRN = \text{Densidad relativa normal} = \frac{m_o}{V_{12\%} * D_a} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$DRB = \text{Densidad relativa básica} = \frac{m_o}{V_{30\%} * D_a} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

De las ecuaciones anteriores se deduce; primero que la densidad relativa disminuye, cuando el contenido de humedad aumenta, debido a que el volumen aumenta, siendo el límite el 30% de humedad (Punto de saturación de las fibras). En este punto el fenómeno de hinchazón cesa y el volumen deja de aumentar, según las investigaciones realizadas por la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989); segundo que la densidad relativa básica (DRB) es el mínimo valor que puede alcanzar la densidad relativa, debido a que el volumen va a ser menor para humedades menores de 12% y a partir de la densidad relativa básica el valor de densidad relativa permanecerá constante para valores humedades mayores al 30%.

### 1.1.2 HUMEDAD EN LA MADERA

La humedad está presente en tres formas dentro de la madera. Agua libre, agua de saturación y agua de constitución.

El agua libre, que por capilaridad se encuentra entre las fibras y poros de la madera, es el agua que se extrae por evaporación.

Una vez que se retira toda el agua libre, se llega al *punto de saturación de las fibras (PSF)*, con humedades que oscilan entre 21 y 32 %, según (SIAU, 1984). Se insiste en el hecho de que, al eliminar el agua libre no se modifican las **propiedades mecánicas** de la madera.(Junta del acuerdo de cartagena, 1989)

El agua de saturación, higroscópica o fija es el agua que se encuentra adherida a las paredes celulares de la madera (Junta del acuerdo de cartagena, 1989). Su extracción se realiza en un horno de secado artificial, debido a que, en el secado al aire libre tardaría demasiado tiempo en salir a producción. Cabe mencionar, que bajo el PSF, comienzan a modificarse las propiedades físicas y mecánicas de la madera.



El agua de constitución es parte de la pieza de madera y su extracción implicaría su destrucción parcial o total. (Junta del acuerdo de cartagena, 1989)

La madera recibe varios nombres de acuerdo a su contenido de humedad (CH). (Ver Tabla 1.4), esto sirve para reconocer el estado en que se encuentra, la misma, durante el secado.

### 1.1.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA MADERA

Para tener una referencia del valor máximo, que se medirá mediante los métodos expuestos en las secciones posteriores, se calculó el máximo contenido de humedad para la madera de chanul, mediante la **Ecuación 1.7**, extraída de la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 1-25).

$$CH_{max} = \left( 0.30 + \frac{1.5 - DA}{1.5 * DA} \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde DA es la densidad anhidra que se obtiene de la Tabla 1.11 y se reemplaza en la **Ecuación 1.7**. Resolviendo esta ecuación se obtiene el máximo contenido de humedad (CH<sub>max</sub>), el cual numéricamente se expresa a continuación:

$$CH_{max} = \left( 0.30 + \frac{1.5 - 0.84}{1.5 * 0.84} \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Resolviendo numéricamente,

$$CH_{max} = 82.38 \% \quad \text{Ecuación 1.9}$$

En capítulos posteriores se hará referencia a este valor (82.38%).

**Tabla 1.4: Denominación de la madera de acuerdo a su (CH)**

DENOMINACIÓN DEL ESTADO DE LA MADERA	NIVEL DE HUMEDAD	LUGAR DE UBICACIÓN
<b>Madera Verde</b>	80 a +200%	Bajo cubierta en el bosque
<b>Madera Húmeda</b>	25 a 80%	Recién cortada, en el patio de trozas o a la intemperie
<b>Madera Poco Seca</b>	20 a 25%	Aire libre
<b>Madera Seca al Aire</b>	15 a 20%	Bajo techo
<b>Madera muy Seca</b>	8 a 15%	Interiores (hornos)
<b>Madera anhidra</b>	0%	En el laboratorio

**Fuente:** <http://www.ritim.org.ar/espanol/Descargas/i007.pdf>

Existen dos métodos para determinar experimentalmente el contenido de humedad (CH) en la madera; el método gravimétrico y el método eléctrico.

### 1.1.3.1 Método gravimétrico

Determinar el contenido de humedad (CH) mediante el método gravimétrico, consiste en pesar una probeta de madera a diferentes condiciones de humedad (proceso especificado en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1160:1983). El presente apartado se referirá a la ecuación utilizada para el cálculo de este contenido.

$$CH = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa anhidra}} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Se reemplazó (masa agua) = {[masa inicial (m)] – [masa anhidra (mo)]} y la ecuación obtenida es:

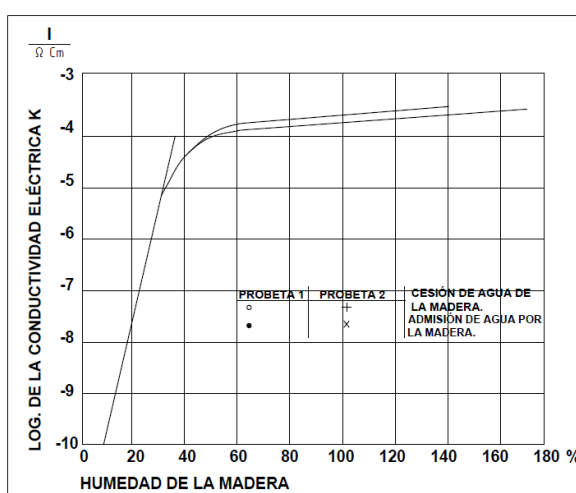
$$CH = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\%$$

### 1.1.3.2 Método Eléctrico

El método eléctrico es un método directo en la medición del contenido de humedad. Su funcionamiento se basa en el cambio de las propiedades eléctricas de la madera de acuerdo a la cantidad de agua, que esta posea. La presente sección se centró en el dispositivo llamado xilohigrómetro o higrómetro resistivo.

El xilohigrómetro es un aparato que mide la resistencia eléctrica y la constante dieléctrica. Esta constante mide la permisividad eléctrica de un medio continuo, de la madera mediante electrodos que se incrustan en su superficie. Para utilizarlo de manera adecuado se debe conocer el principio de funcionamiento y sus limitaciones.

Una de las limitaciones del dispositivo es que, funciona correctamente en un rango de humedad de 6 a 25 %, según la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), con una precisión de  $\pm 2$ . Notar la Figura 1.2



**Figura 1.2:** Relación de la humedad con la conductividad eléctrica para la especie *Sequia Semper Vire*. Según (STAMM, 1929)

Un factor adicional a tomar en cuenta, es la temperatura al medir el CH, ya que, dependiendo del instrumento utilizado, el valor del CH obtenido, puede estar desviado del valor real del CH en la madera. Por esta razón, durante el proceso de secado se utiliza un control de humedad mediante muestras.

#### 1.1.4 PRINCIPIO DE SECADO DE MADERA EN HORNOS

Para la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989) el proceso de secado de la madera en un horno convencional se controla mediante tres variables: la temperatura, la humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado y la velocidad del aire a través de la pila. Al tener condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire adecuada, el agua que se encuentra en la superficie de la madera comienza a evaporarse y crea una diferencia de presión. Esta diferencia de presión conlleva a que, el agua contenida en el interior de la madera migre hacia la superficie.

La temperatura y humedad relativa, dentro de la cámara de secado, son muy importantes porque al mantenerse constantes, definen el **contenido de humedad de equilibrio (CHE)**, es decir, el contenido de humedad al que se aproxima la madera con condiciones estables de temperatura y humedad relativa.

Un procedimiento adecuado para el secado de madera es ir reduciendo su contenido de humedad progresivamente. Partiendo del concepto de contenido de humedad equilibrio se dice que para lograr dicha tarea, las propiedades de humedad relativa y temperatura dentro de la cámara deben variar de manera adecuada para establecer un **CHE** próximo al contenido de humedad deseado en la madera. En este caso, de acuerdo a la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), para el parquet el rango del contenido de humedad (CH) está entre 8% y 14%.

Al ser el proceso migratorio del agua en la madera, muy delicado, debido a los esfuerzos que se producen por su extracción, la velocidad del aire que pasa a través de la pila de madera juega un papel muy importante porque define el tiempo de evaporación del agua en la superficie y en su parte interna. Para evitar defectos en el secado el gradiente de humedad de la madera (relación entre el CH de la superficie y el CH en el centro, de la madera), debe ser el óptimo.

Tomar en cuenta que la relación entre el contenido de humedad inicial de la madera y el *contenido de humedad equilibrio* (CHE) es una medida del potencial del secado de madera en hornos y, define la velocidad del proceso, por tal razón, el valor del CHE debe ser controlado. La relación, de la que se habló, se conoce como gradiente de secado (GS).

A continuación se explica la intervención de cada una de las variables, en el proceso de secado.

#### **1.1.4.1 Temperatura**

El aumento de la temperatura logra un aumento en la energía cinética de las moléculas de agua y, derivado de ese aumento se logra un aumento en la presión parcial de vapor de agua, mismo que, si supera la presión parcial dentro de la pieza de madera, se produce el fenómeno de evaporación.

Un aumento de temperatura sobrelleva un aumento en la capacidad del aire para absorber humedad. Esto se da porque al incrementar la temperatura, incrementa también la presión de vapor saturado, cuya cantidad determina la máxima cantidad de vapor que puede tener el aire a dichas condiciones de temperatura.

Como se pudo apreciar la temperatura conjuntamente con la humedad relativa del aire, son los elementos que determinan el clima dentro de la cámara de secado y el contenido de humedad equilibrio de la madera.

Según la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989) para maderas pesadas o semi-pesadas (chanul: madera a secar en el horno), el rango de temperatura máxima es de 60 a 80 Celsius. La madera verde o recién aserrada debe secarse a temperaturas más bajas para evitar defectos. (Ver Tabla 1.6: Programa de Secado para Tabloncillo de Chanul)

#### **1.1.4.2 Humedad del Aire**

El aire es una mezcla de varios gases. Entre los más importantes están el nitrógeno y oxígeno, que conforman el 99% de su composición, en un porcentaje de 78% y 21% respectivamente; mientras que el 1% restante lo componen otros gases.

Dentro de este, 1%, el gas que cambia significativamente es el vapor de agua (ECKELMAN & BAKER, 1945). Este gas puede variar desde presión igual a cero, en aire seco hasta la presión de vapor de agua, en aire saturado a esa temperatura.

El vapor de agua, al ser unos de los componentes del aire, ejerce una presión parcial sobre la madera, y este es el factor que determina la capacidad del mismo para absorber humedad. El valor de la presión parcial depende estrictamente de la temperatura a la que se encuentre el horno y, de la velocidad de evaporación de las moléculas de agua. Por otro lado La velocidad de evaporación de las moléculas de agua depende de la capacidad que tenga el aire para absorber el vapor de agua contenido en la madera.

Al mantener controlada la presión parcial de vapor dentro de la cámara de secado nos permite, al mismo tiempo, controlar el contenido de humedad en el aire y, consecuentemente nos permitirá obtener el valor de contenido de humedad equilibrio (CHE), requerido para el proceso de secado. Ver importancia del CHE en la sección 1.1.4.

#### 1.1.4.2.1 Presión Parcial y Presión de Vapor Saturado

Como se mencionó anteriormente, el *aire atmosférico* (mezcla de aire seco y vapor de agua), está conformado por distintos gases y cada uno de estos contribuye al peso total del mismo. De manera similar cada gas que compone el aire atmosférico ejerce una presión parcial individual de modo que la sumatoria de estas presiones equivale a la presión total, según la ley de Dalton.

Formalmente el vapor de agua es un componente del aire atmosférico. Este ejercerá una presión individual o parcial (presión parcial de vapor), en el aire. Tomar en cuenta que, debido a la composición uniforme e inquebrantable del aire, el mismo se considera como un gas ideal (no una mezcla de gases), y a esta composición, sin tomar en cuenta, la cantidad de vapor de agua que este contenga, se le llama aire seco.

El porcentaje de humedad en el aire atmosférico determina el valor de presión parcial de vapor. Mediante este valor se puede obtener la presión de vapor saturado, que es la presión a la que se encuentra cierto volumen de aire, a cierta temperatura, cuando su contenido de humedad es 100%. Esto se logra cuando las moléculas de agua en forma de vapor y líquido están en equilibrio, es decir que la cantidad de moléculas que se evaporan es igual a la cantidad de moléculas que se condensan.

A través de la *presión de vapor* se puede obtener la humedad absoluta (HA), que es la relación entre masa de agua por unidad de volumen de aire

húmedo. Esta relación se obtiene suponiendo que el aire sea un gas ideal, (Cengel & Boles, 2002, pág. 139) nos dice que el vapor de agua se puede considerar un gas ideal si la presión parcial no excede 10 kPa. Entonces si se parte de la ecuación de estado de gas ideal:

$$P_v * V = n * R * T \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Dónde:

$P_v$  = presión de vapor saturado

$V$  = volumen de la cámara de secado

$n$  = número de moles (masa de vapor ( $m_v$ )/peso molecular agua ( $P_{MH_2O}$ ))

$R$  = constante universal de los gases ideales

$T$  = temperatura de la cámara de secado

En la ecuación de estado de gas ideal (Ecuación 1.12), se reemplaza el número de moles y se despeja  $m_v/V$ , que por definición es  $HA$ , entonces se obtiene la ecuación de humedad absoluta (Ecuación 1.13):

$$HA = \frac{P_v * P_{MH_2O}}{R * T} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

En la ecuación de humedad absoluta (Ecuación 1.13) se reemplaza el valor de  $R$  y  $P_{MH_2O}$  y se consigue la ecuación para el control de humidificación dentro del horno de secado de tabloncillo (Ecuación 1.14).

$$HA = \frac{2887 * P_v}{T} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Donde  $P_v$  está en cm-Hg,  $T$  en grados kelvin y  $HA$  en g/m<sup>3</sup>.



#### 1.1.4.2.2 Humedad Relativa del Aire

La humedad relativa se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y, la mayor cantidad posible de vapor contenido en el mismo volumen. Si se sustituye estos valores a partir de la ecuación de estado de los gases ideales (Ecuación 1.12), se deriva la relación entre la presión parcial de vapor y la presión de vapor saturada como se muestra a continuación:

$$HR = \frac{P_v}{P_s} * 100 \quad \text{Ecuación 1.15}$$

De lo cual multiplicando valores constantes e iguales a cada término, partiendo de la definición de humedad absoluta (**Ecuación 1.15**), se adquiere la ecuación de humedad relativa (Ecuación 1.16):

$$HR = \frac{HA}{HA_s} * 100 \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde  $HA_s$  es la humedad absoluta de vapor saturado.

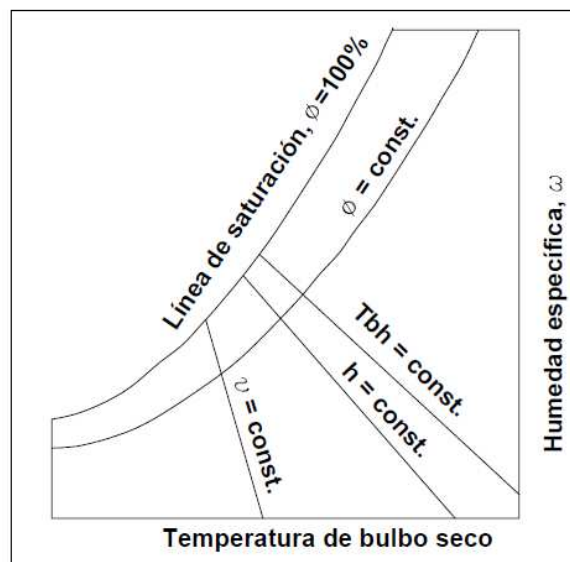
La humedad relativa se mide mediante dos métodos; el primero es un Higrómetro, cuyo principio de funcionamiento, se deriva de la propiedad que tienen algunos materiales para alargarse o contraerse con el cambio de humedad del aire (cabello humano). El segundo método es utilizando un psicrómetro.

El psicrómetro está formado por dos termómetros, uno de bulbo descubierto que mide directamente la temperatura del aire (temperatura de bulbo seco TBS) y el otro, que tiene el bulbo envuelto con una gasa empapada en agua. Esta particularidad trae consigo un enfriamiento evaporativo, que da lugar a una lectura menor del termómetro (temperatura

de bulbo húmedo TBH). La diferencia de estas dos temperaturas se llama diferencia psicrométrica.

La diferencia psicrométrica es una medida indirecta de la humedad relativa. Aclarando esto, imagine que la temperatura de bulbo seco es igual a la temperatura de bulbo húmedo, esto quiere decir que no se evaporó ninguna cantidad de agua del paño, con el que está envuelto el termómetro húmedo. Eso significa que el aire no está extrayendo humedad, por lógica se deduce, entonces que, el aire está a 100% de humedad relativa.

La carta psicrométrica es una gráfica creada por expertos en el tema de acondicionamiento de aire, que nos permite obtener diferentes valores para el análisis térmico de un sistema de este tipo (la carta debe ser elegida para el lugar donde se encuentra el horno). Ver **Figura 1.3:** Esquema carta psicrométrica



**Figura 1.3:** Esquema carta psicrométrica

A partir de la Carta Psicrométrica, la cual está realizada para una presión barométrica específica (presión con respecto a la altura), se obtiene el valor

de humedad relativa del aire (HR) partiendo de la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo, como valores de entrada al gráfico.

Si se desea obtener un valor exacto de la humedad relativa (HR) referirse a la ecuación de CARRIER y, posteriormente modificada por CARPENTER. (Junta del acuerdo de cartagena, 1989).

Ecuación de CARRIER:

$$P_v = P_{oh} - \frac{(P_a - P_{oh})(C - C_h)}{1546 - 1.44 \times C_h} \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Dónde:

$P_v$  = presión parcial del vapor, en cm-Hg

$P_{oh}$  = Presión del vapor saturado a TBH, en cm-Hg

$P_a$  = Presión atmosférica

$C$  = Temperatura del bulbo seco, en Celsius.

$C_h$  = Temperatura de bulbo húmedo, en Celsius.

De la Tabla 1.5 se obtiene el  $P_{oh}$  de acuerdo a la temperatura de bulbo húmedo (TBH). Y  $P_a = 55.70$  cm-Hg, valor interpolado de la Tabla 2.2 de la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 2-16), para la parroquia de calderón ubicada en la ciudad de Quito, cuya altura sobre el nivel del mar es 2500 metros.

**Tabla 1.5: Presión de vapor saturado y Humedad Absoluta**

TEMPERATURA		po	HAo	TEMPERATURA		po	HAo
°C	°F	cm Hg	g/m <sup>3</sup>	°C	°F	cm Hg	g/m <sup>3</sup>
0	32.0	0.458	4.8	54	129.2	11.25	99.3
2	35.6	0.529	5.6	56	132.8	12.38	108.6
4	39.2	0.610	6.4	58	136.4	13.61	118.7
6	42.8	0.701	7.3	60	140.0	14.94	131.0
8	46.4	0.805	8.3	62	143.6	16.38	141.2
10	50.0	0.921	9.4	64	147.2	17.93	153.6
12	53.6	1.052	10.7	66	150.8	19.61	167.0
14	57.2	1.200	12.1	68	154.4	21.42	181.3
16	60.8	1.363	13.6	70	158.0	23.37	198.0
18	64.4	1.548	15.4	72	161.6	25.46	213.1
20	68.0	1.754	17.3	74	165.2	27.72	230.6
22	71.6	1.983	19.4	76	168.8	30.14	249.3
24	75.2	2.238	21.8	78	172.4	32.73	269.2
26	78.8	2.521	24.4	80	176.0	35.51	294.0
28	82.4	2.835	27.2	90	194.0	52.58	424.0
30	86.0	3.182	30.4	100	212.0	76.00	598.0
32	89.6	3.566	33.8	110	230.0	107.46	827.0
34	93.2	3.990	37.5	120	248.0	148.91	1,122.0
36	96.8	4.456	41.6	130	266.0	202.61	1,451.0
38	100.4	4.969	46.1	140	284.0	271.09	1,968.0
40	104.0	5.532	51.1	150	302.0	357.04	2,437.0
42	107.6	6.150	56.4	160	320.0	463.6	3,265.0
44	111.2	6.826	62.2	170	338.0	594.2	3,872.0
46	114.8	7.565	68.5	180	356.0	751.93	4,792.0
48	118.4	8.371	75.3	190	374.0	941.21	5,869.0
50	122.0	9.251	83.2	200	392.0	1,165.65	7,114.0
52	125.6	10.210	90.7				

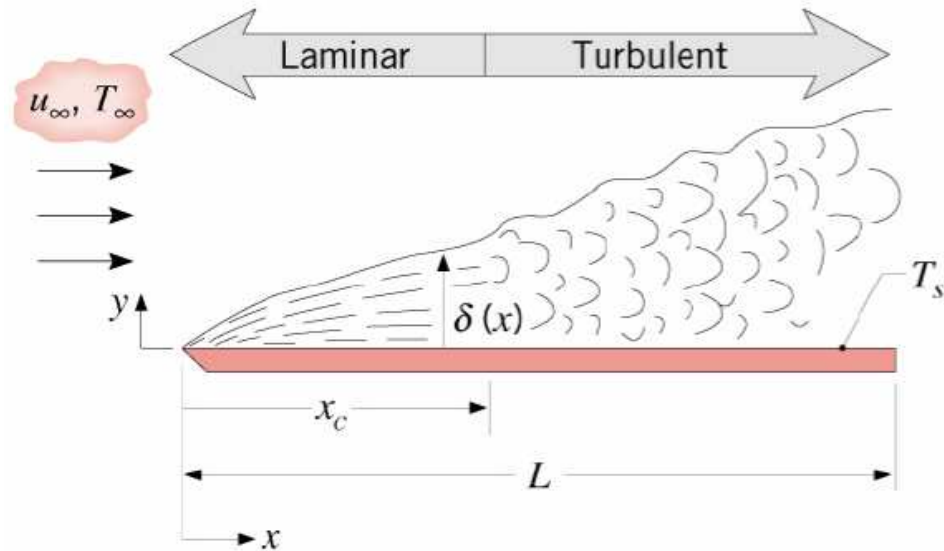
**Fuente:** (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, pág. 2-6)

### 1.1.4.3 Velocidad del Aire

El aire circundante dentro del horno es muy importante por dos cosas; La primera, debido a que forma un medio de transferencia de calor por convección, que ayuda a la evaporación del agua, en la madera. Además permite eliminar el exceso de humedad y mantener las condiciones deseadas.

La capa límite, como su nombre lo dice, es el límite entre dos flujos diferentes. Se dice que para régimen de flujo laminar la transferencia de calor es menor que la transferencia de calor para flujo turbulento. Un flujo

turbulento es más eficaz que un laminar, porque para un flujo turbulento la capa límite es más amplia. (Ver **Figura 1.4**)



**Figura 1.4:** Capa límite en flujo laminar y turbulento

Según la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), se ha demostrado, experimentalmente, que se obtienen condiciones óptimas de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula a través de la pila a una velocidad a 2 m/s.

Estas variables se analizan detalladamente en la sección “Rediseño del sistema de ventilación”, mismo que está ubicado en el Capítulo 3 y, cuyo análisis permitirá encontrar la solución más conveniente desde el punto de vista energético y económico.

### 1.1.5 CONDUCCION DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA EN HORNOS CONVENCIONALES

El proceso de conducción de secado es importante para evitar fallas en las piezas de madera.

### 1.1.5.1 Proceso de conducción del secado

El proceso de conducción se lo puede realizar de tres maneras:

- Utilizando un psicrómetro,
- Utilizando el gradiente de secado ó
- Utilizando un deshumidificador

#### 1.1.5.1 Utilizando un psicrómetro o Humidímetro

La conducción del proceso de secado de madera en un horno convencional, de acuerdo al primer método, se lleva a cabo instalando un psicrómetro que mide, la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo, durante todo el proceso de secado. Mediante este instrumento, se controla la diferencia psicrométrica, junto con la velocidad del aire y, de esta manera, se definirá cada fase del secado.

#### 1.1.5.2 Utilizando el gradiente de secado

Este es un método muy funcional, ya que al fijar la distancia entre el contenido de humedad de la madera (CH) y el contenido de humedad equilibrio (CHE), se puede obtener una gráfica de secado. Además nos facilita la automatización del proceso.

El problema de este tipo de control, incurre en obtener el valor del gradiente de secado porque cuyo valor depende de varios factores como la especie y espesor de la madera, contenido de humedad inicial, tipo de secadero (metálico, de muro), etc.

Para especies desconocidas, respecto a su comportamiento durante el secado, se debe aplicar un gradiente de 1.5 a 1.6, hasta que se adquiere mayor experiencia en el proceso. (Junta del acuerdo de cartagena, 1989)

#### 1.1.5.1.1 Utilizando un deshumidificador

Como se dijo anteriormente todo proceso de secado convencional tiene cuatro fases, y este no va a ser la excepción. Se puede decir que la fase de acondicionamiento se reduce porque el secado por des-humidificación es lento.

La particularidad de este tipo de conducción, insiste en el hecho de que, en las fases de secado A y B (A = sobre el PSF y B = debajo del PSF), se utiliza una máquina de refrigeración como deshumidificador, condensando el vapor de agua contenido en el aire.

El problema radica al llegar a la etapa de secado B (bajo el PSF), el sistema de condensación pierde su eficiencia de forma considerable y sube el consumo específico de energía.(Junta del acuerdo de cartagena, 1989)

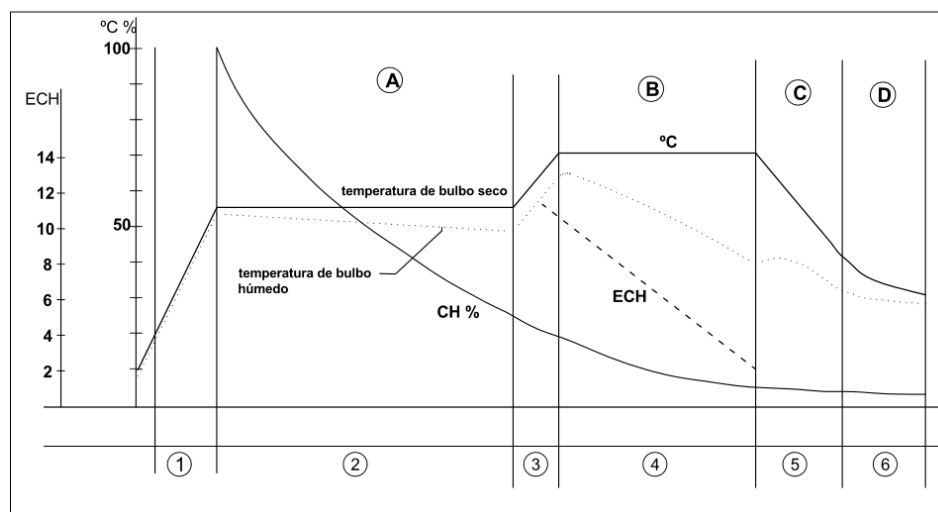
De las tres formas que existen, para conducir el secado, la más utilizada es la que se controla mediante un psicrómetro (Junta del acuerdo de cartagena, 1989). La razón para ser este método el más utilizado, es porque la información para el manejo del proceso y los parámetros de funcionamiento, se encuentran totalmente difundidos. Además que es práctico y económico.

Por esta razón, según la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), el secado por condensación en secaderos de alta temperatura, a un contenido de humedad entre 12 y 14 %, es antieconómico, debido a que, para condensar el vapor de agua se debe disminuir la temperatura del aire.

### 1.1.5.2 Fases de secado

Cualquiera que sea el método utilizado, se debe conocer las fases de secado, mismas que son independientes del tipo de conducción (Junta del acuerdo de cartagena, 1989).

Las fases de secado son cuatro (Ver **Figura 1.5:** ) fase de calentamiento, fase de secado, fase de acondicionamiento y fase de enfriamiento.



**Figura 1.5:** Secado por evaporación, ciclo esquemático (según BOLLMAN, 1984)

- |  |  |
|--|--|
| (1) Calentamiento;                       | (5) Acondicionamiento C;                       |
| (2) Etapa de secado A (antes del PSF);   | (6) Enfriamiento D;                            |
| (3) Calentamiento Intermedio;            | (7) ECH = Equilibrio del contenido de humedad; |
| (4) Etapa de secado B (después del PSF); | (8) PSF = Punto de saturación de las fibras.   |



#### 1.1.5.2.1 Fases de calentamiento

La Fase de Calentamiento consiste en elevar la temperatura ambiente hasta la temperatura que se requiere para iniciar el Programa de Secado. (Ver Tabla 1.6).

El tiempo para la fase de secado se calcula a partir de la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 4-22), donde se encuentran valores de calentamiento por milímetro de espesor de madera. El ejemplo de cálculo se los puede encontrar en el Anexo C7.

Para el presente proyecto el valor de tiempo de calentamiento obtenido es de 10 a 12 horas. Los valores de ingreso para tablas son: para la densidad de la madera un valor mayor a  $800 \text{ kg/m}^3$  y para el espesor un valor mayor a 30 mm, esto es debido a que en las medidas se encontró algunos valores mayores a 30 mm, a pesar de que el espesor promedio sea de 20 mm.

#### 1.1.5.2.2 Fase de secado

La Fase de Secado radica en mantener la temperatura de bulbo seco constante y variar la diferencia psicrométrica.

La Fase de secado se dividió en tres partes de acuerdo a lo recomendado por el programa de secado de la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989), esto es debido a que, de acuerdo al contenido de humedad de la madera CH, se necesita requerimientos de temperatura y humedad relativa diferentes para extraer esta cantidad de agua indeseada. Como primera instancia se estableció el tiempo de secado en 46 días, es decir 1104 horas y esto se divide de manera proporcional para las tres fases de secado, como se muestra, en los párrafos subsiguientes.

Para la primera parte del secado se extrae el agua libre que se encuentra en los poros de la madera. Esta cantidad de agua es la más fácil de extraer y se calculó un valor de 384 horas para su total evacuación. El proceso de cálculo detallado se encuentra en el Anexo C7. Cabe mencionar, que esta cantidad de agua se suele extraer en el pre-secado al aire libre.

Para la segunda parte de la fase de secado se le conoce como calentamiento intermedio, mismo que durará 168 horas, de acuerdo a las relaciones establecidas por la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 4-22), en su tabla de calentamiento para contenidos de humedad diferentes al estado verde de la madera. Al final se puede mencionar que la relación utilizada fue de ocho horas por cada grado Celsius de incremento, más 48 horas de acondicionamiento, a la fase.

Para finalizar se tiene la tercera parte del secado que se conoce como Fase II, de secado. En esta fase de secado se extrae el valor de humedad desde 15%Ch hasta el valor que se desea para la utilidad de la madera, lo que en el caso del presente proyecto es 10%CH. De acuerdo al cálculo detallado expuesto en el Anexo C7 se obtuvo que la Fase II, de secado, debe durar aproximadamente 552 horas.

Notar que los tres tiempos en las tres etapas de secado, si se suman los valores, se obtiene un total de 1104 horas para la fase completa de secado, el cuál es el tiempo estipulado que usa la empresa actualmente para el secado de madera y que es acorde al movimiento de su producción.

Cabe mencionar que las relaciones de tiempos de secado se las obtuvo de la gráfica expuesta por (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 4-21) .

### 1.1.5.2.3 Fase de acondicionamiento

La Fase de Acondicionamiento reside en elevar la temperatura de bulbo seco y aumentar la diferencia psicrométrica en un rango considerable. Según la (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, págs. 4-23), recomienda que la fase de acondicionamiento sea el doble del tiempo que se estipula para la fase de calentamiento, lo que en este caso, realizando ya, la operación matemática, sería de 21 a 24 horas.

### 1.1.5.2.4 Fase de enfriamiento

La Fase de enfriamiento gravita en bajar la temperatura de bulbo seco a un ritmo adecuado hasta llegar, al valor de la temperatura ambiente. En esta fase se debe mantener la diferencia psicrométrica constante.

El tiempo establecido, como primer dato experimental, de acuerdo a distintas recomendaciones, es de 12 horas para la fase de enfriamiento. De acuerdo al comportamiento que presente la madera en esta etapa, este valor puede irse cambiando de manera conveniente. Además, este valor nos servirá para proyectar la cantidad de aire que se va a inyectar a la cámara, en esta fase de secado.

**Tabla 1.6: Programa de Secado para Tabloncillo de Chanul**

Contenido de humedad de la madera (%)	Termómetro Seco (°C)	Termómetro Húmedo (°C)	Humedad Relativa aproximada (%)
<b>Verde (100 - 40)</b>	40	37	80
<b>40 (39 - 30)</b>	40	35	70
<b>30 (29 - 25)</b>	45	37	60
<b>25 (24 - 20)</b>	50	40	50
<b>20 (19 - 15)</b>	55	42	40
<b>Menor al 15 (14 - 10)</b>	55	37	30

**Fuente:** (Junta del acuerdo de cartagena, 1989, pág. 4-35 y 4-36)

## 1.2 ESTUDIO DE VARIABLES Y PARÁMETROS PARA DETERMINAR CARGAS TÉRMICAS EN HORNOS

Dos análisis son importantes en el estudio de cargas térmicas en hornos, el primero es el análisis termodinámico y el segundo es el análisis de pérdidas de calor, hacia el ambiente.

### 1.2.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

La termodinámica trata de los cambios de estado en un proceso, durante el cual, ocurre una interacción entre sustancias. Para realizar un análisis se debe estudiar los sistemas termodinámicos y sus particularidades.

El análisis del horno se realizó mediante un sistema de flujo transitorio (Ver Figura 1.7). Este análisis se dividió en dos partes; El primero se hizo en la cámara de secado, para calcular el flujo de aire seco necesario, que permite la evaporación del contenido de humedad máxima, que pueda tener la madera. El segundo análisis se realizó, de manera consecutiva, a la cámara de secado, para obtener la configuración adecuada de ventilación y conducción del aire a través de los ductos del sistema. (Ver Figura 1.6: Cámara de Secado y Sistema de calentamiento).



**Figura 1.6: Cámara de Secado y Sistema de calentamiento**

Dentro del quemador, el análisis termodinámico, nos sirve para saber la velocidad adecuada del ventilador, que impulsa el aire a través de la llama, originada por la combustión del diesel, y de esta manera obtener la temperatura requerida por el programa de secado. Las condiciones finales obtenidas dentro de este sistema sirvieron como condiciones de entrada para la cámara de secado.

El análisis dentro de la cámara de secado nos ayudó a controlar los sistemas de humidificación y des-humidificación dentro del horno, cuyo control, necesita estar al tanto, de la cantidad de aire entrada y salida para cumplir con el programa de secado.

Al hablar de un volumen de control (horno de secado) se debe definir la ley de conservación de la masa, que nos dice, que la masa no se crea ni se destruye. De la misma manera se define la ley de la conservación de la energía. A pesar de que, la masa y energía se puedan transformar entre sí; tal y como propuso Albert Einstein (1879 - 1955) con la ecuación  $E = m \cdot c^2$ ; este intercambio es insignificante en las reacciones que ocurren dentro de los problemas cotidianos de ingeniería (rediseño del horno de secado). Esto quiere decir que al plantear el horno como un volumen de control, se debe tener un registro de las propiedades de masa que entra y sale, para poder controlar las variables que intervienen en el secado de la madera. Además se debe definir ciertos términos como trabajo de flujo.

#### **1.2.1.1 Trabajo de Flujo y Energía de un Fluido en Movimiento**

El trabajo de flujo es el trabajo que se necesita para introducir o sacar aire de un volumen de control.

Imagine un cubo diferencial, tan pequeño como para que sus propiedades sean uniformes. Este cubo va a ingresar a un volumen de control. (Ver **Figura 1.7:** Esquema para trabajo de flujo), cuyo émbolo

imaginario provoca una fuerza, que empuja el émbolo real, una distancia determinada, para que el aire, en forma de cubo, entre totalmente en aquel. Este proceso se conoce como trabajo de flujo, cuya representación matemática la dicta la **Ecuación 1.18**.

$$W_{\text{flujo}} = F * L \quad \text{Ecuación 1.18}$$

Donde (L) es la longitud, que se movió el émbolo y (F) la fuerza que movió el émbolo.

A partir de la definición de presión ( $P = F/A$ ) se puede obtener el valor de la fuerza ( $F = P * A$ ) y reemplazar en la Ecuación 1.18, para obtener la Ecuación 1.19

$$W_{\text{flujo}} = P * A * L \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Por lo tanto, a partir de una operación geométrica, se obtiene la ecuación 1.20.

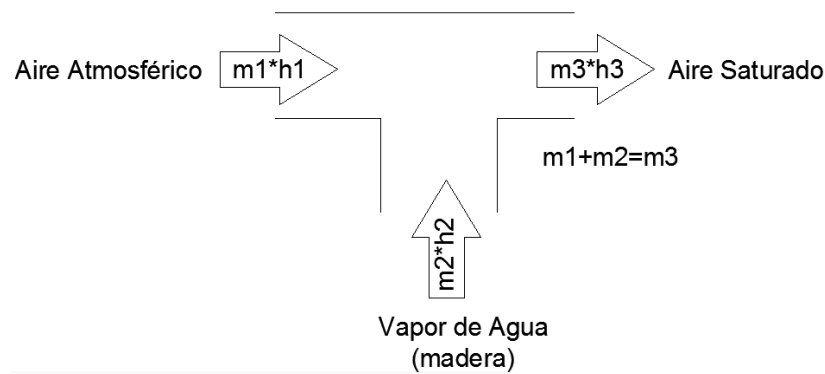
$$W_{\text{flujo}} = P * V \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Donde P = presión y V = volumen.

El trabajo específico, se denota entonces como:

$$w_{\text{flujo}} = P * v \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Donde, P = presión y v= volumen específico, valor que se encuentra en tablas termodinámicas.



**Figura 1.7:** Esquema para trabajo de flujo en el horno de secado de madera

#### 1.2.1.1.1 Energía Total de un Fluido en Movimiento

En termodinámica se definen dos formas de energía: la microscópica y la macroscópica. La energía microscópica se resume a la energía interna o actividad molecular; La energía macroscópica se conoce de la física cotidiana como energía cinética y potencial. Los efectos de otras energías como eléctrica o magnética son insignificantes en este caso.

A partir de aquí, se concluye que, el flujo estacionario está constituido por tres energías principales; la energía interna, cinética y potencial, cuya suma representa la energía total.

Al estar el fluido en movimiento, se debe tomar en cuenta también, el trabajo de flujo. Y si se suma la energía total al trabajo de flujo, se obtiene una ecuación representada por propiedades termodinámicas, cuya relación se conoce como, energía total de flujo (Ver Ecuación 1.22)

$$\theta = P \cdot v + \mu + ec + ep \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Simplificando a partir del concepto de entalpia ( $h = P \cdot v + \mu$ ), se obtiene:

$$\theta = h + ec + ep$$

Al combinar la energía interna con el trabajo de flujo se alcanza una propiedad llamada entalpía, que se encuentra en tablas termodinámicas y, representará la energía total que transporta un fluido en movimiento. La teoría completa acerca de trabajo de flujo se puede encontrar en (Cengel & Boles, 2008). En este caso solo se menciona para conocer los principios de funcionamiento del horno de secado de madera

## 1.2.2 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El análisis de la transferencia de calor es muy importante en el diseño del horno, porque permite obtener las pérdidas de calor que tiene este, por factores de construcción.

El cálculo de cargas térmicas para un horno es similar al de un cuarto frío, en donde partiendo de los conceptos de conducción, convección y radiación (métodos de transferencia de calor), se calculan los siguientes parámetros:

- Calor a través de la estructura
- Calor debido a cambios de aire
- Calor del producto
- Varios

### 1.2.2.1 Calor a través de la estructura

La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de un cuerpo sólido, cuando existe una diferencia de temperatura, entre la superficie interior y exterior del sólido en cuestión., cuya acción no se puede evitar, sin embargo se puede reducir al mínimo requerido, tomando en cuenta factores económicos. En mecánica el factor determinante para



reducir el calor a través de la estructura de la cámara de secado, es el material, del cual está hecha esta.

Este análisis se basa en dos fenómenos fundamentales: la convección a través de una placa y la conducción a través de una pared plana. Y se lo resuelve mediante una analogía eléctrica como se verá en la sección 1.2.2.2.1 Analogía Eléctrica.

#### 1.2.2.1.1 Conducción a través de una pared plana

El flujo de calor parte de la Ley de Fourier que toma al calor, valga la redundancia, como una cantidad vectorial tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{q}'' = -k * \nabla T = -k * \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación 1.24}$$

Se supone conducción unidimensional porque el área de la pared es demasiado grande con respecto a su espesor, entonces se toma una sola dirección, que sea perpendicular a la superficie de la pared, con esto se tiene que el calor es igual a:

$$q'' = -k * \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 1.25}$$

Para condiciones de estado estable sin una fuente de energía o sumidero dentro de la pared se obtiene la siguiente ecuación (Incropera & DeWitt, 1999):

$$q'' = -k * \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Ecuación 1.26}$$

Donde,

$q''$  = flujo de calor por unidad de área

$k$  = coeficiente de conducción de acuerdo al material de la pared

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre superficies

$L$  = longitud de la pared

El valor obtenido se multiplica por el área y se obtiene la tasa de calor que fluye a través de la pared.

$$q = -k * A * \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Ecuación 1.27}$$

### 1.2.2.2 Convección

Existen dos tipos de convección, la natural y la forzada. La convección natural es el proceso físico de transferencia de calor que se da por el ascenso del aire cuando aumenta su temperatura, mientras que la convección forzada se da cuando el aire es forzado a través de un dispositivo mecánico para que cumpla una función específica. De acuerdo al diseño del sistema de ventilación de un horno de secado de madera, cualquiera de los dos procesos se pueden, dar.

La convección se analiza con la Ley de Enfriamiento de Newton que se representa con la Ecuación 1.28:

$$q = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ecuación 1.28}$$

Donde,

$h$  = coeficiente de convección

$T_s$  = temperatura superficial de la pared

$T_{\infty}$  = temperatura del aire

$A$  = área de incidencia del flujo.

El valor más importante dentro de la Ecuación 1.28 es el coeficiente de convección, cuyo cálculo se realiza para flujo externo, sobre una plana placa. El análisis de convección a través de una placa plana se asemeja a muchos de los procesos que se dan dentro del horno. El valor del coeficiente de convección sobre una placa plana, depende de la velocidad del aire y otros factores como se verá en el capítulo de diseño.

Mediante la analogía eléctrica se puede prescindir del valor de la temperatura superficial ( $T_s$ ), para el cálculo. Sin embargo, hoy en día existen instrumentos con los que se pueden medir la temperatura superficial de un sólido.

Siguiendo con la obtención de datos, la temperatura promedio del aire ( $T_\infty$ ), se midió lo más cercana posible, al sistema analizado.

Para finalizar, el valor de área se calcula a partir de la geometría.

De esta manera se completó los datos básicos para el cálculo del flujo de calor a través de una placa plana. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que se debe hacer un análisis más profundo para el cálculo de cargas térmicas, mismo que será abordado en el capítulo de diseño. Las correlaciones utilizadas para este cálculo se extrajeron de (Incropera & Dewitt, 1999).

#### 1.2.2.2.1 Analogía Eléctrica

La analogía eléctrica parte de los términos de voltaje, amperaje y resistencia eléctrica. En este caso se requiere obtener una expresión de resistencia térmica, partiendo del concepto eléctrico. De acuerdo a la Ley de Ohm la resistencia se expresa con la relación de voltaje y amperaje, como se muestran En la ecuación 1.29.

$$\frac{\text{Volt}}{I} = R$$

El voltaje es la magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial entre dos puntos, lo que se puede definir como: trabajo por unidad de carga. Si se relaciona el voltaje y la diferencia de temperatura, se dirá que son similares, porque cuantifica la diferencia de energía, que existe en el sistema.

La intensidad de corriente es el flujo de electricidad a través del sistema eléctrico, y que se relaciona con el valor de “q”, que es el flujo de calor a través del sistema termodinámico o volumen de control.

Por simple comparación se obtiene el valor de resistencia (R) para los fenómenos de transferencia de calor, de acuerdo a las analogías expresadas anteriormente, mediante las ecuaciones 1.30 y 1.31 para conducción y convección, respectivamente.

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad \text{Ecuación 1.30}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad \text{Ecuación 1.31}$$

Partiendo de esta analogía cualquier sistema compuesto se analiza como un circuito eléctrico para la obtención de la resistencia total, lo cual nos permite calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) y con este, la tasa total de transferencia de calor (Q), a través de la pared, como se ve en las Ecuaciones 1.32 y 1.33, respectivamente.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad \text{Ecuación 1.32}$$

$$Q = U \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad \text{Ecuación 1.33}$$

### **1.2.2.3 Calor debido a cambios de aire**

El cambio de aire, en el horno de secado de madera, se realizó siguiendo un programa de secado, mismo que determinó los requerimientos de energía a entregar al aire externo, para que iguale las propiedades del aire, dentro de la cámara y, se pueda cumplir con el programa establecido.

### **1.2.2.4 Calor del Producto**

El calor del producto es la cantidad de energía que se necesita para evaporar la humedad contenida en la madera según la etapa del secado.

El análisis de transferencia de calor se puede realizar, siguiendo parámetros de convección a través de una placa plana, como ya se vio en las secciones anteriores.

Este análisis definió la de velocidad de circulación del aire dentro del horno, de acuerdo al tiempo de secado de la madera, cuyo valor fue establecido a partir de la productividad de tabloncillo, en la empresa PROMARA CIA. LTDA. Se tomó como valor inicial, de referencia, para la velocidad del aire a través de la pila de madera, los establecidos por (Juntan del acuerdo de Cartagena, 1989), con lo que se evitará daños en la madera.

### **1.2.2.5 Factores adicionales de pérdida**

El horno convencional para secado de madera comienza su proceso sellado y termina sellado, existen pocos factores adicionales que puedan influir en la pérdida de energía.

Uno de estos factores adicionales es el sistema de humidificación, cuyo funcionamiento puede causar pérdida de calor por el ingreso de agua a temperatura diferente, a la que se encuentra el horno.

Otro factor a considerar la existencia de un horno de secado, de otro tipo de madera, adyacente al horno de secado de tabloncillo. Este tipo de factores se analizarán y descartarán en la sección de diseño para su mayor entendimiento.

### 1.3 GENERALIDADES SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN

El sistema de humidificación es importante para el secado de madera, porque permite cumplir el programa de secado, variando la humedad relativa del aire.

La humedad relativa es un parámetro que afecta el gradiente de secado y contracción de la madera, por tanto tiene relación directa con los esfuerzos en el interior de la pieza, a través de los cuales se producen defectos.

Para secar la madera a un contenido de humedad uniforme y libre de esfuerzo se necesita controlar la humedad del aire, por lo que se instaló algunos rociadores de agua.

La cantidad de agua que debe ser inyectada por el sistema de humidificación parte del porcentaje en que se desea aumentar a la humedad relativa del aire. Este cálculo se visualiza con el siguiente ejemplo (Peralta, 2009).

**Ejemplo:** La humedad relativa del aire es aproximadamente 72% y suponiendo que la temperatura ambiente sea 22°C, se debe determinar la cantidad de agua a inyectar en el horno, para a una temperatura constante de 40 Celsius, obtener una humedad del 80%.

$$HR_o = 72\%$$

$$HR_f = 80\%$$

$$T_o = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta HR = 80 - 72 = 8\%$$

A 23 °C  $H_{Ao} = 19.4 \text{ g/m}^3$  Tabla 1.5 a HR = 100% entonces a 72%

$$HA1 = 0.72 * 19.4 = 13.97 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

A 40 C  $H_{Ao} = 51.1 \text{ g/m}^3$  Tabla 1.5 a HR = 100% entonces a 80%

$$HA2 = 0.80 * 51.1 = 26.91 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

La diferencia entre HA1 y HA2 es la cantidad de masa por metro cúbico que se debe aumentar para obtener un incremento del 8% en la humedad relativa entonces:

$$\Delta HA = 26.91 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

La masa total que se debe ingresar es  $\Delta HA * V_{\text{Horno}}$  entonces:

$$\text{masa a ingresar} = 26.91 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 103.53$$

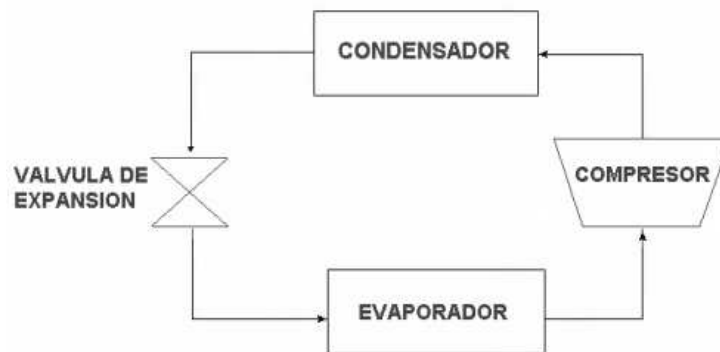
$$\text{masa a ingresar} = 2.79 \text{ kg de agua} = 2.79 \text{ litros}$$

Dependiendo del diseño del sistema de humidificación, se seleccionará los componentes necesarios para su funcionamiento.

## 1.4 GENERALIDADES SISTEMA DE VENTILACIÓN

Debido a que, se debe reducir la diferencia psicrométrica dentro de la cámara de secado, se utiliza un sistema de ventilación o des-humidificación, según como se quiera llamarlo. Este procedimiento es de vital importancia, debido a que, el aire después de retirar la humedad de la madera, se satura.

En algunos casos se utiliza un equipo adicional al horno, para que enfrie el aire y condense la humedad (evaporador), parecido a un sistema de refrigeración (Ver **Figura 1.8**), y luego caliente este aire (condensador), para evitar trabajo excesivo del sistema de calefacción. Al parecer es una buena idea pero impráctica, debido a que la relación beneficio-costos es inapropiada porque el costo de los equipos de refrigeración y su alto consumo de energía eléctrica que estos equipos propician. Generalmente se recomienda utilizar este tipo de sistemas en un medio donde la humedad relativa del ambiente sea demasiado alta como para cumplir el programa de secado (mayor al 30%), por ejemplo en la costa ecuatoriana.



**Figura 1.8:** Diagrama Básico de un Sistema de Refrigeración.

Por esta razón, se opta por un sistema de intercambio de aire, para la des-humidificación del horno, que controla, la relación entre, la cantidad de aire de salida y la cantidad de aire de entrada, sea la adecuada para mantener las condiciones de funcionamiento de la cámara de secado.



## 2 ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS

El capítulo de análisis y selección de alternativas tiene como fin establecer parámetros generales para el diseño, los cuales disminuyen las variables en el proceso de cálculo. Un proceso de cálculo de esta naturaleza facilita el análisis y comprensión del diseño, y en consecuencia implica menos tiempo y recursos.

Para limitar un diseño este se debe marcar, de acuerdo a criterios de evaluación, dichos criterios se pueden tomar a partir de políticas u, objetivos empresariales. (Anónimo, 2009). Siendo el último, el caso de la empresa PROMARA CIA. LTDA., los criterios para evaluación de alternativas son el técnico, el financiero y el de secado.

Cada criterio se evalúo a partir de un concepto simple, llamado factor. (Sanchez & German, 2007, pág. lxxviii)

### Factores del Criterio Técnico

- Confiabilidad
- Facilidad de mantenimiento
- Rendimiento
- Facilidad de uso

### Factores del Criterio Financiero

- Costo de implementación
- Costo de mantenimiento
- Costo de operador
- Consumo de energía

## Factores del Criterio de Secado

- Producción
- Especie de madera
- Tiempo de secado
- Humedad final
- Espesor de la madera

A partir de estos factores se realizó la ponderación para cada alternativa. (Peira, 2009) La selección para el horno de secado de tabloncillo de la empresa PROMARA CIA LTDA, se dividió en tres fases, selección del tipo de proceso, selección del método para la conducción del secado y selección del tipo de operación.

De la misma manera se hizo un apartado para la selección general de materiales de construcción y equipos a implementar para cada sistema que posee el horno.

### **2.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE PROCESO**

De todos los enumerados a continuación, el horno de la empresa PROMARA CIA LTDA., pertenece al grupo de secado artificial. Sin embargo se realizó una matriz de rechazo de alternativas (Ver Tabla 2.1), para la selección del tipo de proceso, con el objetivo más informativo que técnico.

Tabla 2.1: Matriz de Rechazo de alternativas

ALTERNATIVAS	DECISIÓN		JUICIO
	RECHAZO	LIMITANTE ABSOLUTO	CONDICIONANTE
Secado a Bajas Temperaturas o Presecado	No	--	--
Secado a Temperaturas Normales	No	--	--
Secado a Altas Temperaturas	No	--	--
Secado con Vapor Sobrecalentado	Si	--	Costo de Implementación.
			Costo de operación.
Secado por Condensación	Si	No se llega al contenido de humedad deseado	Costo de Implementación. Tiempo de Secado
Secado mediante solventes	Si	Material no disponible	--
		Recursos Humanos no disponibles	

**Modificado de:** <http://www.bvsde.paho.org/bvsaiia/fulltext/basico/031171-14.pdf>

Tabla 2.1: Matriz de Rechazo de alternativas (Continuación)

ALTERNATIVAS	DECISION		JUICIO
	RECHAZO	LIMITANTE ABSOLUTO	CONDICIONANTE
TIPO DE HORNO			
Secado con sales	Si	Material no disponible Recursos Humanos no disponibles	--
Secado en líquidos óleos calientes	Si	--	Costo de operación
Secado al Vacío	Si	--	Costo de Implementación.
Secado con Vapores orgánicos	Si	--	Costo de implementación Tiempo de ejecución
Secado por Aplicación directa de la electricidad	Si	--	Costo de operación
Secado Solar	Si	Decisión por parte del cliente.	Costo de operación Tiempo de implementación.

Modificado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaia/fulltext/basico/031171-14.pdf>

A partir de la matriz de rechazo de alternativas se logra que las opciones seleccionadas, sean viables de acuerdo a los objetivos empresariales.

En este caso las opciones viables para el Rediseño e Implementación del Horno de Secado de madera, corte de Tabloncillo son:

- Secado a temperatura baja o pre-secado
- Secado a temperaturas normales
- Secado a altas temperaturas

**Tabla 2.2: Matriz sin ponderación matemática para selección del tipo de secado.**

CRITERIO	FACTORES	ALTER. A	ALTER. B	ALTER. C
		R.F.	R.F.	R.F.
TECNICO	Confiability	8	10	7
	Facilidad de Mantenimiento	8	6	9
	Rendimiento	7	8	4
	Facilidad de uso	8	5	6
FINANCIER	Costo Implementacion	8	5	9
	Costo Mantenimiento	7	4	8
	Costo Operador	8	6	9
	Consumo de energía	8	4	9
SECADO EN	Producción	8	9	6
	Especie de Madera	10	10	10
	Tiempo de secado	8	10	3
	Humedad Final	8	10	9
	Criterios de espesor	10	10	10
		<b>106</b>	<b>97</b>	<b>99</b>

ALTERNATIVA A  
ALTERNATIVA B  
ALTERNATIVA C

SECADO A TEMPERATURA NORMAL  
SECADO A ALTAS TEMPERATURAS  
SECADO A TEMPERATURAS BAJAS,

Tecnico 0 a 10

0 min  
10 max

Financiero 0 - 10

0 mas caro  
10 mas barato

Secado 0 - 10

0 pésimo  
10 óptimo

**Tabla 2.3: Matriz con ponderación matemática de selección del tipo de horno**

i-j	CRITERIO	CRITERIOS DE DISEÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Punt.	Indice	W.F.	
1	TECNICO	Confiabilidad	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,5	0,1427	0,14	
2		Facilidad de Mantenimiento	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0,1365	0,14	
3		Rendimiento	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10,5	0,1303	0,13	
4		Facilidad de uso	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,1241	0,12	
5	FINANCIERO	Costo Implementacion	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7,5	0,0931	0,09	
6		Costo Mantenimiento	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	0,0868	0,09	
7		Costo Operador	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6,5	0,0806	0,08	
8		Consumo de energía	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	0,0744	0,07	
9	SECADO EN HORNOS	Producción	0,5	0,5	0,5	0,5	1										3	0,0372	0,04	
10		Especie de madera	0,8	0,8	0,5	1												3,1	0,0385	0,04
11		Tiempo de Secado	0,5	0,5	1													2	0,0248	0,02
12		Humedad Final	0,5	1														1,5	0,0186	0,02
13		Criterios espesor	1															1	0,0124	0,01
<b>SUMATORIA =</b>																	80,6	1	1	

**Tabla 2.4: Matriz de Resultados de selección del tipo de horno**

ORD	CRITERIOS DE DISEÑO	W.F	ALTER. A		ALTER. B		ALTER. C	
			R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$
1	Confiabilidad	0,14	8	1,12	10	1,4	7	0,98
2	Facilidad de Mantenimiento	0,14	8	1,12	6	0,8	9	1,26
3	Rendimiento	0,13	7	0,91	8	1	4	0,52
4	Facilidad de uso	0,12	8	0,96	5	0,6	6	0,72
5	Costo Implementacion	0,09	8	0,72	5	0,5	9	0,81
6	Costo Mantenimiento	0,09	7	0,63	4	0,4	8	0,72
7	Costo Operación	0,08	8	0,64	6	0,5	9	0,72
8	Consumo de energía	0,07	8	0,56	4	0,3	9	0,63
9	Producción	0,04	8	0,32	9	0,4	6	0,24
10	Especie de Madera	0,04	10	0,4	10	0,4	10	0,4
11	Tiempo de Secado	0,02	8	0,16	10	0,2	3	0,06
12	Humedad Final	0,02	8	0,16	10	0,2	9	0,18
13	Criterio Espesor	0,01	10	0,1	10	0,1	10	0,1
SUMATORIA =			7,8		6,7		7,34	
ORDEN DE PREFERENCIA			1		3		2	

ALTERNATIVA A  
ALTERNATIVA B  
ALTERNATIVA C

SECADO A TEMPERATURA NORMAL  
SECADO A ALTAS TEMPERATURAS  
SECADO A TEMPERATURAS BAJAS

### 2.1.1 CONCLUSIÓN

A partir de la matriz de resultados se determinó que la mejor alternativa para el diseño es un horno de secado convencional a temperaturas normales.

## 2.2 SELECCIÓN DEL CONTROL DEL PROCESO DE SECADO

Existen tres maneras para controlar el proceso de secado dentro de un horno convencional. Estas son: mediante un psicrómetro, mediante un des-humidificador y mediante el gradiente de secado.

**Tabla 2.5: Matriz sin ponderación matemática de control del proceso**

		ALTER. A	ALTER. B	ALTER. C
CRITERIO	FACTORES	R.F.	R.F.	R.F.
TECNICO	Confiabilidad	6	8	10
	Facilidad de Mantenimier	8	7	5
	Rendimiento	7	8	10
	Facilidad de uso	10	7	5
FINANCIER O	Costo Implementacion	9	6	4
	Costo Mantenimiento	8	8	5
	Costo Operador	7	7	4
	Consumo de energía	8	8	3
SECADO EN HORNOS	Producción	9	8	7
	Especie de Madera	10	10	10
	Tiempo de secado	7	8	10
	Humedad Final	7	9	10
	Criterios de espesor	10	10	10
		<b>106</b>	<b>104</b>	<b>93</b>

ALTERNATIVA A

CONTROL MEDIANTE UN PSICROMETRO

ALTERNATIVA B

CONTROL MEDIANTE EL GRADIENTE DE SECADO

ALTERNATIVA C

CONTROL MEDIANTE UN DESHUMIDIFICADOR

Tecnico 0 a 10

0 min  
10 max

Financiero 0 - 10

0 mas caro  
10 mas barato

Secado 0 - 10

0 pésimo  
10 óptimo



**Tabla 2.6: Matriz con ponderación matemática de control del proceso**

i-j	CRITERIO	CRITERIOS DE DISEÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Punt.	Indice	W.F.
1	TECNICO	Confiabilidad	1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,5	0,1474	0,15
2		Facilidad de Mantenimiento	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0,141	0,14
3		Rendimiento	1	1	1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10,5	0,1346	0,13
4		Facilidad de uso	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,1282	0,13
5	FINANCIERO	Costo Implementacion	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	7	0,0897	0,09
6		Costo Mantenimiento	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	6,5	0,0833	0,08
7		Costo Operador	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	6	0,0769	0,08
8		Consumo de energía	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	5,5	0,0705	0,07
9	SECADO EN HORNOS	Producción	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	3	0,0385	0,04
10		Especie de Madera	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	1	2,5	0,0321	0,03
11		Tiempo de secado	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	2	0,0256	0,03
12		Humedad Final	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	1,5	0,0192	0,02
13		Criterios de espesor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0128
<b>SUMATORIA =</b>																	78	1	1

**Tabla 2.7: Matriz de Resultados de conducción del proceso**

ORD	CRITERIOS DE DISEÑO	W.F	ALTER. A		ALTER. B		ALTER. C	
			R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$
1	Confiabilidad	0,15	6	0,9	8	1,2	10	1,5
2	Facilidad de Mantenimiento	0,14	8	1,12	7	1	5	0,7
3	Rendimiento	0,13	7	0,91	8	1	10	1,3
4	Facilidad de uso	0,13	10	1,3	7	0,9	5	0,65
5	Costo Implementacion	0,09	9	0,81	6	0,5	4	0,36
6	Costo Mantenimiento	0,08	8	0,64	8	0,6	5	0,4
7	Costo Operador	0,08	7	0,56	7	0,6	4	0,32
8	Consumo de energía	0,07	8	0,56	8	0,6	3	0,21
9	Producción	0,04	9	0,36	8	0,3	7	0,28
10	Especie de Madera	0,03	10	0,3	10	0,3	10	0,3
11	Tiempo de secado	0,03	7	0,21	8	0,2	10	0,3
12	Humedad Final	0,02	7	0,14	9	0,2	10	0,2
13	Criterios de espesor	0,01	10	0,1	10	0,1	10	0,1
SUMATORIA =			7,91		7,6		6,62	
ORDEN DE PREFERENCIA			1		2		3	

ALTERNATIVA A CONTROL MEDIANTE UN PSICROMETRO  
 ALTERNATIVA B CONTROL MEDIANTE EL GRADIENTE DE SECADO  
 ALTERNATIVA C CONTROL MEDIANTE UN DESHUMIDIFICADOR

### 2.2.1 CONCLUSIÓN

A partir de la matriz de decisión se seleccionó la alternativa A, Conducción Mediante un Psicrómetro. Cabe recalcar que este es el método más común de conducción en un proceso de secado de madera.

## 2.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE OPERACIÓN

Para un horno convencional de secado existen tres tipos de control los cuales son manual, semiautomático y automático.

**Tabla 2.8: Matriz sin ponderación matemática del tipo de control**

		ALTER. A	ALTER. B	ALTER. C
CRITERIO	FACTORES	R.F.	R.F.	R.F.
TECNICO	Confiability	3	9	10
	Facilidad de Mantenimiento	10	8	5
	Rendimiento	4	8	10
	Facilidad de uso	10	7	5
FINANCIER O	Costo Implementacion	9	5	2
	Costo Mantenimiento	5	8	5
	Costo Operador	7	6	4
	Consumo de energía	8	7	7
SECADO EN HORNOS	Producción	3	8	7
	Especie de Madera	4	8	10
	Tiempo de secado	7	8	10
	Humedad Final	3	9	10
	Criterios de espesor	3	8	10
		<b>76</b>	<b>99</b>	<b>95</b>

ALTERNATIVA A

ALTERNATIVA B

ALTERNATIVA C

MANUAL

SEMIAUTOMATICO

AUTOMATICO

Tecnico 0 a 10

0 min  
10 max

Financiero 0 - 10

0 mas caro  
10 mas barato

Secado 0 - 10

0 pésimo  
10 óptimo

Tabla 2.9: Matriz con ponderación matemática del tipo de control

i-j	CRITERIO	CRITERIOS DE DISEÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Punt.	Indice	W.F.			
1	TECNICO	Confiabilidad		0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,5	0,1474	0,15			
2		Facilidad de Mantenimiento			0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	0,141	0,14			
3		Rendimiento				0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10,5	0,1346	0,13			
4		Facilidad de uso					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,1282	0,13			
5	FINANCIERO	Costo Implementacion						0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7	0,0897	0,09			
6		Costo Mantenimiento							0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6,5	0,0833	0,08			
7		Costo Operador									0,5	0,5	1	1	1	1	6	0,0769	0,08			
8		Consumo de energía										0,5	1	1	1	1	5,5	0,0705	0,07			
9	SECADO EN HORNOS	Producción											0,5	0,5	0,5	0,5	1	3	0,0385	0,04		
10		Especie de Madera													0,5	0,5	0,5	1	2,5	0,0321	0,03	
11		Tiempo de secado															0,5	0,5	1	2	0,0256	0,03
12		Humedad Final																0,5	1	1,5	0,0192	0,02
13		Criterios de espesor																		1	1	0,0128
<b>SUMATORIA =</b>																	78	1	1			

Tabla 2.10: Matriz de resultados del tipo de control

ORD	CRITERIOS DE DISEÑO	W.F	ALTER. A		ALTER. B		ALTER. C	
			R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$	R.F.	$\pi$
1	Confiabilidad	0,15	3	0,45	9	1,4	10	1,5
2	Facilidad de Mantenimiento	0,14	10	1,4	8	1,1	5	0,7
3	Rendimiento	0,13	4	0,52	8	1	10	1,3
4	Facilidad de uso	0,13	10	1,3	7	0,9	5	0,65
5	Costo Implementacion	0,09	9	0,81	5	0,5	2	0,18
6	Costo Mantenimiento	0,08	5	0,4	8	0,6	5	0,4
7	Costo Operador	0,08	7	0,56	6	0,5	4	0,32
8	Consumo de energía	0,07	8	0,56	7	0,5	7	0,49
9	Producción	0,04	3	0,12	8	0,3	7	0,28
10	Especie de Madera	0,03	4	0,12	8	0,2	10	0,3
11	Tiempo de secado	0,03	7	0,21	8	0,2	10	0,3
12	Humedad Final	0,02	3	0,06	9	0,2	10	0,2
13	Criterios de espesor	0,01	3	0,03	8	0,1	10	0,1
SUMATORIA =			6,54		7,5		6,72	
ORDEN DE PREFERENCIA			3		1		2	

ALTERNATIVA A  
ALTERNATIVA B  
ALTERNATIVA C

MANUAL  
SEMIAUTOMATICO  
AUTOMATICO

### 2.3.1 CONCLUSIÓN

A partir del análisis se obtuvo que la mejor alternativa para el control del proceso sea un sistema semiautomático.

Como conclusión general se ha obtenido que, el diseño se basa en un horno convencional, para secado artificial de madera, cuya conducción es realizada mediante un psicrómetro y tiene un control semiautomático de operación. Tomar en cuenta que el análisis se basó en la intuición y buen juicio de los implicados en el proyecto, poniendo delante, de cualquier beneficio personal, los objetivos empresariales. Debido a esto, y a que, en la práctica pueden surgir condicionantes de diferente carácter, las alternativas se pueden ver modificadas en cierta manera.

## 2.4 SELECCIÓN SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN

El sistema de humidificación es de vital importancia para completar el proceso de secado de madera en el horno de secado de tabloncillo, debido a que, en ciertas partes del proceso se requiere humedades mayores a las que se encuentran en el ambiente.

El sistema de humidificación no excede la presión admisible de trabajo, a las comúnmente usadas en sistemas de transporte de agua potable, por esta la mayoría de los materiales y equipos se seleccionaron utilizando este criterio.

### 2.4.1 MATERIAL TUBERÍA Y ACCESORIOS

En términos generales los materiales más usados en los sistemas de tubería son Acero- negro y galvanizado, Hierro forjado – negro y galvanizado, cobre blando y duro (Carrier Corporation, 2009). Sin embargo, en la industria ecuatoriana, para uso de bajas presiones, el material común, usado en sistema de humidificación, es el PVC.

**Tabla 2.11: Matriz sin ponderación matemática (material de tubería y accesorios)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Conductividad térmica	10	8	7
	Rugosidad	6	5	8
	Duración	10	10	8
	Dilatación	4	6	8
Económico	Costo de operación	9	6	8
	Costo Inicial	4	5	10
	Costo de instalación	3	7	10
	Costo de mantenimiento	10	4	6
<b>TOTAL</b>		<b>56</b>	<b>51</b>	<b>57</b>

Alternativa A: Cobre

Alternativa B: Hierro- Galvanizado

Alternativa C: PVC

Para el sistema de humidificación, por medio de la ponderación en la Tabla 2.11 se eligió la alternativa C: PVC

## 2.4.2 MARCA DE EQUIPOS

Es importante seleccionar de manera adecuada la marca de los equipos, debido a que esto, permite obtener información técnica de los mismos y, así lograr una planificación adecuada de mantenimiento y producción.

### 2.4.2.1 Bomba

Generalmente la bomba se selecciona mediante su curva característica, sin embargo, este no es el único factor que debería importar, porque criterios tanto como, el coste de funcionamiento y adquisición y, el ruido que esta ocasione, pueden influir de manera considerable en la implementación del proyecto.

**Tabla 2.12: Matriz sin ponderación matemática (bomba)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF:
Técnico	Reconocimiento de la marca	10	5	10
	Entrega en construcción	10	10	10
	Garantía	10	10	10
Económico	Costos	5	8	7
	Costo de Mantenimiento	8	8	8
	Costo montaje	9	7	5
<b>TOTAL</b>		<b>52</b>	<b>48</b>	<b>50</b>

Alternativa A: Paolo

Alternativa B: Pedrollo

Alternativa C: Well Mate

A partir de la Tabla 2.12 se escogió la alternativa A. El factor que más influye en la decisión es el costo inicial.

### 2.4.2.2 Calentador

Como parámetro técnico fundamental para la selección de un calentador están la temperatura de operación y de servicio, a pesar de esto, el paso inicial recomendable es seleccionar es, de acuerdo a sus materiales de construcción, costos y facilidades logísticas entregadas por el fabricante. Siguiendo esta recomendación se puede asegurar la adquisición primero de un equipo de calidad, para luego, dentro de este equipo de calidad, seleccionar el que cumpla con los requerimientos del proyecto.

**Tabla 2.13: Matriz sin ponderación matemática (calentador)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Reconocimiento de la marca	5	10	10
	Entrega en construcción	8	5	0
	Garantía	3	10	8
Económico	Costos inicial	4	10	4
	Costo Mantenimiento	8	8	8
	Costo montaje	8	9	8
<b>TOTAL</b>		<b>36</b>	<b>52</b>	<b>38</b>

Alternativa A: General Electric

Alternativa B: BOSH

Alternativa C: Franklin Electric



Para la selección del calentador de agua se escogió la alternativa B, debido a la alta disponibilidad y reconocimiento de la marca en el mercado.

### 2.4.2.3 Aspersores

La característica técnica para la selección de aspersores son la temperatura de operación y la presión de operación, sin embargo esos valores se calcularan en la fase de diseño, mientras tanto se puede asegurar la implementación adecuada del horno, con los parámetros que se muestran a continuación:

**Tabla 2.14: Matriz sin ponderación matemática (aspersores)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Reconocimiento de la marca	10	5	8
	Entrega en construcción	0	0	0
	Garantía	10	8	8
Económico	Costos inicial	5	6	7
	Costo Mantenimiento	6	6	6
	Costo montaje	3	4	3
<b>TOTAL</b>		<b>34</b>	<b>29</b>	<b>32</b>

Alternativa A: CDb

Alternativa B: Viking

Alternativa C: Rouchtec

Se escogió la alternativa A, debido a que, son los más económicos en el mercado y son de fácil instalación.

### 2.4.3 PROVEEDOR DE MATERIALES

**Tabla 2.15: Matriz sin ponderación matemática (proveedor1)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Disponibilidad marcas	8	10	10
	Variedad de dimensiones	10	10	10
	Acabado	8	7	7
Económico	Costos inicial	4	6	5
<b>TOTAL</b>		<b>30</b>	<b>33</b>	<b>32</b>

Alternativa A: Megafrio

Alternativa B: Comercial Master 2

Alternativa C: Ferrisariato

Se escoge la alternativa A, Comercial Master 2.

### 2.4.4 CONCLUSIÓN

El sistema de humidificación se conforma por tubería, cuyo material de fabricación es el PVC, donde el flujo de agua requerido es impulsado por una bomba de marca PAOLO, cuya adquisición se la hizo en el COMERCIAL MASTER 2 (Av. De la prensa y Fernández Salvador).

## 2.5 SELECCIÓN SISTEMA DES-HUMIDIFICACIÓN

El sistema de des-humidificación o mejor llamado sistema de extracción de aire ayuda a mantener la diferencia psicrométrica necesaria para cumplir el programa de secado recomendado por la (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1989).

## 2.5.1 MARCA DE EQUIPOS

La extracción de aire o vapor de agua en un sistema de des-humidificación puede ser de varias características, desde un simple ventilador axial hasta un sistema completo de des-humidificación (sistema refrigerado). En este caso, debido a que en la ciudad de Quito la humedad relativa puede ser menor al 30% se opta simplemente por un sistema de des-humidificación simple conformado por extractores de aire.

### 2.5.1.1 Extractor de aire

Los extractores de aire se seleccionan principalmente por el material del cual están compuestos, debido a que, el aire de salida se encuentra a alta humedad relativa, lo que provoca su corrosión. A pesar de esto, en la evaluación no se hizo una ponderación directa del material, más bien se la hizo de la garantía, ya que, la garantía abarca, a más del material de construcción, su ensamble y funcionamiento.

**Tabla 2.16: Matriz sin ponderación matemática (extractor de aire)**

Criterios	Factores	Alternativa	Alternativa	Alternativa
		A	B	C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Disponibilidad marca	10	10	5
	Entrega en construcción	0	0	0
	Garantía	8	8	10
Económico	Costos inicial	8	7	10
	Costo Mantenimiento	5	5	10
	Costo montaje	3	4	6
	<b>TOTAL</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>41</b>

Alternativa A: SHENG KWEI

Alternativa B: PROFANTEC

Alternativa C: ALASKA

A pesar de la similitud en la mayoría de sus factores de selección, de criterio técnico, se eligió la alternativa C, con la diferencia que, la marca seleccionada, fue la única que se encontró con las dimensiones requeridas 100x100 mm.

## 2.5.2 PROVEEDOR DE EQUIPOS

**Tabla 2.17: Matriz sin ponderación matemática (proveedor2)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Disponibilidad marcas	1	10	4
	Variedad de dimensiones	2	9	8
	Acabado	5	10	3
Económico	Costos inicial	8	7	6
<b>TOTAL</b>		<b>16</b>	<b>36</b>	<b>21</b>

Alternativa A: EQUIPROIN

Alternativa B: TAIPEISA

Alternativa C: IMPORTADORA MONTERO S.A

La elección de la alternativa B se hizo de acuerdo a la disponibilidad y tiempo de entrega para los extractores de aire.

## 2.5.3 CONCLUSIÓN

El sistema de des-humidificación se conformará por extractores de aire con marca ALASKA, los cuales fueron adquiridos en TAIPEISA.

## 2.6 SELECCIÓN SISTEMA DE VENTILACIÓN

El sistema de ventilación es el sistema más importante del horno debido a que este fuerza el aire dentro de la cámara de secado para que se proceda con la evaporación del agua entro de la madera.

Los principales equipos para un sistema de ventilación son la unidad de impulsión (ventilador centrífugo) y la unidad de conducción (sistema de ductos). Para el sistema de ductos es muy importante tomar en cuenta el material del cual está construido debido a que esto evitará el exceso de caídas de presión y pérdidas de calor.

### 2.6.1 MATERIAL CONDUCTOS

La selección adecuada de conductos se lleva a cabo, principalmente teniendo en cuenta el equilibrio entre el precio de compra y los gastos de explotación, a más de los factores, expuestos por el criterio técnico.

**Tabla 2.18: Matriz sin ponderación matemática (material conductos)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Conductividad térmica	8	10	9
	Rugosidad	6	4	7
	Maquinabilidad	10	3	5
	Dureza	8	6	10
Económico	Costo de operación	7	5	8
	Costo Inicial	10	4	9
	Costo de instalación	9	3	6
	Costo de mantenimiento	4	10	6
<b>TOTAL</b>		<b>62</b>	<b>45</b>	<b>60</b>

Alternativa A: Acero Galvanizado

Alternativa B: Fibra de vidrio

Alternativa C: Acero inoxidable

Se escoge la alternativa A: Acero galvanizado, debido a su bajo costo y alta resistencia.

## 2.6.2 MARCA DE EQUIPOS

Los ventiladores centrífugos son muy comunes en el mercado ecuatoriano, tanto que, algunos se los construye en campo de acuerdo a las necesidades del sistema en cuestión. Su selección e implementación parte de las curvas de funcionamiento las cuales son proporcionadas por cada marca y/o proveedor de equipos.

Existen varios factores que pueden variar entre una marca u otra, aquí se encuentra, la variación de velocidad que posean, la garantía que entregue el fabricante y, más que todo, el reconocimiento de la marca.

### 2.6.2.1 Ventilador

**Tabla 2.19: Matriz sin ponderación matemática (ventilador)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Reconocimiento de la marca	3	10	3
	Entrega en construcción	10	10	10
	Garantía	10	10	10
Económico	Costos inicial	10	3	8
	Costo Mantenimiento	8	8	8
	Costo montaje	3	5	3
<b>TOTAL</b>		<b>44</b>	<b>46</b>	<b>42</b>

Alternativa A: S&P

Alternativa B: AETHER

Alternativa C: EKKO

Se escogió la alternativa B, debido a que el asesoramiento técnico para su mantenimiento está disponible en Ecuador.

### 2.6.3 PROVEEDOR DE MATERIALES

**Tabla 2.20: Matriz sin ponderación matemática (proveedor3)**

Criterio	Factores	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
		RF.	RF.	RF.
Técnico	Disponibilidad marcas	10	8	10
	Variedad de dimensiones	10	7	3
	Acabado	8	8	8
Económico	Costos inicial	4	10	4
<b>TOTAL</b>		<b>32</b>	<b>33</b>	<b>25</b>

Alternativa A: MEGAFRIO

Alternativa B: EQUIPROIN

Alternativa C: IMPORTADORA MONTERO S.A.

Se escogió la alternativa B, debido a la facilidad para la fabricación de los conductos, disponibilidad de materiales y tiempos de fabricación.

### 2.6.4 CONCLUSIÓN

El sistema de ventilación se conforma de conductos, cuyo material de fabricación es acero galvanizado, mismo donde el aire es impulsado por un ventilador centrífugo con fabricación en USA de marca AETHER, el cuál fue adquirido en EQUIPROIN (Are acondicionado y Ventilación; Santa María E4-114 y 9 de Octubre; Quito - Ecuador), al igual que los conductos.

## **3 REDISEÑO**

### **3.1 NORMAS A SEGUIR**

Una norma es una regla que rige el estándar de diseño para asegurar la calidad de un producto y la seguridad del cliente.

La sección subsiguiente enlista, en tres secciones las normas de diseño, las normas para pruebas de funcionamiento y las normas para presentar la documentación.

#### **3.1.1 NORMAS DE DISEÑO**

Para el diseño de componentes se utilizó las siguientes normas:

NTE INEN 1:2013.- estableció el estándar para las unidades que se utilizaron en los cálculos.

NTE INEN 2:2013.- estableció los símbolos y magnitudes físicas que se utilizaron en el proyecto.

NFPA 13.- estableció las prioridades para la selección de los rociadores pertenecientes al sistema de humidificación.

NPFA 31.- estableció las recomendaciones para la instalación del quemador de diesel (Becket Burner).

#### **3.1.2 NORMA DE PRUEBAS**

NTE INEN 1160:84.- estableció el procedimiento para medir el contenido de humedad en la madera



NTE INEN 1161:84.- estableció el procedimiento para el acondicionamiento de ensayos tecnológicos.

NTE INEN 1158:84.- estableció los parámetros para la selección y colección de muestras

NTE INEN 1164:84.- estableció los parámetros para la determinación de la contracción después del secado.

NTE INEN 1159.- estableció los parámetros para medición y cubicaje de madera aserrada.

### **3.1.3 NORMAS DE DOCUMENTACION**

NTE INEN 2402:2010.- estableció recomendaciones para la presentación del informe final.

UNE 50135 – ISO 5966.- estableció recomendaciones para la presentación de informes técnicos.

RTE INEN.037:09- estableció parámetros para la presentación de planos.

Después de revisar, minuciosamente, las normas que se van a seguir para el diseño del horno de secado madera, con corte de tabloncillo, se debe, primero, hacer un recuento técnico del estado actual de las instalaciones del horno.

## 3.2 ESTADO ACTUAL DEL HORNO

El estudio actual del horno es importante para saber cuáles de los sistemas se encuentran en funcionamiento.

En vista de que uno de los objetivos del proyecto fue realizar un informe técnico de los problemas existentes en el horno se debe poner un esfuerzo adicional a la siguiente sección.

### 3.2.1 ANTECEDENTES TÉCNICOS

En PROMARA CIA. LTDA., el secado de madera se realizaba mediante un horno, cuya fuente de energía es diesel comercial. (Ver Figura 3.1). A esto se añade un sistema de ventilación longitudinal (Ver Figura 3.2) de tiro forzado, cuya distribución de aire se realiza por medio de un sistema de ductos ubicados en el piso del horno (Ver Figura 3.3). Este posee además, un sistema de humidificación que se encuentra instalado en las paredes y techo del mismo (Ver anexo B1). Como elemento adicional se tiene un sistema de extracción de aire, el cual posee cuatro ventilas, de  $100 \text{ mm}^2$  de área. Los planos detallados de cada sistema se encuentran en el Anexo B1.

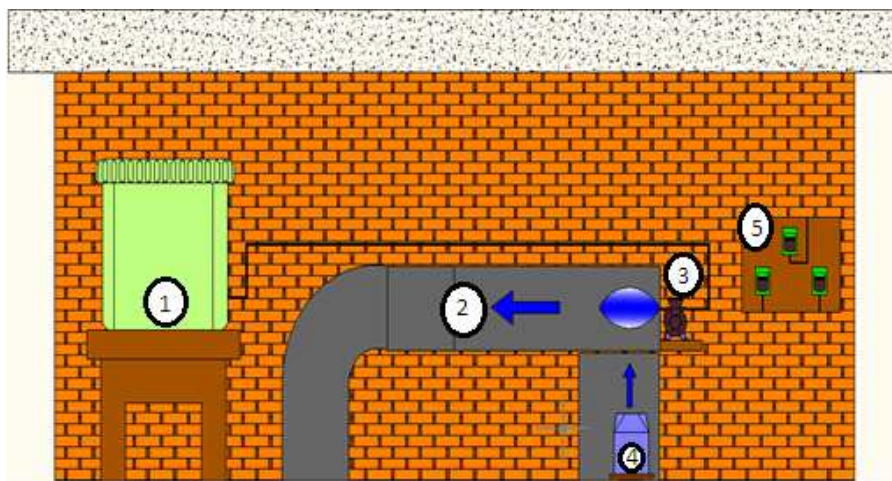
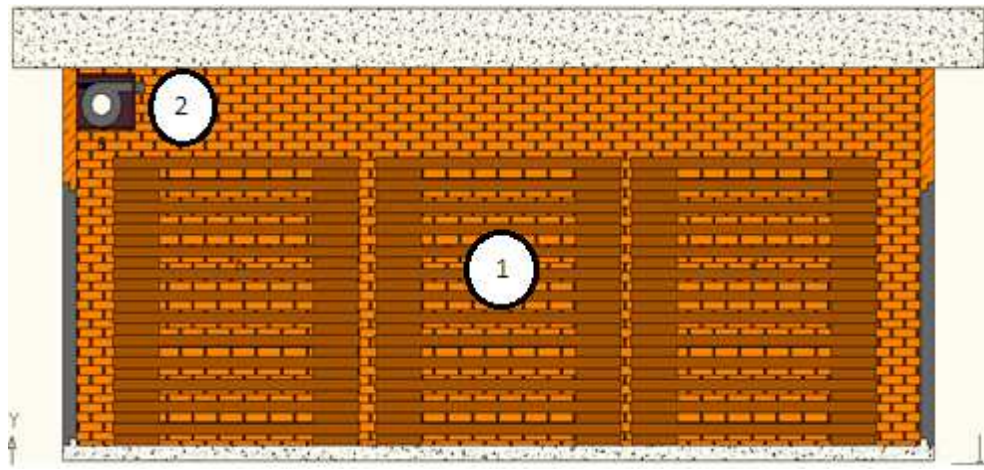


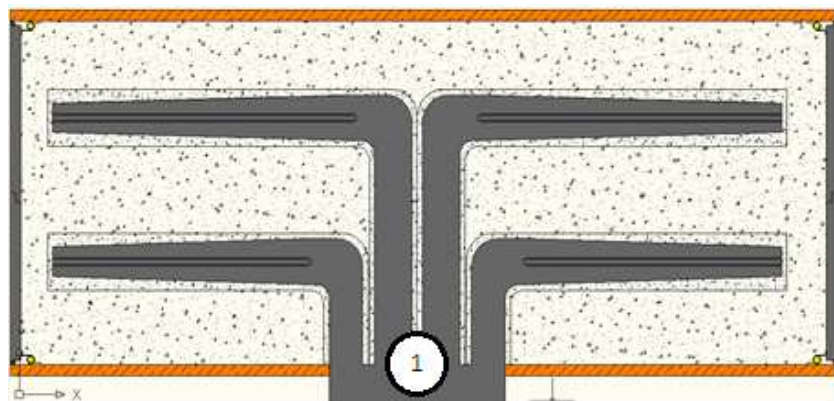
Figura 3.1: Esquema sistema de calentamiento

1. Tanque de almacenamiento de combustible
2. Sistema de calentamiento de aire
3. Bomba diesel
4. Soplador
5. Panel control eléctrico del horno.



**Figura 3.2: Esquema de distribución de madera dentro del horno**

1. Soplador para circulación longitudinal del aire
2. Madera



**Figura 3.3: Corte longitudinal que muestra el sistema de distribución de aire que se encuentra en el piso del horno**

## 1. Sistema de distribución de aire (sistema de conductos)

El comúnmente llamado “chanul” es la especie de madera que se desea secar en el horno de la empresa, esta es transportada desde la provincia de esmeraldas hasta la ciudad de quito en cabezales, cuyas instalaciones no poseen ningún sistema de preservación de madera. (Ver Figura 3.4)



**Figura 3.4: Llegada de madera al recinto de acopio**

Una vez en el recinto de procesamiento la madera es apilada de forma horizontal (Ver **Figura 3.5**) para realizar el pre-secado (secado al aire libre). En este recinto permanece aproximadamente tres meses para luego pasar al secado artificial (secado en horno). Tomar en cuenta que en el pre-secado, la madera también sufre daños, por esta razón hay que controlar correctamente el proceso de secado artificial.



**Figura 3.5:** Apilamiento de madera (tabloncillo)

El proceso de secado se realizaba de la siguiente manera y en el orden mencionado.

1. Carga del horno (24h)
2. Humidificación (1h)
3. Calentamiento y extracción de humedad (240 horas)
4. Descarga del horno (24h)

Se aclara que, después de algunos años de uso, se dejó de utilizar el sistema de humidificación por falta de accesorios para su funcionamiento.

El proceso de secado consumía 6 tanques de diesel por carga de madera, cada tanque contiene 55 galones, obteniendo así, un total de 330 galones/carga, cuya capacidad calórica es de 17000 BTU/carga. El valor anterior se obtuvo mediante las relaciones presentadas por (Cengel & Boles, 2008).

La capacidad calórica mencionada es proporcionada por un quemador diesel de marca Becket, mismo que posee un sistema de control marca Honeywell (Ver Figura 3.6).



**Figura 3.6: Control del quemador**

El sistema Honeywell proporciona un método inteligente de apagado y encendido del horno.

Es importante mencionar que la empresa pierde actualmente el 80% de la producción en el proceso de secado actual, dicho material perdido se divide en rechazos totales y concesiones con el cliente.

Las concesiones con el cliente se dan por no llegar a contenidos de humedad establecidos para el uso en la ciudad de Quito y los rechazos totales se dan, debido a que la pieza de madera no cumple con las dimensiones requeridas por torceduras o agrietamientos.

### 3.2.2 INSPECCIÓN DE LAS INSTALACIONES

A continuación, por medio de fotografías, se muestra el estado actual de las instalaciones. (Ver Anexo A1: Informe del estado actual del horno de secado de tablancillo de la empresa PROMARA CIA. LTDA.).



**Figura 3.7: Vista frontal y lateral del horno**



**Figura 3.8: Difusión de vapor a través de las paredes y techo**



**Figura 3.9: Estado de tubería y conductos**



**Figura 3.10: Deterioro de paredes por gases de combustión**



**Figura 3.11: Pandeo de viga longitudinal y deformación de viga transversal**



**Figura 3.12: Corrosión en columnas**





**Figura 3.13: Corrosión en columnas**



**Figura 3.14: Deterioro del producto por secado rápido**

Notar algunas particularidades de las fotografías presentadas anteriormente. Por ejemplo, en la Figura 3.10 se nota la difusión de vapor de agua a través de las paredes del horno. De la misma manera, fijarse en las columnas que se han visto deterioradas por la corrosión debido al ambiente húmedo dentro del horno (Figura 3.12 y Figura 3.13). Para finalizar con la explicación tener en cuenta la Figura 3.14, esta figura ilustra las grietas en la madera, mismas que, se ocasionan por un secado deficiente y a una velocidad elevada. Estas grietas presentadas en la Figura 3.14 pueden resultar en astillamientos de la madera, el momento de aserrarla

Como se mencionó en la sección ESTADO ACTUAL DEL HORNO, el informe de la inspección visual fue realizado mediante la norma UNE 50135. En nuestro país, un equivalente para esta norma es la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2402:2010.

### **3.2.3 EQUIPOS INSTALADOS**

Con el fin de minimizar los costos, una buena práctica es hacer un listado de todos los equipos que se tienen y, a partir de un análisis, seleccionar aquellos que sean útiles en actividades posteriores del proyecto.

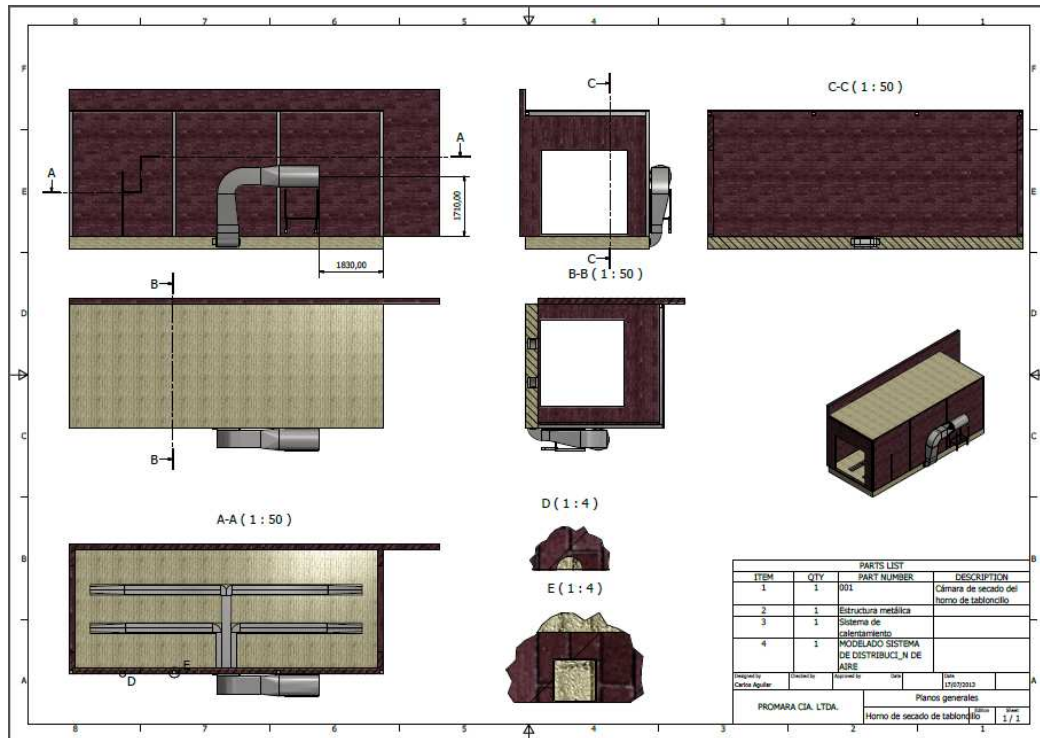
El informe de los equipos instalados en el horno de la empresa PROMARA CIA. LTDA., se encuentran en el Anexo A3 y de la misma manera fue realizado mediante la norma UNE 50135.

Los equipos expuestos en este informe son tres principalmente: el quemador de diesel Becket, el ventilador centrífugo equipado con un motor monofásico de inducción y el control Honeywell. Los catálogos de dichos equipos se encuentran en el Anexo D2, respectivamente.

### **3.2.4 PLANOS ACTUALES**

El levantamiento de planos se dividió por sistema, tal y como, se ha venido haciendo a los largo del proyecto.

Para generar los planos se utilizó el código de práctica ecuatoriano para dibujo y arquitectura, cuya normalización mostró algunas recomendaciones para dimensionado y presentación de formatos. A continuación se presenta un modelo del plano general.



**Figura 3.15: Ejemplo presentación de planos**

Para verificar los planos de detalle refiérase al Anexo B1. Cabe mencionar, que para la presentación de vistas se utilizó la regla general europea, más no la americana.

### 3.2.5 CREACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Es importante crear un procedimiento de medición, antes de la toma de datos, para seleccionar, a partir de un análisis exhaustivo, la ubicación de sensores y actuadores, si fuese el caso.

Recordar que las variables principales en el proceso de secado son la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

Para el proceso de secado se siguió el programa recomendado por la (Junta de acuerdo de Cartagena, 1989), es decir el formato para toma de

datos se diseñó de manera similar, con las variables establecidas por el programa, y además su variación en el tiempo. Ver Anexo A2.

### **3.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

Como se especificó en el alcance, el rediseño estructural constara de la selección de perfiles estructurales que conforman el soporte transversal y longitudinal de la loza del horno (vigas). Esta selección se basó a partir de un cálculo teórico de deformaciones, mas no de resistencia.

#### **3.3.1 UNIDADES UTILIZADAS**

Las unidades utilizadas para la exposición de resultados son las expuestas en el código ecuatoriano de la construcción (Capítulo 5), edición 2013.

#### **3.3.2 GENERALIDADES**

La estructura del horno de secado de tabloncillo de chanul, de la empresa, ha sido deteriorada por ciertos factores como se vio en la sección anterior.

Los problemas en el horno se pudieron haber dado por varias razones pudieron haber sido la mala fabricación de la loza, pesos excesivos, incorrecto diseño estructural, cambios climáticos extremos, falta de mantenimiento, etc.

Para evitar cualquier duda se empezó por lo básico, un análisis estructural del horno. Esto quiere decir que se calculó la deflexión de los perfiles actualmente instalados, con las cargas establecidas por el código ecuatoriano de la construcción. A partir de estos cálculos se expondrán las soluciones requeridas en el informe "Estado Actual del Horno". (Anexo A1)

La importancia para la solución de los problemas estructurales es la pérdida de calor a través de las paredes y techo. Además de cerciorar la seguridad de los obreros, ya que la resistencia mecánica de elementos estructurales pudo haberse visto afectada debido a la corrosión.

A partir de aquí, se realizó el cálculo teórico de las deflexiones de acuerdo, a las cargas establecidas por el código ecuatoriano de la construcción.

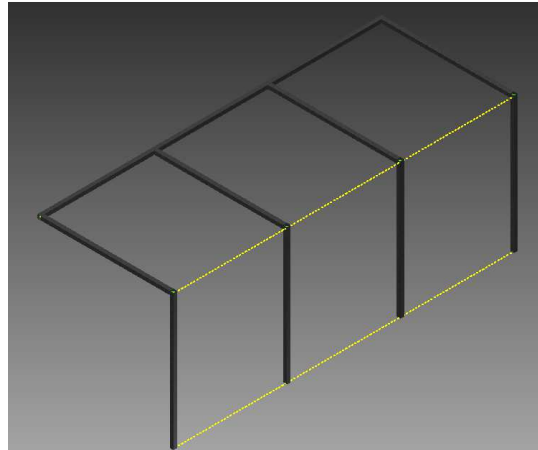
En vista de que la carga del horno se encuentra para la loza o techo se tomó los siguientes datos.

- Carga viva = 1.4 kN
- Carga muerta = 24 kN/m<sup>3</sup>

La carga viva es el valor de carga para edificios con mantenimiento parcial, extraído del código ecuatoriano de la construcción. Para la carga muerta se tomó el peso específico del hormigón armado.

El cómputo de las deflexiones, cuya hoja de cálculo se encuentran en el Anexo C4, se realizó tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

La estructura metálica tiene la configuración mostrada en la Figura 3.16



**Figura 3.16: Configuración estructural**

Las conexiones entre elementos, al ser conexiones soldadas, se analizan como uniones rígidas. Ver Figura 3.17



**Figura 3.17: Conexión viga columna**

El material es acero estructural comercial (ASTM A36). Ver Tabla 3.1

**Tabla 3.1: Tabla de propiedades mecánicas de los perfiles estructurales**

Material	Peso específico	Módulo de elasticidad	Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo último
Acero	77 kN/m <sup>3</sup>	190 GPa	250 MPa	400 MPa

**Fuente:** (Gere, J & Timoshenko, S; 1984)

### **3.3.3 SELECCIÓN DE PERFILES ESTRUCTURALES**

La selección de perfiles estructurales se realizó por medio de iteración, esta se basó en tres opciones: la primera para una viga de sección transversal tipo I; la segunda para una viga de sección transversal cuadrada y la tercera para una viga compuesta de sección transversal tipo g. Ver Anexo C4.

## **3.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ACCESORIOS FALTANTES**

Una vez identificados los sistemas faltantes y la situación actual del horno se puede tener una visión más clara para realizar el diseño

### **3.4.1 CARGAS TÉRMICAS ACTUALES Y DEL REDISEÑO**

Las condiciones térmicas interiores deben ser de acuerdo a los objetivos que se desean conseguir. En este caso, se requiere llegar a los parámetros establecidos por el programa de secado recomendado por la (Junta de acuerdo de Cartagena, 1989).

Para esto, es necesario conocer con cierta profundidad la interacción del producto con diferentes ambientes térmicos y las formas de intercambio de calor y masa, con esto se puede definir las condiciones óptimas de diseño.

En el Anexo B2 se puede visualizar los planos de diseño y la nueva configuración del horno.

A partir de esta geometría se realizó el cálculo de cargas térmicas utilizando la siguiente nomenclatura.

Pared Frontal.- se denomina a la pared que se encuentra anexa al sistema de calentamiento. Tomando como referencia esta superficie se denota la pared lateral izquierda y la pared lateral derecha.

Notar en la Figura 3.18 que la pared lateral derecha se encuentra en cierto estrecho junto al galpón de almacenamiento de madera, por lo que se utilizó otro enfoque para la estimación de cargas térmicas.



**Figura 3.18: Foto frontal del horno**

En la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se muestra la estimación de cargas térmicas actuales, mientras que en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5 se encuentran las cargas térmicas del rediseño.



Tabla 3.2: Estimación de cargas térmicas (Diseño actual)

ELEMENTOS	hi	he		Coficiente global de transferencia de calor	Flujo de calor
Pared Frontal	0.654	5.566	0.222	0.518	20.98
Pared Lateral derecha	0.654	0.677	0.222	0.31	12.54
Pared lateral izquierda	0.654	3.588	0.222	0.31	12.54
Puertas	1.432	1.482	0.307	0.728	29.50
Techo	3.996	5.566	0.025	0.464	89.12
Piso	3.996	---	0.036	3.966	52.46

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Tabla 3.3: Estimación de cargas térmicas (Diseño Actual)

ELEMENTO	Área m <sup>2</sup>	Carga Térmica W
Pared frontal	30.45	638.68
Pared lateral derecha	5.802	72.77
Pared lateral izquierda	5.802	72.77
Puertas (Cuatro puertas)	3.038	89.632 (358.53)
Techo	29.58	2636.17
Piso	26.45	1386.57
Producto	1.00	52 000
Infiltración Invierno (Verano)	0.04	0.016 (0.012)
<b>Total</b>		<b>57 165</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Tabla 3.4: Estimación de cargas térmicas (Rediseño)

ELEMENTOS	hi	he	Resistencia térmica	Coficiente global de transferencia de calor	Flujo de calor
Pared Frontal	0.654	5.566	0.873	0.387	15.69
Pared Lateral derecha	0.654	0.677	0.222	0.31	12.54
Pared lateral izquierda	0.654	3.588	0.222	0.31	12.54
Puertas	1.432	1.482	0.526	0.628	25.45
Techo	3.996	5.566	0.025	0.464	89.12
Piso	3.996	---	0.036	3.966	52.46

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

**Tabla 3.5: Estimación de cargas térmicas (Rediseño)**

<b>ELEMENTO</b>	<b>Área m<sup>2</sup></b>	<b>Carga Térmica W</b>
Pared frontal	30.45	477.72
Pared lateral derecha	5.802	72.77
Pared lateral izquierda	5.802	72.77
Puertas (Cuatro puertas)	3.038	77.32 (309.26)
Techo	29.58	2636.17
Piso	26.45	1386.57
Producto	1.00	52 000
Infiltración Invierno (Verano)	0.36	0.474(0.363)
<b>Total</b>		<b>56 955</b>

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

La estimación de cargas térmicas se hizo de acuerdo a las correlaciones de convección presentadas por la bibliografía consultada (Incropera & Dewitt, 1999). El análisis utilizado fue el de flujo externo a través de una placa plana y en ciertos casos se utilizaron las correlaciones expuestas para el fenómeno de convección natural en una placa vertical, según convenía. El detalle del cálculo se encuentra en el Anexo C1.

Cabe mencionar que la ganancia de calor por irradiación solar no se toma en cuenta, ya que su valor es despreciable, debido a que el horno opera a una temperatura mayor a la máxima alcanzada en el ambiente (40 Celsius mayor que 30 Celsius), por lo tanto, lo que existen son pérdidas de calor.

La asignación de materiales y sus correspondientes propiedades se encuentran en el siguiente apartado

### **3.4.2 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

Saber la composición de los materiales, con los cuales está construido el horno es muy importante, debido a que, a partir de este dato se puede

obtener las propiedades térmicas de dicho material y realizar los cálculos necesarios.

#### 1.1.1.1 Loza

El techo del horno está conformado de una losa de área de 9 x 3.5 m y espesor de 40 (mm). El material que la conforma es hormigón armado.

**Tabla 3.6: Propiedades físicas utilizadas para la loza**

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m °K)	Calor Específico (J/kg °K)
Hormigón armado	2300	1.4	880

**Fuente:** (Incropera & Dewitt; 1999)

#### 1.1.1.2 Paredes

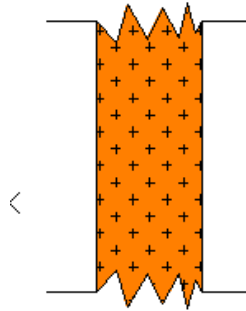
El material con el que fueron construidas las paredes es ladrillo común, cuyo espesor es de 16 cm. A continuación se puede ver las propiedades físicas del mismo.

**Tabla 3.7: Propiedades físicas para las paredes**

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m °K)	Calor Específico (J/kg °K)
Ladrillo Común	1920	0.72	835

**Fuente:** (Incropera & Dewitt, 1999)

En la Figura 3.19 se ve la composición de la pared del horno.



**Figura 3.19: Composición de la pared del horno**

### 1.1.1.3 Puertas

Las puertas del horno no han sufrido ningún deterioro (Ver Figura 3.20). Estas se forman por dos planchas de acero galvanizado de 0.5 mm de espesor y unidas por medio de ángulos de acero dulce. En el Anexo B1 se puede ver los planos de la puerta del horno de secado de tablancillo.



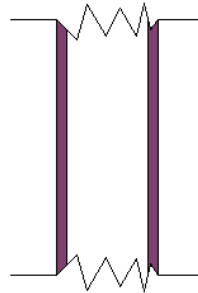
**Figura 3.20: Puertas del horno**

**Tabla 3.8: Propiedades físicas del material de las puertas.**

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m °K)	Calor Específico (J/m °K)
Acero galvanizado	7854	60.5	434

Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999)

En la Figura 3.21 se ve la configuración interna de la puerta, a partir de la representación gráfica de su sección transversal actualmente instalada en la cámara de secado.

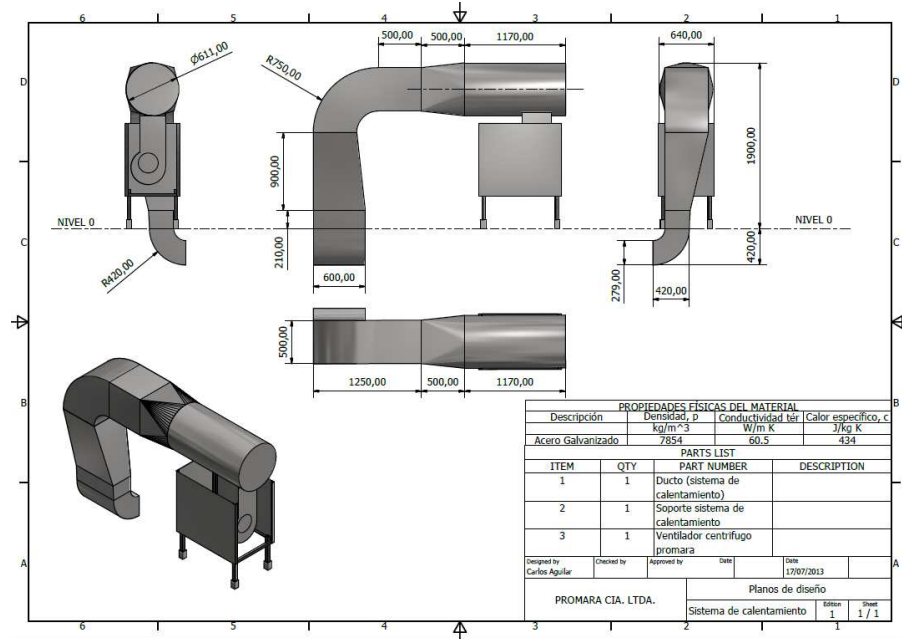


**Figura 3.21: composición de la puerta**

### **3.4.3 PÉRDIDAS DE CALOR DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO**

#### **1.1.1.4 Introducción**

Debido a la configuración del sistema de calentamiento (Ver Figura 3.22), no se realiza el cálculo de pérdidas de calor. La estimación de cargas daría un valor no acertado, de las cantidades de calor perdidas, debido a que se debe hacer demasiadas suposiciones para el cálculo. Al hacer demasiadas suposiciones para el cálculo, se sobrestima o subestima ciertas condiciones del proyecto y esto puede incurrir en gastos innecesarios o modificación de los parámetros del proyecto.



**Figura 3.22.- Sistema de calentamiento.**

Para solucionar dicho problema se realizó una simulación del sistema de calentamiento. Ver Anexo D1.

### 1.1.1.5 Cálculo

Como ya se dijo, en la sección 3.2.3 el volumen por carga de combustible es de 330 galones/carga. Siendo este el caso se calculó el flujo másico a partir de la siguiente fórmula  $m_c = Q_c * d_c$ . El dato de densidad se obtuvo adquiriendo las propiedades del diésel comercial como se muestra en la Tabla 3.9 y, el valor del caudal de combustible se obtuvo con el siguiente proceso; calculando el caudal en galones por hora  $Q_c = 330G/240hr$ ; y, convirtiendo las unidades de galones por hora (GPH) a  $cm^3/s$   $Q_c = 1.37 GPH * 3785.4 cm^3 / 3600s$ .

Para finalizar con la obtención del flujo másico se multiplica, el valor obtenido del caudal por la densidad,  $mc = Qc * dc = 1.44 \text{ cm}^3/\text{s} * 0.820 \text{ gr}/\text{cm}^3$ . Entonces se obtiene  $mc = 1.18 \text{ gr}/\text{s}$

Para facilitar el cálculo de potencia necesaria, se transforma el flujo másico a unidades de kg/s. Una vez transformado se obtiene que el flujo másico equivale a 1.18 milésimas de kg/s. El cálculo continúa obteniendo el valor de potencia máxima que puede dar el diésel comercial con la siguiente fórmula:  $P_{maxactual} = mc * Pc$ ; El valor de mc ya se calculó y el valor de Pc se obtuvo de la Tabla 3.9. Mediante esta operación matemática se obtuvo que  $P_{max} = 0.0018 \text{ kg}/\text{s} * 34169.75 \text{ kJ}/\text{s}$ .  $P_{max} = 40.32 \text{ kW}$ .

**Tabla 3.9: Propiedad del combustible**

PROPIEDAD	DIESEL COMERCIAL
Poder calórico	34169.75 KJ/kg
Densidad	0.820-0.845 g/cm <sup>3</sup>
Punto de inflamación	77°C

Fuente: Internet

El funcionamiento actual del sistema de calentamiento se puede observar en el esquema que de la Figura 3.23.

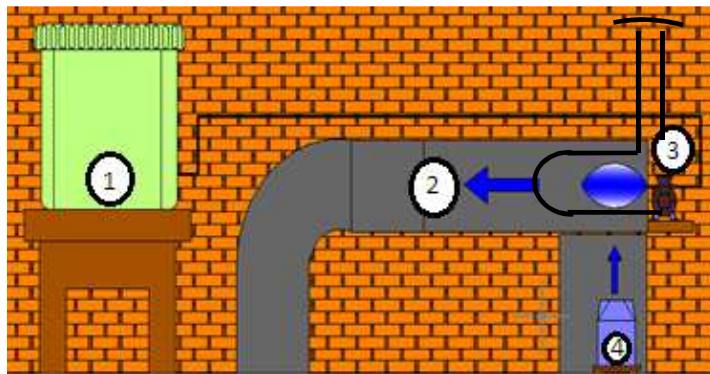
Este valor de pérdidas nos permite ver si necesitamos aislar las superficies externas del intercambiador de calor.

Como ya se calculó en el diseño, y se demuestra en la Tabla 3.10, la eficacia actual de cámara de secado es aproximadamente 50%.

Un porcentaje de pérdidas de energía se da por la combustión incompleta, mientras que la otra, por el diseño del intercambiador de calor.

Con el rediseño que consta de una placa metálica de cobre envuelta a través de la llama que produce la bomba quemador con la ventilación adecuada para que el aire no se mezcle con el producto de la combustión de la cámara y además se mejore la eficiencia en un 2%.

El diseño conceptual del intercambiador de calor se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.23: Esquema de calentamiento rediseño**

El rediseño del intercambiador de calor se realizó de acuerdo a los objetivos empresariales

Los planos en detalle del sistema de calentamiento se encuentran en el Anexo B2.

La eficiencia del sistema de calentamiento se mejoró en un 2%. La configuración nueva del intercambiador de calor logra que se reduzca el uso de combustible en un 5%



### 1.1.1.6 Eficiencia térmica actual y del rediseño

Se conoce como eficiencia térmica al uso de la energía. Para el cálculo de la eficiencia térmica se tomó como referencia el postulado de kelvin, perteneciente a la segunda ley de la termodinámica, que se expone en (Cengel & Boles, 2008) y se expresa de la siguiente manera:

$$n^t = \left( \frac{W_{neto}}{Q_a} \right) = \left( \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Como se sabe, el horno de secado de tabloncillo está compuesto de varios sistemas, entre los cuales, para el cálculo de eficiencia térmica solo se toman en cuenta dos eficiencias, la del sistema de calentamiento y la eficiencia de la cámara de secado.

El cálculo de la eficiencia térmica es importante para saber las ventajas obtenidas con el rediseño del horno. En general la eficiencia es relación entre la energía utilizada para la energía de entregada.

A partir de los datos obtenidos en las secciones anteriores se reemplaza los valores numéricos de la tabla y mediante la Ecuación 3.1 se obtiene que se mejorara la eficiencia (teóricamente) en un 2%. Ver Tabla 3.10.

**Tabla 3.10: Eficiencia térmica Actual (Rediseño)**

Elemento	Energía de Ingreso (kW)	Energía Perdida (kW)	Eficiencia Térmica (%)	Eficacia del Sistema (%)
Sistema de Calentamiento	40.32 (58.92)	3.00 (1.91)	92.55% (96.19%)	100% (100%)
Sistema de ventilación	37.32 (57.01)	0.02 0.03	100% (100%)	100% (100%)
Cámara de secado	37.30 (56.98)	57.2 (56.96)	--- (0.03%)	53.35% (100%)

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

### 3.4.4 REDISEÑO SISTEMA DE VENTILACIÓN

Para realizar el rediseño del sistema de ventilación se debe saber primeramente, los parámetros de diseño, y segundo las condiciones a las que va a trabajar el horno.

Como ya se conoce el horno de secado de tabloncillo de la empresa PROMARA CIA. LTDA., consta de un sistema de ventilación que permite la distribución correcta del aire dentro del horno.

El detalle del sistema de ventilación se lo puede observar en el Anexo B1: Planos Actuales del horno HT – 001. A partir de este detalle se puede obtener la lista de ductos instalados en dicho sistema como se lista a continuación:

- Dos conductos cuadrados (260mm x 260mm), hechos de acero galvanizado, con una longitud de 1.24 m.
- Dos conductos cuadrados (260mm x 260mm), hechos de acero galvanizado, con una longitud de 1.370 m
- Reducción bilateral excéntrica, de 290x180 mm a 600x620 mm. La longitud total del conducto es de 0.620 m.
- Cuatro conductos de reducción excéntrica con respecto a su altura pasando de 260x260 mm a 180x260 mm y con una longitud de 1.04 m.

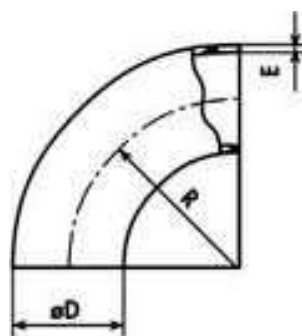
Además se puede notar que, para la distribución de aire en ductos se utiliza una derivación Tipo A, descripción utilizada por (Carrier Corporation, 2009, págs. II - 30), en su publicación Manual de Aire Acondicionado.

Como se puede notar, la relación entre las dimensiones, de los ductos de ventilación es  $W/D = 1$ . Esto quiere decir, que es la óptima utilizada en sistemas de aire acondicionado (Carrier Corporation, 2009, págs. II-23).

Como ya se dijo anteriormente, la derivación para desviación de ductos es de tipo A, según (Carrier Corporation, 2009), en consecuencia, para el cálculo de radio interior ( $R_t$ ) y exterior ( $R_h$ ), se deben utilizar las siguientes correlaciones:  $R_t = (3/4) * D$  y  $R_h = D_1 + (3/4) * D$ , respectivamente. La notación para estas ecuaciones se define:  $D$ , para el ancho del conducto;  $D_1$ , para el ancho reducido del conducto (Carrier Corporation, 2009, págs. II-30);  $R_t$ , para el radio interior y  $R_h$ , para el radio exterior.

Con las relaciones expuestas anteriormente se puede obtener la relación  $R/D$  que es importante para el cálculo de pérdidas en conductos.

Notar en la Figura 3.24, que el radio  $R$  es la suma entre el radio del eje principal del codo y “ $D$ ” el ancho del codo para conductos rectangulares. Esto quiere decir, que para obtener el radio principal del codo se debe sumar el radio interior ( $R_t$ ), y la mitad del ancho del conducto. Mediante esta operación se obtiene que  $R = (D/2) + (3/4) * D = 1\frac{1}{4}D$ . Para los ductos del proyecto actual se obtiene que  $R = 325$  mm y la relación  $R/D = 1,25$ . Relación óptima para conductos de aire acondicionado, según (Carrier Corporation, 2009).



**Figura 3.24: Esquema codo de 90°**

### 1.1.1.7 Cálculo de Conductos

El cálculo de conductos consiste en encontrar las condiciones favorables para el transporte del aire desde el sistema de impulsión hasta el espacio acondicionado. En este procedimiento de cálculo influyen algunas variables como la velocidad del aire, el caudal de aire necesario en cada salida, las pérdidas de presión dentro del ducto, las ganancias o pérdidas de presión estática por cambio de velocidad y algunas más.

Al proyectar un sistema de ductos existen dos métodos para su resolución, estos son: manteniendo la velocidad constante o manteniendo pérdida constante. En los dos casos es necesario saber el caudal de ingreso y la configuración (diseño conceptual) de los ductos.

En el caso del Horno HT – 001, ya se realizó el diseño preliminar de la sección de ductos lo que se hizo fue calcular con el diseño actual las pérdidas de carga en el sistema y comparar la información técnica del ventilador con la de pérdida de carga obtenida para diferenciar, si logra cumplir los requerimientos necesarios. A simple vista se puede decir que el sistema de distribución fue diseñado para mantener la velocidad constante dentro del ducto, debido a que tiene una reducción al final de cada ramal.

El procedimiento para la obtención de datos para el sistema actual de ductos se da de la siguiente manera:

- Cálculo de caudal en cada ramal de distribución
- Cálculo de velocidad
- Cálculo de área de cada ramal
- Cálculo de diámetro equivalente
- Cálculo de longitud equivalente
- Cálculo de pérdida de presión
- Cálculo de recuperación estática

- Cálculo de pérdida parcial
- Cálculo de pérdida total por conducto
- Cálculo de pérdida total por ramal
- Cálculo total de pérdidas

#### 1.1.1.7.1 Cálculo de caudal en cada ramal de distribución

Como se sabe, por la ecuación de la continuidad, el caudal es igual al producto de la velocidad por el área dentro de un conducto ( $\dot{V} = c * S$ ). Tomando en cuenta este principio, el cálculo de caudal para un conducto rectangular viene dado por la fórmula

$$\dot{V} = c * W * H \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde,

W: es el ancho del conducto y,

H: es el alto del conducto

C: Velocidad del air dentro del conducto

Debido a que la velocidad de circulación del aire es la misma, o se intenta que sea la misma y, la altura de los ductos del sistema de ventilación del horno HT – 001 son similares, a la altura del ingreso de la derivación, se puede obtener la siguiente expresión

$$\dot{V}_p = \frac{W_p}{W_t} * \dot{V}_t \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde,

V<sub>p</sub>: es el caudal parcial

$W_p$ : es el ancho parcial

$W_t$ : es el ancho total

$V_t$ : es el caudal total

Por ejemplo para un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  en una derivación tipo A se puede obtener el caudal con la Ecuación 3.2. Como ejemplo de cálculo se obtiene el valor de caudal para el conducto central que llega a los ramales superiores:

$$\dot{V}_p = \frac{280 \text{ mm}}{620 \text{ mm}} * 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_p = 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con este dato de caudal se calcula la velocidad a la que circula el aire por el conducto, despejando de la ecuación de la continuidad, esta variable. El cálculo para el ejemplo que se está siguiendo queda de la siguiente manera, si el área del conducto es  $S = 260 \text{ mm} * 280 \text{ mm} = 72800 \text{ mm}^2$  :

$$c_1 = \frac{\dot{V}}{S}$$

Reemplazando los valores,

$$c_1 = \frac{4.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0728 \text{ m}^2}$$

$$c_1 = 61.81 \text{ m/s}$$

Para obtener la pérdida de presión por rozamiento en un conducto rectangular, se puede seguir dos procedimientos: el primero es obtener la pérdida por unidad de longitud, a partir de una gráfica que se presenta en la

bibliografía: y el segundo es obtenerla a partir de una ecuación que se presenta en (Carrier, 2009). Sin importar cuál sea el método se debe calcular un valor llamado diámetro equivalente.

El diámetro equivalente es el diámetro de un conducto circular que transporta el mismo caudal y tiene la misma pérdida de carga que un conducto rectangular, cuyas dimensiones fueron utilizadas para calcular dicho diámetro. La expresión para calcular el diámetro equivalente es:

$$Deq = 1.55 * \frac{S^{0,625}}{P^{0,25}} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde,

S: superficie interior del conducto

P: perímetro interior del conducto

El diámetro equivalente para el ejemplo que se está siguiendo es:

$$Deq = 1.55 * \frac{0.0728^{0,625}}{(2 * .26 + 2 * .28)^{0,25}}$$

Entonces,

$$Deq = 0.29567 \text{ m}$$

Transformando,

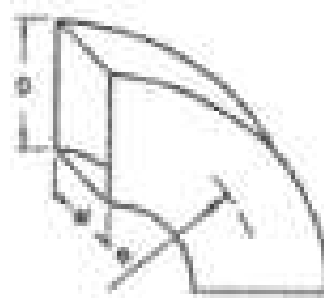
$$Deq = 296 \text{ mm}$$

Dependiendo de cómo se necesiten los datos de la ecuación de pérdida de presión, se puede obtener dos valores: la pérdida de presión total del

ducto que se está analizando y la pérdida de presión por unidad de longitud del conducto.

En la mayoría de los casos es recomendable obtener la pérdida de presión por unidad de longitud de conducto, esto es, debido a que, para el cálculo de una red completa de ductos se tiene que añadir la pérdida de presión de accesorios o transformaciones, como por ejemplo codos y difusores. Para obtener el valor de la longitud equivalente del accesorio se extrae de tablas, (Carrier Corporation, 2009, pág. Parte II). Se conoce como longitud equivalente a la longitud que tendría un conducto que tiene las mismas dimensiones, de ancho y altura, que el accesorio en análisis y que causa la misma pérdida de presión. Es decir, en palabras simples, se obtiene una longitud para calcular la pérdida del accesorio, como si fuera un conducto de las mismas dimensiones.

Tomando el ejemplo del accesorio del cual se habló en el apartado anterior, se obtuvo que la relación de radio sobre diámetro ( $R/D$ ) fue de 1,25. Este es uno de los datos que se necesitan para obtener la longitud equivalente del accesorio. Las dimensiones del ducto accesorio, en este caso, un codo, son  $W = 260$  y  $D = 260$ . Con los valores de  $W$  y  $D$  expuestos en el párrafo anterior se calcula la relación  $W/D$ . En este caso  $W/D = 1$ .



**Figura 3.25: Accesorio para sistema de ductos**

Una vez obtenido  $R/D$  y  $W/D$ , cuyos valores son 1,25 y 1,00, respectivamente se entra a la Tabla 3.11 y se obtiene el valor de  $L/D$  que es



igual a siete. Con este valor de  $L/D = 7$ , se multiplica por el valor de  $D$  que es 260 obteniendo como resultado  $L = 1820$  mm, que representa la longitud equivalente del accesorio.

**Tabla 3.11: Obtención de longitud equivalente en codos rectangulares**

CONDICIONES		RELACIÓN L/D			
W/D	R/D				
	0.5	0.75	1.00	1.25	1.50
	Relación L/D				
0.5	33	14	9	5	4
1	45	18	11	7	4
3	80	30	14	8	5
6	125	40	18	12	7

**Fuente:** (Carrier Corporation, 2009)

Como ya se dijo anteriormente, la pérdida de presión se puede calcular de forma directa o indirecta por medio del cálculo de la longitud equivalente. A continuación se presenta la ecuación para cada una de ellas.

$$\Delta p = 0,15 * r * \frac{L}{D^{1,22}} * c^{1,82} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Dónde:

$\Delta p$ : pérdida de presión

$r$ : la rugosidad de la superficie interior en mm (para acero galvanizado es igual 0,09)

$L$ : longitud del conducto

$D$ : diámetro del conducto

$c$ : velocidad del conducto

Si se despeja  $L$  de la ecuación anterior se obtiene la expresión para la pérdida de carga por longitud.

$$\frac{\Delta p}{L} = 0,15 * r * \frac{1}{D^{1,22}} * c^{1,82}$$

Donde,  $\Delta p/L$  es la pérdida de presión por unidad de longitud.

Recordar que se había calculado el diámetro equivalente para el conducto, del cual se estaba haciendo el análisis. Sin tomar en cuenta la longitud equivalente calculada del accesorio anteriormente se procederá a obtener el valor de pérdida de presión directamente mediante la Ecuación 3.5.

$$\Delta p = 0,15 * 0,09 * \frac{1.290 \text{ m}}{0,296^{1,22}} * 4,5^{1,82}$$

$$\Delta p = 1,188 \text{ Pa}$$

Para el cálculo de pérdida de presión en el accesorio se usa la expresión de pérdida de carga por unidad de longitud como se muestra a continuación:

$$\frac{\Delta p}{L} = 0,15 * 0,09 * \frac{1}{0,296^{1,22}} * 4,5^{1,82}$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 0,921 \text{ Pa/m}$$

$$\Delta p = \frac{\Delta p}{L} * L_{equiv.}$$

$$\Delta p = 0,921 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} * 1,820 \text{ m}$$

$$\Delta p = 1,676 \text{ Pa}$$

La recuperación estática se calcula cada vez que se instale un cono de ampliación o reducción de aire, en cualquier parte del tramo del sistema de conductos. La pérdida o ganancia de presión estática se determina mediante la ecuación:

$$p_{est2} = p_{est1} * \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} * \rho$$

**Ecuación 3.7**

Donde,

Pest1: presión estática en el punto 1 (antes del cono)

Pest2: presión estática en el punto 2 (después del cono)

C1: velocidad en el punto 1

C2: velocidad en el punto 2

P: densidad del aire

Si la presión estática en el punto dos, es positiva, significa que el cono es de ampliación y se ha logrado una ganancia de presión estática. Si la presión en el punto dos es negativa, significa que es una reducción y se ha obtenido una pérdida en la presión estática. Este tipo de transformaciones se usa generalmente para mantener constante la presión estática dentro del ducto o para aumentar la velocidad del aire según corresponda.

Una vez obtenida la pérdida o ganancia de presión estática por cambio de velocidad, se le suma a este valor (sea negativo o positivo) a la pérdida de carga por fricción en el conducto. Por ejemplo si se obtiene por medio de la ecuación de recuperación estática un valor de  $p_{est2} = -6,4 Pa$  y del cálculo de pérdidas de presión un valor de  $\Delta p = 8 Pa$ , la pérdida total en el conducto tendrá un valor de  $P_{total\_cond.} = 1,6 Pa$ . Y para finalizar con este procedimiento se calcula el valor de la pérdida total por rama, que no es más que la suma de las pérdidas totales de cada conducto por ejemplo:

$P_{total\_conduc.1} = 1,6 Pa$  y  $P_{total\_cond2.} = 6,5 Pa$ , entonces la pérdida total en el ramal será  $P_{total} = 8,1 Pa$ .

La hoja de cálculo de pérdidas de carga para el presente proyecto se encuentra en el Anexo C2.

#### **1.1.1.8 Distribución de aire**

Para la correcta distribución de aire dentro del horno se hace referencia a ciertos conceptos que se encuentran en la bibliografía, se hará un énfasis en los más importantes, para que no quede, ningún cabo suelto, en el rediseño del sistema de ventilación.

El objetivo del sistema de distribución de aire es facilitar la llegada del aire a la cámara de secado. Para esto se ocupa un equipo importante que es la unidad terminal de impulsión (UTI), como se le conoce generalmente. En el caso del presente proyecto la UTI es el sistema de calentamiento de aire.

El objetivo principal de la UTI es la llegada del aire a la cámara de secado con velocidad y presión necesaria para cumplir el procesos requerido.

Se dice que para tener una sensación de confort la diferencia de temperatura en diferentes puntos del local debe ser entre -1,7 y +1,1 Celsius. (Carrier Corporation, 2009). Sin embargo, se acepta un cambio general de temperatura entre distintos puntos del horno, de 1 Celsius. Cabe mencionar que este fenómeno de cambio de temperatura dependen más del control de temperatura.

Al ser la velocidad un parámetro importante para el secado, lo que se debe lograr es obtener una velocidad mínima de 2 m/s a través de cada pila de madera, para que el secado sea óptimo.

El principio de la distribución de aire se basa en ciertos parámetros y conceptos, además de accesorios para conducción de aire, como se muestra a continuación:

El *alcance o flecha* es la distancia longitudinal máxima a la que llega el aire impulsado en la cámara. Esta se mide desde la boca de salida del aire. Para el presente proyecto la distancia de alcance o flecha se tomará como el 65% de la longitud total entre paredes longitudinales (ancho del horno). Por lo tanto el **alcance** es **2,21 m**. Se toma como regla para sistemas de distribución de aire que el alcance debe ser el 75% del espacio acondicionado, en este caso ancho del horno. Sin embargo se resta 10% a este total, debido al espacio que ocupan los conductos dentro de la cámara y se resta esta longitud también.

La *caída* es la máxima distancia vertical que alcance el aire, medida desde el centro del conducto de salida de aire. Este parámetro es de gran importancia ya que determina como se va a generar la distribución del aire en forma vertical. Ver Figura 3.26. La caída dentro del presente proyecto no tiene un valor específico ya que como se verá a continuación el fin del sistema de distribución de aire es transportar aire a temperatura requerida desde el techo hasta el piso del horno, de forma más específica se definió a la caída como la altura de la pila de madera. ( $H_{pila\_mad.} \approx 2,4 m$ ).

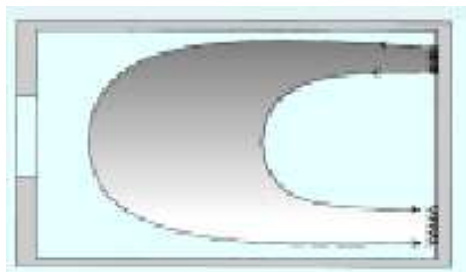


**Figura 3.26: Caída de aire**

*Inducción* es el arrastre que genera el aire de impulsión o aire primario contra el aire que se encuentra en el local y depende específicamente de su velocidad. Es decir el arrastre es proporcional a la velocidad de inducción. Este fenómeno físico permite la correcta distribución de aire dentro de la cámara de secado, debido a que es una medida potencial de desplazamiento de aire. Con esto quiere decirse que, mientras más inducción más rápido se realiza el cambio de aire dentro de la cámara de secado.

La *dispersión* es el efecto que se le da al aire para que cubra la mayor parte del espacio acondicionado. Se menciona, además que la dispersión del aire es resultado de la ley de cantidad de movimiento.

La *envolvente* es una zona arbitraria que se genera a la salida del ducto y tiene como característica principal que, alrededor de la mencionada región, todos los puntos tiene la misma velocidad.



**Figura 3.27: envolvente de aire**

La *zona de estancamiento* se puede denotar como una zona donde el aire está totalmente reposo (velocidad inferior a 0,1 m/s). En refrigeración esta se sitúa cerca del techo y en calefacción cerca del suelo. Esto se debe a la diferencia de densidades entre el aire frío y el aire caliente.

Existen varios deflectores para lograr una distribución de aire correcta. De acuerdo a la aplicación que se requiera y a ciertas limitaciones de espacio y comodidad para los ocupantes, se puede escoger entre una gama de diseños. Lo que es importante mencionar en este escrito, es que, se debe tomar en cuenta la posición de acuerdo a la utilidad (calefacción o refrigeración) y el alcance máximo que se quiere dar al aire de impulsión (salida del ducto).

Se menciona, además que una boca de impulsión se diseña para distribuir el aire que se recibe con velocidad, presión y dirección adecuadas para que cumpla su función, mas no para corregir condiciones indebidas de distribución.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores es importante tener en cuenta la distancia de propulsión, para esto se aplica la regla de  $\frac{3}{4}$  de la distancia que existe entre la pared de difusión a la pared opuesta. Esta es una medida aceptable de distribución siempre y cuando no se encuentren elementos de calefacción en la pared opuesta.

#### 1.1.1.8.1 Diferencia de temperatura

La diferencia de temperatura dentro de la habitación depende de la relación de inducción en la boca de impulsión; las obstrucciones que tenga el aire primario y la altura del techo.

#### 1.1.1.8.2 Movimiento del aire total en la habitación

La finalidad de distribuir el aire en la habitación es provocar el movimiento satisfactorio del aire dentro de la zona ocupada. Lo que se consigue relacionando la configuración de la boca de impulsión y su rendimiento, aplicando el concepto de aire total de circulación y, además calculando la velocidad media de aire en la habitación.

### 1.1.1.9 CLASIFICACIÓN

La clasificación de difusores se encuentra en dos grupos: la clasificación técnica y la clasificación morfológica.

#### 1.1.1.9.1 Clasificación Técnica

Para la clasificación técnica se utiliza la nomenclatura por grupo, es decir Grupo A, Grupo B, Grupo C y Grupo D.

En el Grupo A se encuentran los difusores de techo o de pared, de impulsión horizontal.

Grupo B: se encuentran los difusores de suelo o de pared cerca del suelo, con impulsión vertical, sin difusión

Para el Grupo C: se encuentran difusores de suelo o de pared cerca de suelo con impulsión vertical pero con difusión.

Y para el Grupo D son difusores montados en el suelo o en la pared cerca del suelo con impulsión horizontal.

#### 1.1.1.9.2 La clasificación morfológica se enlista a continuación:

- Rejilla perforada
- Rejilla con deflectores fijos
- Rejilla con deflectores ajustables
- Bocas de rendija
- Salidas con inducción interna
- Difusor de techo
- Casos especiales (rejilla y difusores)



### 1.1.1.10 Aplicación de los difusores de techo

Hay que elegir los difusores de techo de alcance moderado, generalmente igual o inferior al 75% del valor indicado en las tablas.

### 1.1.1.11 Límites de ruido en las bocas de impulsión

La Tabla 3.12 muestra las velocidades recomendadas, que proporcionan niveles de ruidos aceptables.

**Tabla 3.12: Velocidades límites para contrarrestar ruido en las bocas de impulsión**

<b>APLICACIÓN</b>	<b>VELOCIDAD (m/s)</b>
Estudios de radiodifusión	1,5 – 2,5
Residencias	2,5 – 4
Apartamentos	2,5 – 4
Iglesias	2,5 – 4
Dormitorios de hotel	2,5 – 4
Teatros	2,5 – 4
Oficinas particulares, tratados acústicamente	2,5 – 4
Oficinas particulares, no tratados	2,5 – 4
Salas de cine	5
Oficinas públicas	5 – 6,5
Almacenes comerciales, plantas superiores	7,5
Almacenes comerciales, planta principal	10

**Fuente:** (Carrier Corporation, 2009)

### 1.1.1.12 Ubicación de las bocas de salida

La ubicación de boca de salida se puede dar en el techo, en las paredes laterales, en ventanas y en el suelo.

La ubicación de las bocas de salida depende más de la velocidad y temperatura del aire, ya que se pueden combinar de distintas formas para lograr la distribución requerida en el espacio acondicionado.

Se puede mencionar que una desventaja de las bocas de salida ubicadas en el suelo constituye colectores de suciedad.

#### **1.1.1.13 Casos especiales**

Entre los casos especiales se tiene a los difusores rotativos que generalmente se colocan en techos, y las toberas que son dispositivos especiales para lanzar el aire a mayores distancias que las rejillas o difusores convencionales. Estas toberas se las utiliza en aeronáutica y la gran industria.

En algunos de los casos se utilizan techos y paneles perforados donde la velocidad de descarga es baja y la inducción también lo es, por lo tanto se debe proveer el movimiento del aire adecuado, a una velocidad mayor a 0,08 m/s. Este método de difusión es muy poco confiable debido a que no se logra una distribución de aire apropiada.

También se debe revisar información acerca del tótem, elemento cuyo diseño proporciona varios aspectos de necesidad como luz, inserción de propaganda, distribución de aire y otros.

#### **1.1.1.14 Rejillas de retorno**

La rejilla de retorno depende primero de la pérdida de presión admisible y segundo del efecto sobre los ocupantes o material del local. La ubicación de estas se da de acuerdo al tipo de utilidad que tenga espacio acondicionado, y se puede combinar con la ubicación de las bocas de salida para dar una correcta distribución dentro del espacio acondicionado.

En tablas existen tabuladas las velocidades recomendables para las rejillas de retorno, además como regla general se debe tomar que el límite aceptable inferior para retorno no debe exceder el 0,25 m/s; de lo contrario pueden resultar corrientes de aire molestas.

Existen tanto retornos de pared, de techo como de suelo. Los retornos de pared cerca del suelo son los más recomendables, mucho más en calefacción, debido a que primeramente es aspirado el aire frío del suelo y reemplazado por el aire caliente de las capas superiores.

#### **1.1.1.15 Selección de las UTI**

El proyectista debe tomar decisiones respecto a:

- Tipo de la UTI
- Tamaño
- Colocación
- Número de unidades

El caudal determina el número de unidades, además se debe tomar en cuenta factores importantes como pérdida de carga disponible antes de la UTI, diferencia de temperaturas entre el aire primario (aire impulsado) y el aire ambiente, nivel sonoro y cuestiones de índole arquitectónica como lo es en casos de edificios antiguos.

Uno de los artículos más importantes por mencionar, es que los ensayos realizados para las unidades terminales de impulsión (UTI), se hacen de forma isotérmica (temperatura de aire de impulsión = temperatura de aire dentro del local) y, generalmente son los datos que proporciona el fabricante.

#### 1.1.1.15.1 Diseño de distribución de aire

A partir de todos los parámetros mencionados lo que se requiere es una correcta distribución. El valor principal mandante, como ya se había mencionado en capítulos anteriores es la velocidad del aire. La velocidad a través de la pila es de 2 m/s, mínimo. Para lograr este objetivo el cálculo se realizó de atrás para adelante, por así decirlo. Es decir, se tiene la velocidad promedio que se requiere en la cámara de secado 2 m/s, entonces se calcula, mediante la ecuación de movimiento total de aire presentada por (Carrier Corporation, 2009)  $Cm = 1,4 * Vc/Apo$ , el caudal total de circulación. Apo, es el área de la pared opuesta a la salida de impulsión y Cm es la velocidad media del aire.

Para un área de 3,4 m x 2,893 m ( $Apo = 9,8362 m^2$ ) y  $Cm = 2 m/s$ , se obtiene un valor de  $V_{c\_parcial} = 14,051 m^3/s$ . Este valor de Vc, es el caudal total de aire que circula a través de una pila de madera. Debido a que en el horno existen tres pilas de madera se obtiene un caudal total de circulación de  $V_{c\_total} = 42,155 m^3/s$ .

Con este par de valores dependiendo del diseño, si la distribución se realiza para cada pila de madera con un conducto específico, la velocidad de salida del ducto se calcula con Vc\_parcial, en cambio, si la distribución se realiza mediante un conducto a toda la cámara de secado se utiliza el valor de Vc\_total.

Sea cual sea el caso, al final se debe encontrar el valor de la velocidad del aire a la salida del conducto. Para el presente proyecto se selección una distribución con un conducto único para cada pila de madera. Para el cálculo de la velocidad a la salida del conducto se hizo algunas consideraciones. Primero se toma el aire como fluido incompresible, sin transferencia de calor y con densidad constante. A continuación se procedió a hacer una

deducción de la fórmula que nos permitió calcular la velocidad del aire en la sección requerida.

Se empezó con la relación para cálculo de movimiento de aire total expuesta por (Carrier Corporation, 2009), como se muestra a continuación:

$$\dot{V}_c = R * \dot{V}_I \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde,

$V_c$ : es el aire total de circulación

$V_i$ : es el caudal de impulsión y,

$R$ : relación de inducción o arrastre

El valor de  $R$  se expresa como la relación de caudal total para la relación de caudal de impulsión,  $R = \dot{V}_3 / \dot{V}_1$  y el valor de  $V_i$  es igual al producto de la velocidad lineal del aire ( $c_1$ ) por la superficie transversal del conducto ( $S_1$ ),  $V_I = V_1 = c_1 * S_1$

Teniendo las relaciones de  $R$  y  $V_i$  o  $V_1$  a partir de la ecuación de la ley de cantidad de movimiento se obtiene una expresión de  $R$  con dependencia solamente de las velocidades, total y de impulsión.

Si  $m_1 * c_1 + m_2 * c_2 = m_3 * c_3$ , la ecuación de cantidad de movimiento que representa la mezcla de aire de impulsión con el aire de la cámara, se simplifica con la ecuación de conservación de masa  $m_1 + m_2 = m_3$  y se reemplaza el valor de  $C_2$  con cero ( $c_2 = 0 \text{ m/s}$ ), se obtiene la siguiente ecuación:  $m_1 * c_1 = (m_1 + m_2) * c_3$

Como  $c_3 = c_m$ , la ecuación final que describe la ley de cantidad de movimiento queda como  $\dot{m}_1 * c_1 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) * c_m$ . Debido a que, se supuso densidad constante para el aire, se puede multiplicar toda la expresión por

$1/\rho$  . Con lo que la expresión de conservación de cantidad de movimiento se convierte en:  $\dot{V}_1 * c_1 = (\dot{V}_1 + \dot{V}_2) * c_m$  Por la conservación de la masa se obtiene que  $\dot{V}_1 * c_1 = \dot{V}_3 * c_m$  Si se despeja  $V_1/V_3$  se obtiene

$$\frac{\dot{V}_3}{\dot{V}_1} = c_1/c_m \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Recordar que la relación de caudal total para la relación de caudal de impulsión es igual a R. Si se reemplaza esta expresión en la **Ecuación 3.9**, se obtiene:

$$\dot{V}_c = \frac{c_1}{c_m} * \dot{V}_I \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Si  $V_I = V_1 = c_1 * S_1$  y se reemplaza en la **Ecuación 3.10**., se obtiene:

$$\dot{V}_c = \frac{c_1}{c_m} * S_1 * c_1 \quad \text{Ecuación 3.11}$$

De acuerdo a los datos que se obtuvieron en secciones anteriores se puede despejar, de la **Ecuación 3.11**,  $c_1$  y, se obtiene:

$$c_1 = \sqrt{\dot{V}_c * c_m / S_1} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Para valores de  $V_c = 42,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $C_m = 2 \text{ m/s}$  y  $S_1 = 0,18 \text{ m}^2$ . Se obtiene un valor de  $c_1 = 21.64 \text{ m/s}$ , para un ducto de 300x600 mm. Esto quiere decir que se trabajará con un conducto de media velocidad. En las derivaciones se utilizó conducto de 200x600 mm y el caudal en cada ramal será de  $14.05 \text{ m}^3/\text{s}$  y su velocidad de  $21.64 \text{ m/s}$ . Se reduce la velocidad de ingreso al horno a un valor de  $15.6 \text{ m/s}$ , mediante una transformación, para que el aire haga una envolvente adecuada.

### 1.1.1.16 Problemas y recomendaciones de flujo en ductos

Es esencial notar la diferencia entre la velocidad del aire dentro del ducto y la velocidad que se desea a través de la pila de manera. Es por eso que se debe tomar en cuenta la diversificación de simbología en esta variable.

Para dar una explicación breve, la velocidad del aire en el ducto es la velocidad con la que se abastece de fluido al horno mientras que la velocidad del aire a través de la pila es un factor que influirá en la tasa de evaporación de agua de la madera. Es esencial notar que en cierto grado estas dos variables están ligadas no de una manera directa pero su influencia en el proceso de secado es considerable.

#### 1.1.1.16.1 Diseño de conductos

El diseño de conductos se lo realiza siguiendo los pasos expuestos por (Carrier Corporation, 2009). Debido a que las fórmulas fueron determinadas para ductos de sección circular, se debe definir una correlación que comparta estos criterios cuando se trabaja con ductos rectangulares.

$$Dh = 4S/P$$

**Ecuación 3.13**

La ecuación que se notó anteriormente es el conocido diámetro hidráulico, que supone, de acuerdo a las dimensiones de un ducto rectangular, un diámetro para la obtención de correlaciones necesarias para el diseño.

A partir de la obtención del diámetro hidráulico se calcula las pérdidas de carga en el sistema de conductos. En esta sección no se toma en cuenta las pérdidas de calor, debido a que dicho cálculo se encuentre en la sección anterior.

La hoja de cálculo que muestra el diseño del sistema de conductos se encuentra en el Anexo B3.

### 1.1.1.17 Cálculo de pérdida de carga

Para el cálculo de pérdida de carga en los conductos la referencia utilizada fue la expuesta por (Carrier Corporation, 2009, págs. II-35). Esta formulación parte de la ecuación general para pérdida de carga (Ver **Ecuación 3.14**). Debido a que el factor de fricción “f” de la ecuación no se puede despejar fácilmente de la ecuación de Colebrook (**Ecuación 3.14**), mostrada en (Carrier Corporation, 2009) presenta una formulación que es aceptable para sistemas de climatización con temperaturas de 0 a 40 °C y altura de 600 m. Ver **Ecuación 3.16**

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \frac{c^2}{2} * \rho \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$\Delta P$ : pérdida de presión

F: Factor de fricción

L: Longitud del conducto

D: Diámetro interior de la tubería

C: Velocidad dentro del conducto

$\rho$ : densidad del aire

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left[\frac{\varepsilon}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}}\right] \quad \text{Ecuación 3.15}$$

F: factor de fricción

D: diámetro equivalente del conducto

E: rugosidad absoluta (m)

Re: número de reynolds

$$\Delta p = 0.15 * r * \left(\frac{L}{D^{1.22}}\right) * c^{1.82} \quad \text{Ecuación 3.16}$$



$\Delta P$ : pérdida de presión

R: rugosidad de la superficie interior en mm

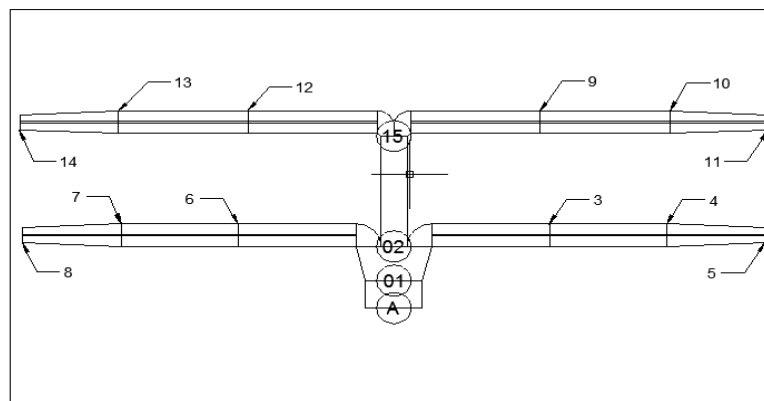
L: longitud del conducto

D: diámetro equivalente del conducto [m]

C: la velocidad del aire en m/s

A partir de la **Ecuación 3.16** se obtuvo los valores de pérdida de carga para el diseño y rediseño del sistema de ventilación. Después de la obtención de estos valores se procedió a corregirlos mediante un factor de corrección para altura, debido a que el proyecto se encuentra en la ciudad de Quito, cuya altura aproximada sobre el nivel del mar es 2800 m y la temperatura máxima de operación del sistema es de 60°C.

Para el diseño antiguo se presentan las siguientes dimensiones para los conductos (Ver Tabla 3.13). Los planos detallados de sistema de ventilación antiguo se encuentran en el Anexo B1 del presente proyecto. A partir de los datos presentados en esta tabla y con caudal de 1.2 m<sup>3</sup>/s se calcula las pérdidas de carga que se muestran en la Tabla 3.14. Cada tramo de conducto se enumeró de acuerdo a como se presenta en la Figura 3.28.



**Figura 3.28: Numeración en el conducto antiguo**

Tabla 3.13: Dimensiones del conducto del diseño antiguo

TRAMO	Lado Corto	Lado Largo	Dimensiones	Longitud	Clasificación
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
A-01	280	600	280x600	0.4	Ducto rectangular
01 a 02	260	800	260x800	0.321	Difusor
02 a 03	260	260	260x260	1.24	Ducto rectangular y codo
03 a 04	260	260	260x260	1.24	Ducto rectangular
04 a 05	180	260	180x260	1.04	Tobera
02 a 06	260	260	260x260	1.24	Ducto rectangular y codo
06 a 07	260	260	260x260	1.24	Ducto rectangular
07 a 08	180	260	180x260	1.04	Tobera
02 a 15	260	280	260x280	1.29	Ducto rectangular
15 a 09	260	260	260x260	1.37	Ducto rectangular y codo
09 a 10	260	260	260x260	1.37	Ducto rectangular
10 a 11	180	260	180x260	1.04	Tobera
15 a 12	260	260	260x260	1.37	Ducto rectangular y codo
12 a 13	260	260	260x260	1.37	Ducto rectangular
13 a 14	180	260	180x260	1.04	Tobera

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Cabe mencionar que el valor de pérdida de carga parte de una velocidad de aproximadamente 7 m/s, cuyo valor es el actual medido para la ejecución del presente proyecto.

A continuación se presentará un ejemplo de cálculo para el conducto en la sección 01 a 02.

A partir del de dato (7 m/s) se supone un caudal de 1.2 m<sup>3</sup>/s y se recalcula la velocidad, obteniendo un valor de 7.14 m/s. Este valor se obtuvo a partir de la ecuación de continuidad  $V = c * S$ . Donde V es el caudal, c es la velocidad del aire y S es el área del conducto.

Tabla 3.14: Valores de pérdida de carga por conducto

TRAMO	Caudal	Velocidad	Pérdida Unitaria	Pérdida Presión	Recup. Estática	Pérdida Parcial	Périd a Total
	(m <sup>3</sup> /s)	(m/s)	(Pa/m)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
A-01	1,2	7,1428	1,31142	0,524589	0	0,524589	0,5245
01 a 02	1,2	5,76923	0,7996	0,256672	10,8191	-10,5625	-10,03
02 a 03	0,3	4,43782	0,94047	4,114209	8,28949	-4,17529	-14,21
03 a 04	0,3	4,4378	0,94047	1,16619	0	1,16619	-13,05
04 a 05	0,3	6,41025	2,31018	2,402594	-13,052	15,45458	2,4075
02 a 06	0,3	4,437869	0,94047	4,114209	8,28949	-4,17529	-1,767
06 a 07	0,3	4,437869	0,94047	1,16619	0	1,16619	-0,601
07 a 08	0,3	6,410256	2,31018	2,402594	-13,052	15,45458	14,853
02 a 15	0,6	8,241758	2,77398	3,578442	-21,132	24,7104	39,563
15 a 09	0,3	4,437869	0,94047	4,236471	29,4214	-25,185	14,378
09 a 10	0,3	4,437869	0,94047	1,288452	0	1,288452	15,666
10 a 11	0,3	6,410256	2,31018	2,402594	-13,052	15,45458	31,121
15 a 12	0,3	4,437869	0,94047	4,236471	29,4214	-25,185	5,9365
12 a 13	0,3	4,437869	0,94047	1,288452	0	1,288452	7,2249
13 a 14	0,3	6,410256	2,31018	2,402594	-13,052	15,45458	22,679
<b>Presión Ventilador</b>							<b>22.68</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Para la pérdida de presión en codos se obtuvo los valores a partir de (Carrier Corporation, 2009).

Siguiendo con el ejemplo se calcula la velocidad para el tramo 01 – 02 a partir de la ecuación de continuidad que ya se mostró anteriormente.  $V = c * S$ . Si  $V = 1.2 \text{ m/s}$  y  $S = 0.26 * 0.8 = 0.208 \text{ m}^2$  y se despeja  $c = V/S$ , entonces se obtiene que  $c = 1.2/0.208$ , con lo que dividiendo aritméticamente se obtiene que  $c = 5.77 \text{ m/s}$ .

Para obtener la pérdida de carga por unidad de longitud se despeja L de la **Ecuación 3.16** y se obtiene:

$$\frac{\Delta p}{L} = 0.15 * r * \left( \frac{1}{D^{1.22}} \right) * c^{1.82} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

De todos estos valores el único que se necesita calcular es el valor de  $D$  que corresponde al valor del diámetro equivalente para un conducto de 260x800 [mm]. El diámetro equivalente se puede calcular mediante la ecuación  $Deq = 1.55 * S^{0.625} / P^{0.25}$ , donde  $S$  y  $P$  son el área u perímetro del conducto respectivamente. En este caso el valor del diámetro equivalente fue igual a  $Deq = 0.481 m$ .

Para completar la ecuación se sustituye el valor de  $r = 0.09 mm$ , para conductos de tol galvanizado y  $c = 5.77 m/s$ , para la velocidad dentro del conducto.

Sustituyendo todos estos valores y evaluando de acuerdo a las operaciones matemáticas en la **Ecuación 3.17** se obtiene que la pérdida de carga por unidad de longitud para el elemento de 01 a 02 es igual a  $\Delta p / L = 0.7996$ . Debido a que la longitud de este elemento es  $L = 0.321 m$ , la pérdida total de carga en la sección 01 a 02 es de  $\Delta p = 0.256 Pa$ . Este es el valor que se pierde en presión por fricción en el elemento mencionado.

A pesar de que existe una pérdida por fricción, también existe una ganancia estática de presión, siempre y cuando se encuentre un aumento en la sección de los conductos. Debido a que este es el caso que se presenta en este ejemplo se procederá a calcular la ganancia o pérdida estática de presión. La también llamada recuperación estática se calcula mediante la relación que se presenta en la **Ecuación 3.18**.

$$P_{est2} = P_{est1} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} * \rho \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Como se sabe la notación para  $c_1$  y  $c_2$  denota la velocidad en el punto 1 (antes del conducto) y punto 2 (después del conducto),  $\rho$  es la densidad del aire, cuyo valor para sistemas de acondicionamiento de aire se puede usar un valor constante de  $1.22 kg/m^3$ . El valor para pérdida de presión estática

en el punto 1 se le asigna el número 01, debido a que se requiere calcular la máxima ganancia de presión en el elemento 01 a 02. Entonces si se reemplaza las velocidades para el punto 1 y 2 con  $c_1 = 7.14 \text{ m/s}$  y  $c_2 = 5.77$ , se obtiene un valor de  $P_{est} = 10.82 \text{ Pa}$ , como se muestra a continuación:

$$P_{est2} = 0 + \frac{(7.14^2 - 5.77^2) \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} * 1.22 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{est2} = 10.82 \text{ Pa}$$

Al mismo tiempo tener en cuenta que el valor es positivo esto quiere decir que se ha logrado una ganancia estática de presión y por lo tanto para obtener el valor total de la pérdida de presión se obtiene restando el valor de pérdida de presión más la ganancia estática. Para el ejemplo en cuestión se obtuvo:

$$P_{total} = \Delta p - P_{est2}$$

$$P_{total} = 0.256 \text{ Pa} - 10.819 \text{ Pa}$$

$$P_{total} = -10.562 \text{ Pa}$$

El valor de presión negativo quiere decir que para el elemento en análisis no existe pérdida de carga debido al cambio de sección que ocurre entre el punto 01 y 02.

Para calcular el valor total de pérdidas de carga en el sistema se equilibra sumando todas las pérdidas a través, de todas, las secciones. Por ejemplo si el sistema constara de las secciones A – 01 y 01 a 02 la pérdida de carga y/o presión del ventilador se calcularía así  $\text{presión ventilador} = 0.525 + (-10.0379)$ .

En vista de que en el último cálculo nos da un valor negativo no se tomará para continuar con el ejemplo.

Una vez obtenido el valor de pérdida de carga total se puede decir que para el sistema de ventilación antiguo se necesita un ventilador con presión igual a  $P = 23 \text{ Pa}$ .

A partir de la simulación se dice que el ventilador es el adecuado para el sistema en cuestión, sin embargo no cumple los requerimientos de abastecimiento de aire para secado de madera.

La velocidad del sistema actual es de aproximadamente 6 m/s con esto se puede concluir que el sistema no necesita una distribución de aire adicional. Sin embargo la cantidad de aire por hora que entrega el sistema de ductos, no es suficiente para cumplir el programa de secado en el tiempo estipulado. Por lo tanto se opta por un rediseño del sistema de ventilación.

El rediseño del sistema de ventilación consta de un codo, cuyas dimensiones son 280x600 mm, una transformación de área inicial  $0.168 \text{ m}^2$  y área final  $0.18 \text{ m}^2$ , un ducto dimensiones 300x600 mm, dos codos regulares sin radio interior de 200x300 mm, dos ductos de 200x300 mm, un codo regular con relación  $R/D=1.0$ , un difusor de área inicial  $0.06 \text{ m}^2$  y área final de  $0.18 \text{ m}^2$ , dos conductos pequeños de 200x300 mm, dos codos regulares ordinarios con relación  $R/D = 0.5$  y dos difusores de área inicial de  $0.06 \text{ m}^2$  y área final de  $0.12 \text{ m}^2$ . Ver planos de detalle en el Anexo B2. También se puede notar en la Tabla 3.15, la enumeración que se asignó para el cálculo de pérdidas de carga.

La selección y sustitución de los ductos en el rediseño se hizo tomando en cuenta los criterios, en la página a continuación:

**Tabla 3.15.- Ductos del rediseño y su numeración.**

TRAMO	Lado Corto (mm)	Lado Largo (mm)	Dimensiones (mm)	Longitud (m)	Clasificación
A-01	280	600	280x600		Codo rectangular
01 a 02'	300	600	300x600		Difusor
02' a 02	300	600	300x600		Codo Rectangular
02 a 03	200	300	200x300		Codo rectangular
03 a 04	200	300	200x300		Ducto rectangular
04 a 05	200	300	200x300		Codo rectangular
05 a 06	200	300	200x300	0.3	Ducto rectangular
06 a 07	200	600	200x600		Difusor
02 a 08	200	300	200x300		Codo rectangular
08 a 09	200	300	200x300		Ducto rectangular
09 a 10	200	300	200x300		Codo Rectangular
10 a 11	200	300	200x300	0.3	Ducto Rectangular
11 a 12	200	600	200x600		Difusor
02 a 13	200	300	200x300		Codo rectangular
13 a 14	300	600	300x600		Difusor

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

- Distribución correcta de aire
- Evitar turbulencias costos de instalación bajos
- Costos de operación bajo
- Lograr envolvente del aire
- Reflexión techo
- Cuerpo negro piso
- Pared fría
- Sistema de des-humidificación saca aire frio
- Mayor control de caudal
- Ventilación dedicada
- Asegura velocidad a través de la pila
- Homogenización del secado
- Proporciona mayor seguridad para cumplir objetivos (secar madera uniformemente).

El cálculo de cargas térmicas se hizo mediante el proceso expuesto por (Carrier Corporation, 2009), tal y como se mostró en el cálculo de pérdidas de carga para el diseño antiguo. La Tabla 3.15 pone en consideración los valores obtenidos en dicho cálculo.

**Tabla 3.16: Pérdidas de carga para el rediseño**

<b>TRAMO</b>	<b>Caudal</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Pérdida Unitaria</b>	<b>Pérdida Presión</b>	<b>Recup. Estática</b>	<b>Pérdida Parcial</b>	<b>Pérdida Total</b>
	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	<b>Pa/m</b>	<b>Pa</b>	<b>Pa</b>	<b>Pa</b>	<b>Pa</b>
<b>A-01</b>	1,22	7,26190	1,3515	4,9763	0	4,9763	4,976316
<b>01 a 02</b>	1,22	6,77777	1,1387	4,5549	4,1461	0,4087	5,385073
<b>02 a 03</b>	0,4066	6,77777	2,1997	15,098	-4,3E-1	15,098	20,48396
<b>03 a 04</b>	0,4066	6,77777	2,1997	4,3994	0	4,3994	24,8834
<b>04 a 05</b>	0,4066	6,77777	2,1997	1,7597	0	1,7597	26,64318
<b>05 a 06</b>	0,4066	6,77777	2,1997	0,6599	0	0,6599	27,3031
<b>06 a 07</b>	0,4066	3,38888	0,4238	0,7629	21,016	-20,253	7,049273
<b>02 a 08</b>	0,4066	6,77777	2,1997	15,098	-4,3E-15	15,098	20,48396
<b>08 a 09</b>	0,4066	6,77777	2,1997	4,3994	0	4,3994	24,8834
<b>09 a 10</b>	0,4066	6,77777	2,1997	1,7597	0	1,7597	26,64318
<b>10 a 11</b>	0,4066	6,77777	2,1997	0,6599	0	0,6599	27,3031
<b>11 a 12</b>	0,4066	3,388889	0,4238	1,2291	21,016	-19,787	7,51551
<b>02 a 13</b>	0,4066	3,38888	0,4238	1,0172	0	1,0172	6,402318
<b>13 a 14</b>	0,4066	2,25925	0,1541	0	3,8919	-3,8919	2,510326
<b>Presión ventilador (Pa)</b>							<b>17,075</b>
<b>Presión por altura (Pa)</b>							<b>11,692</b>
<b>Presión total necesaria (Pa)</b>							<b>28,7</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

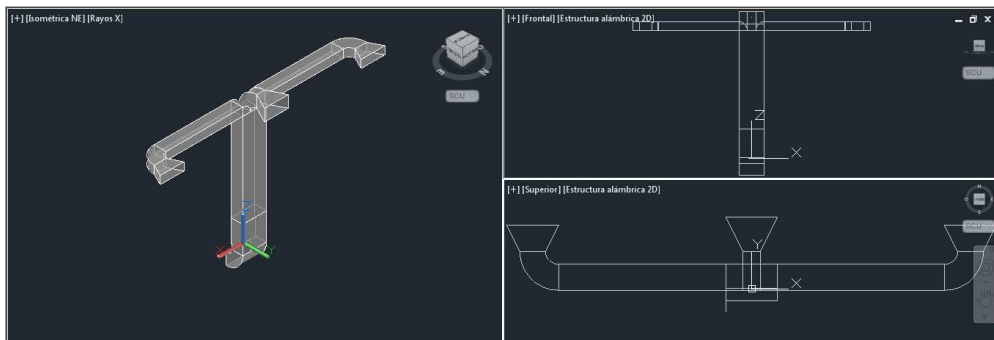
#### 1.1.1.18 Simulación de flujo

Una simulación utiliza métodos numéricos para predecir el movimiento del flujo, este método es conocido como volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos consiste en dividir en partes ínfimas al modelo (diseño en 3D) completo para poder aplicar las leyes de conservación en su forma diferencial y resolverlas por medio de iteraciones (repeticiones consecutivas de un cálculo comenzando con un valor al azar e ir reemplazando el resultado obtenido en la ecuación hasta que el valor final no varíe más del 2% del resultado final). Los métodos iterativos de cálculo tienen que ver con la repetición para ajustar los valores a su cantidad real.



La simulación se realiza en el programa Autodesk Simulation CFD, software que nos permite el ingreso de la configuración en el sistema por medio de un diseño en 3D que venga a partir de programas para diseño CAD.

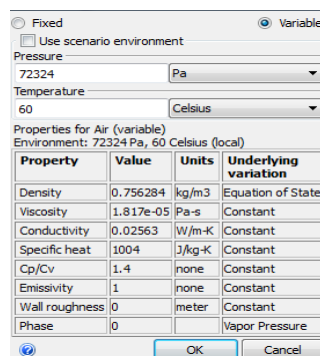
Como ya vio en las secciones anteriores se hizo un rediseño del sistema de ventilación la configuración del mismo se muestra en la Figura 3.29



**Figura 3.29: Rediseño sistema de ventilación**

El material utilizado para la simulación del rediseño del sistema de ventilación fue acero galvanizado.

Las propiedades del aire se escogieron; para temperatura de operación 60 Celsius; para presión de operación, la presión atmosférica. En la ciudad de Quito es de 72324 pascales. Ver Figura 3.30.



**Figura 3.30: Propiedades del aire**

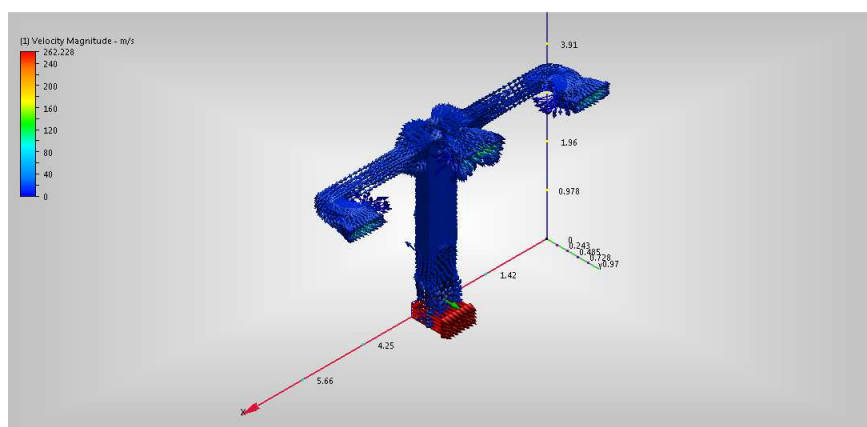
A continuación se presenta los valores para las condiciones de borde en la entrada y salida del sistema.

**Tabla 3.17.- Propiedades de entrada y salida**

TIPO DE SECCIÓN	CAUDAL m <sup>3</sup> /s	ÁREA m <sup>2</sup>	VELOCIDAD m/s
Entrada	43	0.168	255.95
Salida1	14.33	0.12	119.42
Salida2	14.33	0.12	119.42
Salida3	14.33	0.18	79.61

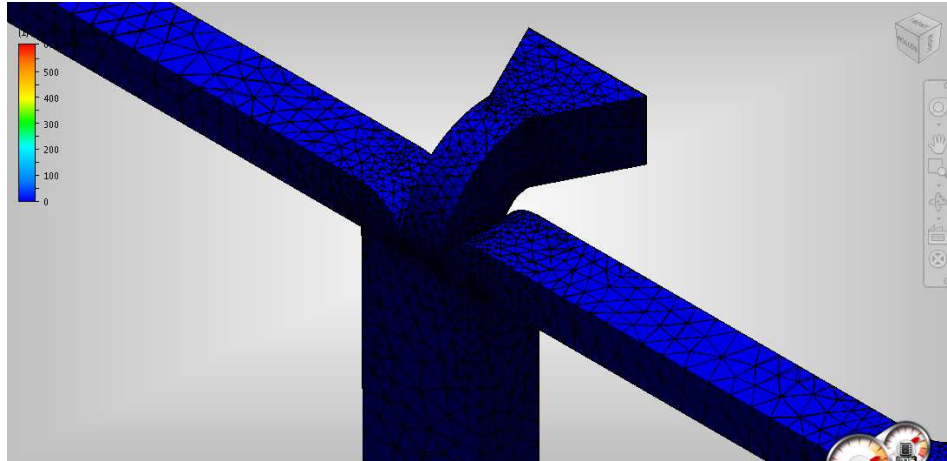
Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Las condiciones iniciales del sistema fueron de presión con valor a cero para las salidas de aire. Ver Figura 3.31



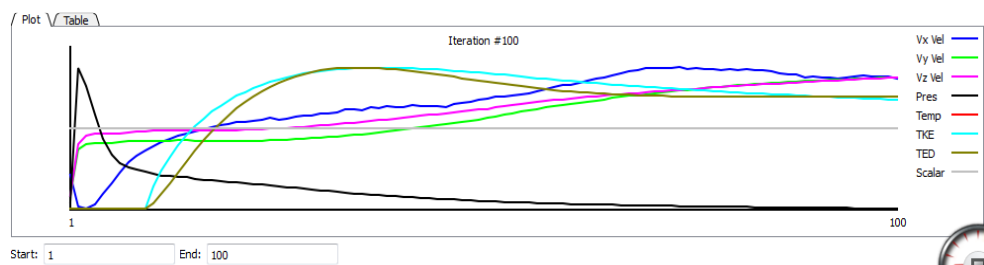
**Figura 3.31: Salidas de aire (rediseño sistema de ventilación)**

El mallado del sistema se hizo con aproximadamente 70000 elementos debido a las limitaciones de hardware. Ver Figura 3.32



**Figura 3.32: Mallado rediseño sistema de ventilación**

El número de iteraciones para obtener los resultados fue la estándar, 100 iteraciones y, debido a que el objetivo de la simulación era ver la distribución correcta de aire dentro del horno no se tomará los datos obtenidos para ningún cálculo, en vez de esto se presentará una gráfico que muestre la variación de presión, temperatura y velocidad por cada iteración. Ver



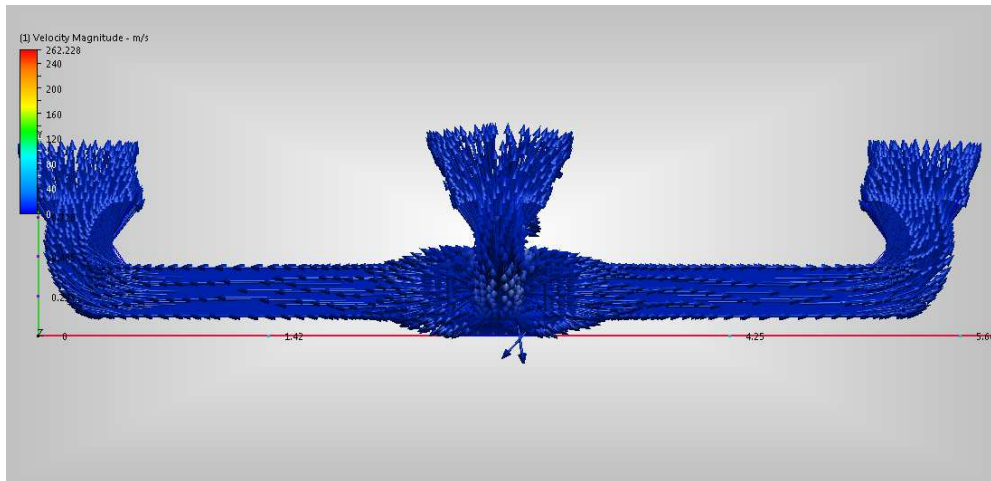
**Figura 3.33: Curvas simulación sistema de ventilación**

#### 3.4.4.12.1. Reporte

- Caída de presión brusca.
- Velocidad en “Y” y “Z” convergen a los mismos valores y son más altas que la velocidad en “X”
- No existe un cambio brusco en la velocidad en “X” luego de la décima iteración.

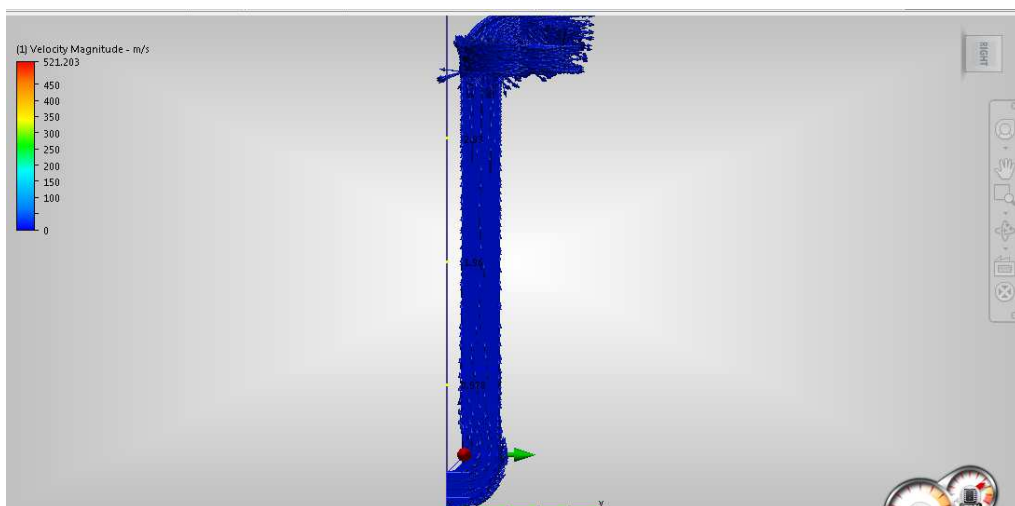
- Las velocidades convergen a un mismo valor.

La distribución de aire dentro de los conductos se da de manera correcta como se puede apreciar en la Figura 3.35

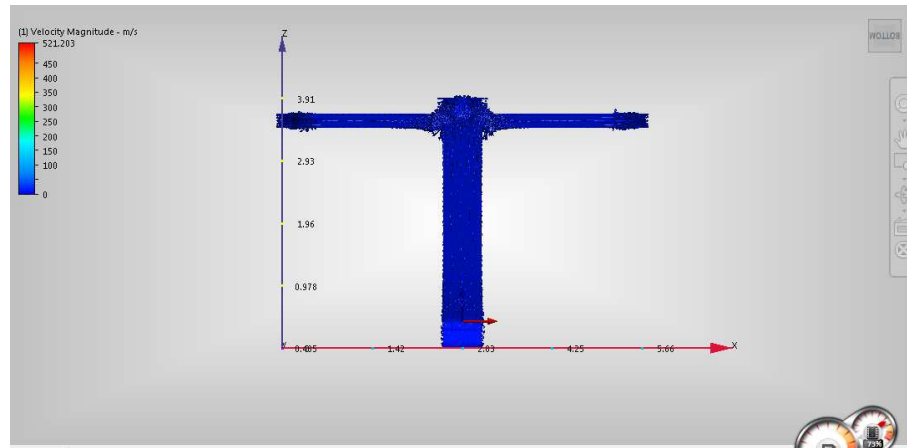


**Figura 3.34: Vista de planta flujo de aire en el rediseño del sistema de ventilación**

Así mismo el ascenso de aire en los conductos verticales se da de manera suave y sin generar turbulencias. Ver Figura 3.36 y 3.37.



**Figura 3.35: Vista lateral simulación rediseño sistema de ventilación**



**Figura 3.36: Vista trasera simulación rediseño sistema de ventilación**

A partir de estos datos gráficos se puede decir que el diseño se encuentra en perfectas condiciones. Además de esto cabe mencionar que la selección del diseño presentado se hizo de 4 opciones diferentes las cuales son presentadas en el informe “Simulación del sistema de ventilación” expuesto en el Anexo D1.

### 3.4.5 REDISEÑO SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN

El diseño de una red de tubería requiere el conocimiento de tres valores de variables como el diámetro de la tubería, el caudal, la longitud de la tubería y la pérdida de carga. Dependiendo, de cuáles, de estos valores se conozca, se utiliza un método para la resolución y diseño del sistema. En el proyecto actual el único valor desconocido es la pérdida de carga.

La pérdida de carga se puede calcular de algunas formas entre las más comunes se tiene a la ecuación de Darcy. Ver **Ecuación 3.19**

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * c^2 * \rho \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Siendo:

$\Delta p$ : pérdida de presión

F: factor de fricción

L: longitud de la tubería

D: diámetro interior de la tubería

C: velocidad dentro de la tubería

P: densidad del agua

El valor conflicto en esta ecuación es el factor de fricción, cuyo valor se calcula de acuerdo a diferentes correlaciones como se mostró en el rediseño del sistema de ventilación. A pesar de esto Hazen- Williams, presenta una solución más práctica para el problema y viene dado por la **Ecuación 3.20**.

$$\Delta p = 6.819 * L * \left(\frac{C}{C}\right)^{1.852} * \left(\frac{1}{D}\right)^{1.167} * \left(\rho * \frac{g}{gc}\right) \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Donde

C: es un factor de rugosidad,

G: aceleración de la gravedad y,

Gc: es un factor de conversión.

Cabe mencionar que en dicha ecuación todas las dimensiones deben estar en el mismo sistema (sistema inglés o sistema internacional). A continuación se presenta el cálculo de pérdidas totales para todo el sistema.

Cabe mencionar que con un valor de 32.69 Pa para pérdidas de presión y 0.3 bar para los rociadores se tiene un total de 30429.2 Pa, es decir una bomba de  $\frac{1}{4}$  de HP será suficiente para el sistema. Tomar en cuenta que la presión del agua potable es de 90 PSI máxima y 60 PSI mínima.

Tabla 3.18: Pérdidas de presión para el diseño antiguo

TRAMO	CAUDAL m <sup>3</sup> /h	VELOCIDAD m/s	PÉRDIDA TOTAL kPa
A-R1	1,05217334	1.5	9.78
R1-R2	0,52608667	0.74	1.87
R2-R3	0,17536222	0.25	0.22
R3-R4	0,17536222	0.25	0.22
R1-R5	0,52608667	0.74	3.4
R5-R6	0,17536222	0.25	0.19
R6-R7	0,17536222	0.25	0.19
B-R8	1,05217334	1.5	15.18
R8-R9	0,35072445	0.5	0.8
R9-R10	0,11690815	0.5	0.8
<b>Presión Bomba</b>			<b>32.69</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

El valor de caudal a la entrada de la tubería se calculó a partir de los datos obtenidos del siguiente experimento.

Se obtuvo un balde vacío, mismos en los que viene la pintura, luego se lo ubicó en cuatro marcas. Después de marcar el balde se procedió a llenarlo y tomar el tiempo para cuando llegue a cada una de las marcas designadas. Este experimento generó los siguientes datos:

Tabla 3.19: Cálculo de caudal de ingreso

Diámetro interior (m)	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo (s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0,305	0,073061664	0,227	0,016585	49,07	0,000337
0,305	0,073061664	0,25	0,01826542	62,53	0,000292
0,305	0,073061664	0,273	0,01994583	71,19	0,000280
0,305	0,073061664	0,296	0,02162625	83,56	0,000258
<b>Total (m<sup>3</sup>/s)</b>					<b>0,000292</b>
<b>Total (m<sup>3</sup>/h)</b>					<b>1,052173</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

A partir de estos tres datos se calculó el caudal, obteniendo los valores que se muestran en la Tabla 3.18y se sacó un promedio de todos los datos para utilizarlo en el cálculo de pérdidas de carga del diseño antiguo.

El sistema se divide en tres ramales principales, cada uno de estos tiene notaciones para cada sección de tubería. En cada una de estas secciones o tramos se calcula un caudal individual. Por ejemplo para la sección A-R1 el caudal es el total entregado, mientras que para la sección R1 - R2, el valor del caudal es de la mitad del calculado, debido a que la tubería se divide en dos ramales principales. Y así sucesivamente. Para notar este cambio revisar los planos de diseño del sistema de humidificación presentados en el Anexo B1.

Tomar en cuenta que el diámetro para el cálculo de pérdidas de presión es el diámetro interno de la tubería. Consultar [14]. Para tubería de ½ NPS, y PVC el diámetro es 0.622 [plg] y en milímetros 15.79 [mm].

El valor de presión para el diseño antiguo es  $P_{total} = 32.69 Pa$ . Cabe mencionar que el sistema de humidificación no posee bomba, el abastecimiento del mismo es a partir del agua potable que viene de la red metropolitana.

Además el diseño antiguo se componía de los siguientes elementos:

- 7 T de 1/2" NPT
- 3 válvulas de compuerta de ½" NPT
- 15 codos de 1/2" NPT
- Tubería de PVC ½" NPT.

La configuración actual del sistema presenta una inconsistencia que no está ubicada uniformemente a las pilas de madera, además de no contar con rociadores de agua.



El flujo de agua que se entrega es a temperatura ambiente, esto quiere decir en verano 20°C y en invierno 14°C.

Para obtener los valores de presión en cada boquilla del sistema se procedió a simular el mismo. El plano P&ID mostrado en el Anexo B1 puede dar a entender mejor la configuración del sistema. La presión y caudal de salida para cada boquilla se encuentra en la Tabla 3.20

**Tabla 3.20: Presión y caudal, sistema de humidificación (Diseño Antiguo).**

Boquilla	Descripción	Presión (kPa)	Caudal L/s
01	Entrada	620	0.3
02	Entrada	620	0.3
03	Salida	60.66	0.15
04	Salida	48.456	0.05
05	Salida	28.325	0.05
06	Salida	50.66	0.15
07	Salida	45.826	0.05
08	Salida	35.333	0.05
09	Salida	70.83	0.15
10	Salida	45.362	0.05
11	Salida	30.362	0.05

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

De acuerdo a las presiones expuestas en la sección anterior y, la cantidad máxima de agua necesaria, debido a las condiciones ambientales de la ciudad de Quito, se selecciona aspersores de 0.3 bar de operación.

Los aspersores fueron selecciones de acuerdo a la NFPA 13 (National Fire Protection Association: Sprinkler Systems).

Con todos los datos obtenidos se procedió al rediseño del sistema de humidificación que entrega agua a un caudal 1.05 m<sup>3</sup>/s a temperatura de 40°C. El procedimiento y partes del nuevo sistema se encuentran en el Anexo D1: Informes (Rediseño del sistema de humidificación).

### **3.4.6 SISTEMA DE CONTROL Y REGISTRO**

El primer paso y, más importante, para el funcionamiento del sistema de control y registro es la selección de los instrumentos de medición.

#### **1.1.1.19 Selección de instrumentos de medición**

Los instrumentos de control que se utilizaran para controlar el proceso de secado son los enunciados en las siguientes secciones.

##### **1.1.1.19.1 Temperatura**

Para la medición de temperatura lo más común es usar una termocupla. De acuerdo a las investigaciones realizadas y a la consulta a expertos en el tema y, bibliografía correspondiente, se escogió un termómetro digital de marca RADIANCE. Se eligió esta marca porque es la más confiable según los expertos

El catálogo completo de dicho sensor se encuentra en el Anexo D2, a continuación, en la Tabla 3.21, se presenta un resumen de sus características.

Además se adquirió un instrumento para medición de temperatura superficial para controlar el sistema de calentamiento. Este es de marca OSAKA y su catálogo se encuentra en el Anexo D1.

**Tabla 3.21: Características termómetro digital**

<b>Código</b>	<b>134604</b>
<b>Referencia</b>	RT - 803
<b>Dimensión</b>	63X63X15 mm
<b>Rango temp. Sensor interno</b>	-10 a 50 °C (°F)
<b>Rango temp. Sensor externo</b>	-50 a 70 °C (°F)
<b>Resolución</b>	+1 °C
<b>Longitud extensión sensor</b>	3 m
<b>Otras funciones</b>	Alarma temperatura alta y baja
<b>Otras características</b>	Fijación adhesiva o magnética
<b>Alimentación</b>	Batería 1.5V tamaño AAA
<b>Marca</b>	RADIANCE

**Fuente:** Termómetros digitales fijos RT – 803 Catálogo en español

#### 1.1.1.19.2 Humedad relativa

Para la humedad relativa se utilizó un psicrómetro. El psicrómetro con marca FULL GAUGE, cuyas especificaciones se encuentran en el catalogo Anexo D2. Cabe mencionar que este es un sistema completo para medición de humedad con rango de temperatura entre 0 a 100 Celsius.

#### 1.1.1.20 Adquisición de instrumentos de medición

La adquisición de instrumentos se realizó mediante el proceso de compras regular que posee PROMARA CIA. LTDA. Este procedimiento demoró dos semanas ya que se debía escoger al mejor proveedor de los equipos solicitados. Los instrumentos son de marca americana y se calibraron para trabajar a las condiciones de altura que se encuentra la ciudad de Quito.

## 1.2 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

*La limpieza y el orden, parámetros fundamentales para un correcto funcionamiento.*

### **3.4.7 MANTENIMIENTO**

El programa básico de mantenimiento se encuentra en el Anexo D1.

El mantenimiento es general y se notan el ciclo de limpieza y calibración de equipos. Cabe mencionar que la calibración se realizará de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

### **3.4.8 OPERACIÓN**

La regulación del proceso se realizara de manera manual, mientras se vaya ganando experiencia en el secado.

El proceso de secado y sus parámetros de funcionamiento se muestran mediante un diagrama de flujo expuesto en el Anexo D1.

## **4 IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

La implementación de sistemas pertenecientes al horno de secado de madera, con corte de tabloncillo perteneciente a la empresa PROMARA CIA. LTDA, se da de acuerdo a recomendaciones técnicas consultadas en la bibliografía y normas correspondientes.

### **4.1 ADECUACIONES DE INFRAESTRUCTURA**

Las adecuaciones de infraestructura son pequeños cambios que se realizaron para mejorar el rendimiento del horno y evitar su completo deterioro al pasar del tiempo.

#### **4.1.1 RECUBRIMIENTO DE PAREDES**

Para el recubrimiento de paredes se utilizó cuatro planchas de acero galvanizado para evitar la difusión de vapor de agua a través de las paredes.

#### **4.1.2 RECUBRIMIENTO DE PISO**

Al igual que las paredes el piso se cubrió con una lámina de tol galvanizado de 0.5 mm de espesor, la cual se pintó de color negro para atraer el calor hacia dicha superficie y que cree una envolvente de aire hacia las pilas de madera. La lámina tiene dimensiones de 2.5x2.5 m se encuentra debajo de cada pila de madera.

#### **4.1.3 ADECUACIÓN DE CÁMARA DE SECADO**

Para la adecuación de la cámara de secado se hizo una limpieza total del techo donde se encontraban escombros, además se creó un

deslizamiento para que el agua pueda circular sin quedarse estancada en el mismo.

En la adecuación de la cámara también se recubrió las columnas de acero negro para evitar corrosión. Lo primero que se hizo fue un granallado (lijado con lija gruesa) y pintura. Además se instaló una pared compuesta para la evitar la corrosión, esta consta de una cubierta de tol galvanizado; por encima de ella se colocó una tabla de madera de dimensiones 15x30 cm de sección transversal y 3.5 m de alto y por último; por encima de esta cubierta de madera se instaló otra lámina de tol con espesor de 0.5 mm y dimensiones de 100x100 (mm).

Las láminas de tol se sujetaron pernos a través de la pared, uno en cada esquina y un final en el medio de la plancha. En la parte posterior de la pared para lograr mayor sujeción se puso una platina acero negro ASTM A36 de 2 mm de espesor.

La sujeción de la madera y las dos láminas de tol en las columnas se sujetaron mediante una junta empernada.

Para las láminas del piso no se utilizó sujeción alguna, debido a que estas se sujetan con el peso de la madera.

Para finalizar hay que mencionar que, antes de todos los trabajos de instalación se hizo una nivelación de las paredes (enlucido) del horno debido a las irregularidades del ladrillo.

#### **4.1.4 REINSTALACIÓN DE PUERTA DE ACCESO**

Como ya se sabía las puertas de acceso son de configuración hueca dentro de dos láminas de tol galvanizado, dentro de estas se colocó una

plancha de espuma flexible, la cual es de bajo costo y en cierta proporción reduce las pérdidas de calor hacia los alrededores.

## **4.2 MONTAJE DE EQUIPOS**

El montaje y sujeción de equipos, tubería, conductos y accesorios, según sea el caso, es de vital importancia para el correcto funcionamiento del horno de secado de madera de la empresa, ya que su correcta instalación proporcionará seguridad de operación, eliminando vibraciones y ruidos.

### **4.2.1 SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN**

#### **4.2.1.1 Instalación de tuberías**

Las tubería de 1" y ½ " con material PVC de conexión a la bomba e ingreso al horno va enterrada.

La tubería de conexión desde la bomba hasta el calentador, debido a que es tubería de hierro - galvanizado para soportar esfuerzos mecánicos por manipulación, por lo general tiene alto espesor y no requiere sujeciones debido a su alta resistencia mecánica.

La tubería de cobre que se encuentra dentro del horno de secado de tabloncillo y que se usa para la humidificación debe ir sujeta con apoyos simples para la tubería principal, formados de ángulos de acero comercial de 2 mm de espesor; estos tienen que formar un ángulo recto con la pared de sujeción y la tubería debe ir asentada en su punto inferior (bottom), y con U-bolts para la tubería de distribución. Recordar que el extremo de esta tubería no debe estar sujeta ni rigidizada para permitir la dilatación del material.

#### **4.2.1.2 Instalación de soportes**

Los soportes para la tubería principal son de tipo triangular y deben tener los requerimientos de instalación mencionados en la sección anterior. Para la evitar el movimiento transversal se debe instalar soportes tipo U-BOLT por cada metro de tubería.

Los soportes para la tubería ascendente de cobre deben tener una conexión directa a la pared mediante TACO FISHER y perno con rosca métrica adecuado para el U-BOLT

#### **4.2.1.3 Instalación de aspersores**

Los aspersores van conectados mediante un adaptador SO para tubería de cobre con rosca unificada de 1/2 NPT en la tubería de cobre.

#### **4.2.1.4 Instalación de calentador de agua**

El calentador de agua debe estar sobre suelo completamente aislado mediante una capa de hormigón.

La conexión de tuberías a la entrada y salida del equipo deben ser de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

#### **4.2.1.5 Instalación de la bomba**

La bomba debe tener, al igual que el calentador, un aislamiento en el suelo para evitar y amortiguar las vibraciones, de esta manera se evita roturas de tubería.



Así mismo las conexiones deben darse siguiendo las instrucciones del fabricante. Tomar en cuenta que como regla general para la succión o descarga de la bomba se colocan reducciones excéntricas para evitar que burbujas de aire, entren o salgan del sistema. Es recomendable que las conexiones sean soldadas.

#### **4.2.1.6 Instalación de válvulas**

Para la instalación de válvulas se debe tener muy en cuenta la inclinación de la tubería dependiendo si estas son de regulación de caudal o desfogue sea cual sea el caso se deben colocar con completa horizontalidad u verticalidad, según corresponda.

Para válvulas de bola de apertura y cierre total, tomar en cuenta el espacio de instalación. Para válvulas de purga de aire se debe instalar con una inclinación, para la tubería, de 2%.

El tipo de válvula de válvula conectado se realizó dependiendo de la ubicación y tubería utilizada por ejemplo para el tramo de 1" con tubería de PVC no se utiliza válvula, debido a que el tanque de suministro tiene una válvula de apertura y cierre, y además está siempre debe estar abierta para evitar daños en la bomba. Para el tramo que se encuentra entre la bomba centrífuga y el calentador se debe instala una válvula check, para evitar el retorno del flujo, y, seguidamente una válvula de bola para abrir o cerrar el paso del flujo. En el tramo de tubería de 1" con material PVC, que se encuentra después del calentador se utilizó una válvula de compuerta para emergencias y antes del bushing que permite el cambio de tubería de 1" a 1/2" se instaló una aguja que permite regular el flujo de agua.

Debido a que las válvulas son de conexión roscada no olvidar hacer su conexión mediante teflón para evitar fugas.

## **4.2.2 SISTEMA DE DES-HUMIDIFICACIÓN**

### **4.2.2.1 Instalación de rejillas de ventilación**

Las ventilas de des humidificación son tres como se pudo apreciar en el capítulo del rediseño. Estas ventilas van empernadas a la pared, donde se instaló un TACOS FISHER según el diseño para la sujeción de la ventila.

Las ventilas son de 200x600 (mm) de área, tomando en cuenta esto se cree que con tres pernos en los largos y dos pernos en los lados es suficiente sujeción. Revisar que la separación de los pernos sea equidistante.

### **4.2.2.2 Instalación de extractores de aire**

Los extractores de aire se instalan en las ventilas antiguas del horno, cuya ubicación es encima de las puertas. Estas ventilas son de 100x100 (mm), en este caso se debe solicitar a un maestro albañil las recomendaciones adecuadas para su sujeción. Como lógica principal se puede decir que vayan empotradas. Al igual que la mayoría de los equipos estas deben ser totalmente paralelas al piso y no tener inclinación en ningún sentido.

## **4.2.3 SISTEMA DE VENTILACIÓN**

### **4.2.3.1 Desinstalación de ductos antiguos**

La desinstalación de los ductos se deberá realizar desde el ducto exterior que es el de difusión hasta el interior del horno. No es necesario desarmar todo el ducto, si se puede sacar en conjunto este sistema, se recomienda hacerlo.

#### **4.2.3.2 Reparación de canales para ductos**

La reparación de los canales donde se colocaban los ductos antiguos es de vital importancia ya que estos espacios vacíos pueden traer estancamiento de aire, además son el soporte para las pilas de madera. Este es un trabajo de mampostería por lo que se debe contratar un experto para lo mismo.

#### **4.2.3.3 Instalación de ductos**

Los ductos viene prefabricados tal y como se requirió en el diseño, sin embargo hay que tomar en cuenta que estos están formados por una plancha de acero galvanizado que forma una U (3 lados) y una plancha de acero galvanizado plana que se sujeta a esta U por medio de dobleces realizados al ducto.

Referirse a los planos de diseño para saber la ubicación correcta de cada una de las piezas del sistema de ventilación

#### **4.2.3.4 Instalación de soporte para ductos**

Debido a que es un ducto ascendente se debe colocar en la parte inferior un soporte de hormigón.

Los soportes verticales deben tener un amortiguamiento para evitar deformación del conducto por vibraciones debido a las altas velocidades de aire que se presentan dentro del mismo.

Los soportes de los conductos superiores van empernados a la loza, en este caso hay que lograr una penetración completa de la misma para que se puedan sujetar por la parte superior del horno.

#### **4.2.3.5 Instalación del ventilador**

El ventilador debe estar sujeto a una estructura metálica. Esta estructura puede ser la antigua. Debido a su configuración se debe colocar la boca de succión para donde se crea que ingresaran menos partículas de polvo y el motor que genera el movimiento debe situarse en una posición donde exista mayor ventilación para evitar su recalentamiento.

#### **4.2.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN**

Debido a que los equipos son digitales y para control temporal de las variables que influyen en el proceso de secado no deben tener una sujeción permanente, más bien, estos deben estar protegidos de agentes corrosivos y dañinos como el polvo y la lluvia. Es recomendable que se cree un pequeño cuarto para instalar este tipo de equipamiento.

##### **4.2.4.1 Instalación de termómetros**

Se ubicó los sensores de temperatura cerca de las paredes o de las puertas debido a que estos lugares son los más fríos del horno y en este caso se mediría la temperatura mínima.

##### **4.2.4.2 Instalación del psicrómetro**

Se colocó el psicrómetro donde no exista una corriente de aire muy fuerte para que no se distorsione la medida. Un lugar estratégico para la medida de humedad relativa es a la salida de las ventilas de des-humidificación.

#### **4.2.4.3 Instalación de manómetros**

La instalación de manómetros se hizo en la tubería de ingreso al horno para cada ramal de distribución. Además se instaló un control de presión y temperatura a la salida del calentador de agua. Esta debe ser monitoreada constantemente debido a que puede variar por el uso en distintas localidades.

### **4.3 ANÁLISIS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

En análisis y pruebas de funcionamiento se hizo por fases, primero se revisó el sistema, sin energía eléctrica, que el cableado, las conexiones de ductos y de tuberías estén de acuerdo a los diagramas realizados en la ingeniería de detalle (pre-comisionado); segundo se revisa todos los sistemas una vez energizado el proyecto. En esta parte del proyecto se hace una inspección mediante los sentidos, es decir revisar fugas, detectar sonidos extraños o vibraciones, detectar irradiaciones de calor u olores extraños en el sistema (fuga de combustible); tercero y último se comienza con el proceso de secado. Para esto se coloca un atado de madera, se conectan los sensores y se deja el proceso avance según y cómo estaba diseñado.

#### **4.3.1 PRE-COMISIONADO**

El pre-comisionado trata de que todos los equipos, y accesorios estén conectados de acuerdo a los diagramas del diseño.

Los principales sistemas a revisar son:

- El cableado eléctrico,
- La tubería de agua y,

- Los conductos

### **4.3.2 COMISIONADO**

En el comisionado se revisó que el valor de las variables que se están midiendo (presión, temperatura y humedad relativa) sean las adecuadas de acuerdo al diseño. Además de esto se debe hacer una inspección visual de todos los sistemas.

#### **4.3.2.1 Cuarto de máquinas**

En el cuarto de máquinas se revisó mediante instrumentos de medición como manómetros y termómetros que los equipos se encuentren funcionando dentro de su rango de operación establecido por el fabricante.

#### **4.3.2.2 Cámara de secado**

En la cámara de secado se realizó una inspección para determinar que no haya no haya fugas de aire a través de puertas o sistemas de expulsión de aire antes de ser abiertos.

### **4.3.3 PUESTA EN MARCHA**

#### **4.3.3.1 Lector de temperatura**

La primera lectura del termómetro digital que se leyó es la temperatura ambiente.

#### **4.3.3.2 Lector de presión**

La presión es un poco discrepante en ductos, a más que no existen conectados sistemas de medición no es de gran importancia, pero en el sistema de humidificación se debe verificar que la presión de ingreso sea mayor a 60 PSI, para el sistema de abastecimiento de agua potable.

Es importante medir también la presión a la salida de la bomba y la presión a la salida del calentador de agua. La presión a la salida del calentador de agua no debe exceder la acordada en el diseño o la expuesta por el fabricante.

#### **4.3.3.3 Lectura de humedad en el aire**

Es un poco complicado saber si la humedad del aire que mide el psicrómetro es la adecuada, debido a esto debe tenerse a mano, la predicción meteorológica de esa fecha o de fechas anteriores con las mismas condiciones y así mismo se recalca que la primera medida que se leyó es la humedad del ambiente.

#### **4.3.3.4 Lectura de humedad en la madera**

La lectura de humedad en la madera se puede comparar, midiendo la humedad, a partir de la misma troza, mediante el método gravimétrico (por pesos), pero debido a la experiencia que tiene la gente que labora en este recinto industrial no es necesaria. La humedad de entrada de la madera al horno estará por lo general entre 30% y 40%.

## **5 ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO**

El análisis económico y financiero es una de las partes más importantes del proyecto debido que a partir de estos valores se hace una evaluación del mismo. Una evaluación del proyecto consta del cálculo del beneficio costo que este proporcionó, además del valor actual neto del proyecto y de la rentabilidad del mismo.

### **5.1 ANÁLISIS ECONÓMICO**

El análisis económico parte de los costos actuales de materiales, equipos, mano de obra y servicios obtenidos.

#### **5.1.1 COSTOS DE MATERIALES**

El costo de materiales y equipos se obtuvo partir del proveedor seleccionado al inicio del proyecto. En la segunda parte del presente informe se mostró las alternativas para proveedores y su selección.

##### **5.1.1.1 Tubería**

La fabricación estándar de tubería se hace con tubos de 6m, por esta razón el precio comercial de tubería se expende de esa forma. En la Tabla 5.1 se expone los valores unitarios para el costo del proyecto.



Tabla 5.1: Costo de tubería

Descripción	Costo Unitario (\$/m)	Longitud total (m)	Costo total
Tubería de PVC 1" NPT	3,05	10	\$30,05
Tubería de PVC 1/2" NPT	1,28	20	\$25,6
Tubería de Hierro – galvanizado 1".	5,82	4	\$23,29
Tubería tipo M Cu 1/2"	3,91	10	\$ 39,10
Tubería tipo M Cu 3/4"	6,75	20	\$ 135,00
<b>Total costos Tubería</b>			<b>\$253.04</b>

Fuente: Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

### 5.1.1.2 Accesorios de tubería

Consta como accesorio de tubería todo elemento que sirva para unir la tubería sea esta, de cualquier dimensión y material.

Tabla 5.2: Costo accesorios de tubería

Descripción	Costo unitario (\$/unidad)	Cantidad (unidad)	Costo total
Codo 1/2" NPT PVC	0,36	6	\$2,16
T 1/2" NPT PVC	0,43	3	\$1,29
Codo 1" NPT PVC	1,16	6	\$6,96
T1" NPT PVC	1,38	2	\$2,76
Bushing de 1" a 1/2"	0,89	3	\$2,67
Codo 1" NPT Hierro-Galvanizado	2,32	4	\$9,28
T1" NPT Acero	2,90	1	\$2,90
Conexión tipo Hembra 1/2" PVC a Cu	1,70	3	\$5,1
<b>Costo Total Accesorios</b>			<b>\$31.12</b>

Fuente: Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

### 5.1.1.3 Válvulas

El precio de la válvula depende de su función y fabricación, además de la demanda que esta posee en la industria. A continuación, en la Tabla 5.3 se muestra los valores para cada tipo de válvula utilizada en el presente proyecto.

**Tabla 5.3: Costo de válvulas**

Descripción	Costo Unitario (\$/unidad)	Cantidad (unidad)	Costo Total
Válvula check 1" NPT	26,79	1	\$26,79
Válvula de bola 1" NPT	10,27	2	\$20,54
Válvula de compuerta 1" NPT	26,34	2	\$52,68
Válvula de aguja 1/2" NPT	33,25	1	\$33,25
<b>Costo Total Válvulas</b>			<b>\$133,26</b>

**Fuente:** Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

- Válvula de aguja 1/2" NPT para regulación del flujo dentro del horno.
- Válvula de compuerta 1" NPT para mantenimiento o emergencia.
- Válvula de bola 1" NPT para cierre hermético o apertura y cierre, mantenimiento y emergencia.

### 5.1.1.4 Ductos

Los ductos para el sistema de ventilación se fabricaron de acero galvanizado tal y como se mostró en la sección de diseño del presente informe. El costo para fabricación de conductos se da por peso, en el comercio ecuatoriano.

**Tabla 5.4: Costo para construcción de ducto (Acero Galvanizado)**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (unidad)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Costo Unitario (\$/kg)</b>	<b>Costo total</b>
<b>Codo 280x600</b>	1	3,0345	3,30	\$10,03
<b>Transformación 300x600</b>	1	4,7779	3,30	\$15.79
<b>Ducto rectangular 300x600</b>	1	16,641	3,30	\$54.91
<b>Codo ordinario sin radio interior 200x300</b>	2	0,6148	3,30	\$4,06
<b>Ducto rectangular 200x300</b>	2	7,5674	3,30	\$50,00
<b>Ducto rectangular 200x300</b>	2	1,175	3,30	\$7,76
<b>Codo regular 200x300</b>	2	1,8457	3,30	\$12,18
<b>Codo regular 300x200</b>	1	1,8457	3,30	\$6,09
<b>Difusor 200x600</b>	2	1,6226	3,30	\$10,71
<b>Difusor 300x600</b>	1	2,3439	3,30	\$7,73
<b>Costo Total Ductos</b>				<b>\$179,26</b>

**Fuente:** EQUIPROIN (Av. Santa María E4-114 y 9 de Octubre)

## 5.1.2 COSTOS DE EQUIPOS

Los equipos instalados y adquiridos para los distintos sistemas fueron obtenidos de acuerdo a los requerimientos presentados en la parte del diseño y sus proveedores y marcas fueron elegidas según los parámetros establecidos en el capítulo de análisis y selección de alternativas.

### 5.1.2.1 Bomba

La bomba adquirida es de marca "PAOLO", cuyo proveedor es el llamado COMERCIAL MASTER 2, ubicado en la Av. De la Prensa y Fernández Salvador (Quito - Ecuador). Cabe mencionar que este tipo de equipos se puede encontrar en cualquier ferretería que conste con accesorios para abastecimiento de agua.

Tabla 5.5: Costo bomba de agua

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Bomba centrífuga 1/2 HP	1	56,00	56,00

Fuente: Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

### 5.1.2.2 Ventilador

El ventilador centrífugo de marca AETHER, se lo obtuvo del proveedor EQUIPROIN, cuya ubicación está en la Av., Santa María y 9 de octubre. Cabe mencionar que el flujo de aire requerido para el proceso fue de 1635 CFM, por lo que se adquirió un ventilador, cuyo rango nominal de caudal está entre 1600 y 2500 CFM. El valor comercial, expuesto en la Tabla 5.6, incluye los impuestos de ley.

Tabla 5.6: Costo Ventilador centrífugo

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Ventilador centrífugo 1/2 HP 1600 - 2500 CFM	1	356,78	\$356,78

Fuente: EQUIPROIN (Av. Santa María E4-114 y 9 de Octubre)

### 5.1.2.3 Calentador de agua

El calentador de agua (marca BOSH), fue expendido por el COMERCIAL MASTER 2. Los valores expuestos en la Tabla 5.7, incluyen los impuestos de ley.

Tabla 5.7: Costo calentador de agua

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Calentador de agua 230 BTU/h	1	436,08	\$436,08

Fuente: Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

#### 5.1.2.4 Tanque para almacenamiento de agua

El tanque de almacenamiento de agua es de material plástico debido a que se intenta reducir costos en la adquisición de equipos. Además su función es solamente la de mantener el nivel de agua en un valor determinado por la ingeniería de básica. Este dispositivo no trabaja a presión. En la Tabla 5.8 se muestra el costo total del tanque.

**Tabla 5.8: Costo tanque almacenamiento agua**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Tanque de plástico 55 GLS.</b>	1	50,00	\$50,03

**Fuente:** Comercial Master 2 (Av. La Prensa y Fernández Salvador)

#### 5.1.2.5 Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición fueron exportados por VAININDUSTRIAL ecuador y se venden calibrados para su funcionamiento en Quito.

**Tabla 5.9: Costo equipos de medición**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Termómetro digital marca RADIANCE</b>	1	50,41	\$50,41
<b>Termómetro infrarrojo marca CEM</b>	1	230,22	\$230,22
<b>Psicrómetro marca FULL GAUGE</b>	1	537,60	\$537,60
<b>Cable de extensión para termómetro</b>	10 m	5,43	\$54,30
<b>Cable de extensión para psicrómetro</b>	10 m	7,87	\$78,70
<b>Costo Total Instrumentos</b>			<b>\$ 951,23</b>

**Fuente:** VAINSDUSTRIAL ([www.viaindustrial.com.ec](http://www.viaindustrial.com.ec))

### 5.1.3 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Debido a que en el presente proyecto no se realiza procesos de fabricación, la respectiva implementación de sistemas requiere de mano de obra especializada para su montaje y pruebas de funcionamiento.

#### 5.1.3.1 Mano de obra

El costo de obra se obtuvo de proyectos anteriores realizados en la empresa, aplicándoles un factor de seguridad, de acuerdo al año, al cual pertenece el dato adquirido. Estos valores se corroboraron en la implementación de los sistemas correspondientes.

**Tabla 5.10: Costo mano de obra**

<b>Descripción</b>	<b>Horas de trabajo (h)</b>	<b>Costo unitario (\$/h)</b>	<b>Costo total</b>
<b>Plomero PVC</b>	24	3,30	\$79,20
<b>Albañil</b>	40	2,30	\$92,00
<b>Plomero de cobre</b>	56	3,80	\$212,80
<b>Técnico en calefacción</b>	16	4,50	\$72,00
<b>Técnico en ventilación</b>	24	3,50	\$84,00
<b>Técnico en calentamiento de agua</b>	8	3,50	\$28,00
<b>Ingeniero residente de obra</b>	168	5,00	\$840,00
<b>Costo Total MO</b>			<b>\$ 1.408,00</b>

Fuente: Varios

### 5.1.4 COSTOS DE OPERACIÓN U EXPLOTACIÓN

El costo de explotación u operación se calcula por carga de secado de madera. La carga del horno perteneciente a la empresa es de 2400 tablancillos y se realiza de tres a cuatro veces por año dependiendo de la venta anual de tablancillo.

El costo de explotación del proyecto es uno de los más importantes debido a que repercute en todos los años de funcionamiento que vaya a tener el horno de secado de madera con corte de tablancillo de la empresa PROMARA. CIA. LTDA.

#### 5.1.4.1 Energía

El costo de energía en general define la eficiencia de cualquier sistema específico. En este caso el horno de secado de madera, con corte de tablancillo utiliza dos fuentes de energía. Una fósil y una eléctrica.

##### 5.1.4.1.1 Energía eléctrica

El costo de energía eléctrica parte del valor unitario por kilovatio – hora obtenido de la planilla de luz del mes de diciembre del 2013. Cabe mencionar que este valor es un costo para industrias mas no para residencias.

**Tabla 5.11: Costo de energía eléctrica**

<b>Descripción</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Horas trabajadas (h)</b>	<b>Costo unitario (\$/kW-h)</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Bomba</b>	0,2984	144	0,0728	\$3,12
<b>Ventilador</b>	0,2984	480	0,0728	\$10,42
<b>Calentador</b>	0,067	144	0,0728	\$0,7
<b>Costo Total Energía Eléctrica</b>				<b>\$14,24</b>

**Fuente:** Empresa Eléctrica Quito S.A

##### 5.1.4.1.2 Energía fósil

La energía fósil es aquella que procede de la biomasa obtenida hace millones de años y que ha sufrido grandes procesos de transformación. Es este caso el combustible fósil utilizado fue el diesel. El costo obtenido para el

cálculo fue adquirido del costo de venta al público de cualquier estación de servicio de combustible en el Ecuador.

**Tabla 5.12: Costo de combustible**

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Diesel	330	1.02	\$336.6

Fuente: EP Petroecuador

#### 5.1.4.2 Costos de mantenimiento

Un costo que generalmente no se toma muy en cuenta, en lo que respecta a la realización de proyectos, es el costo de mantenimiento, cuyo valor es muy importante debido a que influye anualmente en el proceso de funcionamiento del horno. Este costo tiene que ser lo suficiente mente bajo como para obtener una rentabilidad adecuada del proyecto al pasar de los años, ya que no sirve de nada tener una inversión inicial baja, si el costo de mantenimiento va a ser demasiado elevado y disminuye las ganancias de la empresa.

**Tabla 5.13: Costo de mantenimiento**

Descripción	Cantidad Horas por carga	Precio unitario (\$/h)	Costo Total
Limpieza	8	2,12	\$16,96
Inspección	20 (1hdiariax20dias)	5,30	\$106,00
<b>Costo Total MTTO</b>			<b>\$122,96</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

Los valores de 8 y 20 se obtuvieron de la siguiente manera:

La limpieza se hace una vez por carga, antes de comenzar el proceso de secado, y esta se demora un día de trabajo es decir ocho horas. Esta tarea la realiza una sola persona con sueldo básico, en este caso para el



2013, \$ 350 dólares americanos, es decir que el valor por hora es de \$2,19 dólares americanos.

La inspección se realiza, en el tiempo de una hora, durante todo el proceso de secado. Para realizar esta tarea se necesita una persona especializada en el control del horno. El costo por hora de este personal es de \$ 5,30 dólares americanos.

## **5.2 ANÁLISIS FINANCIERO**

El análisis financiero es la evaluación del proyecto y de acuerdo a los valores obtenidos en este apartado se puede decidir si el proyecto es viable o no, además de esto se puede obtener índices para el cálculo ganancias que podría tener la empresa.

### **5.2.1 ANÁLISIS DE MERCADO**

El análisis de mercado nos muestra de manera estadística las ventas que tuvo la empresa en lo que respecta a la venta de tabloncillo. Estos valores se los obtuvo para los años 2011 y 2012.

Los valores obtenidos dicen que la empresa PROMARA CIA. LTDA vendía aproximadamente, entre los años 2011 y 2012, de 700 a 800 tabloncillos por mes, esto quiere decir que el horno con capacidad de 2400 tabloncillos se utilizaba de 3 a cuatro veces por año.

Conocer la venta total de tabloncillo es importante debido a que me permite calcular la ganancia mensual al reducir las fallas de secado, que ocasionan la pérdida total de la pieza, en un 30%.

Para los años 2011 y 2012 se obtuvo, mediante un análisis estadístico, realizado por la empresa, que el 11,99% de la carga tiene fallas que ocasionan la pérdida total de la pieza. Debido a estos problemas, para los años 2013 y 2014, las ventas se redujeron en un 25%, lo que quiere decir que se vende aproximadamente 200 tablancillos por mes. Por lo tanto con el índice de pérdidas (11,99%) se puede decir que la cantidad de piezas rechazadas por mes será de 24 tablancillos y por carga 288 tablancillos, valor que es exactamente el mismo para el análisis anual debido a que, con las nuevas ventas, se redujo la utilización del horno a una vez al año.

El costo por cada tablancillo rechazado es de \$14,00 actualmente, donde se incluye costo de materia prima y costo de secado. Si se espera reducir el 30% de fallas que ocasionan el rechazo total de la pieza se dice que para la venta mensual se espera una reducción del costo por mala calidad de \$100,72 dólares americanos ( $24 \text{ tablancillos} * 30\% * \$14$ ), es decir anualmente y consecuentemente por carga \$1209,60 dólares americanos.

Se espera llegar por lo menos que para el sexto año se retome y se llegue a vender, como se lo hacía anteriormente, lo que conllevará a utilizar el horno tres veces por año, es decir las ventas de tablancillo por mes serán de aproximadamente 700 unidades.

## **5.2.2 CALCULO DE DEPRECIACIÓN DE LA MAQUINARIA**

La vida útil de una máquina o herramienta es de 10 años por lo tanto el valor de depreciación será de 10% para el valor total de la compra. Como caso especial en lo que se refiere a materiales de conducción de fluidos se utilizó una depreciación del 20% debido a que su uso es más prolongado. Ver Tabla 5.14 a la Tabla 5.18.

### 5.2.2.1 Bomba de agua

La bomba de agua tiene un precio inicial de \$50,00 dólares americanos, sin sumarle los impuestos. Notar que el precio de venta dentro de 10 años será de \$19,54 dólares americanos. El descuento de 10% se hace del nuevo valor que adquiere cada año el bien.

**Tabla 5.14: Depreciación anual de la bomba de agua**

<b>AÑOS</b>	<b>INDICE DEPRECIACION</b>	<b>MONTO DEPRECIACIÓN</b>	<b>COSTO MAQUINARIA</b>
<b>0</b>	0%		\$ 56,05
<b>1</b>	10%	\$ 5,61	\$ 50,45
<b>2</b>	10%	\$ 5,04	\$ 45,40
<b>3</b>	10%	\$ 4,54	\$ 40,86
<b>4</b>	10%	\$ 4,09	\$ 36,77
<b>5</b>	10%	\$ 3,68	\$ 33,10
<b>6</b>	10%	\$ 3,31	\$ 29,79
<b>7</b>	10%	\$ 2,98	\$ 26,81
<b>8</b>	10%	\$ 2,68	\$ 24,13
<b>9</b>	10%	\$ 2,41	\$ 21,71
<b>10</b>	10%	\$ 2,17	\$ 19,54
<b>Valor de venta en 10 años</b>			<b>\$ 19,54</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

### 5.2.2.2 Ventilador centrífugo

El precio del ventilador dentro de 10 años será de \$124,40 dólares americanos. A partir de este valor y su funcionamiento se decidirá si el equipo se da de baja o sigue funcionando, dependiendo el valor de incremento en el precio de mantenimiento para el año 10, después de la implementación..

Tabla 5.15: Depreciación anual del ventilador

<b>AÑOS</b>	<b>INDICE DEPRECIACION</b>	<b>MONTO DEPRECIACIÓN</b>	<b>COSTO MAQUINARIA</b>
<b>0</b>	0%		\$ 356,78
<b>1</b>	10%	\$ 35,68	\$ 321,10
<b>2</b>	10%	\$ 32,11	\$ 288,99
<b>3</b>	10%	\$ 28,90	\$ 260,09
<b>4</b>	10%	\$ 26,01	\$ 234,08
<b>5</b>	10%	\$ 23,41	\$ 210,68
<b>6</b>	10%	\$ 21,07	\$ 189,61
<b>7</b>	10%	\$ 18,96	\$ 170,65
<b>8</b>	10%	\$ 17,06	\$ 153,58
<b>9</b>	10%	\$ 15,36	\$ 138,22
<b>10</b>	10%	\$ 13,82	\$ 124,40
<b>Valor de venta en 10 años</b>			<b>\$124,40</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

### 5.2.2.3 Calentador de agua

El precio final del calentador de agua es 34% menos que el precio inicial, cabe mencionar que este precio puede variar de acuerdo a la conservación del equipo.

Tabla 5.16: Depreciación anual del calentador de agua

<b>AÑOS</b>	<b>INDICE DEPRECIACION</b>	<b>MONTO DEPRECIACIÓN</b>	<b>COSTO MAQUINARIA</b>
<b>0</b>	0%		\$ 436,08
<b>1</b>	10%	\$ 43,61	\$ 392,47
<b>2</b>	10%	\$ 39,25	\$ 353,22
<b>3</b>	10%	\$ 35,32	\$ 317,90
<b>4</b>	10%	\$ 31,79	\$ 286,11
<b>5</b>	10%	\$ 28,61	\$ 257,50
<b>6</b>	10%	\$ 25,75	\$ 231,75
<b>7</b>	10%	\$ 23,18	\$ 208,58
<b>8</b>	10%	\$ 20,86	\$ 187,72
<b>9</b>	10%	\$ 18,77	\$ 168,95
<b>10</b>	10%	\$ 16,89	\$ 152,05
<b>Valor de venta en 10 años</b>			<b>\$ 152,05</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

### 5.2.2.4 Tanque de almacenamiento de agua

La depreciación del tanque de almacenamiento de agua llega un valor final de \$17,44 dólares americanos, este valor puede servir tanto para venta del bien como para cálculo del capital de la empresa, en lo referentes a bienes muebles.

**Tabla 5.17: Depreciación anual del tanque de almacenamiento de agua**

<b>AÑOS</b>	<b>INDICE DEPRECIACION</b>	<b>MONTO DEPRECIACIÓN</b>	<b>COSTO MAQUINARIA</b>
<b>0</b>	0%		\$ 50,03
<b>1</b>	10%	\$ 5,00	\$ 45,03
<b>2</b>	10%	\$ 4,50	\$ 40,52
<b>3</b>	10%	\$ 4,05	\$ 36,47
<b>4</b>	10%	\$ 3,65	\$ 32,82
<b>5</b>	10%	\$ 3,28	\$ 29,54
<b>6</b>	10%	\$ 2,95	\$ 26,59
<b>7</b>	10%	\$ 2,66	\$ 23,93
<b>8</b>	10%	\$ 2,39	\$ 21,54
<b>9</b>	10%	\$ 2,15	\$ 19,38
<b>10</b>	10%	\$ 1,94	\$ 17,44
<b>Valor de venta en 10 años</b>			<b>\$ 17,44</b>

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

### 5.2.2.5 Material para conducción de fluido

Como se dijo anteriormente, en este caso, el valor de depreciación es de 20% y el valor final de tubería se lo puede utilizar para cálculo de capital de la empresa mas no para venta debido a que si se desmonta la tubería perdería por completo su valor.

Tabla 5.18: Depreciación anual del material para conducción de fluido

<b>AÑOS</b>	<b>INDICE DEPRECIACION</b>	<b>MONTO DEPRECIACIÓN</b>	<b>COSTO MAQUINARIA</b>
<b>0</b>	0%		\$ 607,38
<b>1</b>	20%	\$ 121,48	\$ 485,90
<b>2</b>	20%	\$ 97,18	\$ 388,72
<b>3</b>	20%	\$ 77,74	\$ 310,98
<b>4</b>	20%	\$ 62,20	\$ 248,78
<b>5</b>	20%	\$ 49,76	\$ 199,03
<b>6</b>	20%	\$ 39,81	\$ 159,22
<b>7</b>	20%	\$ 31,84	\$ 127,38
<b>8</b>	20%	\$ 25,48	\$ 101,90
<b>9</b>	20%	\$ 20,38	\$ 81,52
<b>10</b>	20%	\$ 16,30	\$ 65,22
<b>Valor de venta en 10 años</b>			<b>\$ 65,22</b>

Fuente: PROMARA CIA. LTDA.

### 5.2.3 CALCULO DEL VAN

El VAN o valor actual neto representa el valor que tendrá el proyecto en la fecha que se ejecutó el mismo, después de haber pasado el tiempo de inversión, en este caso 10 años.

El valor actual neto se calcula a partir de un flujo de caja que determina ingresos y egresos que tiene la empresa por la ejecución de este proyecto. En la Tabla 5.19 se puede ver los valores del flujo de caja para el rediseño del horno de secado de madera de la empresa PROMARA CIA. LTDA.

Cabe mencionar, que en cada año, para el ingreso se aumentó el 4,49%, cuyo valor es el valor actual de la inflación. El egreso se realizó tomando en cuenta los costos por depreciación de la maquinaria para cada año, correspondientemente; de la misma manera se aumentó el valor de 4,49%, para el egreso, debido a que al pasar del tiempo los costos de producción aumentan.

**Tabla 5.19: Flujo de caja (cálculo del VAN)**

<b>Años</b>	<b>Ingreso</b>	<b>Egreso</b>	<b>Flujo descontado</b>
<b>0</b>	0	3.349,00	-3349,00
<b>1</b>	3.105,00	520,00	\$ 2.585,00
<b>2</b>	3105,00	521,95	\$ 2.583,05
<b>3</b>	3105,00	523,90	\$ 2.581,10
<b>4</b>	3105,00	525,86	\$ 2.579,14
<b>5</b>	3105,00	527,83	\$ 2.577,17
<b>6</b>	3105,00	529,80	\$ 2.575,20
<b>7</b>	3105,00	531,78	\$ 2.573,22
<b>8</b>	3105,00	533,77	\$ 2.571,23
<b>9</b>	3105,00	535,77	\$ 2.569,23
		<b>VAN</b>	215,40

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA.

Tomar en cuenta que el valor inicial de ingresos, parte del análisis de mercado y el valor de egresos de costo de explotación y depreciación de la maquinaria.

Para finalizar se dice que el cálculo del valor actual neto (VAN) se realizó esperando una rentabilidad del 4,49%.

#### **5.2.4 CALCULO DEL TIR**

La tasa interna de retorno (TIR) representa la rentabilidad estimada del proyecto de acuerdo al flujo de caja presente.

El cálculo del TIR se realizó por medio de una hoja de cálculo realizada en Microsoft Excel 2010, mediante la fórmula "TIR(valor)".

En este el caso el proyecto arrojó una rentabilidad teórica del 9% lo que es dos veces mayor que el rendimiento esperado.

Tabla 5.20: Flujo de caja (cálculo del TIR)

<b>Años</b>	<b>Ingreso</b>	<b>Egreso</b>	<b>Flujo descontado</b>
<b>0</b>	0	3.349,00	-3.349,00
<b>1</b>	3.105,00	520,00	\$ 2.585,00
<b>2</b>	3105,00	521,95	\$ 2.583,05
<b>3</b>	3105,00	523,90	\$ 2.581,10
<b>4</b>	3105,00	525,86	\$ 2.579,14
<b>5</b>	3105,00	527,83	\$ 2.577,17
<b>6</b>	3105,00	529,80	\$ 2.575,20
<b>7</b>	3105,00	531,78	\$ 2.573,22
<b>8</b>	3105,00	533,77	\$ 2.571,23
<b>9</b>	3105,00	535,77	\$ 2.569,23
		TIR	76,28%

**Fuente:** PROMARA CIA. LTDA



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones se forman a partir de los objetivos para ver si estos se cumplieron o no. Como regla general se debe tener una recomendación para cada conclusión.

### 6.1 CONCLUSIONES

Un diseño aerodinámico evita estancamiento en las esquinas del horno y logra una mejor distribución del aire.

Mediante el rediseño se logró reducir el flujo de calor a través de las paredes en un 2%, ocasiona una reducción del 5% en el uso de combustible.

El diseño del sistema de ventilación es poco convencional debido a que se inyecta aire caliente por la parte superior del horno, esto no quiere que se encuentre mal diseñado, sino que debido espació y fundamentos físicos utilizados se logró que su funcionamiento sea el adecuado.

La extracción de aire por la parte superior del horno provoca que se disminuya la eficiencia de la cámara de secado debido a que el aire a mayor temperatura va a salir por dichas ventilas, las superiores.

La selección de ventilas de humidificación se dio de acuerdo a la dimensión de ductos que se tiene en el sistema, debido a que se requiere mantener la presión constante dentro del horno. Las ventilas de deshumidificación poseen cierta restricción al paso del flujo esto ayuda a que el aire se encierre dentro de la cámara y se enfríe lo suficiente para llegar al piso y poder salir.

Se utilizó diferentes dimensiones de tubería para evitar excesivas presiones y velocidades dentro de tubería de transporte y así evitar las pérdidas de presión.

Quizás el beneficio costo en lo referente a inversión para tubería de PVC sea más alto que cuando se instala tubería de cobre pero hay que tomar en cuenta costos de operación y mantenimiento que generalmente son los mandan en un proyecto debido a que su costo aumenta con el tiempo.

Calentar el agua a una temperatura que se similar a la que se encuentra el aire dentro de la cámara de secado evitará el consumo excesivo de combustibles fósiles y además se puede hacer por medio de energía renovable.

Es importante que cada sistema sea totalmente independiente para facilitar su operación y en el mejor de los casos automatizar.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Colocar deflectores de aire en las esquinas de la pared opuesta a la entrada de aire para mejorar la circulación del flujo. Llevar un control de consumo de energía para en la ejecución de cada proceso de secado para evaluar su evolución con el tiempo.

Cada proyecto es totalmente independiente y debe analizarse a partir de los limitantes y no dejarse llevar específicamente por un diseño ya realizado. Tomar cada diseño de manera especial.

La abertura de las ventilas de salida de aire frío debe proporcionar el suficiente caudal de salida para que el aire caliente pueda entrar y ocupar su espacio.

Utilizar materiales del sistema humificación antiguo y darles cómo vida útil el 70% de la vida útil para un sistema nuevo.

.Para tubería de transporte se debe utilizar diámetros grandes relativamente para evitar pérdidas de presión excesivas, mientras que para tubería de servicio se utiliza el diámetro de tubería que proporciones los valores necesarios para la operación del sistema.

La tubería de cobre está exenta de limpieza.

Se recomienda dar el uso y mantenimiento adecuado a las instalaciones para que en futuro no se presenten los problemas como ya sucedió en una ocasión. Revisar el manual de operación del horno.

Un proyecto nuevo puede ser el rediseño del sistema de humidificación para que logre su calentamiento mediante energía solar.

Partiendo de los valores necesarios de producción se debe tomar la decisión de automatizar completamente el proyecto.

A pesar que se recomienda seguir el programa de secado proporcionado por la (Junta de Acuerdo de Cartagena, 1986) se debe reajustar los valores del mismo mientras se vaya adquiriendo mayor experiencia en el secado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, C. (2013). *Diseño del proceso de secado*. Quito.
- Aguilar, D. (Noviembre de 2011). Tesis Auditoria. *Diseño de un sistema de gestión y costeo por procesos monitoreado por indicadores de gestión para un aserradero "Caso Aserradero Cia. Ltda."*. Quito, Pichincha, Ecuador : Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (2009). *Fundamentals*.
- Carrier Corporation. (2009). *Manual de Aire Acondicionado*. Barcelona - España: Marcombo.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica*. México: Programas Educativos.
- Fox, & McDonald. (1995). *Introducción a la mecánica de fluidos*. México: McGraw- Hill.
- García, J. (2006). *Precalculo*. Quito - Ecuador: ESPE.
- García, J. (2007). *Cálculo diferencial e integral*. Quito: s/e.
- Incropera, & Dewitt. (1999). *Fundamentos de Transferencia de calor*. México: Prentice Hall.
- Junta del acuerdo de cartagena. (1989). *Manual de grupo andino para secado de maderas*. Lima: CARVAJAL S.A.
- Kern, D. (1965). *Process heat transfer*. Singapore: MacGraw-Hill.
- Lara Prado, J. (2007). *Ecuaciones Diferenciales Ordinarias*. Quito - Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Manual de Electricidad Industrial. (s.f.). Edición El Técnico.

- Megyesy, E. (2001). *Pressure vessel handbook*. Oklahoma - USA: Pressure Vessel Publishing.
- Moran, & Shapiro. (1988). *Fundamentos de termodinámica técnica*. New York - USA: John Wiley & Sons.
- Müller, W. (1987). *Electrotecnica de Potencia, curso superior*. Barcelona - España: Editorial Reverté.
- Peralta, F. (2006). Tesis Ing. Electrónica. *Diseño y Simulación de la automatización del horno de secado de la empresa DYMAP*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- Piedrafita, R. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industrial*. México: Alfaomega.
- Pontón, R. (2004). *Física II*. Quito - Ecuador: Industria Ecuatoriana.
- Rodriguez, C. (2007). *Cómo Escribir Bien*. Quito: Editora Nacional.
- Shames, & Cozzarelli. (s.f.). Introduction to Cartesian Tensor. En Shames, & Cozzarelli, *Elastic and Inelastic Stress Analysis* (págs. 1-160). New York.
- Straneo, & Consorti. (---). *Dibujo técnico mecánico*. New York: Prentice Hall.
- Toro, J. L. (1999). *Cálculo Vectorial*. Quito - Ecuador: Ediciones FEPEON.
- Valero, M. (1996). *Física Fundamental 1*. Bogotá - Colombia: Editorial Norma.
- Zambrano, M. J. (2003). *Electricidad Básica*. Quito: Pegaso Editores.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Agua libre:** agua que se encuentra en los poros de la madera.

**Agua de saturación:** agua que se encuentra en las fibras de la madera.

**Contenido de humedad equilibrio:** es el contenido de humedad al que se aproxima la humedad en la madera, con ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa, en la cámara de secado.

**Constante dieléctrica:** es una constante de un medio dieléctrico cuya función es medir la permitividad eléctrica de un material.

**Chanul:** nombre común de una especie de madera con la que se realiza el parquet.

**Cizalladura:** resistencia al esfuerzo cortante.

**Difusión:** fenómeno físico similar a la conducción, el cual indica, en este caso, que un gas está intentando pasar a través de cuerpo sólido.

**Dureza:** resistencia a la deformación de la superficie o ralladuras.

**Energía de flujo:** energía total de un fluido en movimiento.

**Energía interna:** medida de la actividad molecular en una sustancia.

**Flujo estable:** flujo a través de las fronteras de un sistema termodinámico sin incidir en el cambio de masa del sistema.

**Flujo transitorio:** flujo a través de las fronteras de un sistema termodinámico incidiendo en el cambio de masa del sistema.

**Gradiente de humedad:** es una medida del cambio de humedad en la pieza de madera y se obtiene relacionando el contenido de humedad en la superficie de la madera y el contenido de humedad en el centro.

**Gradiente de secado:** es una medida del potencial de secado de la madera; se expresa como la relación entre el contenido de humedad inicial de la madera y el contenido de humedad equilibrio.

**Hormigón Armado:** es un material de construcción compuesto de hormigón reforzado con varilla metálica.

**Humedad absoluta:** es la relación entre la masa de vapor que contiene cierta cantidad de aire y la masa de aire seco.

**Humedad relativa:** es la relación entre la masa de vapor que contiene cierta cantidad de aire y la máxima cantidad de vapor que puede contener esta cantidad de aire.

**Madera anhidra:** es la denominación para madera con contenido de humedad higroscópico igual a 0%.

**Madera básica:** es la denominación para madera con contenido de humedad igual al 12%

**Madera en estado verde:** es la denominación para madera con contenido de humedad mayor al 40%

**Madera seca al aire:** es la denominación para madera con contenido de humedad entre 30% y 40%

**Material higroscópico:** es la denominación para el material que se hincha o se contrae al absorber o ceder agua, respectivamente.

**Parquet:** es una pieza de madera, que posee distintas dimensiones, sin embargo la más común es 15 cm de ancho por 25 milímetros de espesor, y sirve para recubrimiento de pisos.

**Presión absoluta:** es la presión total que ejerce un sistema termodinámico, tomando en cuenta la presión atmosférica.

**Presión parcial:** es la presión que ejerce un gas en una mezcla de gases.

**Sistema:** es una cantidad de materia o región en el espacio elegida para el análisis.

**Sistema termodinámico:** es una cantidad de materia o región en el espacio que permite el análisis de la conversión de calor en energía.

**Tabloncillo:** es una pieza de madera, extraída de la parte central del tronco, con dimensiones aproximadas de 2.5 metros de largo, 20 centímetros de ancho y 32 milímetros de espesor.

**Temperatura:** es una propiedad termodinámica que representa por medio de una escala arbitraria el cambio de energía interna en una substancia.

**Tenacidad:** es la resistencia de un material al impacto.



**Trabajo de flujo:** es el trabajo que se necesita para introducir o sacar, cierta cantidad de una sustancia, como aire, de un sistema termodinámico.

**Vapor saturado:** es una denominación para el vapor de agua cuando se encuentra en equilibrio termodinámico a una humedad de 100%.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A: ESTADO ACTUAL DEL HORNO**

- A.1: informe del estado actual
- A.2: formato para la toma de datos
- A.3: listado de equipos instalados

### **ANEXO B: PLANOS**

- B.1: planos actuales
- B.2: planos del rediseño

### **ANEXO C: HOJAS DE CÁLCULO**

- C.1: cálculo de cargas térmicas
- C.2: diseño de conductos
- C.3: diseño de tuberías
- C.4 cálculo estructural
- C.5: depreciación de maquinaria
- C.6: pérdidas de calor en el sistema de calentamiento
- C.7: diseño del proceso de secado

### **ANEXO D: INFORMES Y CATÁLOGOS TÉCNICOS**

- D.1: informes
- D.2: catálogos técnicos

### **ANEXO E: NORMAS**

- E.1 Informativa
- E.2 Documentación
- E.3 Diseño
- E.4 Pruebas de funcionamiento