

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
FACULTAD DE INGENIERIAS
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

**“DISEÑO DE UNA MAQUINA PELLETIZADORA EN BASE A LA
DISPONIBILIDAD DE RESIDUOS MADEREROS DE LA CIUDAD DE
CUENCA PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO”**

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
CON MENCIÓN EN DISEÑO DE MÁQUINAS**

AUTORES:

JORGE EDUARDO ARPI TRUJILLO.
CRISTIAN SANTIAGO CALDERÓN TORAL.

DIRECTOR: ING. PAUL ALVAREZ

CUENCA – ECUADOR
Febrero del 2010

DECLARACION

Nosotros, Arpi Trujillo Jorge Eduardo y Cristian Santiago Calderón Total, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jorge Arpi T

Cristian Calderón Toral

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Arpi Trujillo Jorge
Eduardo y Calderón Toral Cristian Santiago

Ing. Paúl Álvarez
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de los autores, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaremos y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Primero y antes que nada, dar gracias a **Dios**, por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido un soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A nuestra familia por estar presente en cada momento de nuestra vida, brindarnos amor y alegría en los momentos de júbilo y fortaleza en los momentos difíciles dándonos un apoyo incondicional.

Al Ingeniero Paul Álvarez director de esta tesis, por guiarnos y dedicarnos valioso tiempo en su realización.

A nuestro querido amigo Ángel Cárdenas “El Chato” por su apoyo incondicional en todo momento.

A todos los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana que nos transmitieron sus conocimientos durante nuestra carrera universitaria.

A las diversas industrias fabricantes de muebles de madera en Cuenca por darnos las facilidades de acceso a la información para la realización de esta tesis.

Como no sabíamos que era imposible lo hicimos.

Los Autores

“Todo lo que vemos o creemos es un sueño dentro de un sueño.”

Edgar Allan Poe

“Cuanto más alto estemos situados, más humildes debemos ser.”

Marco Tulio Cicerón

DEDICATORIA

Dedico esta tesis y toda mi carrera universitaria a ti **DIOS** que has sido mi guía durante esta larga travesía, por darme el valor para salir adelante a pesar de todos los tropiezos y decepciones que se presentaron en mi vida. GRACIAS DIOS SIN TI MI VIDA NO TENDRÍA SENTIDO.

A mi querido padre por todo el sacrificio que hizo para sacarme adelante, por todos los sabios consejos y palabras de aliento que me supo dar y por el infinito amor que me brindo. GRACIAS PAPI.

A mi madre que a pesar de no estar a mi lado, su recuerdo siempre me acompaña y en mi corazón vive el amor y la ternura que sembró. SIEMPRE LA RECORDARE MAMI.

A Rosy y mi tía Hilda que ocuparon el lugar de mi madre y desde pequeño me supieron encaminar y me enseñaron los valores más importantes de la vida. LAS VALORO.

A mis hermanos, tías y primos por darme la estabilidad emocional y la posibilidad de compartir en familia. GRACIAS A TODOS

A mis grandes amigos Jorge y Ángel que siempre rieron conmigo en los buenos momentos y me apoyaron en los momentos difíciles, gracias por llegar a ser casi como hermanos y luchar juntos para alcanzar este sueño anhelado. GRACIAS AMIGOS.

Cristian Santiago

DEDICATORIA

El presente trabajo esta dedicado a mis padres que han sido el pilar fundamental de mi formación humana y académica, han sido la compañía durante esta experiencia universitaria y que junto a su sabia guía y sus consejos de carácter de superación han logrado que llegue a cumplir una de las etapas más importante de mi vida.

A mis hermanos, a toda mi familia, a mis compañeros y amigos; ya que ellos han sabido ser el apoyo para poder superar todos los obstáculos y adversidades que se han interpuesto durante el trayecto mi vida tanto estudiantil y personal.

De manera muy es especial también dedico este logro a la mujer que me ha acompañado durante este recorrido y que me ha sabido brindado el aliciente necesario con su afecto y amor para poder llegar a cumplir esta meta tan anhelada, a mi enamorada.

Jorge Eduardo.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1

ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MADEREROS EN LAS EMPRESAS FABRICANTES DE MUEBLES DE MADERA MÁS IMPORTANTES DE LA CIUDAD DE CUENCA.

1.1.1	GENERALIDADES	2
1.2	ANÁLISIS DE LAS EMPRESAS.....	3
1.2.1	PRODUCTOS ELABORADOS POR LAS EMPRESAS	
1.2.2	DE MUEBLES DE MADERA EN CUENCA.....	4
1.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	8
1.3.1	DEFINICION DE LOS OBJETIVOS.....	9
1.3.2	SELECCIÓN DE LA POBLACION.....	9
1.3.3	MARCO MUESTRAL.....	10
1.3.4	PROCESO DE MUESTREO.....	12
1.3.5	TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	13
1.4	RECOLECCION DE LA INFORMACION PRIMARIA.....	17
1.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA MUESTRA.....	21
1.5.1	MEDIDAS DE CENTRALIZACION.....	21
1.5.2	MEDIDAS DE DISPERCION.....	22
1.6	ANÁLISIS DE DATOS EN UN SOFTWARE ESPECIALIZADO	
	EN ESTADISTICA.....	23
1.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ESTRATOS.....	25
1.7.1	ANÁLISIS DEL ESTRATO 1.....	25
1.7.2	ANÁLISIS DEL ESTRATO 2.....	31
1.8	PRUEBA DE HIPOTESIS.....	36
1.8.1	PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS NULA (H0)	
	Y LA HIPOTESIS ALTERNATIVA (H1).....	36
1.8.2	SELECCIÓN DEL NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α).....	37
1.8.3	CÁLCULO DEL VALOR ESTADÍSTICO DE PRUEBA (T).....	38
1.8.4	FORMULACION DE LA REGLA DE DECISIONES.....	40
1.8.5	TOMA DE UNA DECISION.....	41
1.9	CONCLUSION DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	44

CAPITULO 2

LOS PELLETS Y PRODUCCIÓN DE PELLETS EN EUADOR

2.1	GENERALIDADES.....	46
2.2	LA BIOMASA.....	47
2.2.1	CATEGORIZACION DE LA BIOMASA.....	48
2.2.2	BIOMASA RESIDUAL.....	48
2.2.3	BIOCOMBUSTIBLES SOLIDOS.....	49
2.3	LEÑAS Y ASTILLAS.....	49
2.3.1	CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS.....	49
2.3.2	COMPOSICION QUIMICA.....	49
2.3.3	HUMEDAD.....	51
2.3.4	DENSIDAD.....	52

2.3.5	PODER CALORIFICO.....	53
2.3.6	PROPIEDADES TERMICAS DE LA MADERA.....	54
2.4	DENSIFICACION DE LA BIOMASA.....	55
2.4.1	CARACTERISTICAS ENERGETICAS DE LOS DENSIFICADOS.....	55
2.5	LAS BRIQUETAS.....	56
2.5.1	FORMAS Y TAMAÑOS DE LAS BRIQUETAS.....	57
2.5.2	DENSIDAD.....	58
2.5.3	BRIQUETADO.....	59
2.6	EL PELLET.....	60
2.6.1	CARACTERISTICAS FISICAS.....	61
2.6.1.1	FORMA Y TAMAÑO.....	61
2.6.1.2	DENSIDAD.....	62
2.6.1.3	HUMEDAD.....	63
2.6.1.4	FRIABILIDAD.....	64
2.6.2	CARACTERISTICAS QUIMICAS.....	66
2.6.2.1	COMPOSICION QUIMICA.....	66
2.6.2.2	PODER CALORIFICO.....	67
2.6.3	PROPIEDADES FISICO QUIMICAS.....	69
2.6.3.1	VARIABLES DE COMBUSTIBILIDAD E INFLAMABILIDAD.....	69
2.6.3.2	POTENCIA CALORIFICA.....	70
2.7	EFEECTO DE LOS ADITIVOS.....	70
2.8	NORMALIZACION Y ESTADARIZACION DE LOS PELLETS.....	70
2.8.1	PRINCIPALES NORMAS EUROPEAS SOBRE PELLETS.....	71
2.8.2	CRITERIOS DE CALIDAD DE LOS PELLETS.....	73
2.8.2.1	INDICES DE CALIDAD DE LOS PELLETS.....	74
2.9	PRODUCCION DE PELLETS EN EL ECUADOR.....	76

CAPITULO 3

ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE LOS DSIINTOS SISTEMAS PELETIZADORES PARA LA ELECCIÓN DEL MÁS ÓPTIMO

3.1	GENERALIDADES.....	81
3.2	PROCESO DE PRODUCCION DE PELLETS	82
3.2.1	ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA.....	82
3.2.2	TRITURADO Y MOLIDO.....	83
3.2.3	CAMPANA DE BIOMASA.....	93
3.2.4	SECADO.....	93
3.2.5	TOLVA DE ALIMENTACION.....	97
3.2.6	ROSCA DE ALIMENTACION.....	98
3.2.7	PROCESO DE PELETIZACION.....	99
3.2.8	PROCESO DE ENFRIAMIENTO.....	100
3.2.9	ALMACENAJE.....	101
3.3	MAQUINAS DE PELETIZADO.....	102
3.3.1	SISTEMA DE ALIMENTACION DE LA MATERIA PRIMA.....	102
3.3.2	PREACONDICIONADOR.....	103
3.3.3	RODILLOS DE PRESION.....	104
3.3.3.1	MATRICES.....	104
3.3.3.2	RODILLOS.....	106
3.3.4	ENGRANE REDUCTOR.....	109
3.3.5	CARACASA.....	109
3.4	CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE PELETIZADO.....	109
3.4.1	PRESA DE MATRIZ ANULAR.....	109
3.4.2	PRESA DE MATRIZ PLANA.....	111

3.5	PARAMETROS PARA EL DISEÑO.....	112
3.6	SELECCIÓN DE LOS PROCESOS PARA LA DENSIFICACION.....	117
3.6.1	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MOLIDO.....	117
3.6.2	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TAMIZADO.....	119
3.6.3	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO.....	119
3.6.4	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACION.....	122
3.6.5	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PELETIZADO.....	123
3.6.6	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIADO.....	123

CAPITULO 4

DISEÑO DE LAS MAQUINAS PARA EL PROCESO DE PELETIZADO

4.1	GENERALIDADES.....	125
4.2	DISEÑO DE LA TRITURADORA PARA RESIDUOS DE MADERA.....	126
4.2.1	CALCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR.....	129
4.2.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISION DE POTENCIA.....	130
4.2.3	DISEÑO DE LOS MARTILLOS DE MOLTURACION.....	135
4.2.4	DISEÑO DE LOS EJES SECUNDARIOS PORTAMARTILLOS.....	146
4.2.5	CALCULO DEL EJE PRINCIPAL.....	155
4.2.6	DISEÑO Y SELECCIÓN DE CUÑAS Y CHAVETEROS.....	166
4.2.7	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	169
4.2.8	DISEÑO DE LA MALLA DE CRIBADO.....	171
4.2.9	DISEÑO DE LA TOLVA DE ALIMENTACION.....	177
4.3	DISEÑO DEL TAMIZ VIBRADOR.....	185
4.3.1	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CRIBADO.....	186
4.3.2	CALCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCION DEL SISTEMA DE CRIBADO PARA EL PRIMER PAÑO.....	186
4.3.3	SUPERFICIE DE CRIBADO DEL PRIMER PAÑO.....	189
4.3.4	CALCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCION DEL SISTEMA DE CRIBADO PARA EL SEGUNDO PAÑO.....	189
4.3.5	SUPERFICIE DE CRIBADO DEL SEGUNDO PAÑO.....	192
4.3.6	DIMENSIONES DEL TAMIZ.....	192
4.3.7	CALCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISION DE POTENCIA.....	193
4.3.7.1	CALCULO DE BANDAS Y POLEAS.....	195
4.3.8	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE DESBALANCE.....	197
4.3.8.1	CALCULO DE LA FUERZA DE DESBALANCE DEL EJE.....	198
4.3.8.2	CALCULO DELEJE PRINCIPAL DEL TAMIZ VIBRATORIO.....	200
4.3.9	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	204
4.3.10	ANALIS DEL EJE DE DESBALANCE EN UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	207
4.4	DISEÑO DEL SECADOR SOLAR.....	208
4.4.1	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE SECADO SOLAR.....	208
4.4.2	VOLUMEN DE LOS RESIDUOS A SECAR.....	209
4.4.3	DIMENSIONES DE LOS MATERIALES DEL CUARTO DE SECADO.....	209
4.4.4	DIMENSIONES Y MATERIALES DE LA CUBIERTA Y DEL COLECTOR SOLAR.....	210
4.4.5	CALCULO DEL VOLUMEN DEL ASERRIN A SECAR.....	212
4.4.6	CALCULO DEL PESO DEL AGUA A EVAPORAR.....	212
4.4.7	CALCULO DEL ANGULO DE ELEVACION DEL COLECTOR.....	213
4.4.8	INCIDENCIA MAXIMA DE RADIACION SOLAR SOBRE EL COLECTOR.....	216
4.4.9	EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR.....	217
4.4.10	CALOR APROVECHABLE DEL SECADOR.....	217
4.4.11	TEMPERATURA DEL COLECTOR.....	218

4.4.12	TEMPERATURA DE CIRCULACION DEL AIRE SECO.....	219
4.4.13	ENERGIA NECESARIA PARA EVAPORAR EL AGUA EXCEDENTE.....	219
4.4.14	TIEMPO DE SECADO DEL ASERRIN.....	220
4.4.15	CALCULO DEL FLUJO MASICO DEL AIRE QUE CIRCULA ATRAVES DEL ASERRIN.....	221
4.4.16	SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES PARA EL CUARTO DE SECADO.....	224
4.4.17	TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AIRE HUMEDO EN EL CUARTO.....	226
4.4.18	TIEMPO DE RENOVACION DEL AIRE SECO.....	228
4.5	DISEÑO DEL SISTEMA DE PELETIZACION.....	230
4.5.1	CONSIDERACIONES INICIALES.....	230
4.5.2	CALCULO DEL PELLET.....	231
4.5.3	COMPRESION DEL ASERRIN.....	232
4.5.4	FUERZA DE COMPACTACION DEL RODILLO.....	234
4.5.5	FUERZA Y PRESION EN EL DADO.....	235
4.5.6	DIMENSIONES DEL RODILLO.....	237
4.5.7	CALCULO DE LA MATRIZ.....	241
4.5.8	CALCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA LA COMPACTACION.....	244
4.5.9	SISTEMA DE TRANSMISION.....	245
4.5.10	POTENCIA DE ENTRADA.....	251
4.5.11	DISEÑO DE LAS CUCHILLAS DE CORTE.....	255
4.5.12	DISEÑO DEL EJE PRINCIPAL.....	258
4.5.13	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA EL EJE PRINCIPAL.....	263
4.5.14	CALCULO DE LA CHAVETA PARA LA TRANSMISION.....	265
4.5.15	CALCULO DE LAS CHAVETAS PARA LAS CUCHILLAS.....	268
4.5.16	CALCULO DE LA CHAVETA PARA EL CABEZAL PORTARODILLOS.....	269
4.5.17	CALCULO DEL EJE PORTARODILLOS.....	270
4.5.18	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA LOS RODILLOS.....	274
4.6	DISEÑO DEL ENFRIADOR.....	276
4.6.1	CONSIDERACIONES INICIALES.....	276
4.6.2	DIMENSIONES DE LA CAMARA DE ENFRIADO.....	277
4.6.3	TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LOS PELLETS Y EL AIRE.....	280
4.6.4	VERIFICACION DE LA TEMPERATURA EN EL CENTRO DEL PELLET.....	284
4.6.5	VERIFICACION DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL PELLET.....	287
4.6.6	CALOR DE CONVECCION DE CADA PELLET.....	289
4.6.7	FLUJO MASICO DEL AIRE.....	290
4.6.8	SELECCIÓN DEL VENTILADOR.....	291
4.6.9	SISTEMA DE DESCARGA DESLIZANTE.....	293

CAPITULO 5

ANALISIS DE LA EFICIENCIA DE UN CALDERO ALIMENTADO CON PELLETS

5.1	GENERALIDADES.....	296
5.2	CALDERA DE PELLETS.....	296
5.2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CALDERAS DE PELLETS.....	297
5.3	INTRODUCCION AL CALDERO DE COLINEAL.....	298
5.4	ANALISIS DE LA COMBUSTION.....	300
5.5	PORCENTAJE DE MASA APROVECHABLE.....	300
5.6	ANALISIS ESTEQUIOMETRICO.....	301
5.6.1	RELACION AIRE COMBUSTIBLE.....	304
5.6.2	TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCIO.....	305
5.7	CALOR PROPORCIONADO POR LA COMBUSTION DE PELLETS.....	306
5.8	PERDIDAS DE CALOR EN LA CHIMENEA.....	308

5.9	PERDIDAS DE CALOR POR INQUEMADOS.....	310
5.10	EFICIENCIA DE LA COMBUSTION.....	311

CAPITULO 6

ANALISIS TECNICO FINANCIERO DEL PROYECTO

6.1	GENERALIDADES.....	314
6.2	COSTOS DEL MOLINO DE MARTILLOS.....	315
6.3	COSTOS DEL TAMIZ VIBRADOR.....	317
6.4	COSTOS DEL CUARTO DE SECADO.....	320
6.5	COSTOS DE LA MAQUINA PELETIZADORA.....	323
6.6	COSTOS DEL ENFRIADOR.....	326
6.7	COSTO TOTAL DEL PROYECTO.....	329
6.8	FLUJO DE CAJA.....	331
6.9	FACTIBILIDAD ECONOMICA DEL PROYECTO.....	333

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

INDICE DE ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1	Diagrama generalizado del proceso productivo	3
Figura 1.2	Estilo de muebles N°1	4
Figura 1.3	Estilo de muebles N°2	5
Figura 1.4	Estilo de muebles N°3	6
Figura 1.5	Estilo de muebles N°4	7
Figura 1.6	Proceso de muestreo	9
Figura 1.7	Selección y determinación de la población y muestra	10
Figura 1.8	Diagrama de pastel de los productos elaborados	17
Figura 1.9	Diagrama de pastel del tipo de madera	18
Figura 1.10	Diagrama de barras de los residuos producidos en el estrato 1	18
Figura 1.11	Diagrama de barras de los residuos producidos en el estrato 2	19
Figura 1.12	Diagrama de barras de la utilización interna de residuos E ₁	19
Figura 1.13	Diagrama de barras de la utilización interna de residuos E ₂	20
Figura 1.14	Diagrama de pastel de resultados de interesados en la maquina	20
Figura 1.15	Ingreso de variables en el software	24
Figura 1.16	Ingreso de datos en el software	24
Figura 1.17	Grafico de Barras de Frecuencias-Aserrín	26
Figura 1.18	Grafico de Barras de Frecuencias-Leña	27
Figura 1.19	Histograma – aserrín	28
Figura 1.20	Histograma – leña	29
Figura 1.21	Diagrama de dispersión – Aserrín	30
Figura 1.22	Diagrama de dispersión – Leña	30
Figura 1.23	Grafico de Barras de frecuencias – Aserrín	32
Figura 1.24	Grafico de Barras de frecuencias – Leña	33
Figura 1.25	Histograma – aserrín	33
Figura 1.26	Histograma – Leña	34
Figura 1.27	Diagrama de dispersión - Aserrín	35
Figura 1.28	Diagrama de dispersión - Leña	35
Figura 1.29	Procedimiento para la prueba de hipótesis	36
Figura 1.30	Prueba de cola - Aserrín E ₁	41
Figura 1.31	Prueba de cola – Leña E ₁	42
Figura 1.32	Prueba de cola - Aserrín E ₂	42
Figura 1.33	Prueba de cola – Leña E ₂	43

CAPITULO 2

Figura 2.1	Ecuador: oferta total de energía primaria (OTEP)	47
Figura 2.2	Generación de Biomasa	48
Figura 2.3	Secciones de Briquetas	57
Figura 2.4	Briquetado: prensa de pistón mecánica	59

Figura 2.5	Pellets de madera	61
Figura 2.6	Tamaño del pellet	61
Figura 2.7	Poder calorífico en función de la humedad	67
Figura 2.8	Proceso de producción de Briquetas	76
Figura 2.9	Esquema de la planta de Briquetas	77
Figura 2.10	Planta de producción de Combustibles a partir de la biomasa	78

CAPITULO 3

Figura 3.1	Proceso básico de producción de pellets	82
Figura 3.2	Almacenamiento de la materia prima	82
Figura 3.3	Molino de disco	84
Figura 3.4	Molino de Martillos y malla de 8 mm	84
Figura 3.5	Molino de rodillos	85
Figura 3.6	Molino de bolas	91
Figura 3.7	Campana de Biomasa	93
Figura 3.8	Proceso de secado natural	94
Figura 3.9	Secador rotatorio	96
Figura 3.10	Diagrama de Flujo de Calor – Secador Rotatorio.	97
Figura 3.11	Tolva de Alimentación	98
Figura 3.12	Rosca de alimentación	98
Figura 3.13	Proceso de compactación del aserrín	99
Figura 3.14	Enfriador vertical	100
Figura 3.15	Esquema del sistema de enfriamiento de pellets	101
Figura 3.16	Almacenaje de pellet en fundas y a granel	102
Figura 3.17	Alimentador y pre acondicionador de la peletizadora	103
Figura 3.18	Pre acondicionador	103
Figura 3.19	Matriz anular y matriz plana	104
Figura 3.20	Matriz y rodillo de presión	107
Figura 3.21	Rodillo de presión	107
Figura 3.22	Sistema Hidráulico	108
Figura 3.23	Principio de peletizado por matriz anular	110
Figura 3.24	Mecanismo de peletizado con matriz anular	110
Figura 3.25	Maquina peletizadora con matriz anular	111
Figura 3.26	Esquema de la matriz plana	112
Figura 3.27	Maquina peletizadora vertical con matriz anular	112
Figura 3.28	Fuerzas generadas en el proceso de compactación	113
Figura 3.29	Avellanado cónico del dado	115
Figura 3.30	Representación de la humedad media	121

CAPITULO 4

Figura 4.1	Esquema del molino de martillos	82
Figura 4.2	Esquema del impacto de trituración de la viruta	136
Figura 4.3	Diagrama de cuerpo libre del eje secundario	147
Figura 4.4	Diagrama del esfuerzo cortante del eje secundario	149
Figura 4.5	Diagrama del momento flector del eje secundario	149
Figura 4.6	Diagrama del esfuerzo cortante del eje secundario	152
Figura 4.7	Diagrama del momento cortante del eje secundario	152
Figura 4.8	Análisis de esfuerzos del eje secundario	154
Figura 4.9	Análisis de deformación del eje secundario	155
Figura 4.10	Fuerzas y momentos en el eje principal	156
Figura 4.11	Diagrama de cuerpo libre del eje principal (distancias)	156
Figura 4.12	Diagrama de cuerpo libre del eje principal	156
Figura 4.13	Diagrama de cuerpo libre de momentos flectores	161
Figura 4.14	Diagrama de esfuerzos cortantes	162
Figura 4.15	Análisis de esfuerzos del eje principal	164
Figura 4.16	Análisis de deformación del eje principal	164
Figura 4.17	Análisis de mecanismo de molido	165
Figura 4.18	Esfuerzos en la chaveta	166
Figura 4.19	Dimensiones del rodamiento SKF 61907	169
Figura 4.20	Ubicación de la malla de cribado	171
Figura 4.21	Diagrama de cuerpo libre de la malla de cribado	172
Figura 4.22	Malla de cribado	177
Figura 4.23	Esquema del diseño de tolva	178
Figura 4.24	Angulo de inclinación de la tolva	181
Figura 4.25	Tolva de alimentación inicial	182
Figura 4.26	Tolva de alimentación final	183
Figura 4.27	Tolva de entrada del material	184
Figura 4.28	Dimensiones de la tolva de alimentación	184
Figura 4.29	Esquema del tamiz vibrador	185
Figura 4.30	Esquema del proceso de tamizado	186
Figura 4.31	Dimensiones de los tamices de la maquina	193
Figura 4.32	Esquema del eje de desbalance	193
Figura 4.33	Esquema del sistema de desbalance	198
Figura 4.34	Diagrama de cuerpo libre del eje principal	200
Figura 4.35	Diagrama de cortante del eje de desbalance	202
Figura 4.36	Diagrama de momentos del eje de desbalance	202
Figura 4.37	Dimensiones del rodamiento SKF 61805	204
Figura 4.38	Análisis de esfuerzos máximos del eje	206
Figura 4.39	Esquema del panel solar	208
Figura 4.40	Esquema del cuarto de secado	208
Figura 4.41	Dimensiones de la cámara de secado	209
Figura 4.42	Materiales del colector solar	210
Figura 4.43	Cubierta del colector solar	211
Figura 4.44	Grafico estadístico de la radiación solar en Cuenca	216

Figura 4.45	Ventilador axial modelo 315	216
Figura 4.46	Esquema de la ubicación de los ventiladores	225
Figura 4.47	Volumen que ocupa el aire húmedo	227
Figura 4.48	Ventanas para el ingreso y extracción del aire	228
Figura 4.49	Maquina peletizadora con matriz plana	230
Figura 4.50	Dimensiones del pellet	231
Figura 4.51	Dimensiones del pellet	233
Figura 4.52	Angulo de entrada del dado	234
Figura 4.53	Fuerzas de compresión del aserrín	234
Figura 4.54	Zona de compresión del aserrín	235
Figura 4.55	Presión en la pared del dado	236
Figura 4.56	Fuerza de fricción en el interior del dado	237
Figura 4.57	Diámetro del rodillo de compactación	238
Figura 4.58	Fuerza de rozamiento entre el rodillo y la matriz	240
Figura 4.59	Esquema de Torque de los rodillos	240
Figura 4.60	Esquema de los rodillos de compresión y matriz principal	241
Figura 4.61	Análisis de la transmisión sin fin corona	246
Figura 4.62	Dimensiones del diente de la Corona	250
Figura 4.63	Detalle de una cuchilla de corte	255
Figura 4.64	Vista inferior de las 4 cuchillas de corte	256
Figura 4.65	Mecanismo de transmisión de potencia y compactación	258
Figura 4.66	Torques generados en el eje principal	259
Figura 4.67	Diagrama de cuerpo libre del eje principal	260
Figura 4.68	Diagramas de momentos flectores	261
Figura 4.69	Diagramas de esfuerzos cortantes	261
Figura 4.70	Dimensiones del rodamiento SKF 32016	263
Figura 4.71	Dimensiones del rodamiento SKF 6215	265
Figura 4.72	Dimensiones de la chaveta para la corona	266
Figura 4.73	Eje porta rodillos	270
Figura 4.74	Esquema de fuerzas originadas en el eje principal	271
Figura 4.75	Diagrama de cuerpo libre del eje (lado del cabezal)	271
Figura 4.76	Diagrama de momento del eje porta rodillo	272
Figura 4.77	Diagrama de cuerpo libre del eje (lado del rodillo)	272
Figura 4.78	Dimensiones del rodamiento 31307J2/Q	275
Figura 4.79	Enfriado de pellets	276
Figura 4.80	Distribución de espacios del enfriador	279
Figura 4.81	Variación de temperaturas en el pellet	280
Figura 4.82	Conducción de temperatura en el centro y la superficie del pellet	283
Figura 4.83	Intersección de un cilindro largo y una pared	284
Figura 4.84	Esquema del ventilador AXP 357 – 9FA- 3000	291
Figura 4.85	Sistema de descarga deslizante bloqueado	293
Figura 4.86	Sistema de descarga deslizante desbloqueado	293

CAPITULO 5

<i>Figura 5.1</i>	Caldero de pellets vertical	296
<i>Figura 5.2</i>	Caldero de pellets horizontal	297

CAPITULO 6

<i>Figura 6.1</i>	Esquema de distribución de las maquinas para el peletizado	329
--------------------------	--	-----

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1

Tabla 1.1	Marco muestral	11
Tabla 1.2	Nivel de confianza	13
Tabla 1.3	Estrato 1	15
Tabla 1.4	Estrato 2	15
Tabla 1.5	Medidas de centralización y dispersión Estrato 1	25
Tabla 1.6	Tabla de frecuencias y porcentajes aserrín	26
Tabla 1.7	Tabla de frecuencias y porcentajes leña	27
Tabla 1.8	Tabla de datos descriptivos E ₁	28
Tabla 1.9	Medidas de centralización y dispersión E ₂	31
Tabla 1.10	Tabla de frecuencias y porcentajes – aserrín	31
Tabla 1.11	Tabla de frecuencias y porcentajes leña	32
Tabla 1.12	Planteamiento de las hipótesis de prueba	37
Tabla 1.13	Tipo de error	37
Tabla 1.14	Datos estadísticos aserrín leña	39
Tabla 1.15	Prueba t - aserrín	40
Tabla 1.16	Prueba t - leña	40

CAPITULO 2

Tabla 2.1	Composición Química y PCS de diferentes madera	50
Tabla 2.2	Composición Química de la madera	50
Tabla 2.3	Valores medios de la humedad de la madera	52
Tabla 2.4	Valores promedios de la densidad de la madera	53
Tabla 2.5	Valores promedios del calor específico de la madera	54
Tabla 2.6	Características físico – Químicas de pellets y briquetas	56
Tabla 2.7	Formas de las Briquetas	58
Tabla 2.8	Relación longitud/diámetro de las briquetas	58
Tabla 2.9	Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles	68
Tabla 2.10	Normas para pellets y briquetas	71
Tabla 2.11	Especificaciones y propiedades de los pellets	72
Tabla 2.12	Características químicas que deben poseer los pellets	73
Tabla 2.13	Características físicas que deben poseer los pellets	73
Tabla 2.14	Tabla clasificatoria preliminar	75
Tabla 2.15	Tabla de clasificación de pellets final	75

CAPITULO 3

Tabla 3.1	Características de los molinos	92
Tabla 3.2	Perdida de la humedad en la madera apilada a la intemperie	95
Tabla 3.3	Tamaño de las partículas	118

Tabla 3.4	Porcentaje de humedad	120
Tabla 3.5	Medidas centralización de la humedad de los residuos	121

CAPITULO 4

Tabla 4.1	Partes principales del molino de martillo	127
Tabla 4.2	Factor de diseño en función de la velocidad tangencial	142
Tabla 4.3	Propiedades mecánicas de algunos materiales	143
Tabla 4.4	Numero de impactos necesarios para desmenuzar el material	145
Tabla 4.5	Tiempos de triturado	146
Tabla 4.6	Ecuaciones de cortes y momentos	160
Tabla 4.7	Resultados de los esfuerzos cortantes y flectores	161
Tabla 4.8	Características del rodamiento SKF 61907	169
Tabla 4.9	Partes del sistema de desbalance	197
Tabla 4.10	Partes del sistema de desbalance	197
Tabla 4.11	Características del rodamiento SKF 61805	201
Tabla 4.12	Dimensiones de la cámara de secado y bandejas	210
Tabla 4.13	Materiales del cuarto de secado	210
Tabla 4.14	Materiales para la cubierta	211
Tabla 4.15	Dimensiones de la cubierta	212
Tabla 4.16	Declinación solar del día para cada mes	214
Tabla 4.17	Posición geográfica de Cuenca	215
Tabla 4.18	Angulo e elevación de la cubierta	216
Tabla 4.19	Propiedades termodinámicas del aire seco y húmedo	223
Tabla 4.20	Medidas del ventilador axial modelo 315	224
Tabla 4.21	Humedad específica @ %HR y ΔT especificadas	226
Tabla 4.22	Constantes empíricas para el ángulo del dado	234
Tabla 4.23	Aceros de las cuchillas de corte	256
Tabla 4.24	Ecuaciones de cortes y momentos del eje principal	260
Tabla 4.25	Resultados de los esfuerzos cortantes y flector	261
Tabla 4.26	Características del rodamiento 32016	263
Tabla 4.27	Características del rodamiento 6215	264
Tabla 4.28	Características del rodamiento 31307 J2/Q	275
Tabla 4.29	Selección del ventilador enfriador	291
Tabla 4.30	Medidas del ventilador AXP 357-9FA-1-3000	292

CAPITULO 5

Tabla 5.1	Análisis de la combustión para el caldero de leña de Colineal	298
Tabla 5.2	Resultados promedio del análisis de los gases de chimenea	299
Tabla 5.3	Calor total de combustión proporcionado por la leña	299
Tabla 5.4	Potencia calorífica perdida por los gases de escape	299
Tabla 5.5	Potencia calorífica perdida por inquemados	299
Tabla 5.6	Eficiencia total de la caldera de leña	299
Tabla 5.7	Propiedades químicas del pellet	300

Tabla 5.8	Porcentaje de masa aprovechable de cada elemento	301
Tabla 5.9	Porcentaje de cada elemento expresado en kilomoles	301
Tabla 5.10	Resumen de resultados del análisis estequiométrico	305
Tabla 5.11	Entalpías sensibles a las temperaturas especificadas	307
Tabla 5.12	Resultado del contenido de cenizas de un pellet	311

CAPITULO 6

Tabla 6.1	Costo de los materiales del molino de martillos	315
Tabla 6.2	Costo de la maquinaria necesaria para construir el molino de martillos	316
Tabla 6.3	Costo de la mano de obra requerida para construir el molino de martillos	316
Tabla 6.4	Costo de la mano de obra indirecta para el molino de martillos	317
Tabla 6.5	Costo total del molino de martillos	317
Tabla 6.6	Costo de los materiales del tamiz vibrador	317
Tabla 6.7	Costo de la maquinaria necesaria para construir el tamiz vibrador	318
Tabla 6.8	Costo de la mano de obra requerida para construir el tamiz vibrador	319
Tabla 6.9	Costo de la mano de obra indirecta para el tamiz vibrador	319
Tabla 6.10	Costo total del tamiz vibrador	319
Tabla 6.11	Costo de los materiales del cuarto de secado	320
Tabla 6.12	Costo de la maquinaria necesaria para construir el cuarto de secado	321
Tabla 6.13	Costo de la mano de obra requerida para construir el cuarto de secado	321
Tabla 6.14	Costo de la mano de obra indirecta para el cuarto de secado	321
Tabla 6.15	Costo total del cuarto de secado	322
Tabla 6.16	Costo de los materiales de la peletizadora	322
Tabla 6.17	Costo de la maquinaria necesaria para construir la peletizadora	324
Tabla 6.18	Costo de la mano de obra requerida para construir la peletizadora	324
Tabla 6.19	Costo de la mano de obra indirecta para la peletizadora	324
Tabla 6.20	Costo total de la peletizadora	325
Tabla 6.21	Costo de los materiales del enfriador	325
Tabla 6.22	Costo de la maquinaria necesaria para construir el enfriador	327
Tabla 6.23	Costo de la mano de obra requerida para construir el enfriador	327
Tabla 6.24	Costo de la mano de obra indirecta para el enfriador	327
Tabla 6.25	Costo total del enfriador	328
Tabla 6.26	Costo total del proyecto	330
Tabla 6.27	Ingreso mensual estimado	332
Tabla 6.28	Gastos de operación mensual	332
Tabla 6.29	Factibilidad económica del proyecto	334

ABREVIATURAS

n	→	Tamaño muestral
N	→	Tamaño de la población finita.
Z	→	Valor correspondiente a la distribución de Gauss (2,05 = al 96%)
p	→	Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno
q	→	Probabilidad de no ocurrencia de un fenómeno
i	→	Error que se prevé cometer (%)
f_h	→	Fracción del estrato
N_h	→	Tamaño de la población de cada estrato
$\bar{x}$	→	Media aritmética
s	→	Desviación estándar
t	→	Valor estadístico de prueba
u	→	Media poblacional hipotética
H_m	→	Porcentaje de humedad de la madera (%)
m_h	→	Masa de la madera húmeda (gr)
m_o	→	Masa de la madera seca (gr)
ρ_H	→	Densidad de la madera (Kg/m ³)
V_H	→	Volumen de la madera (m ³)
PCI	→	Poder calorífico inferior (KJ/Kg)
PCS	→	Poder calorífico superior (KJ/Kg)
h_{fg}	→	Entalpia de vaporización (KJ/Kg)
H	→	Porcentaje de Hidrogeno (%)
ρ_A	→	Densidad aparente (Kg/m ³)
CH	→	Contenido de humedad de los pellets (Kg/m ³)
$P_{inicial}$	→	Peso inicial del pellet húmedo (gr)
P_{seco}	→	Peso final del pellet seco (gr)
FR_1	→	Friabilidad del pellet

N_F	→	Numero de pellets al final del ensayo.
N_I	→	Numero de pellets al inicio del ensayo.
FR_2	→	Friabilidad del pellet (Método 2)
ICP	→	Índice de calidad energética del pellet
K_1	→	Constante (1/4500 Kg/Kcal)
$PCS0$	→	Poder calorífico anhidrido (Kcal/Kg)
K_2	→	Constante (dm ³ / Kg)
K_3	→	Constante adimensional (0.5)
M	→	Tanto por uno en material mineral
$V_{residuos}$	→	Volumen de los residuos (m ³)
$\dot{m}_A$	→	Producción de aserrín (Kg/h)
$\dot{m}_{Ac}$	→	Producción de aserrín corregido (Kg/h)
N_m	→	Potencia necesaria del motor para el molido (Kw)
i_d	→	Grado de desmenuzamiento adimensional
Q	→	Flujo másico de entrada del material (Ton/h)
D	→	Dimensión mayor de las virutas (mm)
d	→	Dimensión menor de las virutas (mm)
$P_{diseño}$	→	Potencia de diseño (HP)
F_{serv}	→	Factor de servicio según el trabajo de la maquina
r_{red}	→	Relación de reducción de velocidad
Dp	→	Diámetro de la polea conducida (m)
dp	→	Diámetro de la polea conductora (m)
a_{min}	→	Distancia mínima entre los centros de las poleas (m)
a_{max}	→	Distancia máxima entre los centros de las poleas (m)
Lo	→	Longitud de la banda de transmisión (m)
α_1	→	Angulo de contacto de la transmisión (°)
z	→	Numero de bandas para la transmisión

θ_T	→	Angulo de rotación del martillo (°)
ω	→	Velocidad angular (rad/s)
t	→	Tiempo (s)
m_1	→	Masa del martillo 1 (Kg)
m_2	→	Masa del martillo 2 (Kg)
$W_{MARTILLO}$	→	Peso total del martillo (Kg)
$I_{MARTILLO}$	→	Inercia del martillo (Kg.m ²)
$F_{impacto}$	→	Inercia del martillo (KN)
N_c	→	Potencia necesaria de trituración (CV)
η	→	Rendimiento mecánico de la transmisión
G	→	Peso total del martillo
R	→	Diámetro del circulo que describen los martillos (m)
f	→	Factor dependiente de la velocidad de rotación de los martillos
v	→	Velocidad tangencial del martillo (m/s)
σ	→	Esfuerzo de compresión (MPa)
F	→	Fuerza necesaria para provocar el fallo por compresión (N)
A	→	Área del material a comprimir (m ²)
$F_{compresion}$	→	Fuerza de compresión del aserrín (N)
F_c	→	Fuerza centrífuga (N)
R_A	→	Reacción en el punto A (N)
R_B	→	Reacción en el punto B (N)
W	→	Peso (N)
V_{max}	→	Fuerza cortante máxima (N)
M_{max}	→	Momento flector máximo (N-m)
d_{epm}	→	Diámetro del eje porta martillos (m)
τ_c	→	Esfuerzo cortante (MPa)
c	→	Distancia a la fibra más lejana (m)
T_3	→	Torque de la polea de transmisión de potencia (N-m)

F_n	→	Fuerza producida por la transmisión (N)
F_t	→	Fuerza tangencial (N)
$T_{\max}$	→	Torque total aplicado al eje principal (N-m)
d_p	→	Diámetro del eje principal (N-m)
F_{ch}	→	Fuerza de cizallamiento de la chaveta (N)
l	→	Longitud necesaria de la chaveta (m)
σ_{apl}	→	Esfuerzo de aplastamiento de la chaveta (Mpa)
L	→	Vida nominal del rodamiento (millones de revoluciones)
L_h	→	Vida nominal del rodamiento (horas de funcionamiento)
F_b	→	Esfuerzo permisible en las placas de apoyo (MPa)
S	→	Modulo de sección (m ³)
h	→	Espesor de la criba (m)
H_g	→	Altura del material granular en una tolva
f_d	→	Factor de corrección de la densidad especifica aparente
f_r	→	Factor para las partículas superiores al tamaño de la clasificación
f_s	→	Factor para las partículas inferiores al tamaño de la clasificación
f_e	→	Factor de corrección de la eficiencia de cribado
f_a	→	Factor de corrección de cribado en seco
f_m	→	Factor de corrección del tipo de apertura de la malla
f_p	→	Factor de corrección según la posición de la malla en la criba
f_i	→	Factor de corrección según el ángulo de inclinación de la criba
f_o	→	Factor de corrección según el área libre de paso
f_T	→	Factor Total de corrección
S_c	→	Superficie de cribado (m ²)
V_{tamiz}	→	Volumen del tamiz (m ³)
U_d	→	Fuerza de desbalance (N)
V_{secado}	→	Volumen de los residuos a secar (m ³)

δ	→	Declinación solar del día (°)
$\bar{\alpha}$	→	Angulo de elevación (°)
G_c	→	Radiación solar (W/m ²)
Q_r	→	Radiación en el colector (W/m ²)
Q_{apro}	→	Calor aprovechable del secador (W/m ²)
$\dot{Q}_{emit}$	→	Calor de emitancia (W/m ²)
ε	→	Emitancia del colector
σ_z	→	Constante de Stefan – Boltzman ; $W / m^2 \text{ } ^\circ K^4$
T_s	→	Temperatura de la superficie del colector (°C)
$\dot{Q}_{conv}$	→	Calor de convección (W/m ²)
h_c	→	Coeficiente de convección del aire (W/m ² °K)
T_f	→	Temperatura del aire seco (°C)
Q_{evap}	→	Energía necesaria para evaporar el agua excedente (W)
$\dot{Q}_w$	→	Calor de vaporización ganado por el aserrín (W/m ²)
Cp_w	→	Calor especifico del vapor de agua (KJ/Kg°C)
ΔT_w	→	Cambio de temperatura del aserrín en la etapa de secado (°C)
Cp_{a1}	→	Calor especifico del aire atmosférico (KJ/Kg°C)
ΔT_{a1}	→	Cambio de temperatura del aire en la etapa de secado (°C)
$\dot{m}_w$	→	Masa del agua extraída del aserrín por tiempo (Kg/h)
$\dot{q}_{a1}$	→	Flujo másico de aire que circula a través del aserrín (Kg/h)
$\dot{v}$	→	Flujo volumétrico del ventilador (m ³ /s)
$\dot{q}_w$	→	Flujo volumétrico del aire húmedo (m ³ /h)
$\dot{q}_{renovacion}$	→	Flujo volumétrico del aire seco de renovación (m ³ /s)
Rc	→	Relación de compresión
ρ_{pellet}	→	Densidad del pellet (Kg/m ³)

$P_{Rodillo}$	→	Presión de compactación del aserrín (MPa)
$\overline{Y_f}$	→	Esfuerzo de fluencia promedio de la madera (MPa)
ε_x	→	Deformación de extrusión
K	→	Fuerza de compactación del rodillo (N)
P_f	→	Presión adicional para superar la fricción (MPa)
P_o	→	Presión en las paredes del dado (MPa)
μ_r	→	Coeficiente de fricción
r	→	Radio del rodillo de compactación (m)
$a_{rodillo}$	→	Ancho del rodillo de compactación (m)
$an_{rodillo}$	→	Aceleración normal del rodillo (m/s ²)
$v_{rodillo}$	→	Velocidad tangencial del rodillo (m/s)
$F_{F rodillo}$	→	Fuerza de fricción de los rodillos (N)
$F_{T rodillo}$	→	Fuerza Total de los rodillos (N)
X	→	Longitud del desplazamiento angular del rodillo (m)
$t_{extrusion}$	→	Tiempo de salida de los pellets (s)
m_G	→	Relación de transmisión del sin fin corona
d_g	→	Diámetro de la corona (m)
γ	→	Angulo de avance del tornillo sin fin (°)
P_x	→	Paso axial del tornillo
P_C	→	Paso circunferencial
N_g	→	Numero de dientes de la corona
N_w	→	Numero de entradas del tornillo
C_m	→	Factor de corrección de razón
Wtg	→	Carga tangencial de la corona
Φ_o	→	Potencia nominal de salida
Φ_l	→	Potencia de perdida del acoplamiento
Wr	→	Fuerza radial de la transmisión

$\dot{Q}_{enfriador}$	→	Capacidad de almacenamiento del enfriador (m ³ /min)
K_{madera}	→	Coefficiente de conductividad térmica de la madera (W/m.°K)
α_{madera}	→	Difusividad Térmica de la madera (m ² /s)
μ	→	Viscosidad absoluta (N.s/m ²)
P_r	→	Numero de Prandal
Re	→	Numero de Reynolds
N_{UD}	→	Numero de Nusselt
Bi	→	Numero de Biot
τ	→	Numero de Fourier
θ_{pared}	→	Temperatura de la pared del pellet (°C)
T	→	Temperatura del centro del pellet (°C)
q	→	Calor de convección del pellet (W)
Y	→	Porcentaje de masa aprovechable (%)
m	→	Masa de una sustancia (Kg)
Pv_{aire}	→	Presión parcial del aire (kPa)
Nv_{aire}	→	Cantidad de moles del aire (kmol)
AC	→	Relación aire combustible
T_{pr}	→	Temperatura del punto de Roció (°C)
$\dot{Q}_{gases}$	→	Tasa de transferencia de calor de los gases (KW)
Cp_{gases}	→	Calor especifico de los gases de combustión (KJ/Kg.°K)
$\eta_{combustion}$	→	Eficiencia de la combustión (%)

CAPÍTULO 1

**ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN
DE LOS RESIDUOS MADEREROS EN LAS
EMPRESAS FABRICANTES DE MUEBLES DE
MADERA MÁS IMPORTANTES DE LA CIUDAD DE
CUENCA.**

CAPITULO 1

1.1 GENERALIDADES

A lo largo de las últimas cuatro décadas en la Provincia del Azuay y en la ciudad de Cuenca en particular, se ha ido conformando un complejo artesanal-industrial en torno a la actividad mueblera y maderera en general muy importante a nivel nacional, llegando en este momento a representar casi el 70% de la producción nacional de muebles.¹ Dichas empresas generan en sus procesos constructivos gran cantidad de residuos como son el aserrín, viruta, astillas y retazos de madera que en la actualidad no son aprovechados en su totalidad, implicando pérdidas económicas y al mismo tiempo una inadecuada organización del espacio físico en el interior de sus instalaciones por la acumulación de dichos residuos.

El consumo de pellets como fuente de energía alternativa no contaminante y rentable, es una aplicación evolucionada de la biomasa con alto poder calórico, limpia, de fácil manejo y almacenaje, e ideal para los sistemas de calefacción y calderos. En comparación con la leña los pellets ocupan tres veces menos volumen de almacenamiento y su combustión es mucho más eficiente, por lo que contamina mucho menos.

La utilización de los pellets en la industria va dirigido como combustible en la generación de calor de varias aplicaciones de uso como son: Calderos, Hornos y sistemas de calefacción, por el ahorro que este representa frente a otras fuentes de energía, (2Kg pellets = 1litro de gasóleo = 1m³ gas natural)²

Por todo lo anteriormente mencionado, en este capítulo se analizara estadísticamente el porcentaje de residuos de las empresas manufactureras de muebles de madera en Cuenca, mediante un análisis muestral representativo que permita verificar si existe la cantidad necesaria de residuos para que ingresen al sistema de peletizado.

¹ Agencia Cuencana para el Desarrollo e Integración Regional “ACUDIR”. Proyecto Clúster de madera y muebles.

² <http://twww.ventadebiomasa.wordpress.com>

1.2 ANALISIS DE LAS EMPRESAS

En general todas las empresas dedicadas a la fabricación de muebles tienen un esquema de producción similar para la elaboración de sus productos (*Figura 1.1*). A continuación se presenta un esquema generalizado del proceso productivo.

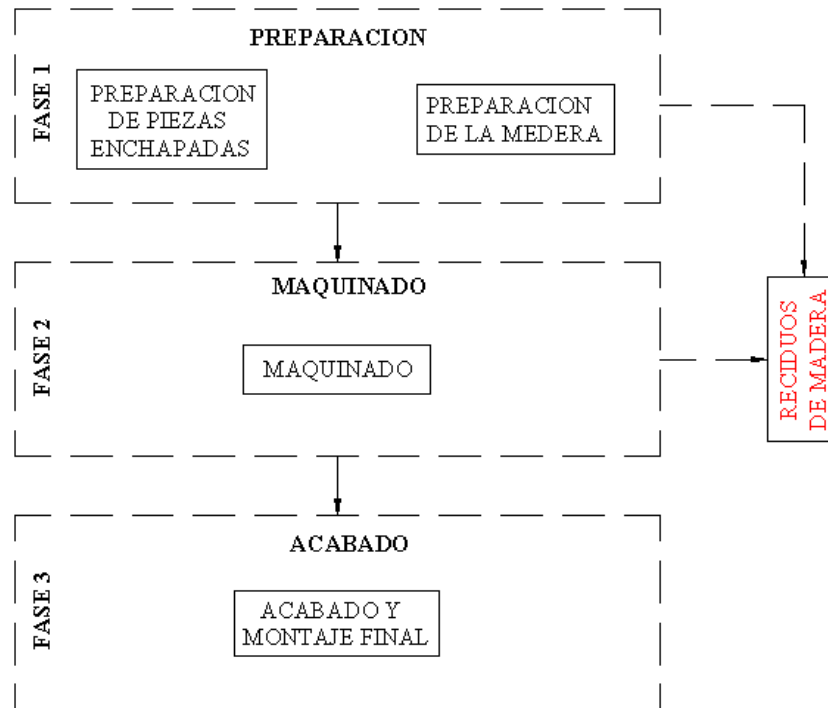


Figura 1.1 Diagrama Generalizado del Proceso Productivo
(Fuente: El Autor.)

Mediante un amplio enfoque de la producción de muebles de madera en Cuenca podemos obtener un porcentaje aproximado de la cantidad de residuos generados en sus procesos de manufactura (aserrín, viruta, astillas de madera).

Solo un pequeño porcentaje de estos residuos son utilizados como subproductos del proceso productivo para la generación de calor, mientras tanto el porcentaje restante es desaprovechado, esto involucra problemas de almacenaje dentro de sus instalaciones, pérdidas económicas debido a la salida de este material sin ninguna aplicación interna y la disminución de eficiencia de los calderos debido a al bajo poder calorífico que posee la madera en su estado natural.

1.2.1 PRODUCTOS ELABORADOS POR LAS EMPRESAS DE MUEBLES DE MADERA EN CUENCA

A nivel nacional, Cuenca es una de las ciudades más importantes en lo que se refiere a la producción de muebles de madera por la variedad en sus diseños y la calidad de sus productos que han sido reconocidos a nivel local e internacional.

Dicho reconocimiento origina una elevada demanda de sus productos que han obligado a las empresas a optimizar sus diseños y recursos en la producción, es por ello que existe una gran variedad de muebles para hogar y oficina.

En esencia las empresas elaboran los mismos productos pero con diferentes diseños y estilos, los mismos que dependen sus acabados, como se detalla a continuación.

ESTILO 1

Característica principal: tallados menores, combinación de grecas, líneas curvas y adornadas.

Disponibilidad: salas, comedores, dormitorios, oficinas y complementarios.

Diseños: elegantes, estilo colonial americano.



Figura 1.2 Estilo de Muebles N° 1
(Fuente: <http://www.colineal.com>)



Figura 1.2 (Continuación) Estilo de Muebles N° 1
(Fuente: <http://www.colineal.com>)

ESTILO 2

Características principales: tallados, grecas, combinación de chapas.

Disponibilidad: dormitorios, comedores, salas, oficinas y complementos.

Diseño: elegantes, estilo clásico europeo.



Figura 1.3 Estilo de Muebles N° 2
(Fuente: <http://www.colineal.com>)



Figura 1.3 (Continuación) Estilo de Muebles N° 2
(Fuente: <http://www.colineal.com>)

ESTILO 3

Características principales: línea curva y semi adornada. Estilo contemporáneo, muy práctico y funcional.

Disponibilidad: dormitorios, comedores, salas y complementos.

Diseño: contemporáneo.



Figura 1.4 Estilo de Muebles N° 3
(Fuente: <http://www.colineal.com>)



Figura 1.4 (Continuación) Estilo de Muebles N° 3
(Fuente: [hppt://www.colineal.com](http://www.colineal.com))

ESTILO 4

Características principales: línea recta, sencilla, minimalista y limpias.

Disponibilidad: dormitorios, comedores, salas y complementos.

Diseño: modernos.



Figura 1.5 Estilo de Muebles N° 4
(Fuente: [hppt://www.colineal.com](http://www.colineal.com))



Figura 1.5 (Continuación) Estilo de Muebles N° 4
(Fuente: <http://www.colineal.com>)

1.3 ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico se lo realiza con la finalidad de obtener valores aproximados a los reales de generación de residuos madereros (aserrín y leña) producidos por las grandes y pequeñas industrias, debido a que en la actualidad este tipo de datos no se encuentran tabulados por ninguna entidad privada o pública.

Los datos para el estudio estadístico serán obtenidos por medio de encuestas dirigidas a una muestra definida con anterioridad de la población (empresas madereras) existente en la ciudad de Cuenca, los resultados que se obtengan del análisis estadístico se someterán a una hipótesis para la validación del proyecto, de esta manera se puede obtener un valor promedio fundamentado en el análisis de residuos de madera con el que trabajaría la maquina peletizadora a diseñara

Con la finalidad de adentrarnos al estudio estadístico del proyecto, es esencial establecer los pasos que seguirán al igual que los conceptos que describen a cada uno de los parámetros que se contemplaran, a continuación se presenta el diagrama de muestreo a seguir:

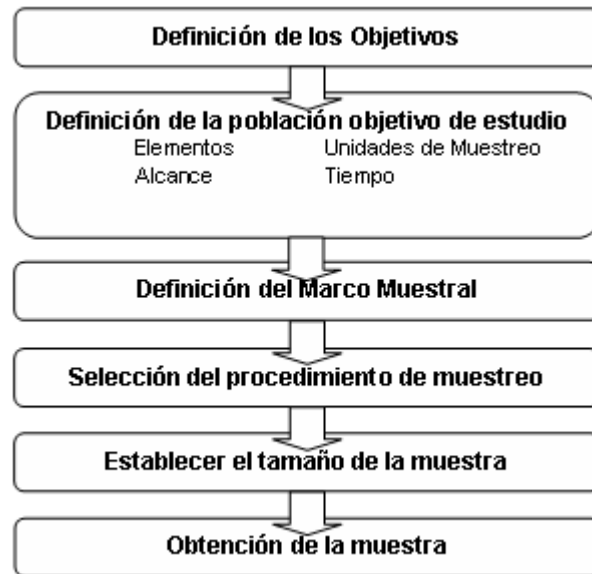


Figura 1.6 Proceso de Muestreo
(Fuente: El Autor.)

1.3.1 DEFINICION DE LOS OBJETIVOS

El estudio estadístico está encaminado primordialmente a las macro empresas dedicadas a la manufactura de muebles de madera, pero sin descuidar un porcentaje importante de las microempresas generadoras de residuos madereros, con el fin de aproximarnos a valores estadísticos reales para determinar la factibilidad del proyecto.

1.3.2 SELECCION DE LA POBLACION

Para la delimitación del universo o población³, en primer lugar se debe determinar la unidad de análisis. Las empresas manufactureras de muebles de madera son las unidades de análisis que se investigan en este proyecto debido a que son las principales generadoras de residuos de madera.

Una vez establecida la unidad de análisis fijamos el alcance del proyecto que permitirá establecer parámetros y generalizar los resultados. El estudio de este proyecto sería demasiado extenso con respecto al tiempo si se toma como universo

³ **Población.-** Es el conjunto de todos los elementos a los cuales se refiere la investigación. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. Metodología de la Investigación. Guía N°7. Proceso Científico.

un país entero (Ecuador), por ello la ciudad de Cuenca fue seleccionada como la población de estudio, debido a que está catalogada como una de las principales ciudades que posee un alto número de empresas dedicadas a la elaboración de muebles de madera.

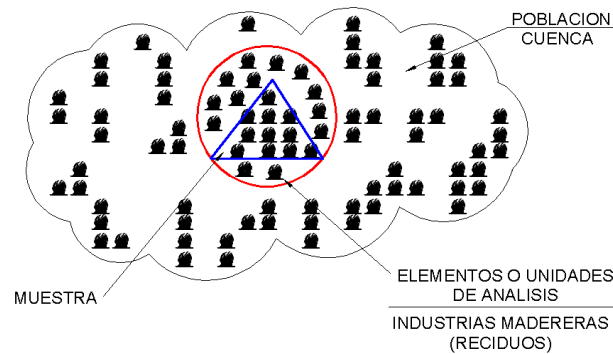


Figura 1.7 Selección y determinación de la población y muestra
(Fuente: El Autor.)

1.3.3 MARCO MUESTRAL

Este constituye un marco muestral⁴ o de referencia que nos permitirá verificar físicamente los elementos de la población, la posibilidad de enumerarlos y por ende de proceder a la selección de los elementos muestrales.

Para la elaboración del marco muestral se realizó una investigación en la Cámara de Comercio de Cuenca, con el propósito de extraer un listado de todas las empresas fabricantes de muebles de madera inscritas en dicha institución.

A continuación se presenta la lista que constituye el marco muestral.

Nº	NOMBRE DE LA EMPRESA	DIRECCION	TELEFONO
1	FARICA PATO	GIL RAMIREZ DAVALOS 2-30	2800-560
2	MAREL	RAFAEL MARIA ARIZAGA 7-91	2826-388
3	LA CARPINTERIA CCIM. CIA. LTAD.	CORNELIO VINTIMILLA 2-54	2809-445

⁴ **Marco Muestral:** Se refiere a la lista, el mapa o la fuente de donde pueden extraerse todas las unidades de muestreo o unidades de análisis en la población. - Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. Metodología de la Investigación. Guía N°7. Proceso Científico.

4	MADIART	MIGUEL CORDERO 6-117	2817-431
5	FARCONT CIA. LTDA.	AV. 12 DE ABRIL E ISABELA (ESQ)	2883-992
6	KUEN S.A.	AV. FLORENCIO ASTUDILLON	2847-157
7	MUEBLEXPRESO	HERNAN MALO 1-10 CIRCUN. SUR	2819-883
8	ROMADER	VIA PATAMARCA 1-96	2900-968
9	MODO	AV. ORDÓÑEZ LAZO Km. 4.5	2895-477
10	MADENZA	PASEO DE LOS CAÑARIS 1-84	2807-078
11	YOGO	AUTOPISTA GAPAL	2887-628
12	RENOVA	CALLE DEL SARAR Y CEREZOS	2844-499
13	VITEFAMA	RICAU RTE CALLE 10 AGOSTO	4085-247
14	MUEBLERIA DON BOSCO	TURI - SECTOR LA UNION	2819-696
15	ALTO DISEÑO	AV. ENRIQUE ARIZAGA - SAN JOAQUIN	2846-432
16	MADERAMICA	AV. TORIL Y GUAGRAHUMA	2809-045
17	MADEFORM	AV. LOJA Y RODRIGO TRIANA	2818-502
18	FACINACION MUEBLES	AV. ORDÓÑEZ LAZO Km. 2.5	_377-057
19	CARDECA	AV. OCTAVIO CHACON 4-87	2863-053
20	AA MARCO	ERNESTO LOPEZ Y CARLOS ARIZAGA	2854-438
21	LURIQ	OCTAVIO CHACON 4-104	2882-239
22	MUEBLES MZ	SIMARRONES Y CAJANUMA	2801-197
23	MUEBLES ESTILO	MONAY CHICO Km. 2.3	2350-019
24	MADERAS MELGAR	URB. MASTODONTES	2474-693
25	MOBILIART	CALLE PALMIRA 1-16 Y PUCARUMI	2900-057
26	MUEBLES BIENESTAR	CAMINO AL CAMAL	2898-820
27	LINEA A1	VIA A MISICATA	2844-236
28	DISERVAL	CALLE PALMIRA 777	2899-992
29	ARTE RUSTICO	PANAMERICANA SUR	2385-921
30	ALPHAB MUEBLES S.A.	AV. EL TORIL Y AV. AMERICA	2864-986
31	AMUATUA CIA. LTDA.	AV. ESPAÑA Y TURUHAYCO	2862-888
32	COLINEAL CIA. LTDA.	PAQ. INDUSTIAL AV. CHACON 2100	2805-122
33	ECUAMUEBLE	AV. HUMBOLT 3-164 Y J. ANDRADE	2832-966
34	TORRES Y CORDERO CIA. LTDA.	AV. EL TORIL	2800-038
35	CARUREL	CORNELIO VINTIMILLA (PARQ. INDUS.)	2806-397
36	MUEBLES LINAJE	SEC. MOLINOPAMBA - RICAU RTE	2891-472
37	CARPEBA	GONZALES SUAREZ 6-38	2806-053
38	MADERMAN	YANAHURCO 5-25 Y VALDIVIA	2802-488
39	ALPAMA	JORGE CARRERA ANDRADE 1-91	2867-577
40	MUEBLES KAROLINA	EL SOL Y FRANCISCO DE ORELLANA	2818-635
41	MUEBLERIA LA UNION	TURI - SECTOR LA UNION	2812-183
42	MUEBLERIA EBANO	MARISCAL SUCE 4-79	2831-574
43	MUEBLERIA EL CISNE	MARIANO CUEVA 10-60	2847-107
44	MUEBLERIA OCHOA	BENIGNO MALO 6-4 Y P CORDOVA	2840-024
45	MUEBLERIA RODAS	MANUEL VEGA 11-59	2826-858
46	MUEBLERIA ROFRIGUEZ	TARQUI 6-86	2841-432

47	MUEBLERIA ESTANDAR	MARIANO CUEVA 9-78	2832-834
48	MUEBLERIA ULLOA	JUAN JARAMILLO 7-85	2823-967
49	MUEBLERIA V ERA VAZQUES	ESTEVEZ DE TORAL 10-46	2850-054
50	MUEBLERIA YOLITA	GASPAR SANGURIMA 8-54	2829-703
51	MUEBLES ARTECTO	AV AMERICAS 10-02 Y M CUEVA	2843-432
52	MUEBLES BURGUES	CALLE DEL RETORNO Y DON BOSCO	2885-611
53	MUEBLES EL ARTESANO	CARLOS ARIZAGA 6-60	2853-004
54	CARPINTERIA MJ	CIMARRONES Y CAJANUMA	2901-197
55	MUEBLES FORMAS Y CONTRASTES	AV 12 DE ABRIL E ISABELA	2883-992
56	MUEBLES MOBLIQUE	AV SOLANO 4-82	97980739
57	MUEBLES TANGARE	AV 1 DE MAYO 1-97	2818-313
58	MADESUR	AUTOPISTA Y CAMINO A TURI	4090-841
59	MADERA EL BOSQUE	GIL RAMIREZ DAVALOS Y ROMERO	2883-500
60	MADERAS VITANZA	LOS CONQUISTADORES L3	2818-407
61	MADERAS VALDEZ	AV LOS ANDES Y BUERAN	2864-452
62	MADERAS EL BOSQUE	AV DON BOSCO 1-84	2816-231

Tabla 1.1 Marco Muestral
(Fuente: Cámara de Comercio de Cuenca)

1.3.4 PROCESO DE MUESTREO

El proceso de muestreo⁵ involucra una serie de conceptos y pasos sucesivos que tienen que desarrollarse sistemáticamente para obtener la muestra final, para poder continuar con nuestro análisis seleccionaremos el tipo de muestreo con la finalidad de escoger el más conveniente para el desarrollo de la investigación.

Básicamente las muestras están divididas en dos categorías, las cuales están diferenciadas por la probabilidad de que un elemento muestral pueda ser escogido dentro de la muestra, de esta manera vamos a tener a: *Muestras No Probabilísticas* y *Muestras Probabilísticas*.

Elegir entre una muestra probabilística o no probabilística depende de los objetivos del estudio, del esquema de investigación y de la contribución que se piensa hacer con ella, el proceso de muestreo que va de acuerdo con los objetivos planteados

⁵ Es la parte de la población que se selecciona, y de la cual realmente se obtiene la información para el desarrollo de la investigación. - Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. Metodología de la Investigación. Guía N°7. Proceso Científico.

previamente, es el proceso de *Muestreo Probabilística*, debido a que dentro este proceso existe un subgrupo de procesos de muestreo los cuales están diferenciados de acuerdo con las características que posee la población, el grado de representatividad de cada unidad de análisis y por la mecánica de selección de las unidades de análisis; estos procesos de muestreo son: *Muestra Probabilística Estratificada* y *Muestra Probabilística por Racimos*.

Muestra Probabilística Estratificada.- Aquí el grado de homogeneidad de la población determina en gran medida el grado de representatividad que se pueda lograr en la muestra. Existen algunas situaciones en la cuales resulta necesario combinar otros métodos de selección como es el de estratificar la muestra para que represente los estratos o categorías que hay en la población y que son relevantes al estudio.

En base a nuestros objetivos de investigación se considera que la **muestra probabilística estratificada** se ajusta más al proceso de recolección de datos, ya que nos permite comparar sus resultados entre segmentos de la población de tal manera que ningún grupo quede excluido del universo.

1.3.5 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Ya establecido el método de muestreo de acuerdo a nuestros objetivos de estudio, procedemos a determinar el tamaño de la muestra de estudio, para ello es esencial conocer el significado de cada variable de la ecuación.⁶

El nivel de confianza (p), es la probabilidad de que la estimación efectuada se ajuste a la realidad; es decir, que caiga dentro de un intervalo determinado basado en el estimador y que capte el valor verdadero del parámetro a medir.

Según el anexo 1.1, para un nivel de confianza del 96%, $Z = 2.05$. A continuación se presenta un extracto de esta tabla.

⁶ Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar Boletín Electrónico No. 02, María Torres, <http://www.umce.cl/publicaciones>

Nivel de confianza	Probabilidad más cercana	Valor Z
80%	0.3997	1.28
94%	0.4699	1.88
96%	0.4798	2.05

Tabla 1.2 Nivel de Confianza
(Fuente: MASON, 8va edición, Pág. 302.)

En contraste con el nivel de confianza, la **probabilidad de fracaso (q)**, esta expresada por: $q = 1-p$.

El error muestral (i), siempre se comete ya que existe una pérdida de la representatividad al momento de escoger los elementos de la muestra. Sin embargo, la naturaleza de la investigación nos indicará hasta qué grado se puede aceptar.

La muestra probabilística estratificada tiene su propio sistema de cálculo del tamaño de la muestra, como se detalla a continuación:

Cálculo del Tamaño de la muestra no ajustada, teniendo en cuenta que la población tiene un valor finito se aplica la siguiente fórmula empírica:

$$n = Z^2 \frac{N \cdot p \cdot q}{i^2 (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Ecuación 1.1 Tamaño de la muestra.
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

n = tamaño muestral.

N = tamaño de la población finita = 62 empresas

Z = valor correspondiente a la distribución de Gauss = 2,05 equivalente al 96%

p = nivel de confianza. Probabilidad de ocurrencia del fenómeno = 0,96

$q = 1 - p$, probabilidad de la no ocurrencia del fenómeno = 0,04

i = error que se prevé cometer (impuesto por el investigador) = 4%

$$n = 2.05^2 \frac{62 \cdot 0.96 \cdot 0.04}{0.04^2 \cdot (62 - 1) + 2.05^2 \cdot 0.96 \cdot 0.04}$$

$$n = 38.93 \approx 39$$

Es decir que de la población, 39 de las empresas enumeradas en la tabla 1.1, serán sujetas al análisis estadístico.

División de Estratos.

Para realizar el cálculo de la muestra se divide a la población en estratos, en este caso separamos a la población en dos grupos de acuerdo a la cantidad de residuos generados semanalmente.

Estrato 1.

Empresas grandes con una generación de residuos mayor o igual a 15m^3 quincenales.

Nº	NOMBRE DE LA EMPRESA	Nº	NOMBRE DE LA EMPRESA
1	LINAJE	7	COLINEAL
2	VITEFAMA	8	MADERAMICA
3	BIENESTAR	9	MODEFORM
4	ROMADER	10	LURIQ
5	MOBILIART	11	TOTORACOA
6	CARRUSEL	12	MADERAS EL BOSQUE
		13	CARDECA
TOTAL DE EMPRESAS = 13			

Tabla 1.3 Estrato 1
(Fuente: El Autor.)

Estrato 2.

Empresas pequeñas con una generación de residuos menor a 15m³ quincenales.

Nº	NOMBRE DE LA EMPRESA	Nº	NOMBRE DE LA EMPRESA
1	LINEA A1	25	DISERVAL
2	FABRICA PATO	26	MARCEL
3	MADIART	27	FARCONT
4	KUEN	28	MUEBLES EXPRESO
5	MODO	29	MADENSA
6	YOGO	30	RENOVA
7	MUEBLERIA DON BOSCO	31	ALTO DISEÑO
8	FACINACION MUEBLES	32	AA MARCOS
9	MUEBLES ESTILO	33	MADERAS MELGAR
10	ARTE RUSTICO	34	ALPHA MUEBLES
11	AMAUTA	35	ECUAMUEBLE
12	TORRES Y CORDERO	36	CARPEBA
13	MADERMA	37	ALPAMA
14	MUEBLES KAROLINA	38	MUEBLERIA LAUNION
15	MUEBLERIA EBANO	39	MUEBLERIA EL CISNE
16	MUEBLERIA RODAS	40	MUEBLERIA OCHOA
17	MUEBLERIA RODRIGUEZ	41	MUEBLERIA ESTANDAR
18	MUEBLERIA ULLOA	42	VERA VAZQUEZ
19	MUEBLERIA YOLIA	43	ARTECTO
20	MUEBLES EL ARTESANO	44	CARPINTERIA MJ
21	FORMAS Y CONTRASTES	45	MOBLIQUE
22	TAGARE	46	MADESUR
23	MADERA EL BOSQUE	47	MADERAS VITANZA
24	MADERAS VALDEZ	48	MADERAS EL BOSQUE
TOTAL DE EMPRESAS = 48			

Tabla 1.4 Estrato 2
(Fuente: El Autor.)

Cálculo de la fracción del estrato.

$$fh = \frac{n}{Nh}$$

Ecuación 1.2 Fracción del Estrato.
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

Donde:

fh = fracción del estrato.

n = tamaño de la muestra.

Nh = tamaño de la población de cada estrato.

$$fh = \frac{39}{62}$$

$$fh = 0,629$$

Cálculo del tamaño de la muestra de cada estrato.

$$nh = fh \bullet Nh$$

Ecuación 1.3 Tamaño Muestral de cada estrato.
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

Por lo tanto se determina que el número de elementos muestrales de cada estrato es:

ESTRATO – 1
8. 17 $\approx$ 8 Empresa

ESTRATO – 2
30.24 $\approx$ 30 Empresas

De cada estrato se elegirán las empresas que tengan más significancia para nuestro análisis.

1.4 RECOLECCION DE LA INFORMACION PRIMARIA

Para recolectar la información se pueden utilizar diferentes tipos de instrumentos, de acuerdo con los objetivos y el proceso metodológico establecidos en la investigación. Los más importantes son: la encuesta, la entrevista.⁷

De acuerdo al tamaño de la muestra calculado anteriormente se considera que la mejor forma de recolectar la información es por medio de la entrevista, debido a que la información requerida esta manejada por una persona en específico, esta persona posee los datos sobre la cantidad de desperdicios de madera producidos dentro de la empresa en la que labora y la manera en la que son manejados estos desperdicios.

La entrevista (ver entrevistas en Anexo 1.2) contiene varias preguntas relacionadas con la generación de residuos de madera en sus procesos, enfocando el objetivo central de la entrevista que es conocer la cantidad de residuos de madera y la forma en la que se tratan dentro de cada empresa.

A continuación se presenta los resultados obtenidos en las entrevistas realizadas a las empresas seleccionadas para la muestra:

Línea de productos elaborados por las empresas.

Las empresas dedicadas a la fabricación de muebles de madera clasifican sus productos en dos grupos: muebles para el hogar y la oficina y lo que son complementos, para este análisis fueron consideradas las empresas de los dos estratos. En la *figura 1.8* se representan los porcentajes obtenidos.

⁷ **La Encuesta**, se aplica a grupos grandes conformados por la muestra.

La Entrevista, se aplica a grupos pequeños o a individuos para recolectar datos específicos.

■ HOGAR Y OFICINA ■ COMPLEMENTOS

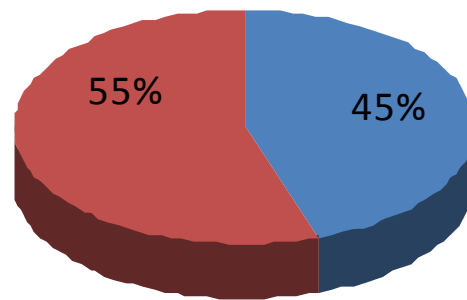


Figura 1.8 Diagrama de Pastel del porcentaje de productos elaborados
(Fuente: El Autor.)

Madera que utilizan las empresas para la fabricación de sus productos.

Las maderas mas utilizadas por las empresas para la elaboración de muebles están representadas en forma porcentual en la *figura 1.9*, aquí están consideradas las empresas de los dos estratos.

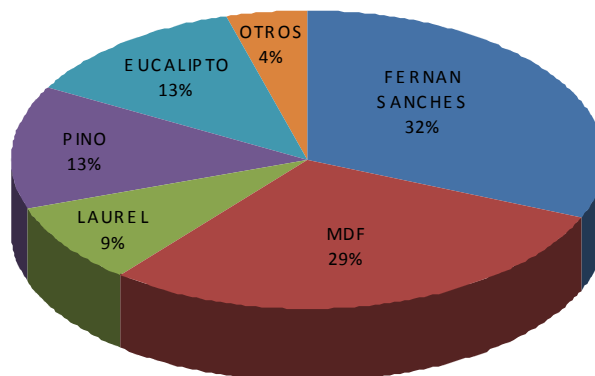


Figura 1.9 Diagrama de pastel del tipo de madera
(Fuente: El Autor.)

Residuos generados por las empresas del estrato 1.

En el primer estrato de muestreo están las empresas que generan una cantidad de aserrín mayor o igual a $15m^3$. En la *figura 1.10* se puede el diagrama de barras de estos datos tabulados.

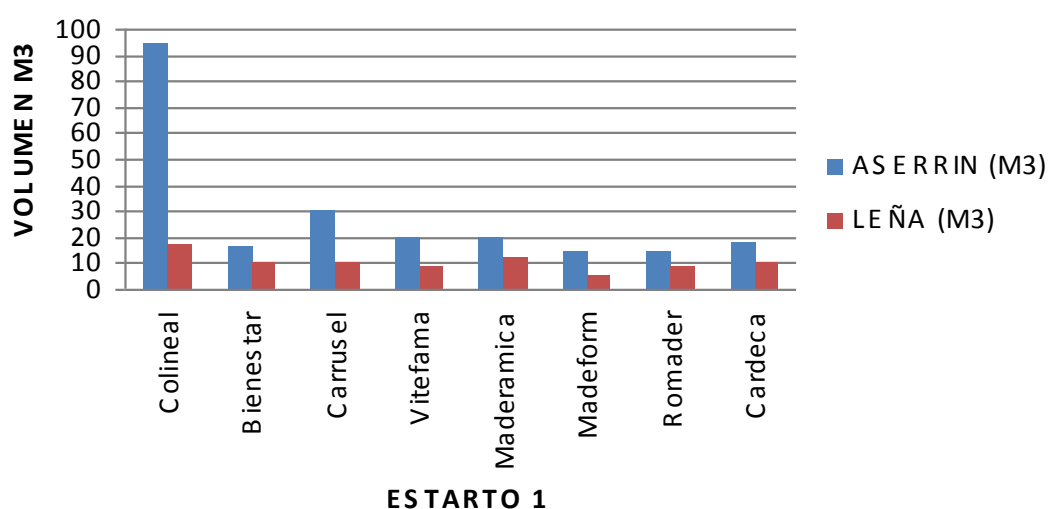


Figura 1.10 Diagrama de barras de los residuos producidos en el estrato 1
(Fuente: El Autor.)

Residuos generados por las empresas del estrato 2.

En el segundo estrato de muestreo están las empresas que generan una cantidad de aserrín menor a 15m^3 . En la *figura 1.11* se observan estos datos tabulados.

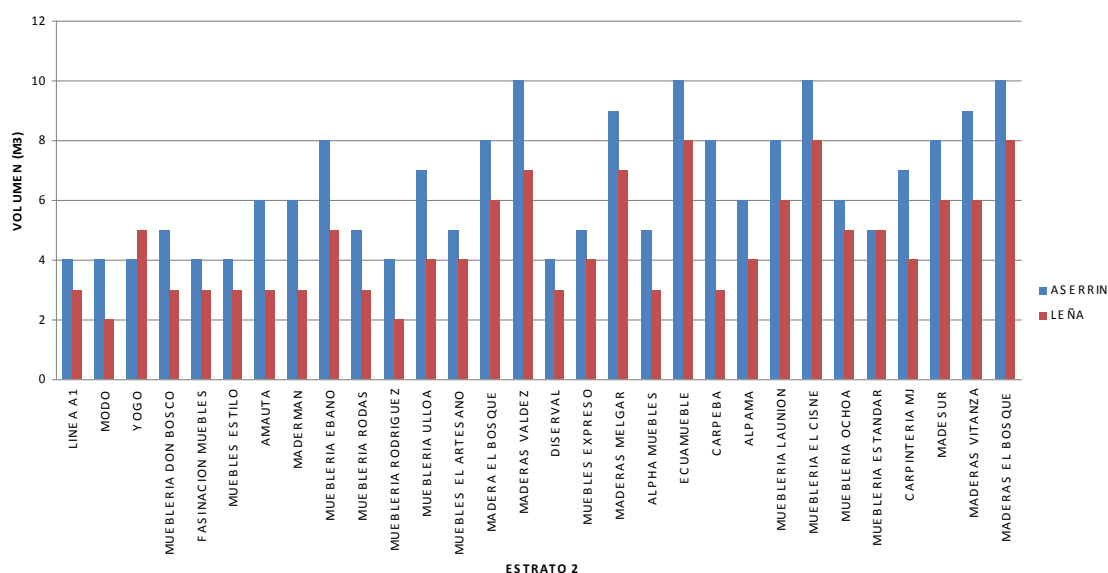


Figura 1.11 Diagrama de barras de los residuos producidos en el estrato 2
(Fuente: El Autor.)

Cantidad de residuos utilizados internamente en las empresas y cantidad de residuos desechados.

En cada empresa existen subprocesos en los que pueden ser usados parte de los residuos de madera sólida (leña), en la *figura 1.12* se presenta el porcentaje y la forma de utilización de estos residuos para el *Estrato 1*.

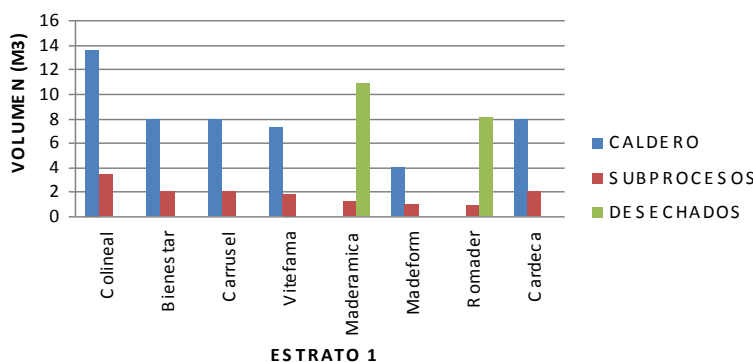


Figura 1.12 Diagrama de barras de la utilización interna de residuos en los subprocesos del estrato 1
(Fuente: El Autor.)

Cantidad de residuos utilizados internamente en la empresa y cantidad de residuos desechados.

Como se puede observar en la *figura 1.13* en las empresas del *Estrato 2* se desecha la mayor cantidad de los residuos de madera.

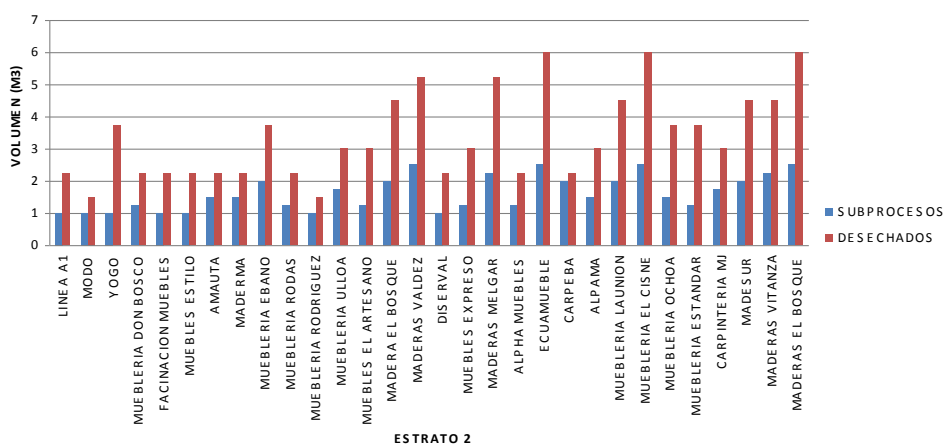


Figura 1.13 Diagrama de barras de la utilización interna de residuos en los subprocesos del estrato 2
(Fuente: El Autor.)

Porcentaje de empresas interesadas en adquirir la maquina peletizadora.

Un objetivo importante de de la entrevista era saber si a las empresas visitadas les interesaba adquirir la maquina que les permita optimizar sus recursos que actualmente son desechados, los resultados se observan en la *figura 1.14*.

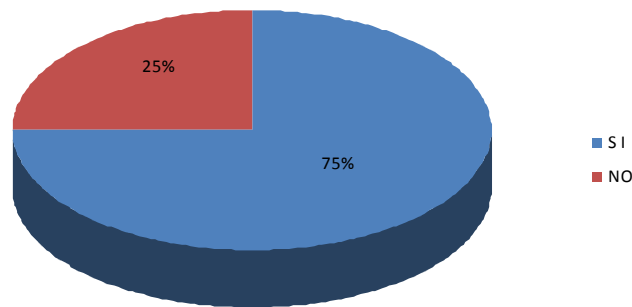


Figura 1.14 Diagrama de pastel de resultados de las empresas interesadas en adquirir la maquina peletizadora
(Fuente: El Autor.)

El 25 % de las empresas que respondieron que nos les interesaba la maquina peletizadora, argumentaron que su empresa no posee caldero y no cuentan con recursos físicos y económicos para su implementación.

1.5 ANALISIS ESTADISTICO DE LA MUESTRA

Una vez realizada la recolección de datos, se procede a analizarlos estadísticamente con el fin de determinar si las propiedades de la muestra seleccionada tienen la representatividad necesaria dentro de la población, por ello es indispensable tener claro los conceptos que permitan evaluar los parámetros estadísticos necesarios para verificar la prueba de hipótesis. (Los resultados de cada parámetro se presentaran mas adelante con la ayuda del Software Estadístico).

1.5.1 MEDIDAS DE CENTRALIZACIÓN.

Nos permite obtener un valor único que se considera típico en una serie de datos en su conjunto que nos permite para comparar con otros conjuntos, dentro de estos valores tenemos:

Media aritmética.

Es la medida de tendencia central la más familiar. Se encuentra sumando todos los valores de una serie de datos y dividiendo el total entre el número de valores que se sumaron, se calcula mediante la ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 1.4 Media Aritmética.
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

Donde:

$\bar{x}$ = Media aritmética.

x_i = Cada uno de los términos.

n = Número de términos.

Mediana.

Es el valor por encima del cual cae la mitad de los valores y por debajo cae la otra mitad.

Media Impar	Media Par
$\tilde{x} = \frac{x_{n+1}}{2}$	$\tilde{x} = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$

Ecuación 1.5 Mediana Aritmética.
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

1.5.2 MEDIDAS DE DISPERSIÓN.

Para indicar la representatividad de las medidas de centralización. En algunos casos la media representa con mayor fiabilidad a la muestra, y en otros con menos, por eso

es necesario contar con una medida que nos indique cómo de dispersos están los datos. Las medidas de dispersión o concentración nos van a cuantificar la representatividad de los valores centrales.

Desviación Estándar (s).

Se interpreta como la cantidad que se ha de restar y sumar a la media para que la mayor parte de datos se encuentren en esa franja, si todos los datos se encuentran ahí la medida de centralización será representativa, si no es así no.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Ecuación 1.6 Desviación Estándar.

(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

Varianza (s²).

Es el promedio de los cuadrados de las desviaciones de los valores individuales de su media, es usada como una medida de la dispersión presente en la muestra.

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Ecuación 1.7 Varianza.

(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

1.6 ANÁLISIS DE DATOS EN UN SOFTWARE ESPECIALIZADO EN ESTADISTICA

El análisis de los datos recopilados se realizó en el software especializado en estadística, este es un paquete estadístico y de administración de datos para los analistas e investigadores, que proporciona un amplio rango de habilidades para el proceso analítico completo de datos, generando la información necesaria para la toma de decisiones de forma rápida.

El software nos permite graficar los resultados del análisis estadístico al igual que la creación de tablas con los resultados de todos los datos analizados, a continuación presentamos las tablas de resultados y graficas correspondientes al análisis de cada estrato (El programa con los datos y su análisis completo se encuentran en el archivo digital adjunto).

El análisis Estadístico en este software inicia con la tabulación de datos primarios obtenidos de las encuestas que se realizaron, estos son ingresados en el editor de datos y a cada uno se le asigna la variable que será analizada.

Es importante aclarar que el proceso estadístico esta aplicado únicamente para los datos de residuos de aserrín y leña tabulados en las encuestas ya que esta es la información especifica más importante de la investigación.

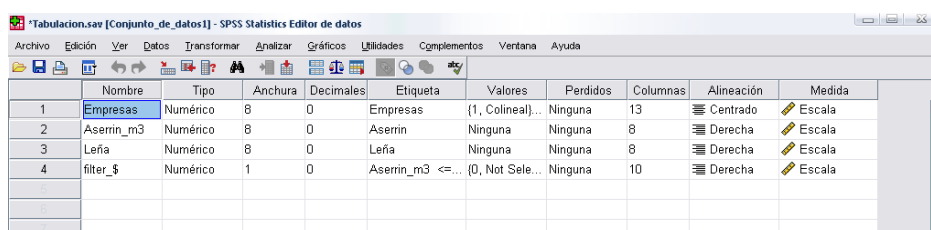


Figura 1.15 Ingreso de Variables en el Software.
(Fuente: Software Estadístico.)

	Empresas	Aserrin_m3	Leña	filter_ \$
1	Colineal	95	17	Not Selected
2	Vitafama	20	9	Not Selected
3	Cardeca	18	10	Not Selected
4	Carrusel	30	10	Not Selected
5	Bienestar	16	10	Not Selected
6	Maderamica	20	12	Not Selected
7	Maderform	15	5	Not Selected
8	Romader	15	9	Not Selected
9	Linea A1	4	3	Selected
10	Modo	4	2	Selected
11	Yogo	4	5	Selected
12	M. Don Bosco	5	3	Selected
13	Facinacion Muebles	4	3	Selected
14	M. Estilo	4	3	Selected
15	Amauta	6	3	Selected
16	Maderman	6	3	Selected
17	M. Ebano	8	5	Selected
18	M. Rodas	5	3	Selected
19	M. Rodriguez	4	2	Selected
20	M. Ulloa	7	4	Selected
21	M. El Artesano	5	4	Selected
22	Madera El Bosque	8	6	Selected
23	Maderas Valdez	10	7	Selected
24	Diserval	4	3	Selected
25	M. Expreso	5	4	Selected

Figura 1.16 Ingreso de datos en el Software.
(Fuente: Software Estadístico.)

1.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ESTRATOS

El software estratifica automáticamente la muestra tabulada en base a condiciones establecidas con anterioridad en el *estrato 1* y el *estrato 2*.

1.7.1 ANALISIS DEL ESTRATO 1

En la *tabla 1.5* se resumen todos los resultados de las medidas de centralización y dispersión calculados automáticamente por el software y mostrados en la ventana *visor de datos*.

Estadísticos			
		Aserrín	Leña
N	Válidos	8	8
	Perdidos	0	0
Media		28,63	10,25
Error típ. de la media		9,636	1,191
Mediana		19,00	10,00
Moda		15 ^a	10
Desv. típ.		27,255	3,370
Varianza		742,839	11,357
Asimetría		2,661	,817
Error típ. de asimetría		,752	,752
Rango		80	12
Mínimo		15	5
Máximo		95	17
Suma		229	82
a. Existen varias modas. Se mostrará el menor de los valores.			

Tabla 1.5 Medidas de Centralización y Dispersión– Estrato 1.
(Fuente: Software Estadístico.)

De igual manera el programa estadístico nos permite realizar un análisis gráfico de los datos del *estrato 1* en base a la frecuencia y el volumen de aserrín y leña respectivamente.

A continuación se pueden ver los datos tabulados y agrupados en base a la frecuencia para el volumen de aserrín, con su respectiva gráfica.

Aserrín					
		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válidos	15	2	25,0	25,0	25,0
	16	1	12,5	12,5	37,5
	18	1	12,5	12,5	50,0
	20	2	25,0	25,0	75,0
	30	1	12,5	12,5	87,5
	95	1	12,5	12,5	100,0
	Total	8	100,0	100,0	

Tabla 1.6 Tabla de Frecuencias y Porcentajes – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

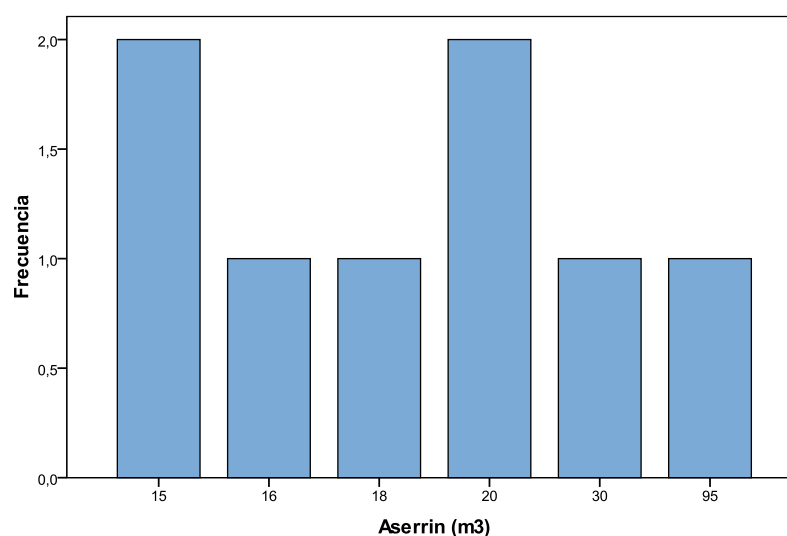


Figura 1.17 Grafico de Barras de Frecuencias – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

De manera similar para el volumen de leña de *estrato 1* tenemos los datos tabulados con su correspondiente grafica.

Leña					
		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válidos	5	1	12,5	12,5	12,5
	9	2	25,0	25,0	37,5
	10	3	37,5	37,5	75,0
	12	1	12,5	12,5	87,5
	17	1	12,5	12,5	100,0
	Total	8	100,0	100,0	

Tabla 1.7 Tabla de Frecuencias y Porcentajes – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

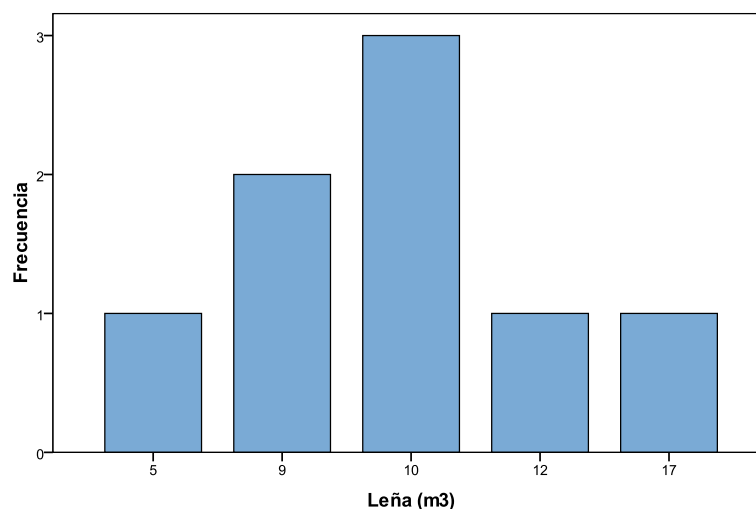


Figura 1.18 Grafico de Barras de Frecuencias – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

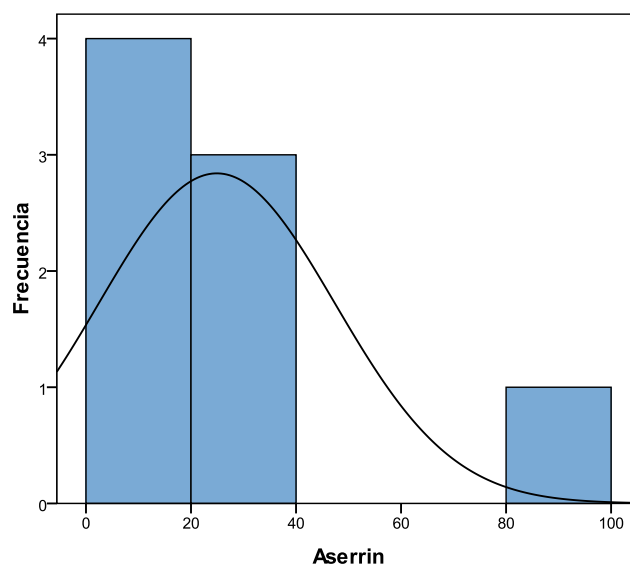
La *tabla 1.8* nos permite comparar los estadísticos descriptivos de los volúmenes de aserrín y leña para el *estrato 1*.

Estadísticos descriptivos								
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desv. típ.	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error típico	Estadístico	Estadístico
Aserrín	8	80	15	95	28,63	9,636	27,255	742,839
Leña	8	12	5	17	10,25	1,191	3,370	11,357
N válido (según lista)	8							

Tabla 1.8 Tabla de Datos Descriptivos – Estrato 1.
(Fuente: Software Estadístico.)

Como es de conocimiento general **un histograma** consiste en una serie de rectángulos cuyo ancho es proporcional al alcance de los datos que se encuentra dentro de una clase y cuya altura es proporcional al número de elementos que caen dentro de la clase.

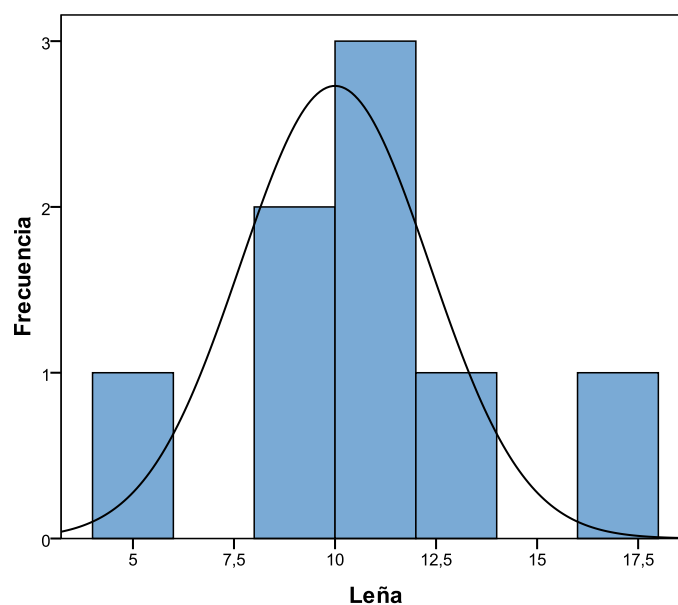
La *figura 1.19* representa el histograma en base a los datos de volumen de aserrín del *estrato 1* con su respectiva curva estándar.



Media =28,63
Desviación típica =27,255
N =8

Figura 1.19 Histograma – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

El histograma correspondiente para el volumen de leña del *estrato 1* esta representado en la *figura 1.20*



Media =10,25
Desviación típica =3,37
N =8

Figura 1.20 Histograma – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

Grafico de Dispersión de Datos.

Este grafico representa la dispersión de la muestra y mediante una regresión lineal representa la centralización de los datos según el nivel de confianza.

Las *figura 1.21* y *1.22* representan la dispersión de los datos para el volumen de aserrín y leña del *estrato 1* respectivamente. Como se puede observar los datos están ajustados mediante una regresión lineal y con un nivel de confianza de 95 %.

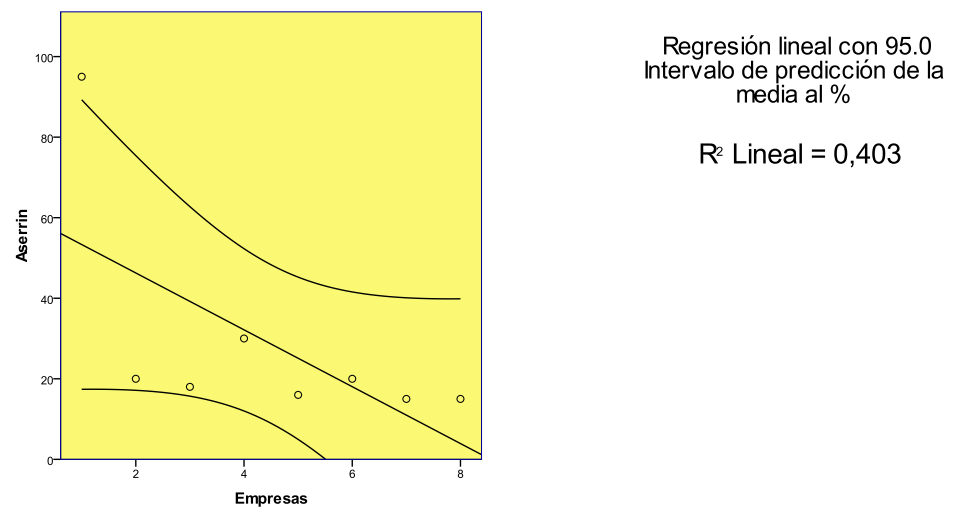


Figura 1.21 Diagrama de Dispersión – Aserrín
(Fuente: Software Estadístico.)

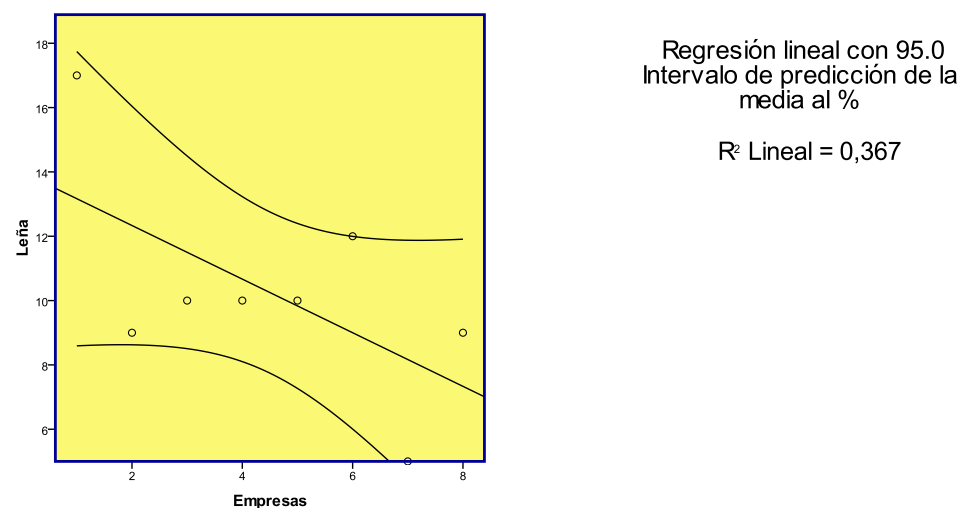


Figura 1.22 Diagrama de Dispersión – Leña
(Fuente: Software Estadístico.)

1.7.2 ANALISIS DEL ESTRATO 2

En la *tabla 1.9* se resumen todos los resultados de las medidas de centralización y dispersión para el *estrato2*, calculados automáticamente por el software estadístico y mostrado en la ventana *visor de datos*.

Estadísticos			
		Aserrín	Leña
N	Válidos	30	30
	Perdidos	0	0
Media		6,47	4,53
Error típ. de la media		,389	,331
Mediana		6,00	4,00
Moda		4	3
Desv. típ.		2,129	1,814
Varianza		4,533	3,292
Rango		6	6
Mínimo		4	2
Máximo		10	8
Suma		194	136

Tabla 1.9 Medidas de Centralización y Dispersión– Estrato 2.
(Fuente: Software Estadístico.)

A continuación se pueden ver los datos tabulados y agrupados en base a la frecuencia para el volumen de aserrín, con su respectiva grafica.

Aserrín				
	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válidos 4	7	23,3	23,3	23,3
5	6	20,0	20,0	43,3
6	4	13,3	13,3	56,7
7	2	6,7	6,7	63,3
8	5	16,7	16,7	80,0
9	2	6,7	6,7	86,7
10	4	13,3	13,3	100,0
Total	30	100,0	100,0	

Tabla 1.10 Tabla de Frecuencias y Porcentajes – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

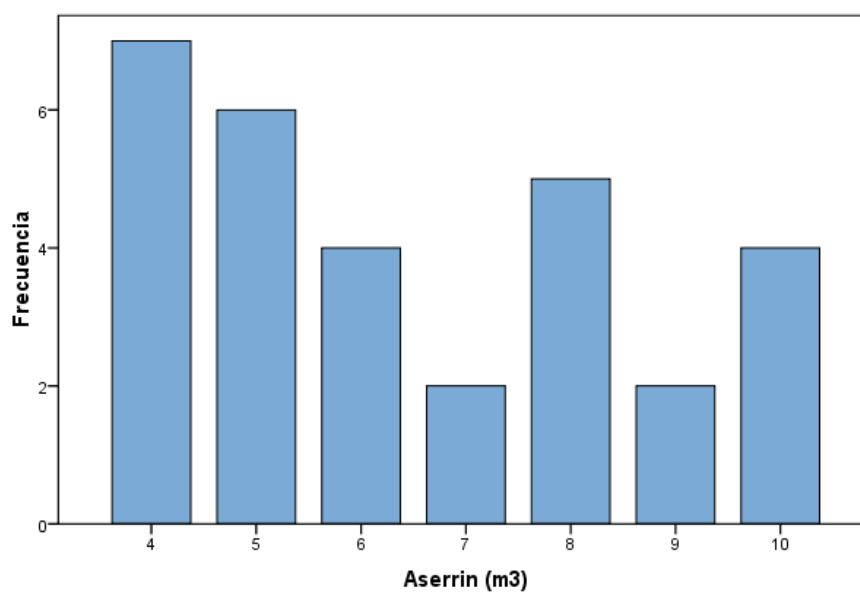


Figura 1.23 Grafico de Barras de Frecuencias – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

De manera similar para el volumen de leña de *estrato 2* tenemos los datos tabulados con su correspondiente grafica.

Leña					
		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válidos	2	2	6,7	6,7	6,7
	3	10	33,3	33,3	40,0
	4	5	16,7	16,7	56,7
	5	4	13,3	13,3	70,0
	6	4	13,3	13,3	83,3
	7	2	6,7	6,7	90,0
	8	3	10,0	10,0	100,0
	Total	30	100,0	100,0	

Tabla 1.11 Tabla de Frecuencias y Porcentajes – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

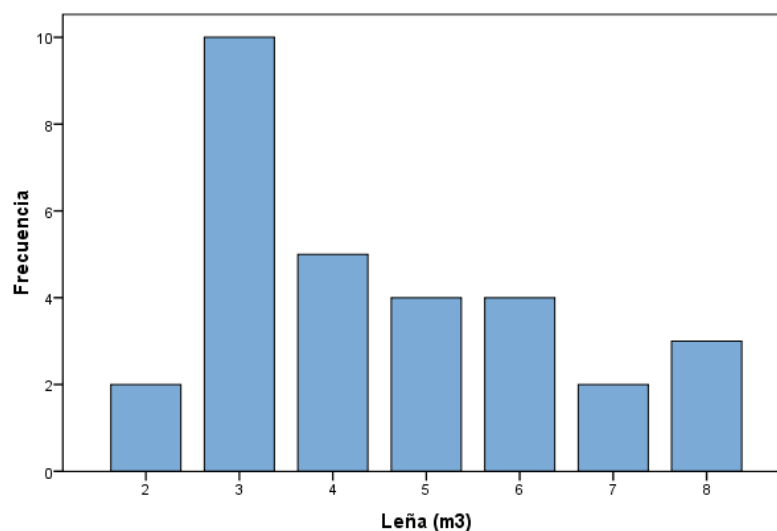


Figura 1.24 Grafico de Barras de Frecuencias – Leña
(Fuente: Software Estadístico.)

En la *figura 1.25* se presenta el histograma en base a los datos de volumen de aserrín del *estrato 2* con su respectiva curva estándar.

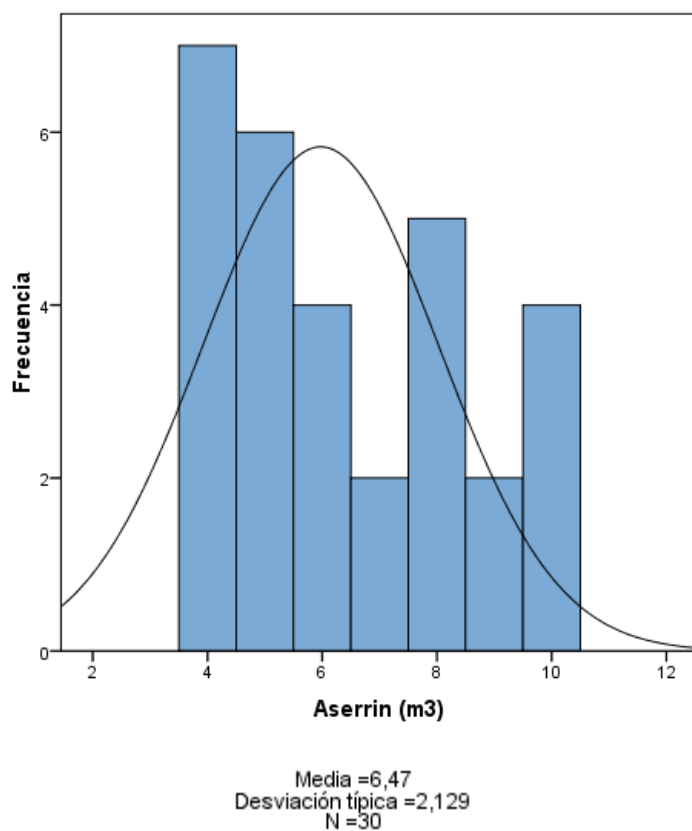


Figura 1.25 Histograma – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

De manera similar para el volumen de leña de *estrato 2* tenemos el histograma de la *figura 1.26*.

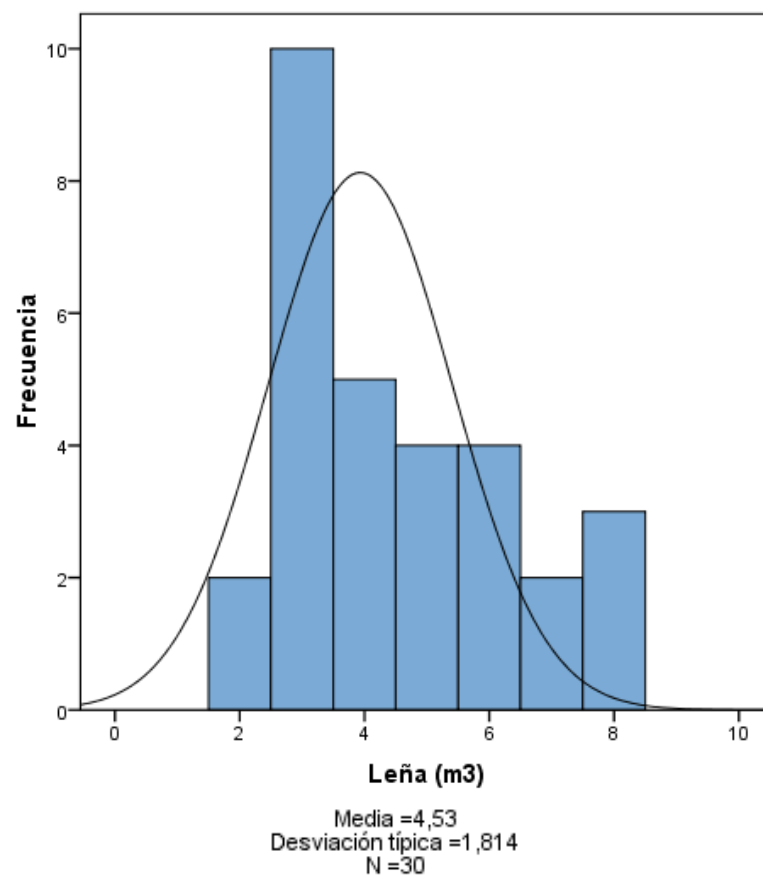


Figura 1.26 Histograma – Leña
(Fuente: Software Estadístico.)

Grafico de Dispersión de Datos

Las *figuras 1.27 y 1.28* representan la dispersión de los datos muestrales del *estrato 2*, para el aserrín y leña respectivamente, estos datos están ajustados mediante una regresión lineal y centralizados con un nivel de confianza del 95%.

La dispersión de datos es mayor en el *estrato 2* debido al tamaño de la muestra y a la variabilidad de datos, la variabilidad de los datos es la principal razón por la que algunas empresas no están dentro de la franja central.

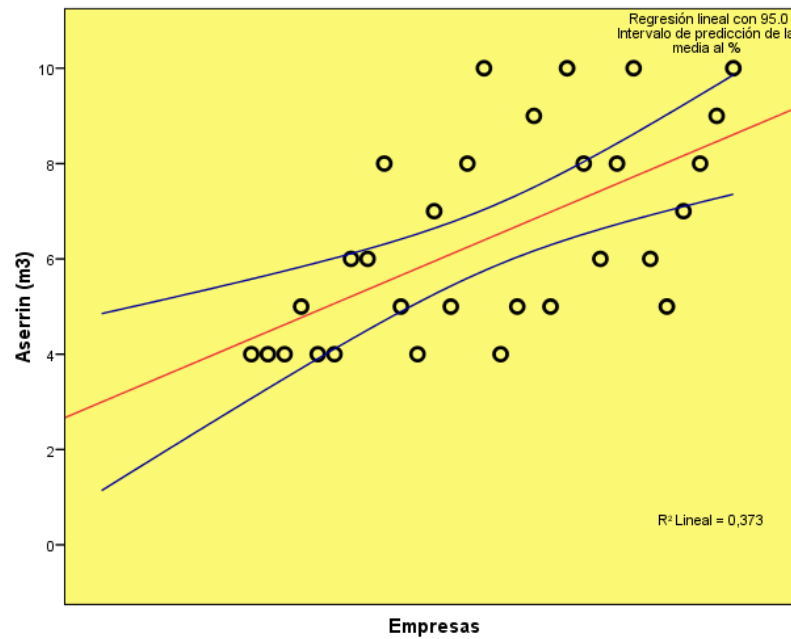


Figura 1.27 Diagrama de Dispersión – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

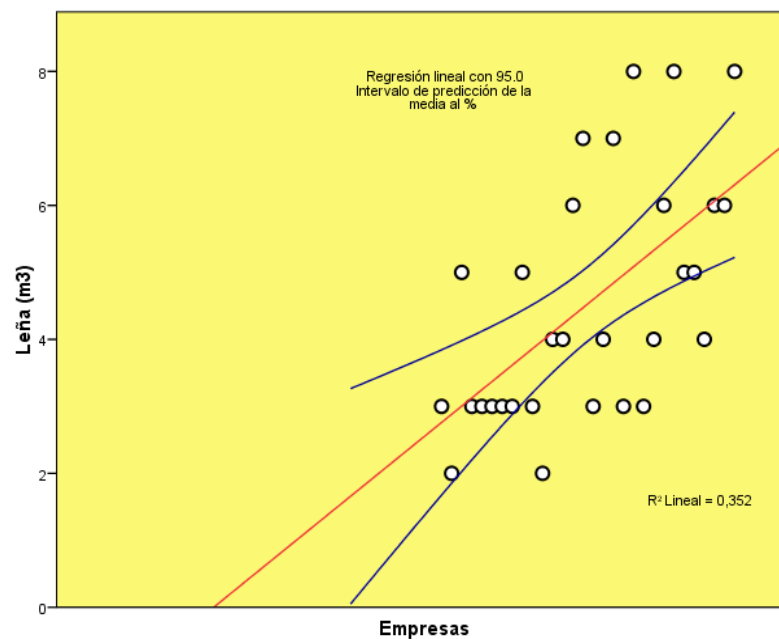


Figura 1.28 Diagrama de Dispersión – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

1.8 PRUEBA DE HIPOTESIS.

El paso final del análisis estadístico es la elaboración de un proceso que nos permita probar la validez de una aseveración acerca de un parámetro poblacional.

La Hipótesis.

Una hipótesis es una afirmación acerca de la población. Para verificar si la afirmación es razonable se usan datos obtenidos de las encuestas (muestra).

Procedimiento para probar la hipótesis

El procedimiento se basa en la evidencia muestral y la teoría de la probabilidad; este procedimiento es utilizado para determinar si la hipótesis planteada es una afirmación razonable.

Para la prueba de hipótesis existe un procedimiento sistematizado que consiste en cinco pasos, que se enuncian a continuación.

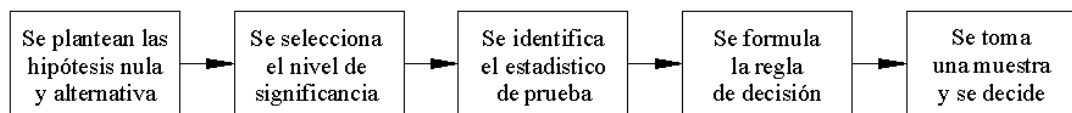


Figura 1.29 Procedimiento para la prueba de hipótesis
(Fuente: El Autor.)

En este análisis estadístico se realiza la prueba de hipótesis para cada estrato ya que consideramos dos poblaciones diferentes, cada una con su respectiva muestra.

1.8.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS NULA (H_0) Y LA HIPÓTESIS ALTERNATIVA (H_1).

La hipótesis nula (H_0).

Es una afirmación que no se rechaza a menos que los datos proporcionen evidencia convincente de que sea nula, por lo tanto no hay como afirmar que sea verdadera.

La hipótesis alternativa (H_1).

Esta hipótesis es aceptada si los datos estudiados proporcionan la evidencia suficiente para demostrar que la hipótesis nula es falsa.⁸

El valor de la hipótesis nula se ha establecido en base a la media muestral, tomando en cuenta que el valor de **H_0** debe ser superior a $\bar{x}$, con ello garantizamos que la cantidad de residuos de madera que se necesitan para la producción de pellets sea suficiente.

En *tabla 1.12* se han planteado las hipótesis nulas y las hipótesis alternativas para el aserrín y leña de cada estrato

ESTRATO 1		ESTRATO 2	
Aserrín	Leña	Aserrín	Leña
$H_0 \geq 30 \text{ m}^3$	$H_0 \geq 12 \text{ m}^3$	$H_0 \geq 7 \text{ m}^3$	$H_0 \geq 5 \text{ m}^3$
$H_1 < 30 \text{ m}^3$	$H_1 \geq 12 \text{ m}^3$	$H_1 < 7 \text{ m}^3$	$H_1 \geq 5 \text{ m}^3$

Tabla 1.12 Planteamiento de las hipótesis de prueba.
(Fuente: El Autor.)

1.8.2 SELECCIÓN DEL NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α).

También conocida como nivel de riesgo debido al riesgo que corre la hipótesis nula de ser rechazada cuando en realidad es verdadera. El siguiente cuadro permite identificar el tipo de error que se puede cometer en la investigación

Hipótesis Nula	Investigador	
	Se acepta H_0	Se rechaza H_0
H_0 es verdadera	Decisión correcta	Error tipo I
H_0 es falsa	Error de tipo II	Decisión correcta

Tabla 1.13 Tipo de Error.
(Fuente: El Autor)

Error del tipo I, este tipo de error sucede cuando se rechaza la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.

⁸ MASON, Robert D, *ESTADISTICA PARA ADMINISTRACION Y ECONOMIA*, Alfa omega, 11va edición, Colombia-Bogota 2004.

Error de tipo II, este error sucede cuando se acepta la hipótesis nula cuando es falsa.

Para proyectos de investigación generalmente se selecciona un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (5%).

1.8.3 CALCULO DEL VALOR ESTADÍSTICO DE PRUEBA (T).

El valor estadístico de prueba se calcula partiendo de la información muestral, y se utiliza para determinar si se rechaza o no la hipótesis nula.

El estadístico de prueba que se utiliza es la distribución t , debido a que la muestra es menor o igual a 30 y se desconoce la desviación estándar de la población.

Para realizar una prueba de hipótesis usando la distribución t , se utiliza la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}}$$

Ecuación 1.8 Valor estadístico t
(Fuente: <http://www.umce.cl/publicaciones>)

Con $n - 1$ grados de libertad, donde:

$\bar{X}$ = Es la medida de la muestra.

μ = Es la media poblacional hipotética.

s = Es la desviación estándar de la muestra.

n = Es el número de observaciones de la muestra.

El cálculo de la prueba “ t ” esta realizado en el software estadístico, el resultado va ser representado mediante una tabla que corresponderá a una muestra y a un valor de hipótesis nula ya planteada anteriormente (tabla 1.12), el resultado de esta prueba nos permitirá validar o rechazar esta hipótesis y graficar el renglo de aceptación o de rechazo.

Cálculo en el Programa Software Estadístico.

Para realizar el cálculo, el software estadístico primero presenta una tabla que pertenece a los datos correspondientes a la muestra del aserrín y de la leña en donde se encuentran los datos necesarios para el correspondiente cálculo.

ESTRATO 1				
Estadísticos para una muestra				
	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Aserrín	8	28,63	27,255	9,636
Leña	8	10,25	3,370	1,191

ESTRATO 2				
Estadísticos para una muestra				
	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Aserrín	30	6,47	2,129	,389
Leña	30	4,53	1,814	,331

Tabla 1.14 Datos Estadísticos – Aserrín – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

Para la elaboración de la *prueba t* en lo que se refiere al Aserrín se planteo una hipótesis nula presentada en la *tabla 1.12* para cada estrato, el programa realiza el cálculo con respecto a esta hipótesis (H_0) para luego validarla o rechazarla.

ESTRATO 1						
Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 30					95% Intervalo de confianza para la diferencia
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
Aserrín	-1,43	7	,891	-1,375	-24,16	21,41

ESTRATO 2						
Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 7					95% Intervalo de confianza para la diferencia
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
Aserrín	-1,372	29	,181	-,533	-1,33	,26

Tabla 1.15 Prueba t – Aserrín.
(Fuente: Software Estadístico.)

Para el análisis de la *prueba t* de la muestra de leña se plantea una hipótesis nula al igual que en el aserrín, con este valor y los datos representados en la la prueba "t", obteniendo el siguiente resultado:

ESATRTO 1						
Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 12					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
					Inferior	Superior
Leña	-1,469	7	,185	-1,750	-4,57	1,07

ESTRATO 2						
Prueba para una muestra						
	Valor de prueba = 5					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
					Inferior	Superior
Leña	-1,409	29	,170	-,467	-1,14	,21

Tabla 1.16 Prueba t – Leña.
(Fuente: Software Estadístico.)

1.8.4 FORMULACIÓN DE LA REGLA DE DECISIONES.

Establece las condiciones específicas en las que se rechaza o no la hipótesis nula. La región de rechazo define la ubicación de todos los valores que son tan grandes o tan pequeños, que la probabilidad de que se presenten bajo la suposición de que la hipótesis nula es verdadera, es muy remota.

Valor Crítico, Punto de división entre la región en la que se rechaza la hipótesis nula y la región en la que no se rechaza la hipótesis nula, este valor se obtiene de la tabla presentada en *el anexo 1.4*.

El valor crítico para la muestra del primer estrato es igual a: $vc = 1,895$

El valor crítico para la muestra del segundo estrato es igual a: $vc = 1,699$

1.8.5 TOMA DE UNA DECISIÓN.

Este último punto se refiere a una prueba de hipótesis, es el cálculo del estadístico de prueba, compararlo con el valor crítico y tomar la decisión de rechazar o no la hipótesis nula, para esto se realiza la prueba de significancia de una cola.

La prueba de una cola se representa a continuación, se grafica el valor crítico obtenido anteriormente, este valor dividirá a la región de rechazo y a la de aceptación, el valor calculado de "t" también se grafica y si cae dentro de la zona de aceptación H_0 se aceptara pero si cae en la zona de rechazo la hipótesis tendrá que ser rechazada y trabajaremos con la hipótesis alternativa. El análisis de la prueba de cola se realiza por separado, tanto para el aserrín – leña como para los estratos.

Prueba de Cola – Estrato 1.

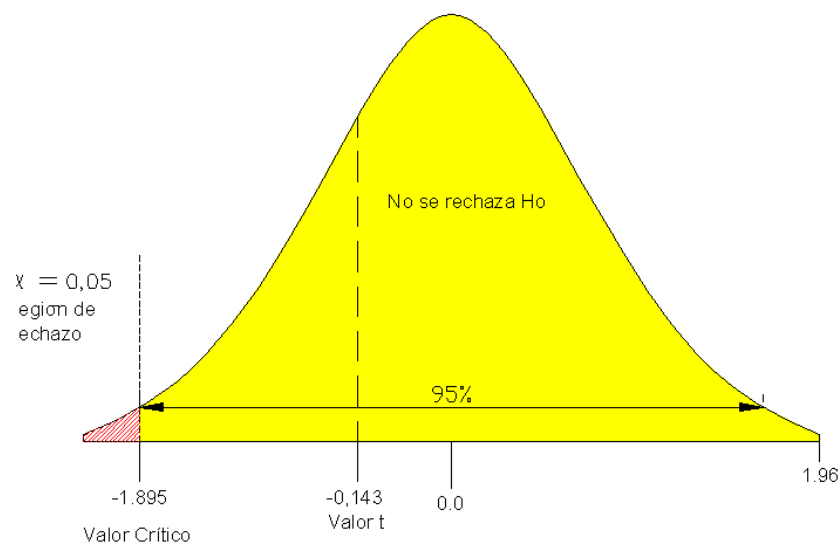


Figura 1.30 Prueba de Cola – Aserrín.
(Fuente: El Autor.)

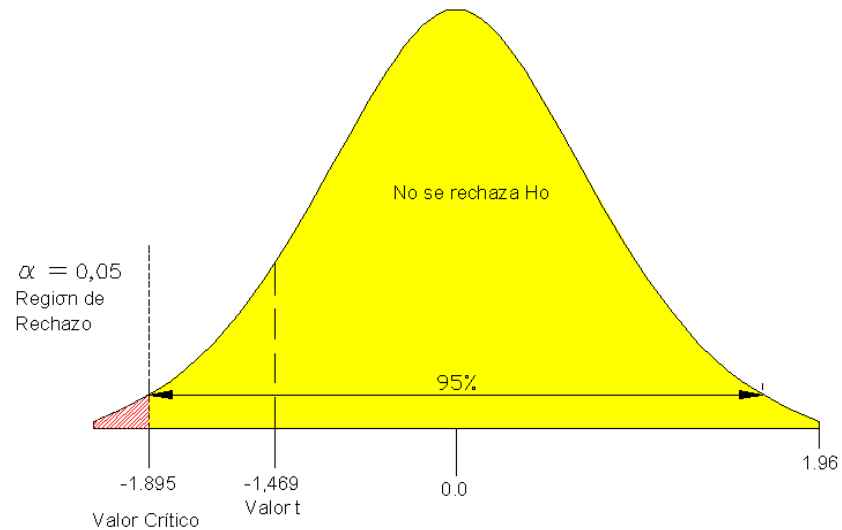


Figura 1.31 Prueba de Cola – Leña.
(Fuente: El Autor.)

Como se puede observar en las figuras 1.29 y 1.30 el valor "t" esta representado en cada figura esta al lado derecho del valor crítico esto quiere decir que la hipótesis nula es aceptada.

Prueba de Cola – Estrato 2.

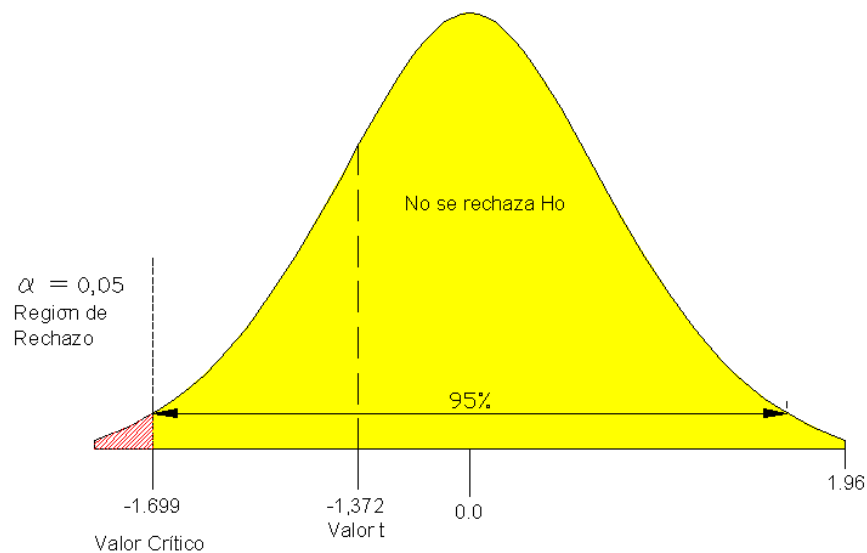


Figura 1.32 Prueba de Cola – Aserrín.
(Fuente: El Autor.)

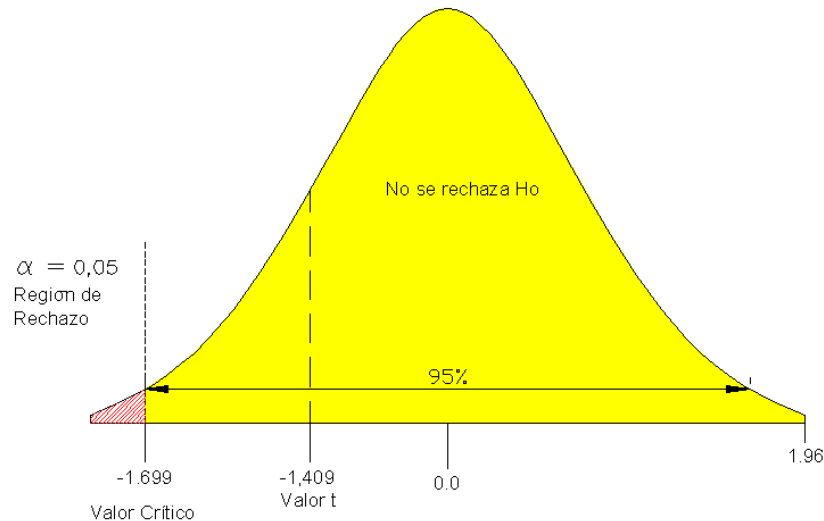


Figura 1.33 Prueba de Cola – Leña.
(Fuente: El Autor.)

Como se puede observar en las figuras 1.31 y 1.32 el valor “t” esta representado en cada figura esta al lado derecho del valor crítico esto quiere decir que la hipótesis nula es aceptada.

1.9 CONCLUSION DEL ANALISIS ESTADISTICO

Según el análisis estadístico se puede concluir que la muestra obtenida, es representativa dentro de la población en sus dos estratos, por lo que las características que poseen estas empresas se asemejaran a las características de la población.

Para la prueba de hipótesis fue necesario plantear una media muestral hipotética (μ) superior a la media muestral ($\bar{X}$), con ello se garantiza que la cantidad de residuos existentes en Cuenca se la necesaria para abastecer las necesidades de producción de pellets en la industria.

Al comprobar y ser aceptada la hipótesis nula planteada mediante el proceso de la prueba de hipótesis se concluye que los datos muestrales permiten aceptar la afirmación sin que esto signifique que sea verdadera, por lo tanto la evidencia muestral recolectada es valida.

Para producir una tonelada de pellets se necesitan 10 m^3 , en el análisis estadístico realizado se obtuvo una media del estrato 1 de $28,63\text{ m}^3$ de aserrín por quincena más una media de $6,47\text{ m}^3$ de aserrín del estrato 2 por quincena, esto quiere decir que la producción de pellets haciendo a más de 3 Toneladas de pellets por quincena, esto en el caso de recolectar el aserrín de las diferentes empresas de la ciudad.

Las empresas del estrato 1 tienen la capacidad necesaria de residuos generados para la producción de pellets y utilizarlos internamente para la combustión en su caldero, la empresa que se puede ver más favorecida con un sistema de peletizado es COLINEAL S.A. debido a una generación de 95 m^3 de aserrín por quincena.

CAPITULO 2

LOS PELLETS Y PRODUCCIÓN DE PELLETS EN EUADOR

CAPITULO 2

2.1 GENRALIDADES

Ecuador es considerado una potencia forestal en crecimiento que genera múltiples beneficios para los ciudadanos, el medio ambiente y el Estado. Según la Asociación Ecuatoriana de Industriales de la Madera, unas 200 mil personas están vinculadas a este sector en el país, si se toma en cuenta toda la cadena productiva que abarca la industria del sector forestal, madera, muebles y, primordialmente, el sector artesanal que se concentra en las zonas rurales y ciudades pequeñas del país.

Los residuos de madera provenientes de industrias de muebles y aserraderos en Cuenca presentan muchas oportunidades para crear valor agregado. Este capítulo considera una de las vías para utilizar los residuos madereros convirtiéndolos en pellets, conocidos también como biocombustibles sólidos densificados. Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

En Cuenca la industria de transformación de la madera genera cerca del 30% de residuos de la materia prima usada, por lo que su aprovechamiento representa un importante reajuste de costos así como una reducción del impacto ambiental que generan.⁹

⁹ www.hoy.com.ec

2.2 LA BIOMASA

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), de aserraderos (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros).

La lectura del Balance Energético de Ecuador indica que los hidrocarburos, en particular el petróleo con más del 80%, dominan la oferta de energía primaria en el país mientras que el aporte del conjunto de fuentes renovables de energía es bastante reducido alcanzando sólo al 14,6%.¹⁰

Dentro de las energías renovables claramente se observa el reducido consumo de la biomasa de la leña, cuyo aprovechamiento es principalmente residencial y apenas el 1.6 % es utilizado en la industria, por ello la necesidad de optimizar estos recursos para generar mejores ingresos económicos en las industrias.

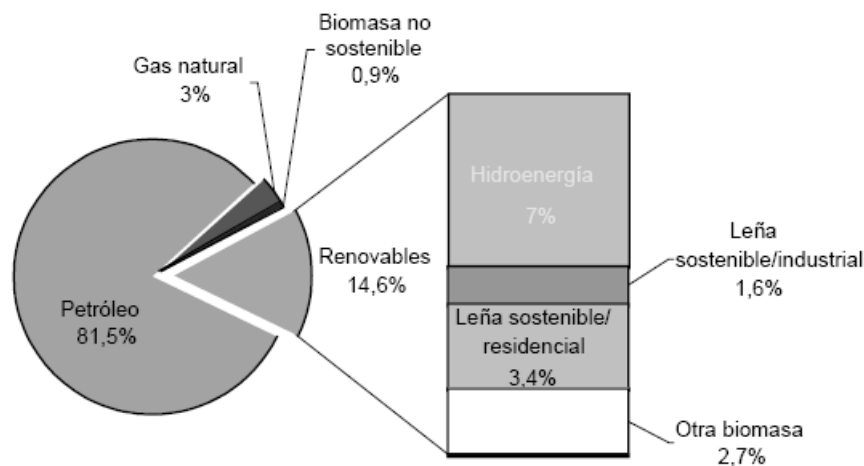


Figura 2.1 Ecuador: oferta total de energía primaria (OTEP)

(Fuente: Organización Latinoamericana de Energía (OLADE); el Sistema de Información Económico Energética (SIEE) y el Balance Energético de Ecuador.)

¹⁰ Organización Latinoamericana de Energía (OLADE); el Sistema de Información Económico-Energética (SIEE) y el Balance Energético de Ecuador.

2.2.1 CATEGORIZACIÓN DE LA BIOMASA

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, la clasificación general consta de:

- Biomasa natural
- Biomasa residual
- Cultivos energéticos
- Excedentes agrícolas

En La figura 2.1 se representa esta clasificación en forma grafica

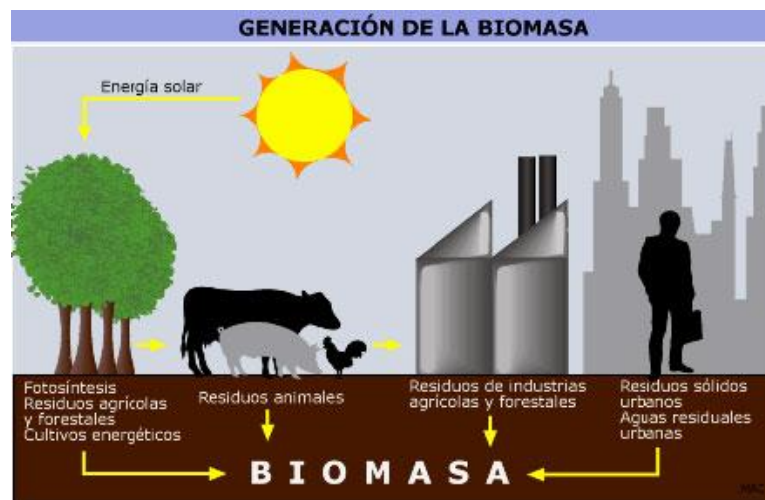


Figura 2.2 Generación de Biomasa.
(Fuente: www.ambientum.com enciclopedia virtual)

2.2.2 BIOMASA RESIDUAL

Nuestro estudio está enfocado en el grupo de **La Biomasa residual**, debido a que aquí se encierran todos los procesos que generan residuos¹¹ de madera, tales como: los residuos forestales, agrícolas y los residuos sólidos urbanos producidos por industrias

¹¹ **Residuo:** Es todo aquel que sobra de un proceso de producción y explotación, de transformación o de utilización. Es también toda sustancia, material, o producto abandonado por su propietario.

manufactureras (aserraderos, fábricas de tableros de partículas, plantas de fabricación de pasta de papel) y secundarias (ebanisterías, carpinterías).

2.2.3 BIOCOMBUSTIBLES SOLIDOS

Existe gran variedad de residuos sólidos usados como biocombustibles, sin embargo en este proyecto se consideraran tres tipos de combustibles derivados de la *maderas* como son:

- Leñas
- Las astillas
- Los densificados (pellets y briquetas)

2.3 LEÑAS Y ASTILLAS

2.3.1 CARACTERISTICAS FÍSICO – QUIMICAS

Las leñas y las astillas conservan las propiedades principales de la madera que básicamente son: resistencia, dureza, rigidez y densidad. La densidad suele indicar las propiedades mecánicas puesto que cuánto más gruesa y más densa es una leña más tarda en arder. La madera tiene alta resistencia a la compresión, baja resistencia a la tracción y una moderada resistencia a al cizallado.

2.3.2 COMPOSICION QUIMICA

Según un análisis elemental (análisis ultimo¹²), la madera consta de un 50% de Carbono y 43% de Oxígeno, las mismas que suman el 93% que recibe el árbol mediante absorción del dióxido de carbono (CO₂), de la atmósfera; siendo el dióxido de carbono un producto de procesos de oxidación (combustión, pudrición). El tercer elemento es el

¹² Hace referencia a un análisis porcentual en función de su peso.

Hidrogeno con un 6%, el árbol lo recibe en forma de agua (H₂O) que absorbe mediante sus raíces; mientras que el oxígeno y nitrógeno restantes son entregados a la atmósfera.

La transformación química de estos tres elementos básicos en la primera fase de crecimiento se llama Asimilación y se representa por la ecuación: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$. De esta se puede entender, que el árbol para su crecimiento requiere de energía solar, la misma que conserva la madera hasta que la entrega finalmente en el momento de su oxidación (calor de fuego).

El 1% restante son los diferentes minerales que se encuentran en forma de ceniza, es decir que al quemar la madera, solamente este mínimo porcentaje representa las sustancias no combustibles. En la tabla 2.1 se presenta una tabla comparativa en la cual se indican distintos análisis de maderas, en lo que concierne a su composición química y además su poder calorífico superior (PCS).

Muestra	Cenizas %	Análisis mediante porcentaje					PCS	
		C %	H2 %	N2 %	S2 %	O2 %	KJ/Kg	Kcal/Kg
Madera	1.20	49.5	6.25	1.10		43.15	13481.5	3220
Aserrín	0.5	48.3	5.8	0.1	0.0	45.8	18800	4490.3
Leña	1.5	40	4.5	1		38		
Madera dura	0.5	50	6	1		43	20935	5000
Madera seca	0.5	44	5	0.5	0.0	35	17410	4158.3

Tabla 2.1 Composición Química y PCS de diferentes maderas

(Fuente: Bernal Sixto, “Apuntes de Producción Industrial de Calor”, Universidad de Cuenca, Ecuador 1998.)

Existen variaciones mínimas entre las fuentes bibliográficas en lo que respecta a la composición química de la madera, por lo tanto en este proyecto se adopta la siguiente composición química de la madera.

Material	Cenizas %	C%	H 2 %	N 2 %	S 2 %	O 2 %	Formula Química
Madera	0.5	50	6	0.5	0.0	43	C ₆ H ₁₀ O ₅

Tabla 2.2 Composición Química de la madera

(Fuente: Eugene A. Avallone, “Manual del Ingeniero Mecánico”, Novena Edición Mc Graw Hill, México, 2002)

2.3.3 HUMEDAD

La madera expuesta a cualquier clima, contiene una determinada cantidad de agua. Ésta se la conoce como la humedad de la madera, y es la relación expresada en porcentaje (%) entre la masa de agua que se encuentra en el volumen dado de la madera y la masa de la misma pero exenta de agua (madera seca).

El contenido de humedad de una madera está en relación con las condiciones ambientales del lugar y dentro de un mismo lugar. La madera exenta de agua (madera seca) se la puede obtener mediante un secado en horno, y su humedad porcentual se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$H_m = \frac{m_h - m_o}{m_o} \cdot 100\%$$

Ecuación 2.1 Porcentaje de Humedad de la Madera

(Fuente: Bernal Sixto, “Apuntes de Producción Industrial de Calor”, Universidad de Cuenca, Ecuador 1998.)

Donde:

H_m Es la humedad (%)

m_h Es la masa de la madera húmeda (gr)

m_o Es la masa de la madera seca (gr) es decir 0% de humedad

Según datos obtenidos de los estudios realizados por la industria maderera de Cuenca, el porcentaje de humedad contenido en los principales tipos maderas utilizadas dentro de su producción, están representados en la tabla 2.3; cabe recalcar que, los valores de humedad obtenidos de cada tipo de madera son posteriores a un proceso de secado a 70 °C, debido a que la materia prima entregada por los proveedores contiene porcentajes de humedad muchos más elevados los cuales no son convenientes para el procesado.

Variedad de Madera	Humedad (%)	Valor max Humedad (%)
		Valor min Humedad (%)
Fernan Sanchez	9 ± 4,7%	10,10%
		9,20%
Guayacan	10,9 ± 3,4%	11,20%
		10,50%

Tabla 2.3 Valores promedios de la humedad de la madera
(Fuente: Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor Empresa Colineal, Arpi Saldaña, Patiño Ramón, UPS Cuenca 2006)

2.3.4 DENSIDAD

La densidad de todos los materiales depende de su composición química y de su porosidad. En cuanto a las maderas, todas se componen de los mismos elementos básicos citados anteriormente, por lo tanto la densidad de la madera comprimida seca (madera sin poros) es en todas las especies 1.56 g/cm³. Por otra parte, la densidad es la expresión de la masa de la madera en relación a su volumen, y que al mismo tiempo está en función de su humedad, por tanto esta se puede calcular mediante la fórmula siguiente:

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad [Kg / m^3]$$

Ecuación 2.2 Densidad de la Madera.

(Fuente: Bernal Sixto, “Apuntes de Producción Industrial de Calor”, Universidad de Cuenca, Ecuador 1998.)

Donde:

ρ_H Es la densidad (Kg/m³)

m_H Es la masa de la madera (Kg)

V_H Es el volumen de la madera (m³)

En la tabla 2.4 se presentan los valores de densidad de un estudio realizado para las maderas mencionadas anteriormente:

<i>Tipo de Madera</i>	<i>Humedad (%)</i>	<i>Densidad (Kg/m3)</i>	<i>Valor máximo Densidad (Kg/m3)</i>
Fernan Sánchez	9 ± 4,7%	506.8 ± 1.13 %	512.5
			501.0
Guayacan	10,9 ± 3,4%	499.3 ± 1.16 %	505.1
			493.5

Tabla 2.4 Valores promedios de la densidad de la madera.

(Fuente: Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor Empresa Colineal, Arpi Saldaña, Patiño Ramón, UPS Cuenca 2006.)

2.3.5 PODER CALORIFICO

El poder calorífico de la madera, está en función de su humedad y se define como la cantidad de energía que produce la combustión total de un kilogramo del mismo.

La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida, en base a ello se utiliza la expresión Poder calorífico superior (PCS) y Poder calorífico inferior (PCI).¹³

Por lo tanto el PCI se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$PCI = PCS - h_{fg} \cdot (9H_{\%} + H) \quad [KJ / Kg]$$

Ecuación 2.3 Poder Calorífico Inferior.

(Fuente: Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor Empresa Colineal, Arpi Saldaña, Patiño Ramón, UPS Cuenca 2006.)

Donde:

PCI = Poder Calorífico Inferior (KJ/Kg)

PCS = Poder Calorífico superior obtenido mediante diversos métodos de medición (KJ/Kg).

¹³ PCI.- calor producido sin aprovechar la energía de la condensación del agua.
PCS.- es la energía una vez aprovechado el calor de la condensación.

h_{fg} = Entalpia de evaporación obtenida en tablas

H % = Porcentaje de hidrogeno

H = Humedad de la madera

En forma general, según varios autores el poder calorífico de la madera varía entre 15000 y 21000 KJ/Kg dependiendo del tipo de madera y su humedad. En la tabla 2.5 se puede apreciar el poder calorífico de dos de los tipos de madera más usados en Cuenca.

TIPO DE MADERA	PCS		PCI	
	(KJ/Kg)	(Kcal/Kg)	(KJ/Kg)	(Kcal/Kg)
Fernan Sanchez	21282.9 ± 2%	5083.3 ± 2%	19682.9 ± 2%	4701.2 ± 2%
Guayacan	21843.8 ± 2%	5217.3 ± 2%	20243.8 ± 2%	4835.2 ± 2%

Tabla 2.5 Valores promedios del Poder Calorífico de la madera

Fuente: Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor Empresa Colineal, Arpi Saldaña, Patiño Ramón, UPS Cuenca 2006.

2.3.6 PROPIEDADES TERMICAS DE LA MADERA

Cuando la madera se calienta, hace que la humedad se evapore haciendo que se inicie un proceso de pirolisis¹⁴. Los productos de pirolisis son gases, líquidos y residuo carbonoso cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la madera a tratar y de los parámetros de operación del equipo.

Químicamente, la madera se descompone en gases volátiles y carbón, esto a medida que la temperatura aumenta; por esta razón la gasificación de la madera se inicia aproximadamente a los 150 °C. Donde existe suficiente oxígeno del aire y una llama externa, estos gases se encienden a una temperatura de 230 °C (punto de inflamación).

¹⁴ **Pirolisis:** consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante

A más de 260 °C la madera sigue quemándose con calor ajeno y a partir de 400 °C la madera se auto enciende sin llama externa (punto de encendido), llegando normalmente hasta los 540 °C que es donde se produce el máximo calor utilizable.

2.4 DENSIFICACION DE LA BIOMASA

La densificación de la madera es un proceso de compresión o compactación de la biomasa residual (aserrines, virutas, astillas y leñas) que permite aumentar su densidad y modificar sus propiedades físico-químicas para de esta manera obtener un combustible de características más eficientes y de fácil almacenamiento.

En vista de que los subproductos generados en las industrias de transformación y elaboración secundaria de la madera, pueden llegar a ocupar volúmenes de hasta el 25-30% de la materia prima utilizada, el proceso de densificación permitirá almacenar considerables cantidades de energía reduciendo la necesidad de espacio, y posibilitando fácilmente que se mantenga siempre seca.

2.4.1 CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LOS DENSIFICADOS

Los productos obtenidos de la densificación de residuos son principalmente dos los pellets y las briquetas, las características energéticas que posee cada uno de estos productos densificados no difieren en consideración.

Las Briquetas y pellets de aserrín compactado poseen mayor poder calorífico que la leña tradicional, encienden más rápido, no sueltan humos ni olores y su uso evita la tala indiscriminada de árboles.

Las principales características físicas, químicas y físico-químicas que influyen en el comportamiento energético de los densificados están recogidas en la tabla 2.6.

Físicas	1. Forma	
	2. Tamaño	
	3. Aspecto (color, brillo)	
	4. Densidades	kg/dm ³
	5. Humedades	%
	6. Friabilidad	índice
Químicas	1. Composición química elemental	%
	2. Composición química por compuestos	%
	3. Poderes caloríficos	kJ/kg, kcal/kg
Físico - químicas	1. Coeficiente de conductividad térmica	W/m.s
	2. Combustibilidad e inflamabilidad: Temperaturas y tiempos de combustión e inflamación	°C, s
	3. Temperatura máxima de llama	°C
	4. Potencia calorífica	J/(kg.s) = W/kg kJ/dm ³
	5. Densidad energética	

Tabla 2.6 Características físicas, químicas y físico-químicas de pellets y briquetas.
(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a.ed.). España: Mundi-Prensa, 2008.)

2.5 LAS BRIQUETAS

Las briquetas son un biocombustible de origen lignocelulósico (madera) en la mayor parte de los casos, formado por la compactación de biomasa. Es un producto 100% ecológico y renovable, catalogado como bioenergía sólida, que viene en forma cilíndrica o de ladrillo y sustituye a la leña con muchas ventajas.

La materia prima de la briqueta puede ser biomasa forestal (aserraderos, fábricas de puertas, fábricas de muebles, fábricas de tableros de partículas, etc.), biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas. Los mismos son molidos, secados a un 10% de humedad y luego se compactan para formar briquetas generalmente de formato cilíndrico, por lo tanto no utilizan ningún tipo de aglomerante ya que el agua y la propia lignina de la madera funcionan de ligante natural.

2.5.1 FORMAS Y TAMAÑOS DE LAS BRIQUETAS

La forma de las briquetas puede ser muy variable, según se observa en la gráfica 2.2, depende de la maquinaria utilizada en su obtención.

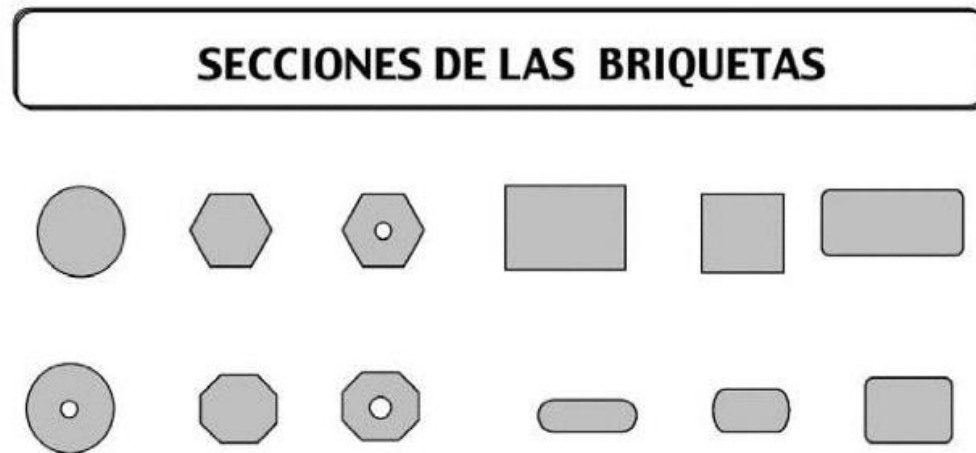


Figura 2.3 Secciones de Briquetas.

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a.ed.). España: Mundi-Prensa, 2008.)

Cuando las briquetas se fabrican con una prensa de tipo tornillo sinfín dejan un hueco en su interior con lo que la relación superficie-volumen es mayor.

Casi todas las briquetas fabricadas en la actualidad son de forma cilíndrica. Su diámetro supera los 5 cm, siendo el diámetro más usual el comprendido entre los 7,5cm y los 9,0cm. La longitud es variable y oscila entre los 50 y 80cm. Normalmente, a mayor diámetro mayor es la longitud.

Otra forma de las briquetas es la de sección octogonal, con un hueco redondo en el centro. Esta forma presenta desventajas a la hora de almacenarse pues se pierde espacio útil al estar hueca la briketa, de esta manera se consigue una ignición más rápida. En la tabla 2.7 se realiza un resumen de las formas que las briquetas pueden poseer.

Cilindrica		Cilindrica	
Maciza	Prisma Hexagonal	Hueca	Prisma Hexagonal
	Prisma Rectangular		Prisma Octogonal
	Prisma Cuadrado		Prisma Rectangular
	Prisma Octogonal		
	Prisma Rectangular		
	1/4 Cilindro		

Tabla 2.7 Formas de las Briquetas.

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a.ed.). España: Mundi-Prensa, 2008.)

También existe cierta relación entre la longitud de la briqueta y su diámetro como se observa en la tabla 2.8.

Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Relacion longitud/diámetro
32	8,5	3,765
32,5	9	3,611
32,5	7,5	4,3333
32	7,5	4,266

Tabla 2.8 Relaciones longitud/diámetro de las briquetas

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a.ed.). España: Mundi-Prensa, 2008.)

2.5.2 DENSIDAD

La principal característica de las briquetas frente a las astillas y leñas es que son más densas con lo que facilita el transporte, manipulación y almacenaje. El inconveniente es que resultan más caras que las astillas pues requieren un proceso industrial de fabricación. Los factores que influyen en la densidad de la briqueta son de dos tipos:

- 1- **La materia prima empleada:** Cuanto mayor sea la densidad de la materia prima mayor será la densidad del producto final. Por lo tanto aquí están involucradas las diferentes especies de madera.
- 2- **La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación y el correcto diseño y manipulación de la misma:** Las presiones de compactación son variables, dependiendo de la maquinaria empleada.

Para determinar la densidad de las briquetas deben realizarse ensayos de laboratorio en los que basta evaluar su masa (en una balanza) y su volumen (cálculos geométricos) para obtener la densidad aproximada.

Es importante destacar que los pellets y las briquetas poseen propiedades idénticas, y que la única diferencia radica en el tamaño, por ello los productos compactados con menos de 25mm de diámetro son considerados convencionalmente pellets y con diámetros mayores, briquetas.

2.5.3 BRIQUETADO

Durante el proceso de briquetado se generan mecánicamente elevadas presiones (aproximadamente 200 MPa/cm²), que provocan un incremento térmico del orden de 100 a 150° C¹⁵; esta temperatura origina la plastificación de la lignina que actúa como elemento aglomerante de las partículas de madera, por lo que no es necesaria la adición de productos aglomerantes (resinas, ceras). Para que tenga lugar este proceso de auto aglomeración es necesaria la presencia de una cantidad de agua (material termoplástico) comprendida entre el 8 y el 15% B.H.



Figura 2.4 Briquetado: prensa de pistón mecánica.
(Fuente: <http://www.bogma.com>)

¹⁵ Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.) , España: MundiPrensa, 2008.

Para la producción de briquetas existe una gran variedad de maquinas que poseen distintos sistemas de densificación, a continuación se presentan algunas de ellas:

- Briquetadoras de pistón (densificación por impacto)
- Briquetadoras de tornillo (densificación por extrusión)
- Briquetadoras hidráulicas y neumáticas
- Briquetadoras de rodillos

2.6 EL PELLET

El pellet es un biocombustible estandarizado, cilíndrico, hecho por la compresión de virutas, aserrines y astillas molidas, procedentes de residuos de madera de aserríos, industrias forestales, industrias agroforestales, industrias del parquet, empresas de mobiliario de madera e incluso, molduras y puertas.

El pellet, al estar compuesto solo de madera, su balance de emisiones de CO₂ es neutro, lo que equivale a decir que el CO₂ emitido en la combustión es el que ha absorbido el árbol al crecer, y que volverá a absorber el que crezca en su lugar. Por lo tanto, la combustión con pellet colabora en la reducción de los gases de efecto invernadero en la atmosfera, ayudando en el cumplimiento del protocolo de Kyoto.

Además, los pellets son el combustible más estandarizado con alta fiabilidad de operación debido al menor requerimiento de espacio para el almacenamiento en comparación con otras biomásas. La producción de este biocombustible se realiza con alta presión y vapor de agua, no hay que utilizar ningún tipo de aglutinante (la propia lignina¹⁶ hace de aglutinante), porque de lo contrario no estaríamos hablando de un producto ecológico.

¹⁶ **Lignina:** Es el constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fibrosas de los vegetales, las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas.



Figura 2.5 Pellets de madera
(Fuente: <http://www.ventadebiomasa.wordpress.com>)

2.6.1 CARACTERISTICAS FISICAS

2.6.1.1 FORMA Y TAMAÑO

El pellet tiene forma cilíndrica y siempre se fabrica de menor tamaño que la briqueta, para poder ser manipulado con medios mecánicos en forma más rápida y eficiente, y por lo tanto, facilitar y abaratar su movimiento y la carga automática en las calderas.

El diámetro del pellet no debe superar los 25mm, siendo los diámetros más normales los que oscilan entre 5 y 22mm. La longitud del pellet es variable y depende de cada fabricante, sin embargo oscilan entre 10 y 30mm, aunque pueden alcanzar longitudes de hasta 7cm.



Figura 2.6 Tamaño del pellet.
(Fuente: <http://www.pelletheat.org>)

2.6.1.2 DENSIDAD

La principal característica de los pellets es que son más densos, al tener mayor densidad este producto se transportará ocupando menos volumen (a igualdad de peso) que las leñas y astillas y será más sencilla su manipulación.

La densidad específica no es una variable cuyo valor pueda modificarse, como ocurre con la humedad o la granulometría. Es una característica propia de cada materia a procesar. Cuanto más denso sea el material más resistencia a la compresión ofrece, obligando a aplicar más presión para conseguir los mismos grados de compactación.

En los pellets deben considerarse dos valores de la densidad: la densidad real y la densidad aparente.

La **densidad real o específica** es el cociente entre la masa real y el volumen real de los pellets.

$$\rho = \frac{m_{real}}{V_{real}} \quad \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 2.4 Densidad Especifica.

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.), España: Mundi Prensa, 2008.)

La **densidad aparente** es el cociente entre la masa aparente (que es igual a la masa real) y el volumen aparente (que es el volumen real más el volumen de los huecos entre los pellets).

$$\rho_A = \frac{m_{aparente}}{V_{aparente}} = \frac{m_{real}}{V_{real} + V_{huecos}} \quad \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 2.5 Densidad Aparente.

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.), España: Mundi Prensa, 2008.)

Como el volumen aparente es mayor que el volumen real, la densidad aparente es menor que la densidad real. La densidad de los pellets suele estar en el rango de 1000 - 1200 Kg/m³, pero cuando se distribuye a granel la densidad aparente suele ser del orden de los 600 - 800 Kg/m³.¹⁷

2.6.1.3 HUMEDAD

La humedad del pellet es muy importante desde el punto de vista del aprovechamiento energético, pues es la que más influye en el poder calorífico de los biocombustibles, junto a la especie a la que pertenecen los residuos. Por encima de un contenido de humedad del 30 % (en base húmeda; BH.), no es posible formar un densificado cohesionado a partir de residuos forestales o leñosos. Por otra parte, al disminuir la resistencia de la madera a la compresión con la humedad, la energía específica de densificación también disminuye. Por eso, intentar densificar madera con humedad por debajo del 6% (BH.), obliga a aplicar mucha energía y con ello un coste energético elevado. La producción de una tonelada de pellets requiere al rededor de 10m³ de estéreo de virutas cuyo contenido de humedad varia en el orden comprendido entre 10-15%, este contenido de humedad es el óptimo para la producción de pellets.¹⁸ Rangos de humedad por encima o y por debajo de estos valores, crean dificultades en el proceso de compactación, donde el exceso o defecto de agua crean grietas y deformaciones en los densificados. Para poder calcular el contenido de humedad se puede utilizar la ecuación 2.6.

$$CH = \frac{P_{inicial} - P_{seco}}{P_{seco}} * 100$$

Ecuación 2.6 Humedad de los pellets.

(Fuente: Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.) , España: MundiPrensa, 2008.)

¹⁷ www.woodpelletfuels.com

¹⁸ www.pelletheat.org

Donde:

CH Es el contenido de humedad de los pellets.

P_{inicial} Es el peso inicial del pellet húmedo.

P_{seco} Es el peso final del pellet (seco).

2.6.1.4 FRIABILIDAD

Se relaciona con la capacidad de los pellets para resistir los golpes y abrasión sin que se desmoronen durante el proceso de manufactura, empaque, transporte y uso por parte del consumidor.

La friabilidad es una variable muy importante en los pellets pues se están manipulando continuamente y chocando unos con otros. La friabilidad del pellet puede ser considerada en dos casos:

1. La resistencia al golpeteo en el movimiento de pellets.
2. La resistencia a desmenuzarse (friabilidad) cuando el pellet está en el hogar, horno o parrilla, también llamada friabilidad en la combustión.

Friabilidad antes de la combustión

Para evaluar la friabilidad de los pellets, se proponen dos métodos de ensayo:

- Método del golpe contra el suelo.
- Método del golpeteo entre sí.

Método del golpe contra el suelo

Este método está basado en la rotura de pellets por golpeteo contra el suelo. En esencia, consiste en dejar caer sobre el suelo cerámico, desde una altura de 100 cm, 100 pellets y contar el número de pellets que se rompen en 2, 3, 4, 5 o más trozos, y obtener a partir de esos resultados un índice de friabilidad FR_1 . Este método es sencillo pero poco confiable. Para calcular el índice de friabilidad (FR) se utiliza la siguiente ecuación:

$$FR_1 = \frac{NF}{NI}$$

Ecuación 2.7 Friabilidad del Pellet.

(**Fuente:** Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.), España: Mundi Prensa, 2008.)

Donde:

NF Es el número de pellets al final del ensayo.

NI Es el número de pellets al inicio del ensayo.

El valor del índice FR es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR_1 mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeteo.

Método del golpeteo entre sí

Este método se basa en la rotura de pellets por golpeteo entre ellos. Consiste en introducir en un recipiente de dimensiones estandarizadas pellets o briquetas enteros, contando el número de pellets o briquetas introducidos al inicio del ensayo (NI) y tenerlos vibrando un tiempo determinado en condiciones también estandarizadas dicho recipiente. Pasado ese tiempo se cuenta el número de pellets finales (NF).

$$FR_2 = \frac{NF}{NI}$$

Ecuación 2.8 Friabilidad del Pellet.

(**Fuente:** Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.), España: MundiPrensa, 2008.)

Donde:

NF Es el número de pellets al final del ensayo.

NI Es el número de pellets al inicio del ensayo.

El valor del índice FR_2 también es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR_2 mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeo.

Friabilidad en combustión

La friabilidad en combustión se puede medir en minutos o por un índice de friabilidad. Si se mide en minutos son los minutos que transcurren desde que el pellet se desmenuza, en combustión, en las condiciones de ensayo establecidas. Si es medida por un índice se calcula el número de pellets desmenuzados en un tiempo dado en condiciones de combustión estandarizadas y se compara ese número con el número de pellets introducidos en el hogar, antes de la combustión.

La friabilidad en combustión depende de las condiciones de ensayo. Hay dos tipos de ensayo:

1. *Ensayos en hogar cerrado*: El aire entra en el hogar y éste permanece cerrado.
2. *Ensayos en hogar abierto*: El aire entra en el hogar y éste permanece abierto, permitiendo que entre más aire.

2.6.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

2.6.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química elemental de los pellets condiciona su poder calorífico, los gases emitidos en la combustión y la composición de las cenizas. La composición química de los pellets dependerá del material utilizado en su constitución. Conocidos estos porcentajes puede evaluarse de forma aproximada la composición química de los pellets

2.6.2.2 PODER CALORÍFICO

La cantidad de energía desprendida por un Kg de pellet al quemarse, conocido como poder calorífico es una de las principales características que poseen los pellets.

El poder calorífico está en función del material de procedencia. Suponiendo que es madera y corteza sin aditivos, su poder calorífico será el de la madera de la que proviene. Si el pellet incluye restos de lijado, el poder calorífico es menor pues aparecen los áridos de la lijadora. Estos áridos también darán lugar a un mayor porcentaje de cenizas en la combustión.

Sin embargo, como el poder calorífico inferior es función de la humedad del pellet, están más secos que las astillas por lo que se puede concluir que su poder calorífico es mayor. En la figura 2.6 se puede observar la variabilidad del poder calorífico en función de la humedad.

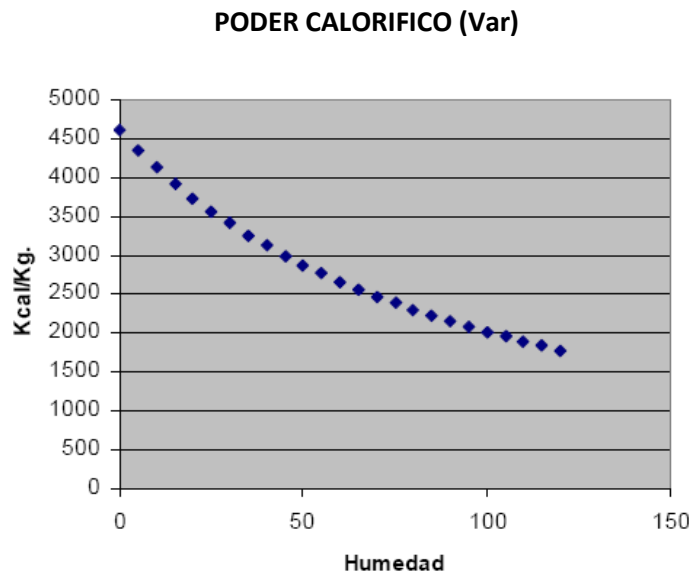


Figura 2.7 Poder Calorífico en función de la humedad
(Fuente: Formato Pdf. Grupo KAHAL. Bioenergía a partir de la Biomasa.)

El valor aproximado del poder calorífico del pellet es 4.500 Kcal/Kg. tomando en cuenta un 10% de humedad.

Comparación del poder calorífico de los pellets con otros combustibles

Considerando que el poder calorífico de 1 Litro de Gasóleo para calefacción está estimado en 10 kWh por litro, al igual que el de 1 m³ de gas natural, se establece la siguiente comparación:

2Kg pellets.....1 Lt. gasóleo aprox.

1 m³ pellets.....320 Lt. gasóleo aprox.

En la tabla 2.9 se puede apreciar la diferencia que existe entre el poder calorífico y el costo del pellet en comparación con otros combustibles fósiles y leña en Europa, considerado como el continente con los mayores índices de productores de pellets en mundo.

Combustibles fósiles	P.C. neto KWh/kg	Coste €/kg	Litro equivalente gasóleo		Litro equivalente GPL		Metro cúbico equivalente metano	
			kg	€	kg	€	kg	€
Gasóleo	11,7	0,990	0,83	0,83	0,62	0,61	0,83	0,82
Metano	13,5	0,720	0,73	0,52	0,54	0,39	0,72	0,52
GPL	12,8	1,097	0,76	0,84	0,57	0,62	0,75	0,83
Combustibles de biomasa	P.C. neto KWh/kg	Coste €/kg	Litro equivalente gasóleo		Litro equivalente GPL		Metro cúbico equivalente metano	
			kg	€	kg	€	kg	€
Leña para quemar 25% humedad	3,5	0,103	2,79	0,29	2,07	0,21	2,76	0,28
Leña para quemar 35% humedad	3,0	0,093	3,31	0,31	2,45	0,23	3,27	0,30
Leña para quemar 45% humedad	2,4	0,077	4,08	0,32	3,02	0,23	4,03	0,31
Pellet de madera humedad máx. 10%	4,9	0,180	2,00	0,36	1,48	0,27	1,98	0,36

Tabla 2.9 Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles fósiles y de la biomasa.
(Fuente: Formato Pdf. Proyecto RES & RUE Dissemination. Grupo C.E.C.U.)

2.6.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

2.6.3.1 VARIABLES DE COMBUSTIBILIDAD E INFLAMABILIDAD.

En el inicio de su combustión el coeficiente de conductividad térmica de los pellets es igual al de las briquetas si su composición química es la misma. A medida que avanza la combustión el producto va cambiando su composición química y se va convirtiendo en residuo carbonoso cuya composición química y densidad es diferente que la del material ligno-celulósico inicial por lo que también varía su coeficiente de conductividad térmica.

La temperatura de combustión es superior en los pellets que en las astillas. Con las leñas la comparación depende del tipo de leña, normalmente la temperatura de inflamabilidad es ligeramente superior en pellets. El motivo de este aumento de temperatura es que la composición química de la superficie lateral del pellet es distinta de la madera ya que en el proceso de peletizado esta superficie se calienta y la madera sufre una combustión incompleta formándose una fina película carbonosa que ennegrece a esta superficie y en la que el coeficiente de conductividad térmica es inferior al de la madera.

El tiempo de inflamabilidad de pellets es ligeramente superior al de las leñas. Las leñas presentan temperaturas y tiempos de inflamabilidad muy variables, pues dependen de la existencia o no de corteza, el tipo de corteza, el porcentaje de corteza, la disposición de la leña respecto al tiro del hogar y la superficie específica de la leña. Los biocombustibles forestales que más pronto se inflaman suelen ser las astillas y el carbón vegetal (a igualdad de otros parámetros).

Al ser el pellet un material más denso que la madera, y por tener menos contenido de aire en su interior, su coeficiente de transmisión térmica es mayor que el de aquella. La alta densidad y el bajo valor de este coeficiente provocan que los pellets ardan más despacio que la madera y que permanezcan más tiempo en el hogar, lo cual puede ser ventajoso en el caso de que se desee una combustión lenta.

2.6.3.2 POTENCIA CALORÍFICA

Como el pellet es más pequeño que la briqueta arde más deprisa por lo que su potencia calorífica es mayor a igualdad de composición química. Es decir, los pellets presentan mayor superficie específica que las briquetas y arden más deprisa que éstas.

Se mide en W/kg, Kcal/kilogramo-minuto, kJ/kg-minuto, $\text{kJ/kg.s} = \text{kW/kg}$.

El pellet debe ser comparado con una rama de madera de igual diámetro, en este caso el pellet arderá casi siempre más despacio que esta.

2.7 EFECTO DE LOS ADITIVOS

Es posible utilizar aditivos con aglutinantes, lubricantes o protectores para los efectos de la humedad. Los aditivos no son usados a menudo en la fabricación de los pellets, debido a que su aplicación encarece los costos de producción y en la mayoría de los casos no son necesarios. Los aditivos utilizados no deben intervenir la combustión o producir gases tóxicos ni malolientes.

El vapor es el aditivo más utilizado en la peletización. Este puede ser seco o estar ligeramente calentado, con el fin de secar el material, pero teniendo la precaución de no elevar la temperatura de la materia prima en exceso. Se ha logrado determinar que el uso de vapor contribuye a disminuir el tiempo de uso de los troqueles y hace que los pellets sean más fuertes y cohesionados.

2.8 NORMALIZACION Y ESTANDARIZACION DE PELLETS

La existencia de una Normativa sobre pellets y biocombustibles es básica para el desarrollo del mercado, por las siguientes razones:

- Garantiza una calidad común en todo el país o región de los pellets, los sistemas de almacenamiento, transporte y combustión.
- Define los indicadores de calidad y los valores límite.

- Confiere seguridad legal a los agentes implicados.
- Informa al consumidor de las distintas calidades del producto.

2.8.1 PRINCIPALES NORMAS EUROPEAS SOBRE PELLET

En la mayoría de países europeos no existen normas regulatorias para los pellets, el Comité Europeo para la Normalización CEN/TC 335 ha preparado especificaciones técnicas para los biocombustibles sólidos y métodos de análisis, donde se incluyen los pellets y briquetas.

En la actualidad países como Austria, Suecia y Alemania, han creado sus propias normativas para tener una producción estandarizada, otros países como Dinamarca y Finlandia que poseen un mercado importante de densificados, prefieren esperar la culminación de la norma común del CEN/TC 14961 la cual encierra métodos de estandarización, análisis y clasificación del pellet.

Las normas creadas por Austria, Suecia y Alemania van de acuerdo con el tipo de materia prima y las características que poseen sus plantas peletizadoras, por lo que los pellets varían en tamaño (diámetro y largo), composición química (aglutinantes, materia prima densificada), entre otras como calidad, transporte y almacenamientos del producto; estas normas están especificadas por:

País	Norma
Austria	ÖNORM M1735 (briquetas y pellets)
Suecia	SS 187120 (pellets) y SS 187.121 (briquetas)
Alemania	DIN 51731 (briquetas y pellets)

Tabla 2.10 Normas para pellets y briquetas.
(Fuente: <http://www.pelletcentre.info/cms/site.>)

La norma creada por CEN/TC 14961 se aprobó en 2004 y se espera que se convierta en Norma Europea (EN) de "Certificación europea para biocombustibles sólidos", dentro de esta en el anexo 2 estás las "Especificaciones y propiedades para los pellets", a continuación se presenta parte del anexo 2.

Origen	Madera no tratada químicamente sin corteza
NORMATIVA	
Tamaño	D06 <= 6mm + / - 0,5mm y L <= 5 * diámetro D08 <= 8mm + / - 0,5mm y L <= 4 * diámetro D10 <= 10mm + / - 0,5mm y L <= 4 * diámetro D12 <= 12mm + / - 1,0mm y L <= 4 * diámetro D25 <= 25mm + / - 1,0mm y L <= 4 * diámetro
Finos % < 3,15mm	F1,0 <= 1,0% F2,0 <= 2,0% F2,0 <= 2,0% (valor real por establecer)
Contenido de agua	M10 <= 10% M15 <= 15% M20 <= 20%
Contenido de ceniza	A0,7 <= 0,7% A1,5 <= 1,5% A3,0 <= 3,0% A6,0 <= 6,0% A6,0 <= 6,0% (valor real no establecido)
Azufre	S0,05 <= 0,05% S0,08 <= 0,08% S0,10 <= 0,10% S0,20 <= 0,20% (valor real por establecer)
Nitrógeno	N0,3 <= 0,3% N0,5 <= 0,5% N1,0 <= 1,0% N3,0 <= 3,0% N3,0 <= 3,0% (valor real por establecer)
Aditivos	El tipo y el contenido de las sustancias aglomerantes, inhibidoras para resolver los problemas de sinterización de cenizas y otros tipos de aditivos tienen que estar indicado.
Durabilidad	DU97,5 >= 97,5 DU95,0 >= 95,0 DU90,0 >= 90,0

Tabla 2.11 Especificaciones y propiedades de los pellets.

(Fuente: CEN/TS 14961: Certificación europea para biocombustibles sólidos. Especificaciones y propiedades para los pellets.)

En el anexo 2.1 se detallan las normas existentes en los países productores de biomasa densificada y las variaciones existentes entre ellas.

2.8.2 CRITERIOS DE CALIDAD DE LOS PELLETS

Las normativas elaboradas por países productores de pellets toman en cuenta las características químicas y físicas que deben poseer los pellets, en las tablas 2.10 y 2.11 se detallan dichas características respectivamente:

Parámetro	Efectos
Características químicas y de composición	
Contenido de Agua	Almacenamiento, poder calorífico, pérdidas, auto-ignición.
Poder Calorífico	Utilización del combustible, diseño de planta.
Análisis Elemental	
Cl	HCl, emisiones de dioxinas y furanos, corrosión en calentadores.
N	Emisiones de Nox, HCN y NO ₂
S	Emisiones de Sox.
K	Corrosión en calentadores, reducción del punto de fusión de las cenizas.
Mg, Ca, P	Aumento del punto de fusión de las cenizas, efectos en la retención de contaminantes en las cenizas y uso de las cenizas.
Metales pesados	Emisiones contaminantes.
Contenido ceniza	Emisiones de partículas, costes en el uso o eliminación de las cenizas.
Fusibilidad ceniza	Seguridad en las operaciones, nivel de emisiones contaminantes.
Esporas hongos	Riesgos de salud durante el manejo del combustible.

Tabla 2.12 Características Químicas que deben poseer los pellets.
(Fuente: CEN/TS 14961: Certificación europea para biocombustibles sólidos. Especificaciones propiedades para los pellets.)

Parámetro	Efectos
Características físicas	
Densidad aparente	Gastos en almacenamiento y transporte, planes de logística.
Densidad real	Propiedades de combustión (conductividad térmica específica, rendimiento en gasificación)
Distribución tamaño de partículas	Porosidad, formación de bóvedas, seguridad de operación durante el transporte, propiedades de secado, formación de polvo.
Formación de finos	Densidad aparente, pérdidas en el transporte, formación de polvo.
Durabilidad	Cambios de la calidad durante el transporte, desintegración, pérdidas de combustible

Tabla 2.13 Características físicas que deben poseer los pellets
(Fuente: CEN/TS 14961: Certificación europea para biocombustibles sólidos. Especificaciones propiedades para los pellets.)

2.8.2.1 ÍNDICES DE CALIDAD DE LOS PELLETS

La combinación de variables físicas, químicas y físico-químicas puede dar lugar a un índice de calidad del pellet. Para definir la calidad energética de los pellets existen dos métodos a los que se definen por, el primero se basa en un índice de calidad y el segundo en una clasificación.

En el primer método, para poder definir el índice de calidad energético de los pellets se utiliza la siguiente fórmula:

$$ICP = [K_1 \cdot PCS_0 + K_2 \cdot D + K_3 \cdot (1 - M)] / (Hh \cdot FR)$$

Ecuación 2.9 Índices de calidad del Pellet.

(**Fuente:** Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.), España: Mundi Prensa, 2008.)

Donde:

ICP Es el índice de calidad energética del pellet

K₁ Constante, en Kg/Kcal = 1/4.500 Kg/Kcal = 1/18.810 Kg/KJ.

PCS₀ Poder calorífico anhidrido, en Kcal/Kg o KJ/Kg.

K₂ Constante en dm³/Kg = 1/1.1 dm³/Kg

D Es la densidad en Kg/dm³.

K₃ Constante adimensional = 0.5

M Tanto por uno en material mineral

Hh Humedad en base humedad

FR Friabilidad como media entre la friabilidad y la media de las friabilidades en hogar cerrado y en hogar abierto.

El segundo método para determinar en índice de calidad de los pellets está basado en un conjunto de tablas clasificatorias las cuales tendrán como variables la densidad energética, la humedad y la friabilidad, esta clasificación previa nos servirán para realizar la clasificación final de los pellets.

Clase	Densidad energética mínima, MJ/dm ³	Clase	Contenido máximo de humedad, %*	Clase	Friabilidad**
E1	1,8	K1	25	P1	3
E2	1,7	K2	35	P2	8
E3	1,6	K3	45	P3	15
E4	1,5	K4	50	P4	20

Tabla 2.14 Tabla clasificatoria preliminar.

(**Fuente:** Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.) , España: MundiPrensa, 2008.)

*Humedad en base humeda.

**% máximo de pellets rotos en el ensayo.

Utilizando las clases anteriores (E, K y P) obtenemos las clases de calidad finales (C). Los pellets de calidad C1 son los mejores y los de C4 son los de peor calidad.

Calidad: Clase	Tipología
C1	E1 y K1 y P1
C2	No es de la clase C1 Ninguno de ellos es E3, ni E4, ni K3, ni K4, ni P3, ni P4
C3	No es de la clase C1 No es de la clase C2 Ninguno de ellos es E4, ni K4, ni P4
C4	Ninguna de las anteriores

Tabla 2.15 Tabla de clasificación de pellets final.

(**Fuente:** Campos Michelena, Manuel; Marcos Martín, Francisco. Los biocombustibles (2a. ed.) , España: MundiPrensa, 2008.)

2.9 PRODUCCIÓN DE PELLETS EN EL ECUADOR

Se ha realizado una investigación sobre la existencia de empresas dedicadas a la fabricación de pellets dentro del país, teniendo como resultado que la industria ecuatoriana no ha explotado el campo de la biomasa densificada (pellets o briquetas de madera); sin embargo en la actualidad existe un proyecto promovido por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT).

El proyecto denominado "*Planta para producción de Combustibles a partir de la biomasa residual*" ubicada en la provincia de Santo Domingo, es ejecutado por la Corporación para Investigaciones Energéticas (CIE) y el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), y contó con el financiamiento directo de la SENACYT.

Los componentes sustanciales del proyecto son la planta de carbonización y la planta de pirolisis.

En planta de pirolisis se contara con procesos que permiten la generación de energía eléctrica para el autoconsumo de la estación experimental. En este proceso se transforma la biomasa resultante de la elaboración de aceites de palma, cáscaras de frutos secos, restos de carpintería y de podas, residuos ganaderos, entre otros.



Figura 2.8 Proceso de Producción de Briquetas.
(Fuente: Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)).

En la planta de carbonización se planea realizar:

- El análisis físico-químico y calórico de la biomasa.
- Identificación de tecnologías para la conversión de residuos orgánicos en combustibles para la producción de calor y/o energías limpias.
- Elaboración de productos intermedios o combustibles sólidos utilizando biomasa deshidratada para la producción de briquetas y pellets, este sistema evitará la recurrente tala de bosques.

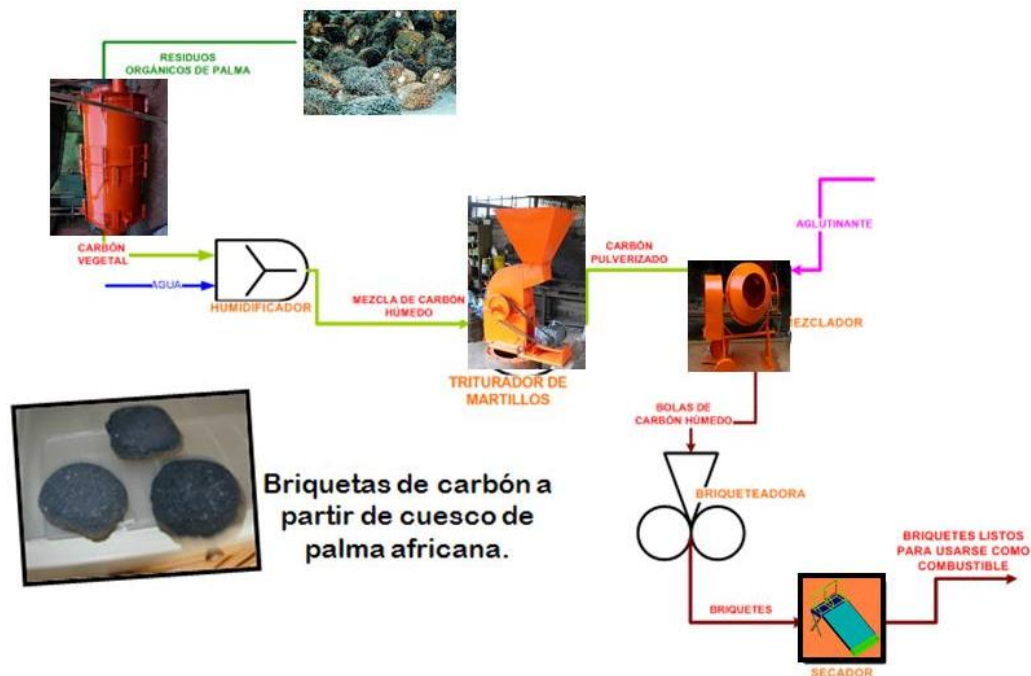


Figura 2.9 Esquema de la planta de Briquetas.
(Fuente: Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)).

Los resultados esperados de este proyecto son la producción aproximada será de 300 kg de briquetas/día y la generación de 600 kwh/día como resultados visibles, además del conocimiento y experiencia que serán adquiridos y sistematizados a lo largo de la investigación.

El proyecto inició en el mes de diciembre del año 2007 y el plazo de entrega es de 24 meses, es decir a finales del año 2009 el proyecto deberá estar concluido.



Figura 2.10 Planta para producción de Combustibles a partir de la biomasa residual
(Fuente: Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)).

En conclusión, esta tecnología, será aplicada por primera vez en el Ecuador y aportará a la reducción de combustibles fósiles y la disminución de los problemas de contaminación ambiental que producen las grandes masas de residuos forestales y/o vegetales, ajustándose de esta manera a las políticas Estado del Gobierno del Ecuador que promueve la utilización de energías limpias.

El proyecto también está enfocado a la difusión de los procesos de investigación a través de los centros de educación superior para promover el uso de la nueva tecnología de densificación de biomasa y suscribir convenios con las industrias madereras para que en un futuro cercano puedan disponer de esta tecnología para que a su vez los pellets puedan ser usados en la producción de calor de sus procesos internos.

CAPITULO 3

**ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE LOS
DISTINTOS SISTEMAS PELETIZADORES PARA LA
ELECCIÓN DEL MÁS ÓPTIMO**

CAPITULO 3

3.1 GENERALIDADES

Una de las mayores limitaciones que presenta el aprovechamiento energético de biomásas residuales es la baja densidad de los materiales, lo cual plantea problemas en el almacenaje, transporte, etc.

Dentro de este capítulo se estudiara las principales tecnologías y sistemas existentes en el mercado para la producción de combustibles biomásicos densificados como son las briquetas y los pellets, teniendo como enfoque principal los sistemas de peletizado; también se aportan datos técnicos del producto, características, rendimientos, problemática asociada. etc.

Las máquinas peletizadoras son utilizadas en diferentes campos de la industria (alimenticia, agrícola, forestal) para la producción de un producto de alta calidad y de excelente eficiencia, sin embargo para nuestro estudio nos enfocaremos en la maquinas peletizadoras de madera.

El proceso básico de producción de pellets comprende las siguientes etapas:

- Secado de la materia prima (Dependiendo de la humedad de la materia prima).
- Martillado o granulado de la materia prima.
- Peletizado propiamente dicho.
- Enfriado y separación de partículas finas.
- Embalaje y almacenado.

Dentro de este proceso pueden aumentar algunas etapas, que van de acuerdo con las características de la materia prima y del diseño del sistema peletizador, el cual puede variar de acuerdo a la matriz de extracción del producto.

3.2 PROCESO DE PRODUCCION DE PELLETS

El proceso de fabricación de pellets sigue un esquema básico, el cual consta de una serie de pasos ordenados que nos permiten obtener un producto final de alta calidad, dicho esquema se puede apreciar en la *figura 3.1*.

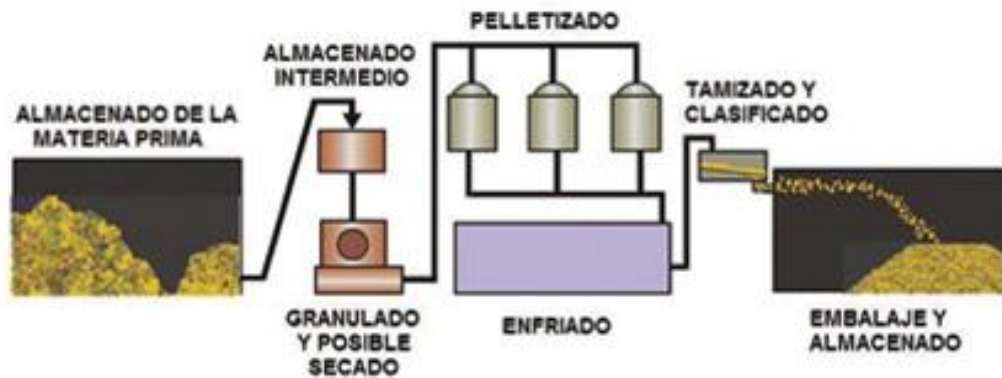


Figura 3.1 Proceso básico de producción de pellets.
(Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002.)

3.2.1 ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA

Consiste en el ingreso y recepción de la materia prima, la misma que es clasificada según el tipo y se ubica en sitios de acopio o en silos, una vez realizado el almacenamiento se descontamina la materia prima con el fin de que al momento de su utilización el material se encuentre libre de cualquier tipo de agente dañino (se entiende por agente dañino cualquier tipo de materia distinta a la de madera).



Figura 3.2 Almacenamiento de la materia prima.
(Fuente: Universidad de Chile, “Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets a partir de desechos forestales, Chile 2004)

3.2.2 TRITURADO Y MOLIDO

Esta operación es imprescindible cuando se pretende utilizar el material en aplicaciones energéticas, tanto en aplicaciones directas (astillas) como para la fabricación de elementos densificados.

Para la producción de densificados es necesario realizar además del triturado un molido para conseguir una mayor homogeneidad y una granulometría adecuada, inferior al diámetro del pellet que se desea fabricar. La unión de partículas es tanto mejor cuanto más fina es su granulometría, hasta valores de 0,5 mm, a partir del cual empieza a dificultarse el proceso, se señalan la necesidad de evitar las partículas de grandes dimensiones, ya que facilitan la fractura del producto.

Actualmente la mayor parte de los equipos de astillado de biomasa forestal emplean cuchillas montadas sobre un tambor o un disco de inercia, y sistemas de alimentación normalmente horizontales y forzados mediante el empleo de rodillos compresores, los mecanismos más utilizados para la moler material son: molino de disco, molino de martillos, molino de rodillos y molino de bolas.

- ***Molino de disco.***

Llamados también molinos de platos, consiste en dos discos generalmente de diámetro entre 102 y 1524 mm que se frotan uno al otro. Los discos pueden estar en posición vertical u horizontal, en este sistema un disco generalmente se mueve y el otro está fijo.¹⁹

Los molinos de disco generalmente son buenos para moliendas gruesas y en algunos casos para una molienda media, la molienda fina es muy difícil lograrla con molinos de disco debido a que existen muchos factores que influyen para lograr una molienda fina tales como: los platos que se usen, la velocidad o capacidad del motor, condición y presión de los platos, la velocidad de alimentación, el tipo de grano y el contenido de humedad del mismo.

¹⁹ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>



Figura 3.3 Molino de Disco.

(Fuente: <http://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-discos/dm-200>).

- **Molino de Martillos.**

Este es un método efectivo para desarrollar una adecuada trituración y pulverización, opera con una gran gama de martillos que reducen el material a un tamaño deseado. El tamaño final del producto depende del tamaño de las aberturas de las pantallas, el número, tamaño y tipo de martillos, y la configuración de platos ajustables y la velocidad del rotor.

Los molinos de martillo usualmente consisten de una serie de barras de libre movimiento (martillos) adjuntos a pivotes los cuales están sujetos a una barra rotatoria. La viruta que se alimenta al mecanismo es quebrada por los martillos y luego descargada. Los pivotes ayudan a los martillos a transferir la energía de impacto hacia el material a moler mientras se minimiza el desgaste en los martillos y se mantiene la velocidad en la barra, protegiendo los rodamientos de la barra principal.

Un molino tritura material que tiende a ser fácilmente reducido a pequeños pedazos, por medio de impactos contra un martillo rotatorio (el cual típicamente trabaja a 750 RPM y 1800 RPM)²⁰. El material resultante es luego presionado contra un plato sólido y rugoso el cual reduce aún más el tamaño de los fragmentos. Finalmente, este material es lanzado hacia una parilla que filtra los pedazos más grandes para que inicien otro proceso de trituración hasta que alcancen el tamaño deseado. Durante todo este proceso el material es impactado por los martillos y por las paredes del molino.

²⁰ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

Ventajas:

- Produce un amplio rango de tamaño de partículas.
- Trabaja con cualquier material y fibra.
- Bajo costo de compra inicial comparado con los molinos de rodillos.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Generalmente es de una fácil operación.

Desventajas:

- La eficiencia del uso de energía es baja en comparación con los molinos de rodillos.
- Puede generar calor.
- Puede generar ruidos y emisiones de polvo.

Diseño General.

En la figura 3.4 se puede observar los componentes principales del molino de martillos y su funcionamiento.

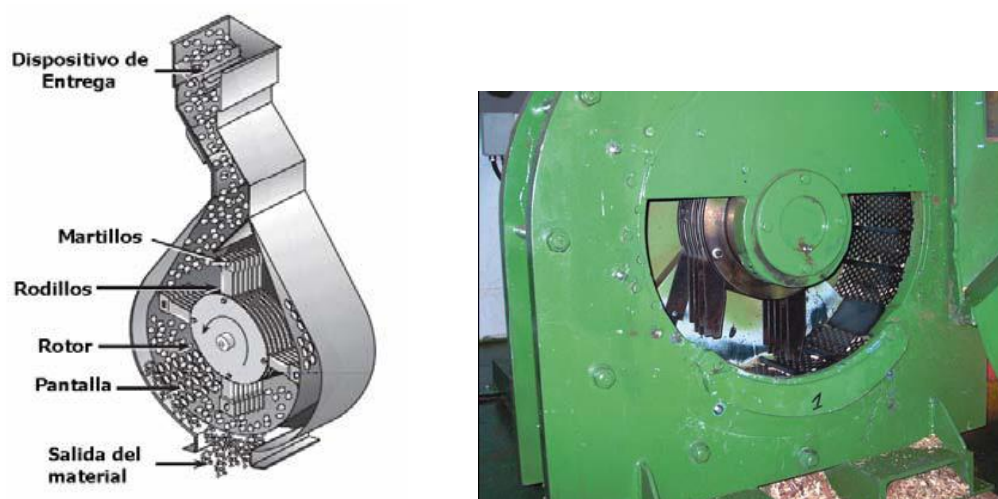


Figura 3.4 Molino de Martillos y Malla de 8mm.

(Fuente: Aprovechamiento de Biomasa Forestal / Parte III: Producción de elementos densificados.)

- Dispositivo alimentación, introduce el material en la trayectoria de los martillos; un rotor contiene una serie de discos maquinados montados en un eje horizontal.
- Una pantalla perforada y asistencia de aire para remover el producto molido.
- Los martillos de libre oscilación que están suspendidas de barras las cuales corren paralelamente al eje horizontal del rotor.

Diseño del Alimentador.

El material es introducido dentro de la guía de los martillos por una banda alimentadora de alta velocidad. Este tipo de alimentador puede tener su motor funcionando por un control programable que funciona junto al motor general del molino. La velocidad operacional del alimentador es controlada para mantener un amperaje óptimo de carga en el motor.

Diseño del Martillo.

El diseño y colocación de los martillos está determinado por los parámetros de rotación como un rotor de velocidad, el caballaje del motor, y un área abierta en la pantalla. El diseño óptimo del motor y su colocación proveerá un contacto máximo con el ingrediente alimentado.

En molinos en donde la velocidad del rotor es aproximadamente 1800 r.p.m., los martillos deben ser alrededor de 25 cm (10 pulgadas) de largo, 6,35 cm de ancho (2,5 pulgadas), y 6,4 mm (0,25 pulgadas) de espesor. Para rotores de velocidades de 3600 r.p.m., los martillos deben de ser de 15 a 20 cm (6 a 8 pulgadas) de largo, 5 cm de ancho (2 pulgadas) y el mismo espesor de la anterior.²¹

Los martillos deben ser balanceados y arreglados en las barras de modo que no arrastren el uno al otro. La distancia entre los martillos y la pantalla debe ser entre 12 y 14 mm. (0,5 pulgadas).

²¹ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

La velocidad de los martillos de la parte superior máxima es crítica para el tamaño propicio de reducción. La velocidad superior es calculada por la multiplicación de la velocidad rotacional del rotor en r.p.m. por la circunferencia que realiza el martillo.

$$\text{Velocidad en la punta del martillo} = \frac{\pi \bullet D \bullet r.p.m}{12 \text{ pul} \bullet \text{pie}}$$

Ecuación 3.1 Velocidad en la punta del martillo.
(Fuente: www.fao.org/.../new_else/x5693s/x5693s03.htm)

La velocidad de la punta comúnmente esta en el rango de 16000 y 23000 pies por minuto, (5000 y 7000 m/min.) Cuando esta velocidad excede 23000 pies por minuto, hay que darle el cuidado necesario al diseño de los martillos, los materiales usados en la construcción, y la fabricación de todos los componentes. Simplemente cambiando la velocidad rotacional de los martillos no es un método recomendable de incrementar la velocidad de los mismos en exceso de 23000 pies por minuto.

Diseño de la pantalla.

La cantidad de un área abierta en un molino de martillos determina el tamaño de las partículas y la eficiencia de la pulverización. La pantalla tiene que ser diseñada para mantener su integridad y proveer la mayor cantidad de área abierta. Las aberturas de la pantalla que en si son orificios o tamices por donde el pulverizado pasa, están alineados en 60 grados optimizan el área abierta, mientras se mantiene la resistencia de la pantalla. Este método resultará en un 40% de área abierta utilizando un agujero de 3.2 mm (1/8 pulgada).²²

El lector está urgido en prestar particular atención al radio de pantalla abierta al caballaje. El radio recomendado puede ser de 55 cm² (8-9 pulg²) por caballaje. La insuficiente relación entre área abierta por caballaje resulta en la

²² <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

generación de calor. Cuando el calor generado excede entre 44 °C a 46 °C la capacidad puede reducirse como mucho al 50%.²³

La remoción del material ya triturado de un molino de martillos es un aspecto crítico en el diseño. El despeje apropiado afecta no solamente la eficiencia de la operación sino también al tamaño de la partícula.

Cuando el radio correcto del área de la pantalla al caballaje es usado y apropiada distancia entre los martillos y la pantalla es mantenida o controlada, la mayoría de partículas con el tamaño correcto saldrán de una manera oportuna. Anderson (1994) estableció que las partículas que no pasen a través de los agujeros de la pantalla se convierten en cama del resto del material que es alimentado al molino. Estas partículas son continuamente reducidas en su tamaño por fricción y por el martillado. Este excesivo tamaño de reducción es contraproducente, porque la energía es desperdiciada en la producción de calor, y las partículas llegan a ser demasiado pequeñas.

La mayoría de los nuevos molinos de martillos están equipados con un sistema de aire asistido que circula dentro del molino junto con el producto a ser molido. Estos sistemas son diseñados para proporcionar una reducción de presión en el lado de la salida de la pantalla, para interrumpir el estrato fluidificado del material en la cara de la pantalla, permitiendo así que las partículas salgan a través de los orificios. Aplicaciones típicas: carbón, madera, recipientes de aluminio, bebederos de animales, vasos pequeños, granos de trigo, cacao, leche deshidratada, restos de pescado, yeso, piedras pequeñas, residuos de carnes, granos de sal, maíz, soya, huesos pequeños, granos pequeños.

- ***Molino de Rodillos.***

Generalmente constan de dos rodillos que cumplen con la reducción de tamaño del material a través de una combinación de fuerzas debido a giran en sentido inverso. Si los rodillos rotan a la misma velocidad, la compresión es la fuerza primaria usada y si los rodillos rotan a diferentes velocidades, las

²³ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

fuerzas primarias son el cizallado y la compresión; si los rodillos pueden estar ranurados se crea un efecto de pulverización, las ranuras gruesas producen partículas de mayor tamaño que las ranuras finas.

Las partículas producidas tienden a ser de un tamaño uniforme pero la forma de las partículas tiende a ser irregular, más cúbicas o rectangulares que esféricas, provocando problemas al momento de juntarlas. Durante el proceso de molido existe un pequeño ruido y polución del polvo asociada con el diseño propiamente de los molinos de rodillos. La velocidad lenta de operación no genera calor, y es muy pequeña pérdida húmeda.

Ventajas.

- Eficiencia de Energía.
- Distribución uniforme del tamaño de la partícula.
- Bajo ruido y generación de polvo.

Desventajas.

- Bajo efecto o casi sin efecto en las fibras.
- Las partículas tienden a ser irregulares en forma y en dimensión.
- Pueden tener un costo inicial alto (dependiendo del diseño del sistema).
- Cuando es requerido el costo del mantenimiento puede ser considerablemente alto.

Diseño General.

Como características principales tenemos, un dispositivo alimentador para proveer una cantidad apropiada y constante del material a ser molido, un par de rodillos montados horizontalmente en un rígido marco o bastidor.

Alimentador.

El material debe ser introducido entre los rodillos en una forma uniforme y constante; el alimentador más simple es una tolva de compartimiento con un agitador localizado dentro y con una puerta de descarga ajustable o automática. En este tipo de alimentador, el rodillo está situado debajo de la tolva del compartimiento.

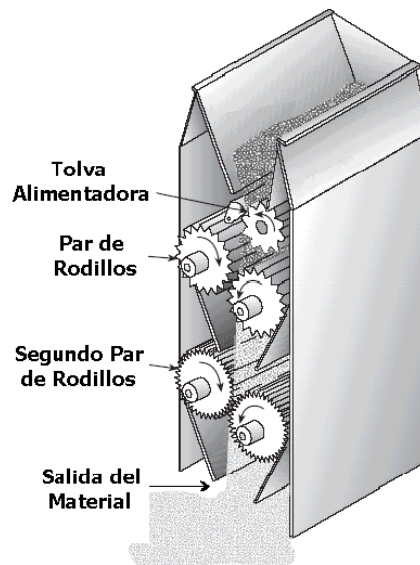


Figura 3.5 Molino de Rodillos.

(Fuente: Aprovechamiento de Biomasa Forestal / Parte III: Producción de elementos densificados.)

Rodillos.

Los rodillos pueden ser de 23-25 cm (9-12 pulg) de diámetro y el radio de longitud puede ser de 4 a 1. Es muy importante mantener la alineación entre la pareja de rodillos. El tamaño del material es dependiente de la ranura entre los molinos a lo largo de su longitud, si esta ranura no es uniforme, el rendimiento del rodillo disminuirá, incrementando los costos de mantenimiento y en general aumento en los costos de operación. La ranura puede ser ajustada manualmente a través del uso de cilindros neumáticos o hidráulicos. Para mejorar el tamaño de reducción uno de los rodillos debe rotar más rápido que el otro, esto resulta en una diferencia de velocidad entre las parejas de rodillos, el rango de diferenciales típicos es desde 1.2 a 1 hasta 2 a 1 (rápido a lento). Típicamente la velocidad del rodillo puede ser entre 395

m/min (1300 pies/min.) a 23 cm de rodillo a 957 m/min (3140 pies/min.) para 30.5 cm (12 pulgadas) de rodillo.²⁴

Un sólo motor es utilizado para accionar dos parejas de rodillos grandes, con la cadena o bandas para proveer el diferencial de velocidad. En tres pares de rodillos grandes, el par inferior tendrá un motor impulsor separado. Además las caras de los rodillos se pueden acanalar para mejorar la reducción de tamaño.

- **Molino de Bolas.**

El molino es una carcasa cilíndrica (metálico o cerámico) que gira sobre su propio eje, este cilindro está lleno aproximadamente hasta la mitad de objetos duros (medios de molienda), resistentes a la abrasión y de preferencia más pesados que el material a moler. Los medios de molienda se clasifican en:

1. Esferas metálicas (acero inoxidable).
2. Barras metálicas.
3. Mineral de mayor tamaño y dureza.

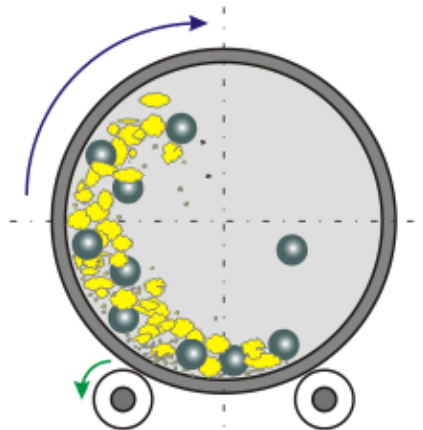


Figura 3.6 Molino de Bolas.

(Fuente: Aprovechamiento de Biomasa Forestal / Parte III: Producción de elementos densificados.)

El medio de molienda, que es el medio que permite la reducción del material, es de mayor tamaño que el mineral a moler, pero de muchísimo menor tamaño que el molino

²⁴ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

El material en su paso por el molino, puede ser fracturado mediante dos formas:

1. Ciclo de cascada, el tipo de fractura es vía impacto preferencialmente.
2. Cizalle (interior), el tipo de fractura es vía abrasión o atrición.

Así los materiales menos resistentes se fracturan al interior del molino o se desgastan paulatinamente hasta su desgaste, debido a los repetidos impactos y el desgaste al cual están sometidos.

Ventajas.

- Útil para productos oxidables o explosivos.
- Pulverización húmeda.
- Pulverizar materiales estériles (previa esterilización de la cámara).

Desventajas.

- Larga duración del proceso.
- Elevado consumo energético.
- Laboriosa limpieza.

El consumo de acero (revestimiento, bolas, barras) puede variar desde 0.2 kg/ton hasta 1.4 kg/ton para los diferentes minerales y grados de molienda.²⁵

Los molinos se elijen de acuerdo al material a moler, el tamaño de partícula deseado y el mecanismo; a continuación damos a conocer las principales características que poseen los molinos descritos anteriormente.

²⁵ <http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default4.asp>

TIPO DE MILINO	MECANISMO	TAMAÑO DE PARTICULA (um)	MATERIALES ADECUADOS	MATERIALES NO ADECUADOS
Disco	Impacto+Roce	0,2 (Ultra fina)	Moderadamente d	Fibrosos, Adhesivos, Bajo punto de fusión
Martillos	Impacto+Roce	40 (Paticula fina)	Quebradizos Nada o poco abrasivos	Fibrosos, Adhesivos, Bajo punto de fusión
Rodillos	Compresion	7 - 5 (Intermedia)	Blandos	Abrasivos, Fibrosos
Bolas	Impacto+Roce	10 (Fina)	Moderadamente duros, Abrasivos	Fibrosos, Blandos

Tabla 3.1 Tabla de características de los molinos.

(Fuente: <http://www.elprisma.com>)

3.2.3 CAMPANA DE BIOMASA

Es el lugar donde se almacena la biomasa hasta el momento de procesarla, ésta no debe ser totalmente cerrada para que las corrientes de aire puedan ayudar al secado natural. Estos lugares temporales de almacenamiento se denominan CRAB (Centros de recogida y almacenamiento de biomasa).

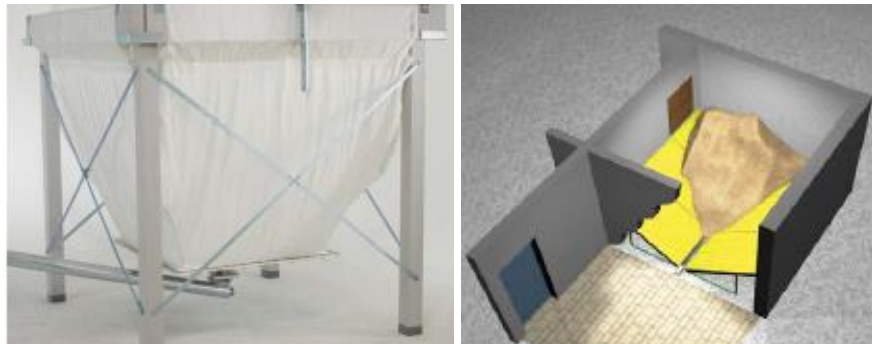


Figura 3.7 Campana de Biomasa.

(Fuente: <http://www.okofen.es>)

3.2.4 SECADO

Para llevar a cabo un peletizado exitoso, la materia prima debe presentar contenidos de humedad en un rango no superior a un rango de 8 - 15%.

Como la materia prima (restos de aserrado, aserrín, virutas, etc.) presentan por lo general altos contenidos de humedad (superiores a un 50%), es necesario previo a su utilización llevarla a contenidos de humedad menores mediante la utilización de sistemas de secado.

El proceso de secado se lo puede realizar de forma natural (exponiendo el material a la radiación solar y al aire), o mediante secado forzado.

- ***Secado Natural.***

Este sistema se basa en el aprovechamiento de las condiciones favorables que nos ofrece el medio ambiente para realizar la deshidratación de los residuos y obtener niveles de humedad que posibiliten el proceso de conversión de energía.

Para el secado de residuos de madera, estos se apilan para formar montes comúnmente denominados esteros, en ellos se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: humedad ambiental (temperaturas medias y extremas), régimen de precipitaciones, tiempo de heladas, la intensidad de los vientos, grado de insolación y exposición.

En los esteros las condiciones ambientales solo afectaran a una capa superficial del montículo la cual podría tener como espesor máximo unos 50cm, creando de esta manera una zona de aislamiento de la influencia ambiental exterior, dentro de esta zona se producen reacciones químico – físicas (fermentación, desarrollo de bacterias, hongos) las cuales producen un incremento de temperatura que puede llegar hasta valores de 70 hasta 90° C.

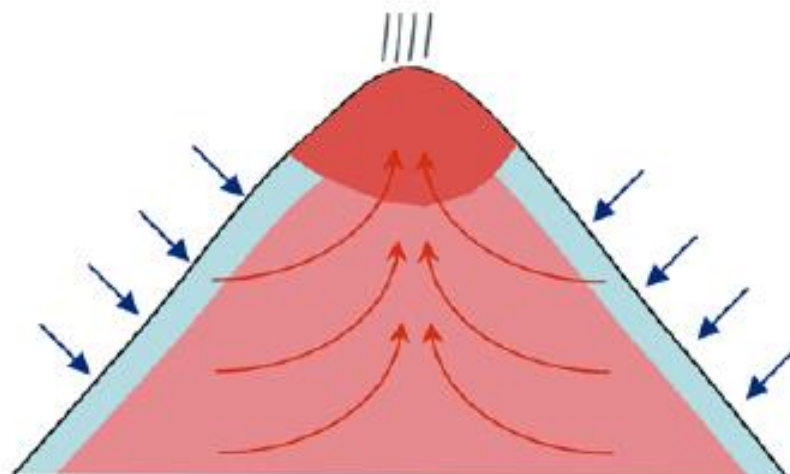


Figura 3.8 Proceso de Secado Natural.

(Fuente: El autor).

 Capa superficial cuyo contenido de humedad está influenciado por las

condiciones atmosféricas.

- Zona interior, donde se produce un secado lento y sostenido, no hay influencia atmosférica directa. Hay un flujo de aire que va arrastrando el agua progresivamente y un calentamiento que acelera el secado.
- La zona de la cumbre acumula el agua arrastrada por el flujo del aire del interior de la pila, y el aportado por la atmosfera, por lo tanto, esta zona tiene el mayor porcentaje de humedad del estero.

Durante este proceso hay que realizar un seguimiento de las temperaturas generadas en el interior para no tener problemas, por lo cual se debe realizar un descabezado del monte de forma adecuada y remover el material.

El inconveniente del secado natural es el largo tiempo que debe permanecer a la intemperie el aserrín para alcanzar una humedad optima para su posterior proceso tal como se observa en la tabla 3.1, sin embargo estos porcentajes pueden variar dependiendo de las condiciones climáticas.

TIEMPO DE ALMACENAJE	HUMEDAD B.H
2 días	50%
1 semana	40%
2 semanas	35%
1 – 2 meses	30%
6 meses a 3 años	15 – 20%

Tabla 3.2 Perdida de la humedad en la madera apilada a la intemperie
(Fuente: Ortiz Luís, Centro de investigaciones forestales, España 2005)

- **Secado Forzado.**

Cuando no se puede obtener la humedad deseada por las técnicas de secado natural se recurre al secado forzado el cual consiste en la aportación de un flujo térmico que permite la deshidratación de los residuos hasta los valores deseados, los equipos más utilizados para realizar este proceso se clasifican en:

Secadores directos: la transferencia de calor es por contacto directo entre el material húmedo y aire caliente.

Secadores indirectos: la transferencia de calor se realiza a través de una pared de retención.

Los diseños que mejor se ajustan a estos tipos de transferencia de calor, y suelen resultar más adecuados para el secado de biomasa son los de tambor rotatorio o "trommel" (Figura 3.6), y los de tipo neumático.

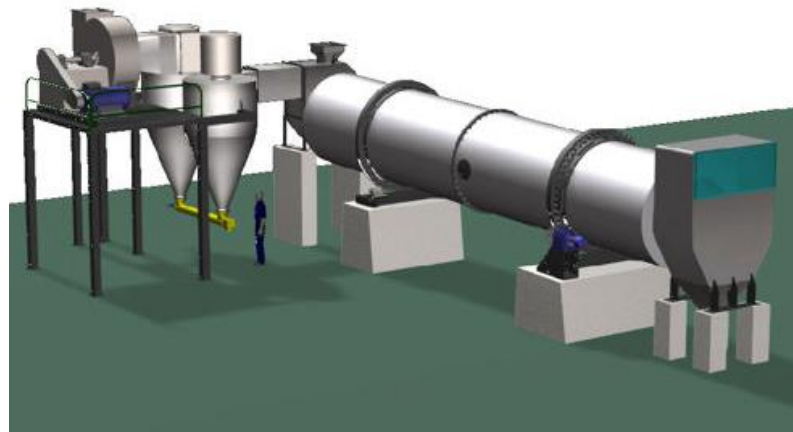


Figura 3.9 Secador Rotatorio.

(Fuente: www.sertonenginy.com/ESP/prcm.html)

Los secadores de tipo neumático están basados en el arrastre de los residuos mediante un flujo térmico que durante el recorrido extrae la humedad del material, suelen utilizarse cuando el producto es de granulometría fina y se requiere una ligera deshidratación.

Básicamente constan de un foco de calor (hogar donde se queman combustibles convencionales, o parte de la propia biomasa previamente secada, para generar el flujo térmico deshidratador), canal de secado (conducto de diámetro y longitud variable según diseño, donde el flujo térmico generado arrastra los sólidos en suspensión, al tiempo que provoca la evacuación del agua contenida en los mismos) y sistema de succión (aspirador ciclónico que produce una depresión que posibilita el movimiento del sistema).

Los secaderos rotatorios de tipo Trommel se suelen utilizar cuando se trabaja con materiales muy húmedos y/o de granulometría gruesa. En estos equipos el canal de circulación es un cilindro de sección y longitud variable (en función de diseños), que gira con velocidad variable facilitando un contacto

íntimo entre los sólidos y el flujo secante. La pendiente interior junto con el giro produce el avance de los sólidos a una velocidad controlable. El tambor está dotado interiormente de espas, paletas o tornillos sinfín, que permiten regular el flujo de sólidos y garantizar una adecuada exposición de la superficie de la biomasa al flujo térmico.

Finalmente, en ambos casos se procede a la segregación de los sólidos mediante un ciclón decantador donde el flujo pierde velocidad y precipitan los sólidos secos por gravedad, separándose del aire cargado de humedad.

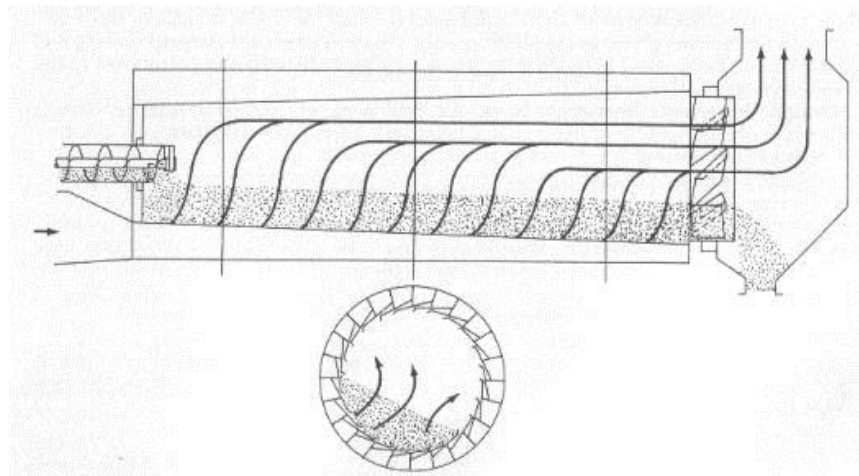


Figura 3.10 Diagrama de Flujo de Calor – Secador Rotatorio.

(Fuente: *El Secado de sólidos en la Industria Química*, Nonhebel G., Moss A.A.H., Ed Reverté S.A., 1ª edición ,1979.)

3.2.5 TOLVA DE ALIMENTACION

Los residuos secados son clasificados con ayuda de varios tamices vibrantes ubicados en el interior de la tolva que obtienen diferentes grados de granulometría, los excesivamente gruesos vuelven al proceso de trituración mientras que el resto entra en el proceso. Pueden también eliminar las partículas menores a 0,3mm, por las razones ya indicadas, aunque no suele ser lo más frecuente.

Los problemas que se presentan en los tamices vibrantes de la tolva suelen ser debido al taponamiento de los orificios de las mallas o a sobrecargas que impiden el contacto de los residuos con la malla del tamiz, esto debido a la existencia de una capa intermedia de aserrín que impide dicho contacto.

Este efecto se puede minimizar mediante un correcto diseño y funcionamiento del equipo de cribado en cuanto a superficie, forma, espesor, inclinación de la malla, frecuencia e intensidad del movimiento aplicado y flujo de material por m^2 de malla y unidad de tiempo.



Figura 3.11 Tolva de alimentación
(Fuente: <http://www.wasvelt.com>)

3.2.6 ROSCA DE ALIMENTACION

Mediante la rosca de alimentación (Figura 3.9) se transportan los residuos secos a la peletizadora a través de un conducto desde la tolva, por medio de un mecanismo de rosca puede basarse en un tornillo sin fin o en un eje con palas de orientación variable, con el objetivo de modificar la velocidad de alimentación.

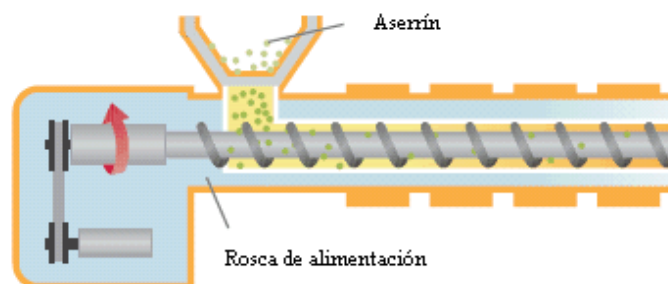


Figura 3.12 Rosca de alimentacion
(Fuente: <http://www.wasvelt.com>)

3.2.7 PROCESO DE PELETIZADO

El fundamento operativo del peletizado se basa en un proceso de compactación de material lignocelulósico, es decir; los residuos de madera ubicados sobre una matriz metálica dotada de orificios estandarizados del mismo calibre son compactados por

una serie de rodillos a presión constante y de forma continua, de esta manera se logra la densificación del material.



Figura 3.13 Proceso de Compactación del aserrín (peletizado)

(Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002.)

Los pellets de biomasa residual se fabrican a partir de la materia prima base que tiene que cumplir con determinadas condiciones como son la humedad y granulometría; dentro de este proyecto se tiene como materia prima los residuos de madera, por lo tanto estos residuos deben tener las siguientes características:

- La humedad debe estar comprendida entre 8 y 15 %BH (base húmeda).
- El tamaño de partícula debe tener alrededor de 0,5cm.
- la compactación de la biomasa debe ser de 1 a 6 veces su volumen
- Los agujeros de extrusión de la matriz deben tener forma cilíndrica, con diámetros de 0,5cm a 2,5cm y de 1cm a 3cm de longitud.

Los dos últimos factores son de diseño y varían de acuerdo a las características que se desee dar al producto final, esto en base a las normas existentes en el mercado para la elaboración de pellets.

Ventaja del proceso de peletizado

Los procedimientos para la elaboración de materiales densificados tienen algunas ventajas, tales como:

- La posibilidad de guardar los combustibles para periodos más largos sin riesgo de descomposición.
- La densificación de la madera es aproximadamente cinco veces del volumen de los residuos.
- La combustión es mas limpia y no perjudica al medio ambiente
- La Potencia Calorífica es mayor con respecto a la leña y a las briquetas.

3.2.8 PROCESO DE ENFRIAMIENTO

Al salir el pellet de la prensa peletizadora, las altas temperaturas que adopta lo hacen frágil y propenso a la formación de hongos, es por eso que es muy importante incorporar equipos que bajen de forma consistente la temperatura del producto.

Por esta razón se emplean los enfriadores verticales (*Figura 3.14*), estos tienen una cámara vertical con ventiladores donde los pellets caen por la aplicación de un flujo transversal de aire suave.



Figura 3.14 Enfriador vertical
(Fuente: <http://www.Engormix.com>)

Los enfriadores de contra flujo proporcionan una corriente de aire frío en sentido contrario de la caída del pellet (*Figura 3.15*) para reducir la temperatura de entrada y evitar los riesgos antes descritos.

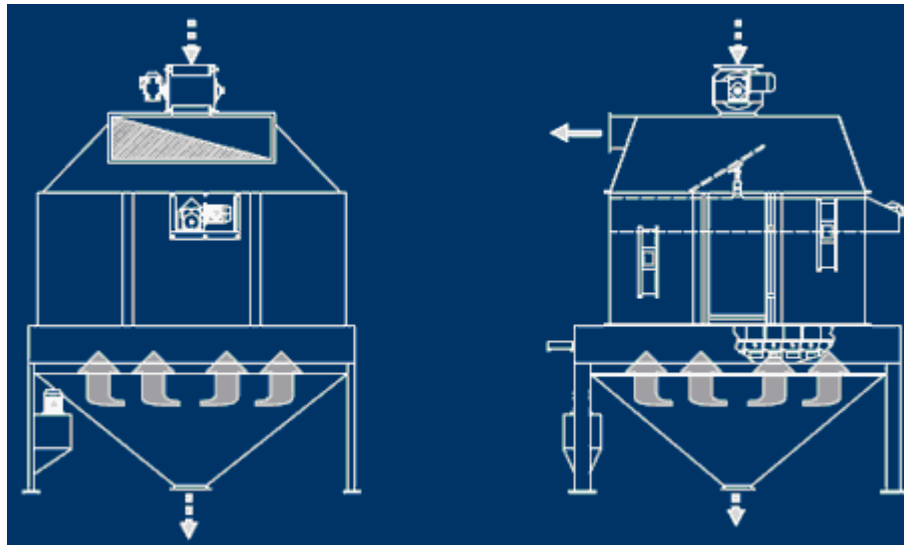


Figura 3.15 Esquema del sistema de enfriamiento de pellets
(Fuente: <http://www.Engormix.com>)

3.2.9 ALMACENAJE

Posterior al proceso de enfriamiento, el pellet frío pasa a ser tamizado con sistema de vibrado para separar el polvo que pudo haber escapado del proceso de peletizado, el cual es devuelto como materia prima al proceso de producción.

Los pellets son transportados a un silo para almacenamiento (granel), y/o finalmente pueden ser envasados. El sistema más habitual de envasado de los pellets es el ensacado en unidades de 15-50 kg.

En países donde existe una red de comercialización importante el material se suele manejar a granel o en grandes bolsas de 1m³ de capacidad.



Figura 3.16 Almacenaje de pellet en fundas y a granel
(Fuente: <http://www.enerpellet.com>)

3.3 MAQUINAS DE PELETIZADO

La mayoría de los equipos destinados al peletizado del aserrín, incluyen salvo pequeñas variaciones, los siguientes componentes:

- Sistema de alimentación.
- Pre-acondicionador
- Troquel y rodillos de presión.
- Engranaje reductor.
- Carcasa.

3.3.1 SISTEMA DE ALIMENTACION DE LA MATERIA PRIMA

El alimentador es generalmente un gusano o tornillo sinfín (*Figura 3.9*) que vierte los residuos de la tolva al acondicionador. El ángulo de las aspas del gusano debe estar diseñado para suministrar los residuos de una manera continua y sin fluctuaciones u oleadas al acondicionador.

Es importante que tanto el alimentador como el acondicionador (*Figura 3.11*) entreguen los residuos uniformemente, de otra manera las oleadas que se podrían generar en el acondicionador causarían capas gruesas en la matriz provocando que los rodillos patinen y se atranque la Peletizadora.



Figura 3.17 Alimentador y pre-acondicionador de la peletizadora
(Fuente: <http://www.Engormix.com>)

3.3.2 PRE-ACONDICIONADOR

Para la producción óptima de pellets, con la finalidad de obtener una buena calidad de los gránulos se requiere un correcto acondicionamiento de los residuos para la granulación y la extrusión.

El proceso de pre-acondicionado se hace necesario cuando la materia prima tiene bajos niveles de humedad que no permiten una correcta compactación, está equipada con sistemas de tuberías para la salida del humo y sistemas de spray que proporcionan vapor al material seco para que obtengan un nivel de humedad apropiado y homogéneo para su posterior densificación.

En caso de que el material tenga los niveles apropiados de humedad, el pre acondicionador se convierte en un alimentador que transportara el material directamente al proceso de peletizado.

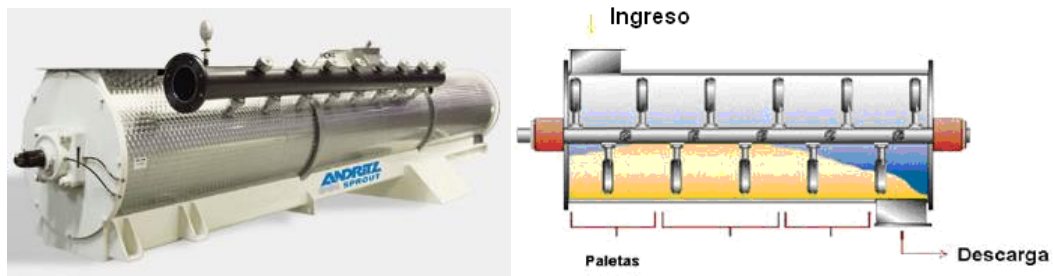


Figura 3.18 Pre-acondicionador
(Fuente: <http://www.Engormix.com>)

3.3.3 MATRICES Y RODILLOS DE PRESION

Los elementos mecánicos más trascendentales dentro del proceso de densificación son las matrices y los rodillos que serán los encargados de proporcionar la forma y el tamaño final del pellet.

3.3.3.1 MATRICES

En los canales abiertos de la matriz se compactan los residuos de aserrín provenientes del pre-acondicionador, estos residuos son alimentados en caída libre vertical y de manera uniforme.



Figura 3.19 Matriz Anular y Matriz Plana.
(Fuente: <http://www.biodiesel-machine.com/sp/ring-die-pellet>)

Las matrices se construyen con los siguientes tipos de acero:

- X46Cr13 (más conocido como acero inoxidable o acero al cromo)
- 20MnCr5 (más conocido como acero normal = normal alloy)
- 18NiCrMo5 (acero similar al 20MnCr5 pero más caro por la presencia de un número más elevado de constituyentes de aleación²⁶)

Esos aceros tienen características y empleos muy diferentes:

El acero X46Cr13 se somete a un tratamiento de endurecimiento que permite lograr una dureza superficial e interior de 52-54 HRC. El elevado porcentaje de cromo lo hace inoxidable. No obstante el coste más elevado del acero normal, se emplea casi universalmente para todos tipos de forraje.

A las matrices hechas con los aceros 20MnCr5 y 18NiCrMo5 se les aplica un temple superficial por cementación, que permite lograr una dureza de 60-62 HRC en aproximadamente 0.8-1.2mm. Por debajo del estrado de cementación el acero se queda maleable y por eso más tenaz. Las matrices fabricadas con este acero son por lo tanto más resistentes en la granulación de productos fibrosos y difíciles de trabajar.

²⁶ http://www.lamec-pellets.com/ver_sp/dies_main_dies_sp.htm

Con frecuencia se cree que es posible resolver todos los problemas utilizando matrices con un elevado índice de compresión (espesor elevado). En este caso hay que considerar las ventajas y desventajas conexionadas:

Matrices con espesor elevado:**Ventajas:**

- Menor trabajo y experiencia del operador para tratar de mantener constante la calidad del pellet.
- Mayor densidad del pellet

Desventajas:

- Menor productividad
- Frecuentes problemas de atascamiento
- Mayores costes de producción
- Mayor desgaste de la matriz y de las camisas de los rodillos
- Menor temperatura de acondicionamiento
- Menor humedad añadida
- Aumento de la temperatura por roce
- Posible daño superficial de la matriz

Matriz con espesor bajo:**Ventajas:**

- Elevada capacidad
- Menor riesgo de atascamiento
- Posibilidad de trabajar con más humedad

- Posibilidad de acondicionar la harina con una temperatura más elevada
- Adaptabilidad a un mayor número de recetas
- Reducción de los costes producidos por el desgaste de la matriz y de las camisas de los rodillos
- Menor sollicitación de las máquinas
- Disminución de los gastos energéticos

Desventajas:

- Posibles problemas durante el enfriamiento por las temperaturas de acondicionamiento más elevadas
- Mayor empeño y experiencia requerida por parte del operador para garantizar la calidad del pellet
- Aspecto opaco del pellet
- Menor densidad del pellet

Dentro del canal de compactación no debe exceder la fuerza de presión de los rodillos. Sin embargo, la fuerza de fricción debe ser capaz de producir una compactación suficiente del producto a un aglomerado sólido.

3.3.3.2 RODILLOS

La función del rodillo es proporcionar la fuerza de compresión necesaria entre el aserrín y la matriz. La matriz ofrece la fuerza de resistencia que depende de su espesor (área de trabajo efectivo), coeficiente de fricción, y diámetro del orificio.

La fuerza de presión aumenta continuamente, a medida que los rodillos van llevando el producto hacia el canal de compactación, hasta tal punto que el cilindro de material (tapón) que se encuentra dentro del canal va siendo desplazado poco a poco.

Los rodillos son alimentados con la materia prima de diferentes maneras dependiendo del tipo de maquinaria. Los rodillos empujan la materia prima a través de los agujeros del troquel o matriz, la que posteriormente es cortada por navajas especiales dando a los pellets su forma definitiva. El tamaño de los agujeros de la matriz depende de las dimensiones de los pellets que se quiera producir, siendo estas especificadas al momento de su diseño.

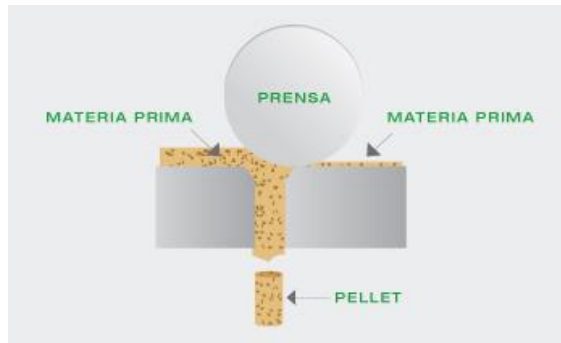


Figura 3.20 Matriz y rodillo de presión.

(Fuente: http://www.lipsia.com.ar/bio_textos/es_proceso.html)

Para una eficiencia y vida máxima de la matriz, se recomienda, como regla general, utilizar un juego de rodillos nuevos siempre que la matriz sea nueva, pues cualquier cosa que le ocurra al rodillo, también le sucederá a la matriz por la relación directa que existe entre estos dos.

La fabricación de los rodillos se lleva a cabo utilizando materiales como aleaciones de acero, cromo, níquel y molibdeno, con el fin de que estas piezas tengan una alta resistencia al desgaste por trabajo que realizan, que en este caso, consiste esencialmente en la aplicación de presión y fricción.

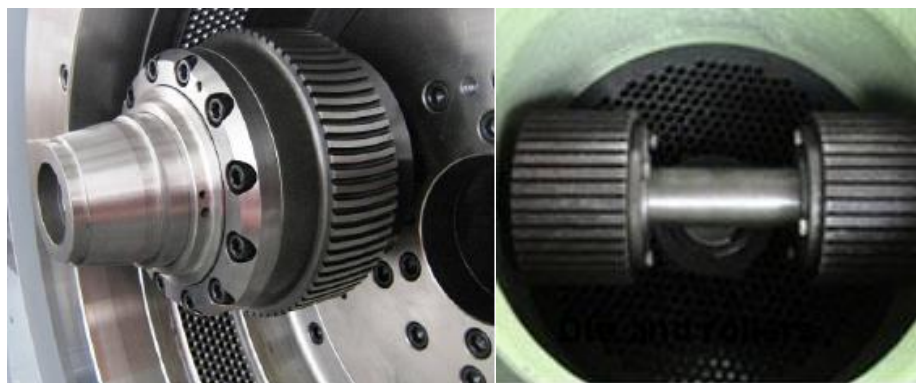


Figura 3.21 Rodillo de Presión.

(Fuente: Revista CIS-Madera.)

Los rodillos de presión y las navajas con las que se da el tamaño final a los pellets son partes removibles, las mismas que deben ser cambiadas periódicamente a causa del desgaste que en ellas se va produciendo a raíz de su uso.

Los rodillos pueden tener muchas configuraciones, pero siempre hay que buscar el que tenga mejor tracción. Por eso se recomienda usar rodillos con el mayor número de corrugaciones (canales) y que estos estén cerrados. Los de canales abiertos permiten que los residuos se filtren por los lados impidiendo ser comprimida en los agujeros de la matriz.

El sistema Hidráulico

La distancia entre los rodillos y la matriz tiene una influencia importante sobre la compactación. Por eso es deseable poder cambiar esta distancia durante la producción y controlar el estado de funcionamiento de la prensa a base de la presión del producto contra los rodillos.

Para ajustar los rodillos se suele usar un sistema hidráulico que permite regular la separación entre la cara de la matriz y el rodillo, de esta manera se puede monitorear el proceso y optimizarlo durante el servicio. Además, el sistema hidráulico está equipado con una válvula reductora de presión integrada que la protege.

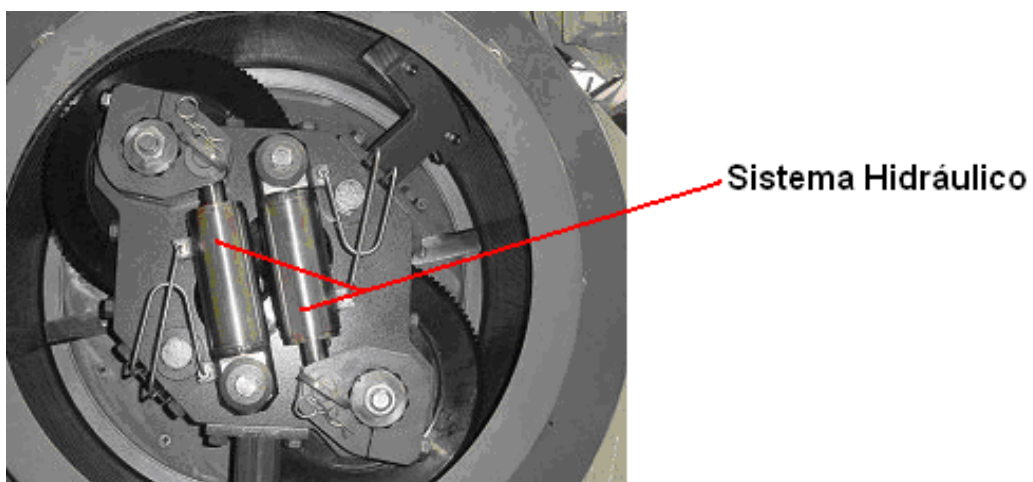


Figura 3.22 Sistema Hidráulico.
(Fuente: <http://www.segra.es/granuladora.html>)

3.3.4 ENGRANE REDUCTOR

El sistema reductor de velocidad es necesario para controlar la velocidad del motor principal y ganar potencia para la compresión del material, dependiendo del diseño se pueden utilizar varios tipos de reductores, sin embargo el mas utilizado es el reductor sin fin corona por su simplicidad en cuanto a la construcción y mantenimiento.

3.3.5 CARCASA.

La carcasa o cuerpo de la peletizadora debe ser lo suficientemente rígida para soportar los esfuerzos y producidos durante el proceso de compactado del material, pero a su vez ser manejable para que permita el mantenimiento respectivo de sus partes internas.

3.4 CLASIFICACION DE SISTEMAS DE PELETIZADO.

Para poder realizar el trabajo de compactación de la biomasa en la actualidad existen dos tecnologías, su clasificación se basa en la forma de la matriz de extrusión, estas pueden ser:

- Prensas de matriz anular.
- Prensas de matriz plana.

3.4.1 PRENSA DE MATRIZ ANULAR

En este equipo la forma de la matriz es anular o en anillo. El sistema del mecanismo de compresión lo constituye un troquel sólido en cuyo margen giran de 1 a 3 rodillos de presión. Hoy en día existen equipos en los cuales, los rodillos y el troquel giran, generando elevadas fuerzas de fricción, las mismas que son transferidas en el proceso al material que esta siendo peletizado (por ello la necesidad del enfriamiento de los pellets) . Además del mecanismo de compresión, el sistema de alimentación es un factor de vital importancia, cuando el objetivo es obtener un alto rendimiento y un bajo desgaste en el equipo.

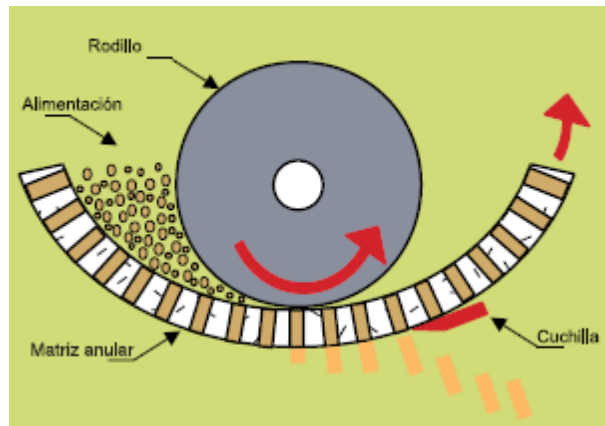


Figura 3.23 Principio de Peletizado por Matriz Anular.

Fuente: <http://www.segra.es/granuladora.html>

En aquellos equipos que cuentan solo con un rodillo, el material fluye dentro del troquel solamente por acción de la fuerza de gravedad o es transportado por un tornillo alimentador.

En un equipo de dos o tres rodillos estacionarios, el sistema de alimentación más efectivo es realizado mediante un movimiento de tipo centrífugo, el cual dirige el material hacia los rodillos por medio del uso de alerones ajustables. El objetivo es extender el material como una capa sobre los agujeros del troquel y los rodillos.

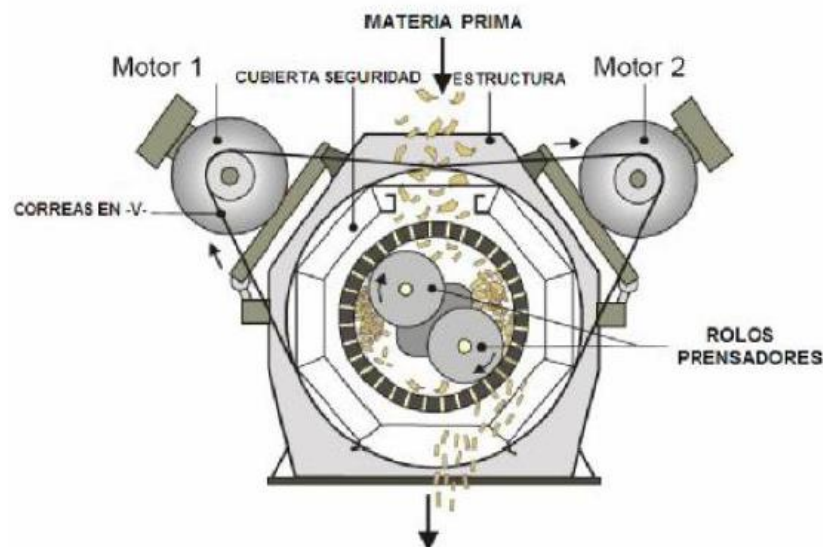


Figura 3.24 Mecanismo de Peletizado con matriz anular.

(Fuente: CIEEPI Nov 2004, Santiago Sánchez M.)

Dentro de este tipo de prensa existen dos variantes, en el primero la matriz anular es fija y los rodillos, también llamados discos, animados de un movimiento giratorio,

empujan la materia a través de las numerosas hileras; en el segundo los rodillos son fijos y es la matriz la que gira a alta velocidad, la velocidad de rotación de la matriz anular determina la longitud del pellet, recomendándose un máximo de 4 veces el diámetro.

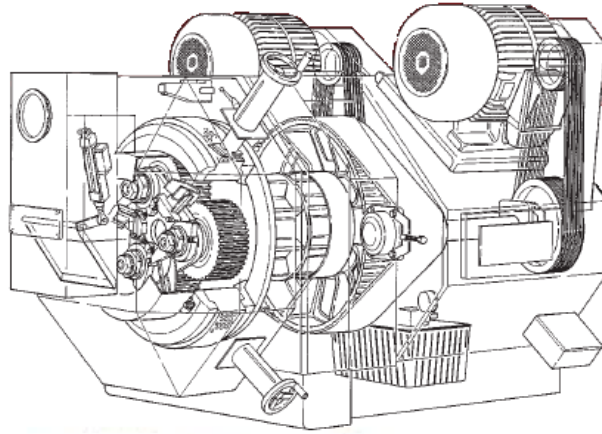


Figura 3.25 Máquina Peletizadora con Matriz Anular.
(Fuente: <http://www.segra.es/granuladora.html>)

3.4.2 PRENSA DE MATRIZ PLANA

En este tipo de prensa, el mecanismo de compresión lo constituye una matriz plana y redonda, equipada con rodillos de presión sobre su superficie.

El número de rodillos varía de entre 1 a 6, dependiendo del tamaño de la máquina.

En algunos modelos el troquel rota y los rodillos se mantienen estacionarios, aunque también existen modelos en que el troquel se mantiene estacionario y los rodillos son los que rotan.

En el troquel liso, el material es alimentado solamente por la acción de la fuerza de gravedad.

Una de las ventajas de este tipo de sistema es la simplicidad al momento de su limpieza y cambio de piezas.

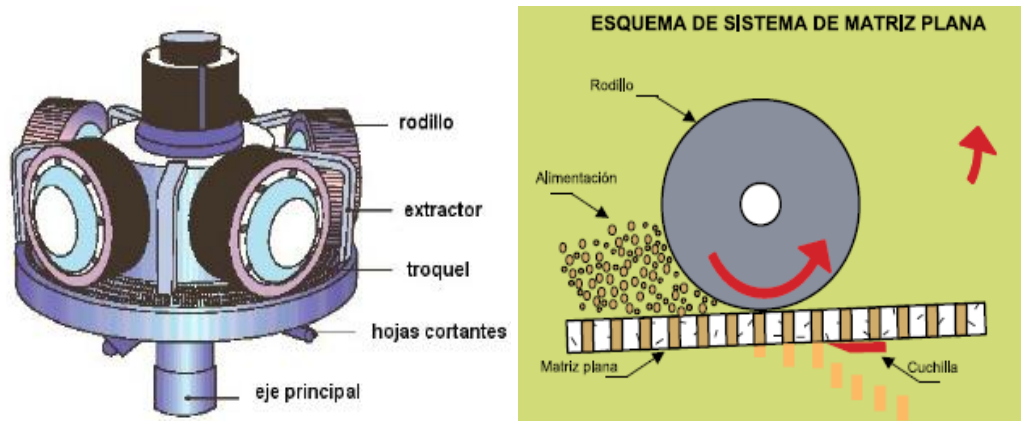


Figura 3.26 Esquema de la matriz plana.
(Fuente: <http://www.segra.es/granuladora.html>)

Comparativamente, resultan más recomendables las prensas de matriz plana (Figura 3.27) que las de matriz anular, ya que al ser éstas reversibles se duplica la vida útil de las mismas y, además, son más simples de manejar y en consecuencia su costo es menor.



Figura 3.27 Máquina Peletizadora vertical con Matriz Anular.
(Fuente: Inderfor S. A.)

3.5 PARAMETROS PARA EL DISEÑO

Para un correcto diseño del sistema de peletización, se deben considerar varios aspectos que pueden influir durante el proceso de compactación, los cuales pueden afectar de manera importante al producto terminado.

Las magnitudes físicas son las que deciden sobre el comportamiento de entrada del material, el rendimiento y la cantidad de gránulos, entre las más importantes podemos mencionar:

Presión axial, es determinada por el diseñador puesto que de esta dependerá el grado de compactación que tenga el pellet y la longitud de la matriz de peletizado.

Potencia motriz, de esta dependerá que durante el proceso de peletizado no sea interrumpido a causa de diferentes fuerzas generadas por la transmisión de movimientos y la fricción creada entre la materia prima y el mecanismo, este es uno de los factores principales para que la maquina tenga un grado de eficiencia satisfactorio.

Coeficiente de fricción, durante el proceso de compactación se van a crear varias fuerzas de fricción las mismas que producirán un aumento de temperatura en los diferentes componentes de la maquina peletizadora y a su vez serán transmitidos a la materia prima (en la *figura 3.28* están representadas las fuerzas que se producirán durante este proceso), entre las principales fuerzas de fricción tenemos:

- Superficie de rodillo – producto.
- Producto – producto, produce.
- Producto – superficie de matriz.
- Producto – canal de compactación.

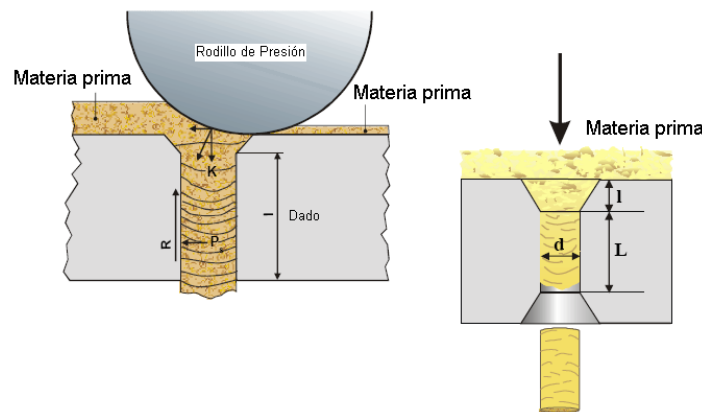


Figura 3.28 Fuerzas generadas en el proceso de compactación.
(Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002.)

La fuerza de fricción se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$R = \mu * P_s * u * l < |K|$$

Ecuación 3.2 Fuerza de Fricción en el peletizado
(Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002.)

Donde:

R = Fuerza de fricción [N].

μ = Coeficiente de fricción.

P_s = Presión de las paredes $\left[\frac{N}{m^2} \right]$

u = Diámetro del agujero [m]

l = Longitud el agujero [m].

K = Fuerza de presión del rodillo [N].

Índice de compresión (relación de compresión): es la relación entre el espesor efectivo de compresión y el diámetro del hueco (Figura 3.28). Este índice es característico de cada clase de material. Es decir que después de haber escogido el diámetro del pellet, para definir más o menos el espesor de compresión hay que multiplicar el índice por el diámetro. Para calcular la relación de compresión se puede usar la ecuación 3.2

$$\text{Relacion de compresion} = \frac{d}{(L + 2l')}$$

Ecuación 3.3 Relación de compresión de los residuos.
(Fuente: Technical Research Centre of Finland, 2002.)

Los parámetros de diseño son los que van a determinar las características que va a poseer el producto final, y el análisis de todas las magnitudes físicas dentro de un solo conjunto para verificar los rendimientos y el correcto funcionamiento del elemento peletizador, entre los principales aspectos de diseño están:

Dimensión del dado.

La presión necesaria para alcanzar una densidad deseada se incrementa de forma exponencial con el diámetro del dado, por lo que su diseño debe estar en consonancia con la potencia de la máquina.

Avellanado cónico

Los huecos de la matriz tiene en la embocadura un avellanado cónico que facilita la entrada del material. El avellanado puede tener conformaciones diferentes: Normalmente tiene una conicidad de 55 - 60° y una profundidad tal que las embocaduras de los huecos casi se rozan, así que se produzca el efecto de nido de abeja. También las características del avellanado cónico son importantes, porque un avellanado cónico demasiado profundo puede transmitir un efecto de precompresión a la matriz, con riesgo de atascamiento y de bloqueo sobre todo en las primeras horas de trabajo.

En efecto cuando la matriz no comprime de manera suficiente (índice de compresión bajo) y el pellet que sube tiende a ser friable, se puede tratar de aumentar la capacidad de compresión acentuando el avellanado cónico.

En muchos casos las matrices que tienen un diámetro de grande tamaño (> 6 - 7 mm) se construyen con un avellanado cónico muy profundo (10 - 15 mm) para evitar espesores de matriz elevados y, no obstante, garantizar una compresión fuerte.

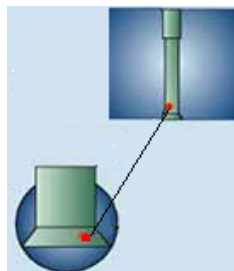


Figura 3.29 Avellanado cónico del dado.

(Fuente: <http://www.lamec-pellets.com>)

Avellanado cilíndrico: en unos casos el avellanado es cilíndrico. Este perfil muy especial garantiza la máxima precompresión. Es un tipo de perfil difícil de realizar y

se puede utilizar únicamente para la producción de pellets con diámetros comprendidos entre 16 - 20 mm.

Cantidad de materia comprimida. (Presión ejercida).

Las presiones de compactación oscilan en una fuerza aplicada entre 1100Kg./cm² a 2500Kg./cm² dependiendo de las características de las especies de madera utilizadas.²⁷

La densidad del pellet aumenta con la cantidad de material comprimido y las presiones generada durante el proceso. La retracción del material y por tanto, la densidad del pellet son menores según aumenta la longitud del material obtenido. La energía específica necesaria no se ve influenciada por la cantidad comprimida.

Velocidad del émbolo.

Se ha demostrado que la energía específica aumenta con la velocidad de extrusión. Hay que señalar que a pesar de todo, las velocidades experimentales son mucho más bajas que las que tienen lugar en la práctica industrial.

Duración y mantenimiento de la presión.

El tiempo de aplicación de la presión es importante porque junto con la velocidad definen la profundidad de la matriz. Está en dependencia del contenido en sustancias ligantes de la materia prima. Si la materia prima tiene alto contenido en lignina, resinas o taninos, el tiempo necesario de presión es menor y por tanto la profundidad de la matriz.

Al ser más corta la profundidad de la matriz, también van a tener una longitud menor los pellets y con ello serán más resistentes.

Calor aplicado exteriormente.

La temperatura, junto con la humedad, es el factor cuyos efectos sobre los procesos de densificación son más acentuados. La aplicación de calor a un material densificado en formación confiere a éste una mayor cohesión, necesitándose una presión mínima para obtener la densidad deseada.

²⁷ Leaver, R. (1970).

La hipótesis que justifica la acción de la temperatura se basa en las características de las ligninas: a temperaturas comprendidas entre los 80C y 200C, según las materias estudiadas, la lignina se reblandece, modifica su estructura y tras su enfriamiento, asegura una mayor unión de las partículas. En este sentido la lignina es considerada como una cola termoplástico natural.

Entre otras consideraciones para el diseño del equipo peletizador hay que tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia previa hidráulica.
- Distancia entre rodillos y matriz.
- Número, propiedad superficial y velocidad de rodillos.
- Geometría y material de la matriz.
- Geometría del chaflán.
- Geometría de los canales de compactación (relación de compresión, paso, diámetro).

3.6 SELECCIÓN DE LOS PROCESOS PARA LA DENSIFICACIÓN

Como se menciona anteriormente, para el proceso previo al peletizado, los residuos deben poseer ciertas características de granulometría y humedad que permitan su correcta compactación, para ello se debe elegir los sistemas de molido y secado que más se ajusten a las necesidades de fabricación según la norma CEN/TS 14961.

3.6.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MOLIDO

Análisis de granulometría

El tamaño de la materia prima a compactar debe cumplir con ciertos factores geométricos referentes al tamaño. Las dimensiones de la partícula van a depender del diámetro del agujero de compactación, el cual se determina de acuerdo a la norma CEN/TC 14961 presentada en el capítulo 2. El proyecto se vale de esta norma para la elección del diámetro del pellet de 8 mm y una longitud de 32 mm, por lo tanto la

granulometría de la materia prima debe ser inferior a los 8 mm que posee el agujero de compactación.

De las muestras recolectadas se realizó un análisis de tamaño para determinar si existe la necesidad de implementar un proceso de molido; cabe decir que, las muestras obtenidas de las diferentes empresas son los residuos de los procesos de manufactura, por lo tanto el tamaño de los residuos es variable. En la tabla 3.3 están representados los tamaños de viruta de las diferentes muestras.

Nº Muestra	Tamaño (mm)
Muestra 1	41
Muestra 2	52
Muestra 3	14
Muestra 4	1,5
Muestra 5	19
Muestra 6	23
Muestra 7	39
Muestra 8	40
Tamaño Promedio	28

Tabla 3.3 Tamaño de las partículas.
(Fuente: El Autor.)

La granulometría promedio de los residuos es de 28 mm por lo tanto hay que realizar un proceso de molido para poder alcanzar un tamaño de partícula que nos permita realizar un proceso de compactación eficiente.

En base a la investigación de los sistemas de molido para el aserrín, hemos elegido el molino de martillos por las siguientes razones:

- Mayor durabilidad del equipo (menor mantenimiento).
- Forma uniforme de las partículas finales.
- Mayor producción (5 a 15% más)
- Menor consumo de energía
- Menor tiempo de molturación
- De fácil construcción.

- Menor costo

Las dimensiones y el caculo de sus componentes dependerán de diferentes factores que serán analizados en el capítulo 4.

3.6.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TAMIZADO

La selección de un sistema de tamizado nos garantiza que las partículas que provienen del molino sean separadas del proceso de densificación ya que no garantizan su correcta compactación, por ello se resolvió diseñar un tamizador vibrante de doble tamiz para obtener un mayor grado de confiabilidad en la clasificación y calidad de la materia prima.

El tamiz en la parte superior impedirá el paso a las partículas mayores a 6 mm, las mismas que deberán retornar al proceso de molido.

El tamiz en la parte inferior impedirá el paso a las partirlas menores a 3 mm, de tal manera que los polvos finos que pasan por esta tamiz sean rechazados del proceso y las partículas que se queden en el tamiz serán usadas para el peletizado.

3.6.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO

Análisis de Humedad

El contenido de humedad del aserrín depende del lugar en donde es almacenando, las industrias que poseen un nivel medio de generación de residuos por lo general utilizan silos de almacenamiento, si el nivel de generación de residuos es alto, el aserrín es acumulado al medio ambiente (con techo o sin techo); es por ello que se debe realizar un análisis previo de su contenido de humedad.

Las muestras analizadas fueron recolectadas en diferentes empresas, debido a que en la industria cuencana los métodos de almacenamiento de residuos (aserrín) es muy variado por lo que se dan todos los sistemas de recolección antes mencionados, esta es la causa por la cual, el nivel de humedad varía entre las muestras, por consiguiente se decide trabajar con un valor promedio de humedad de las muestras.

Para determinar el contenido de humedad se aplicara la *Ecuación 2.1*. Rigiéndonos en este principio, se realiza un ensayo con muestras de aserrín extraídas de las

empresas seleccionadas para el análisis (mayor información en el anexo 3), para ello se aplica la siguiente metodología:

- Se extrae una muestra representativa de aserrín de las empresas fabricantes de muebles y de aserraderos.
- Se pesa cada una de las muestras, para establecer la masa de la madera húmeda m_h (masa inicial), para ello se utiliza una balanza con una apreciación de 1 gramo, se toma un peso inicial común para todas la muestras ($m_h = 37$ gramos).
- Se realiza un proceso de secado en horno hasta que los residuos estén completamente secos.
- Se pesa nuevamente la muestra para determinar su m_o (masa de la madera seca).
- Por último, obtenidos m_h y m_o de cada una de las muestras, se procede a utilizar la *Ecuación 2.1*.

En la tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos del análisis de humedad de las muestras (residuos) extraídos.

No Muestra	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Tiempo (seg)	Humedad (%)
Muestra 1	37	33	60	12,12
Muestra 2	37	30	65	23,33
Muestra 3	37	34	63	8,82
Muestra 4	37	29	120	27,59
Muestra 5	37	33	70	12,12
Muestra 6	37	33	63	12,12
Muestra 7	37	35	40	5,71
Muestra 8	37	25	180	48,00

Tabla 3.4 Porcentaje de Humedad.
(Fuente: El Autor.)

En la *figura 4.1* se puede observar la variabilidad del porcentaje de humedad con respecto la media aritmética de las muestras escogidas.

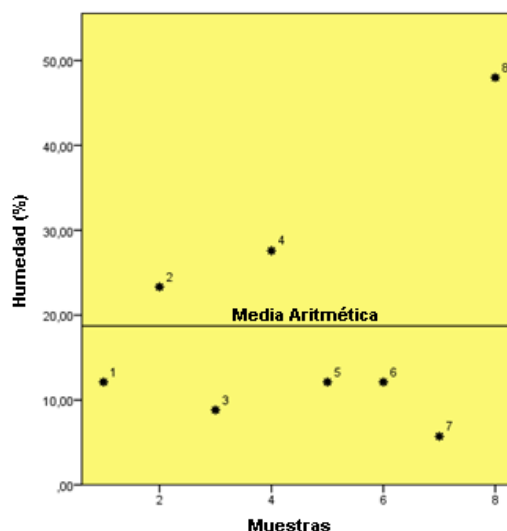


Figura 3.30 Representación de la humedad media.
(Fuente: El Autor.)

Como resultado del análisis estadístico se obtiene los valores de la *tabla 3.4*, los datos obtenidos nos pueden ayudar a tomar una decisión sobre la implementación de un sistema de secado.

Humedad (%)		
N	Válidos	8
	Perdidos	0
Media		18,7263
Error típ. de la media		4,91934
Mediana		12,1200
Moda		12,12
Desv. típ.		13,91401
Varianza		193,600
Rango		42,29
Mínimo		5,71
Máximo		48,00
Suma		149,81

Tabla 3.5 Medidas de Centralización de la humedad de los residuos de madera.
(Fuente: El Autor.)

La humedad contenida en las muestras nos dan una media aritmética de 18.72 por lo tanto los residuos deben ser sometidos a un procedimiento de secado previo al peletizado y obtener una humedad cercana al 12% para una correcta compactación.

En base al análisis de humedad realizado, se puede deducir que:

- Los residuos que son almacenados a la intemperie (bajo techo), y los residuos que son almacenados en silos tienen una humedad promedio del 8% al 15%, por lo tanto no requieren de un proceso de secado.
- Los residuos que están a la intemperie (sin techo), contienen una humedad promedio del 23% al 50% dependiendo de las condiciones ambientales, por lo tanto el proceso de secado es necesario.

Las empresas que manejan sus residuos con alto grado de humedad pueden realizar el proceso de secado de forma natural o forzada, la elección de uno de los métodos dependerá del tiempo de secado y de los costos por infraestructura.

El método que recomendamos para el secado del aserrín, se basa en el uso de la energía solar con circulación de aire forzado (Esta propuesta será presentada con detalles en el capítulo 4).

3.6.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Como se menciona en la parte teórica, existen dos tipos de alimentadores (paletas y tornillos sin fin). El sistema de alimentación por paletas se usa cuando el material posee un proceso de acondicionamiento, mientras que el tornillo sin fin se usa para proceso de precisión y con sistemas de control moderno

Sin embargo, con la finalidad de reducir los costos de construcción, la alimentación del aserrín se realizara simplemente por gravedad, desde la parte superior el material será alimentado en la tolva diseñada para la capacidad necesaria.

3.6.5 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PELETIZADO

Dentro de la teoría analizada se puede concluir, que el sistema de peletizado de matriz anular, por lo general es utilizado cuando existen altos niveles de producción de pellets y por ello su costo de fabricación es alto, sin embargo el mecanismo de peletizado de matriz plana posee ciertas ventajas sobre el mecanismo de matriz anular.

Basándonos en los niveles de capacidad de producción y las características y costos de fabricación, se selecciono la peletizadora de matriz plana cuyas ventajas principales se detallan a continuación.

- Se acopla a la capacidad de producción.
- Costo más económico.
- Mayor facilidad en el aspecto constructivo.
- Fácil operación.
- La vida útil de la matriz plana es el doble que la matriz anular.
- Fácil mantenimiento.

3.6.6 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIADO

La selección de un sistema de enfriamiento es necesaria para brindarle al pellet la característica final de friabilidad. Por esta razón se diseñara un sistema de aire forzado que permita un rápido enfriamiento de los pellets que salen a alta temperatura del proceso de compactación de la materia prima.

Finalmente luego del proceso de enfriado los pellets serán empaquetados o simplemente distribuidos a granel.

CAPITULO 4

**DISEÑO DE LAS MAQUINAS PARA EL PROCESO DE
PELETIZADO**

CAPÍTULO 4

4.1 GENERALIDADES

En este capitulo se diseñaran los mecanismos seleccionados en el capitulo 3 de acuerdo a las características que posee la materia prima y a las propiedades que se deseen proporcionar a esta, los cuales nos permitirá realizar un correcto peletizado.

Los residuos de madera deberán pasar por los siguientes procesos antes de ser paletizados:

- Molido o Triturado (Molino de Martillos).
- Tamizado (Cribado de dos pasos).
- Secado (Cámara de Secado Forzado).

El proceso de peletizado propiamente dicho esta compuesto de:

- Alimentación (Acondicionamiento o Alimentación).
- Peletizado (Peletizadora de Matriz Plana).
- Enfriado (Enfriador).

4.2 DISEÑO DE LA TRITURADORA PARA RESIDUOS DE MADERA

Cada uno de los elementos que conforma el molino de martillos varía de acuerdo al material a moler y las consideraciones que el fabricante toma para este material, provocando de esta forma la variación del martillo de diseño a diseño en la forma, número, tamaño, etc. Es importante mencionar estos aspectos ya que el mismo molino puede ser diseñado de forma diferente, por lo tanto es necesario comprender el funcionamiento de todos los elementos que lo componen.

Las máquinas trituradoras tipo martillo, están compuestas de manera general por los siguientes elementos:

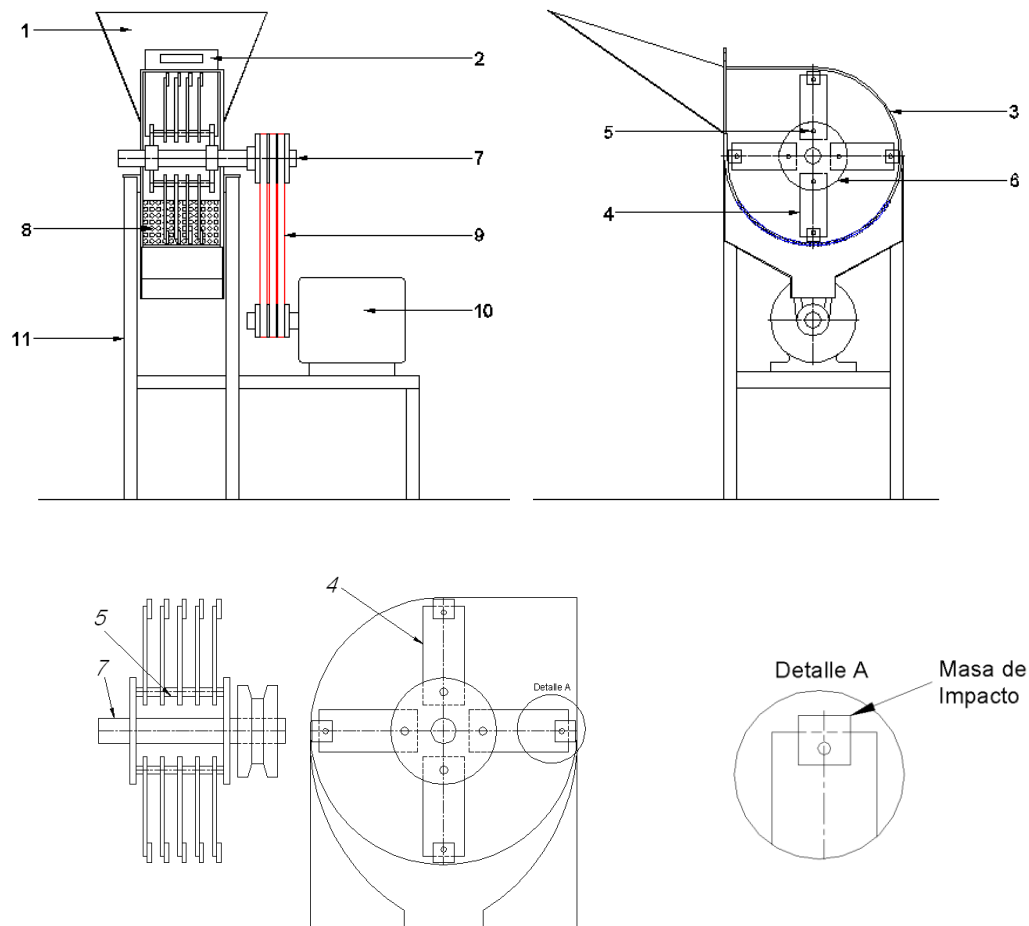


Figura 4.1 Esquema del molino de martillos
(Fuente: El Autor)

1	Tolva de alimentación	7	Eje principal de potencia
2	Compuerta de alimentación	8	Pantalla o criba
3	Cámara de Molido	9	Elementos de transmisión
4	Martillos	10	Motor eléctrico o a combustión
5	Ejes porta martillos	11	Estructura
6	Discos porta martillos		

Tabla 4.1 Partes Principales del Molino de Martillos
(Fuente: El Autor)

El diseño del molino empieza con la determinación de la capacidad de trituración por hora de residuos de madera; dentro de este punto los datos obtenidos del estudio estadístico realizado en el *capítulo 1* serán de gran importancia, estos valores representan el volumen total de residuos generados por las pequeñas y grandes industrias; por lo tanto se puede plantear el siguiente análisis.

Producción de Aserrín por Hora.

El volumen total de residuos de madera generados, es igual a la suma de los residuos del estrato 1 y estrato 2 analizados en el capítulo 1.

Volumen de Residuos de Aserrín Semanal:

$$V_{\text{residuos}} = 194 + 229 = 423 \frac{m^3}{\text{quincena}}$$

$$V_{\text{residuos}} = 211,5 \frac{m^3}{\text{semana}}$$

Para obtener la producción por hora, multiplicamos por la densidad promedio del aserrín.

Producción de Aserrín por hora:

$$211,5 \frac{m^3}{\text{semana}} \cdot \frac{1 \text{ semana}}{5 \text{ dias}} = 42,3 \frac{m^3}{\text{dia}} \cdot \frac{\text{dia}}{24 \text{ h}} = 1,7625 \frac{m^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_A = 5,825 \frac{m^3}{h} \cdot 250 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow \dot{m}_A = 1321,875 \frac{kg}{h}$$

El diseño del molino debe tomar ciertas consideraciones sobre la capacidad de producción debido a que puede ser variable a causa del aumento o disminución de los residuos de madera, el principal de los problemas es el consumo de energía innecesario cuando el volumen de residuos para el trabajo disminuye, otro problema es la acumulación de residuos provocando repercusiones en el campo de almacenado y producción.

La capacidad de producción que requiere el molino no es muy alta por lo tanto el problema que causa la disminución del volumen de trabajo no tendrá un efecto considerable en nuestro diseño, el problema principal será el garantizar que la eficiencia de la maquina sea el adecuado cuando exista una sobre producción; para que la maquina tenga la eficiencia necesaria se ha escogido un factor de sobre producción del 20% (Factor de producción. Fp. 15 – 20%)²⁸ el cual no causar repercusiones con el consumo de energía y tendrá un rango de sobre producción que facilitara el trabajo en esos casos.

Producción de Aserrín Corregido:

Después de haber tomando en cuenta estas consideraciones se escogió un Fp = 0.20, por lo tanto la capacidad de producción par diseño será:

$$5,2875 \frac{m^3}{h} \cdot 1,2 = 6,345 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{m}_{Ac} = 6,345 \frac{m^3}{h} \cdot 250 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_{Ac} = 1586,25 \frac{kg}{h}$$

²⁸ Fuente: Technical Research center of Finland 2002

4.2.1 CALCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR

La potencia necesaria para realizar el molido del material es calculada en base al caudal de alimentación (Q) y del grado de desmenuzamiento (i), esta expresada en la siguiente ecuación empírica:

$$N_m = (0,1 \div 0,15) \bullet i_d \bullet Q$$

Ecuación 4.1 Potencia Necesaria del Motor para el Molido.

(Fuente: Ing. Walter H. Duda.)

Donde:

N_m Potencia Necesaria del Motor para el Molido, en kW .

Q Caudal o flujo másico de entrada, en Ton/h .

i_d Grado de Desmenuzamiento, adimensional.

El grado de desmenuzamiento es la relación existente entre la mayor dimensión lineal del material antes de su subdivisión (D), a la mayor dimensión lineal del material desmenuzado (d), en consecuencia i esta representado por:

$$i_d = \frac{D}{d}$$

Ecuación 4.2 Grado de Desmenuzamiento.

(Fuente: Ing. Walter H. Duda, Manual Tecnológico.)

Las partículas que ingresan al proceso de molturación poseen diferentes dimensiones, siendo la de mayor tamaño de 52mm; para este cálculo también se ha considerado la posibilidad de ingresar pedazos de leña (madera sólida) los que se recomienda que su tamaño no sea superior a los 90mm.

El tamaño de la partícula una vez desmenuzada debe llegar a ser de 6mm, para su posterior peletizado.

Grado de Desmenuzamiento:

$$i_d = \frac{0,09m}{0,006m} \Rightarrow i = 15$$

Potencia Necesaria del Motor:

$$N = 0,15 \bullet 15 \bullet 1,6 \frac{Ton}{h} \Rightarrow N = 3,6kW = 4,89CV = 4,82HP$$

Se debe de seleccionar un motor de 5 HP, con esta potencia se garantiza que la inercia del sistema se puede mover y a la vez realizar la trituración de los residuos.

4.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISION DE POTENCIA

El molino de martillos diseñado, utilizara un sistema de transmisión de potencia por medio de bandas, por lo que hay considerar algunos aspectos como el tipo de bandas a utilizar, y los diámetros correspondientes de las poleas.

Potencia de Diseño del Motor.

El primer paso es escoger el factor de servicio adecuado según la tabla del *Anexo 4.1*, tomando en cuenta tipo de motor, tipo de máquina, régimen de trabajo y la colocación de la polea.

La potencia de diseño es igual al factor de servicio por la potencia del motor.

$$P_{diseño} = F_{serv} \bullet N_m$$

Ecuación 4.3 Potencia de Diseño.
(Fuente: Robert L. Norton, Diseño de Maquinas.)

F_{serv} Factor de servicio según el trabajo de la máquina.

N_m Potencia necesaria para el molido.

$$Potencia\ de\ diseño = 1,4 \bullet 5HP$$

$$Potencia\ de\ diseño = 7HP$$

A continuación, utilizando la grafica del Anexo 4.2, se selecciona la sección adecuada para la combinación de potencia de diseño y velocidad. 3V o 3VX para transmitir 7 HP a 1800rpm.

Luego, en una tabla del Anexo 4.3 se verifica diámetro mínimo de polea recomendado para el motor que se va a emplear, para un motor eléctrico estándar de 7 HP a 1800rpm se recomienda que el diámetro de la polea motriz sea mayor o igual a 3pulgadas.

Relación de Reducción de Velocidad.

La relación de reducción es igual a la velocidad de la polea motriz entre la velocidad de la polea conducida.

$$r_{red} = \frac{r.p.m.\ polea\ motriz}{r.p.m.\ polea\ conducida}$$

Ecuación 4.4 Relación de Reducción.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

La relación de reducción de r.p.m. para los molinos es de 25% - 35% de esta manera el eje principal aumentara el troqué de trabajo.²⁹

$$1800r.p.m. \bullet 0,7 = 1260r.p.m.$$

²⁹ Ing. Walter H. Duda, Manual Tecnológico.

Por lo tanto la relación de reducción de velocidad es:

$$r_{red} = \frac{1800}{1260} = 1,428$$

Relación de Transmisión de Poleas:

En las tablas de selección que proporciona el fabricante, correspondiente a la sección de banda determinada en el anexo 4.2 (banda 3V), se escoge una combinación de poleas que ofrezca la relación deseada y que tenga un diámetro aproximado recomendado.

$$\frac{D_p}{d_p}$$

Ecuación 4.5 Relación de Transmisión de Poleas.

(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

D_p Diámetro mayor, polea conducida.

d_p Diámetro menor, polea conductora.

Diámetro de Polea Conducida:

$$\frac{D_p}{d_p} = 1,428 \therefore d = 3 pu lg$$

$$D_p = 1,428 \bullet (3 pu lg) = 4,284 pu lg \approx 4,5 pu lg$$

Distancia entre Centros de Polea.

La distancia entre centros de poleas debe ser elegida de forma tal que permita colocar las poleas sin chocar (criterio a_{min}) y que la distancia no sea excesivamente grande ante las condiciones practicas (criterio a_{max}).

$$a_{\min} \leq a_o a_{\min} \leq a_{\max}$$

Ecuación 4.6 Distancia entre centros de las Poleas.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Donde:

Criterios de Distancia Máx. y Min:

$a_{\min} = 0.7(d + D)$	$a_{\max} = 2(d + D)$
Distancia mínima entre centros $a_{\min}$	Distancia máxima entre centros $a_{\max}$

Ecuación 4.7 Criterios de Distancia máxima y mínima entre centros de polea.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Por lo tanto:

Distancia Mímica entre Poleas:

$$a_{\min} = 0,7 \bullet (d + D) = 0.7 \bullet (76,2mm + 114,3mm) = 133,35mm$$

Distancia Máxima entre Poleas:

$$a_{\max} = 2 \bullet (d + D) = 02 \bullet (76,2mm + 114,3mm) = 381mm$$

Longitud de Banda de Transmisión.

$$Lo \approx 2 \bullet a_o + 1,57 \bullet (D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \bullet a_o}$$

Ecuación 4.8 Longitud de Banda de Transmisión.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Donde:

$a_o = 300mm$ Distancia previa entre centros de polea $a_{\min} < a_o < a_{\max}$.

$$Lo \approx 2 \bullet 300mm + 1,57 \bullet (114,3mm + 76,2mm) + \frac{(114,3mm - 76,2mm)^2}{4 \bullet 300mm}$$

$$Lo \approx 900,294mm$$

Según la tabla de longitudes normalizadas para bandas 3V (anexo 4.4), se escoge la longitud $Ln = 901,70mm$ (35,5pulg).

Angulo de Contacto de la Banda de Transmisión.

Con el objetivo de calcular el ángulo de contacto en una transmisión por correa abierta y de dos poleas, puede ser empleada la siguiente fórmula.

$$\alpha_1 = 2 \bullet \cos^{-1} \left[\frac{D - d}{2a_o} \right]$$

Ecuación 4.9 Angulo de contacto de transmisión.

(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$\alpha_1 = 2 \bullet \cos^{-1} \left[\frac{114,3mm - 76,2mm}{2 \bullet 300mm} \right] = 172,718 \approx 180^\circ$$

Número de Bandas.

El número de bandas necesarias esta en dependencia de la potencia útil admisible (N), potencia nominal transmitible por la correa (N1), coeficiente de ángulo de contacto (c_a), coeficiente por corrección de la longitud (c_L) y del factor de seguridad (fs), por lo tanto el número de bandas que expresado por la siguiente ecuación.

$$z \geq \frac{N \cdot fs}{N_1 \cdot c_\alpha \cdot c_L}$$

Ecuación 4.10 Número de Bandas para la Transmisión.

(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

En el anexo 4.5 se determinan los coeficientes de ángulo de contacto y correlación de longitud respectivamente, por lo tanto:

$$z \geq \frac{5,21kW \cdot 1,4}{5,21kW \cdot 0,985 \cdot 0,85}$$

$$z \geq 1,68 \approx 2 \text{ bandas}$$

4.2.3 DISEÑO DE LOS MARTILLOS DE MOLTURACION

Los ejes porta martillos también denominados ejes secundarios, contienen a los martillos de molido, cada martillo es distribuido de tal manera que no se golpeen entre ellos, esto se logra por medio de separadores.

Los martillos son móviles, este sistema es utilizado ya que le otorga la capacidad de transmitir toda la fuerza acumulada hacia el material a moler, además le permite golpear con cualquiera de sus partes, beneficiando al trabajo molturación.

Ambos extremos de los ejes se roscan para fijarlos al sistema de trituración, por medio de dos discos de separación que sujetan a los ejes secundarios (Fig.4.2).

La viruta un momento antes de la trituración hace contacto con los martillos, en ese preciso instante se procede a analizar qué ocurrirá con la viruta al ser triturada.

Esto permite calcular la fuerza de trituración, el tiempo de impacto de los martillos contra los residuos, la aceleración del sistema, la velocidad angular, etc.

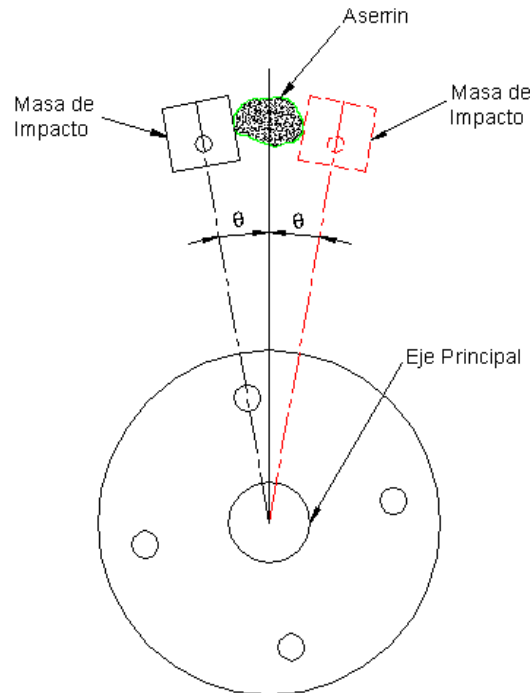


Figura 4.2 Esquema del impacto de trituración de la viruta.
(Fuente: El autor)

Tiempo de Impacto.

De acuerdo al gráfico mostrado podemos tomar el triángulo equilátero formado por el diámetro de la viruta (por motivos de diseño se asume que la viruta es circular) hasta el centro del eje principal.

Angulo de Rotación:

De esta manera se puede calcular el ángulo de rotación, mediante la función trigonométrica seno.

$$\text{Sen } \theta = \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Hipotenusa}}$$

Ecuación 4.11 Seno de un ángulo
(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

Para la determinación del cateto opuesto, se ha tomado la media de la granulometría de los residuos con mayo tamaño, por lo tanto esta es igual a 33mm.

$$\text{Sen } \theta = \frac{0,033m}{0,2m}$$

$$\theta = 9,35^\circ$$

Como se puede observar en la figura 4.2 el ángulo θ total es igual a 2θ , de esta manera nos queda un ángulo total derogación de:

$$\theta_T = 2\theta = 18,703^\circ$$

Como la rotación se la calcula en radianes, se realiza la siguiente conversión:

$$\begin{aligned} 1 \text{ rad} &\rightarrow 57,2958^\circ \\ x \text{ rad} &\rightarrow 18,703^\circ \rightarrow x = 0,326 \text{ radianes} \end{aligned}$$

Este valor es el desplazamiento angular en ese instante.

Velocidad Angular:

La velocidad angular ω está dada por la relación entre el desplazamiento angular versus el tiempo, lo que se muestra en la ecuación:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Ecuación 4.12 Velocidad angular.
(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

El valor de la velocidad angular ω es de 1260r.p.m. y para motivos de cálculo, transformamos las unidades a rad./seg.

$$1260 \frac{\text{revoluciones}}{\text{min uto}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ revolucion}} \times \frac{1 \text{ min uto}}{60 \text{ segundos}} = 132 \text{ rad / seg}$$

Tiempo de Impacto:

Ahora para encontrar el valor del tiempo de impacto, despejamos de la ecuación 4.3, el valor de t y reemplazo los valores del desplazamiento angular (θ) y de la velocidad angular (ω) en la expresión.

$$t = \frac{\theta}{\omega} = \frac{0,326 \text{ rad}}{132 \text{ rad / seg}} = 0,00247 \text{ seg.}$$

Fuerza de Impacto.

Aceleración Angular:

Aplicando las ecuaciones de cinemática rotacional se puede calcular la aceleración rotacional (α) La ecuación de cinemática a usar es la siguiente:

$$\omega^2 = \omega_o^2 + 2 \bullet \alpha \bullet (\theta - \theta_o)$$

Ecuación 4.13 Aceleración Cinemática.
(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

Despejando la aceleración angular α de la ecuación 4.4 reemplazamos los valores.

$$\alpha = \frac{\omega^2 - \omega_o^2}{2 \bullet (\theta - \theta_o)}$$

Considerando:

$$\omega_o = 0$$

$$\theta_o = 0$$

Por lo tanto:

$$\alpha = 26667,070 \frac{rad}{s^2}$$

Peso de Martillo:

En base a la teoría analizada en el capítulo 3, se eligen las medidas de los martillos.

- Medida de las placas 15 x 6,35 x 0,64 (cm.)
- Medias de la masa de impacto de 3 x 3,175 x 0,64 (cm.)

Masa de Martillo:

Conociendo que la densidad del acero es de $7,8 \frac{gr}{cm^3}$, procedemos a calcular la masa.

$$m_1 = \rho \cdot v = 7,8 \frac{gr}{cm^3} \cdot 15 \cdot 6,35 \cdot 0,64 cm^3 \cdot \frac{1kg}{1000 gr} = 0,475kg$$

$$m_2 = \rho \cdot v = 7,8 \frac{gr}{cm^3} \cdot 3 \cdot 3,175 \cdot 0,64 cm^3 \cdot \frac{1kg}{1000 gr} = 0,048kg$$

$$m_T = m_1 + m_2 = 0,475kg + 0,048kg = 0,523kg$$

Peso Total del martillo:

$$W_1 = m_1 \cdot g = 0,475kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 4,665 N$$

$$W_2 = m_2 \cdot g = 0,048kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 0,466 N$$

$$W_{MARTILLO} = W_1 + W_2 = 4,665N + 0,466N = 5,131N$$

Inercia del Martillo:

La fuerza de impacto nos permitirá calcular posteriormente el tiempo de desmenuzamiento del material en función del número de impactos:

$$I = \frac{1}{2} \bullet m \bullet r^2$$

Ecuación 4.14 Inercia de un cuerpo.

(Fuente: Dinámica de Hibbeler)

$$I_{\text{MARTILLO}} = \frac{1}{2} \bullet 0,523\text{kg} \bullet (0,20\text{m})^2$$

$$I_{\text{MARTILLO}} = 0,010\text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

Fuerza de Impacto en base a la inercia:

El principio de D’Lambert, establece qué: la sumatoria de los momentos es igual a la sumatoria de las inercias multiplicado por las aceleraciones angulares.

$$\sum = M_o = \sum l_o \bullet \alpha$$

$$\sum F \times d = \sum l_o \bullet \alpha$$

Ecuación 4.15 Principio de D’Lambert.

(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

Despejando la fuerza F y aplicando la inercia del martillo se tiene:

$$F_{\text{impacto}} = \frac{I_o \bullet \alpha}{d} = \frac{0,010\text{kg} \cdot \text{m}^2 \bullet 26667,070\text{rad} / \text{seg}^2}{0,20\text{m}} = 1,395\text{kN}$$

Esta es la fuerza que se produce cuando el martillo impacta con el aserrín en el instante del contacto.

Fuerza de Impacto Total:

La fuerza total, será la sumatoria de la carga viva y muerta (peso).

$$F = 1,395kN + \frac{5,131}{1000}kN$$

$$F_{\text{impacto}} = 1,4kN$$

Número de Martillos Necesarios.

El cálculo del número de martillos depende de distintas variables las cuales se determinan en base a expresiones empíricas, de esta manera el número de martillos esta expresado por:

$$e = \frac{N_c \cdot 8 \cdot 100000 \cdot \eta}{G \cdot R^2 \cdot n^3 \cdot f}$$

Ecuación 4.16 Numero total de martillos.

(Fuente: Ing. Walter H. Duda.)

Donde:

e Número de martillos.

N_c Potencia necesaria, en CV.

η Rendimiento mecánico de la transmisión.

G Peso del martillo, en kg.

R Diámetro del círculo que describen los martillos, en m.

n Vueltas por minuto del rotor.

f Factor dependiente de la velocidad de rotación de los martillos.

Velocidad Tangencial y Factor “f”:

El factor “f” dependiente de la velocidad de rotación de los martillos, es decir de la velocidad tangencial que esta dada por:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{60}$$

Ecuación 4.17 Velocidad Tangencial del Martillo

(Fuente: Ing. Walter H. Duda.)

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,4m \cdot 1260rpm}{60} \Rightarrow v = 52,78 \frac{m}{seg}$$

Con la velocidad tangencial del martillo podemos obtener el valor “f” del anexo 4.6:

Velocidad Tangencial m/seg.	Factor f
52,78	0,0093

Tabla 4.2 Factor de diseño f en función de la Vt.

(Fuente: Ing. Walter H. Duda.)

En el sistema de transmisión se determino anteriormente que las perdidas eran del 30% por lo tanto el rendimiento es de 70%.

Los martillos durante el trabajo de molido dibujaran una circunferencia de 0,4m de diámetro. De esta manera todas las variables que incurren en la expresión de número de martillos quedan especificadas por lo tanto:

Número de Martillos:

$$e = \frac{4,891CV \cdot 8 \cdot 100000 \cdot 0,7}{0,523kg \cdot (0,4m)^2 \cdot (1260rpm)^3 \cdot 0,00093}$$

$$e = 17,59 \approx 18 \text{ martillos}$$

Tiempo de Molturación.

El tiempo de molturación dependerá de la resistencia que tenga la madera a los distintos esfuerzos que se dan dentro de la cámara de molido.

Propiedades Mecánicas de la madera:

Cuando hablamos de las propiedades mecánicas de la madera, tenemos que hacer hincapié en su constitución anatómica. La madera es un material anisótropo formado por tubos huecos con una estructura ideal para resistir tensiones paralelas a la fibra. La madera tiene una muy elevada resistencia a la flexión. La relación resistencia/peso propio es 1.3 veces superior al acero y 10 veces superior al hormigón. La resistencia a la tracción y compresión paralelas a la fibra es buena en la madera. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

unidades en (kg/cm ²)	Flexion	Traccion		Compresion		Cortante	Modulo de Elasticidad
		Paralela	Perpend.	Paralela	Perpend.		
Madera	120	120	1,5	110	28	12	110000
Hormigon	80	6		80		6	200000
Acero	1700	1700		1700		1000	2100000

Tabla 4.3 Propiedades Mecánicas de algunos materiales.
(Fuente: <http://elprisma.com>)

Esfuerzo de Compresión:

De la ecuación 4.18 se puede determinar la fuerza necesaria para provocar el fallo del material por compresión de acuerdo a su área transversal, por lo tanto:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 4.18 Esfuerzo de Compresión.
(Fuente: S. P. Timoshenko, Mecánica de Materiales.)

Para el cálculo de la fuerza se utilizaran las dimensiones de las partículas que poseen el mayor tamaño y se la tomara como si fuera de forma esférica siendo su diámetro igual a 52mm.

σ Resistencia de Compresión del Aserrín, es $110 \frac{kg}{cm^2} = 10,79MPa$

F Fuerza necesaria para provocar el fallo por compresión, en N.

A Área del material a comprimir, en m^2 .

$$F_{compresion} = A \bullet \sigma$$

$$F_{compresion} = \pi \bullet \left(\frac{0,052m}{2} \right)^2 \bullet 10,79MPa$$

$$F_{compresion} = 22,89kN$$

Cantidad de Impactos para la rotura del material:

El número de impactos necesarios para la ruptura del material se calcula en base a la Fuerza de impacto calculada con la

$$\#impactos = \frac{F_{compresion}}{F_{impacto}}$$

Ecuación 4.19 Numero de impactos necesarios para el Fallo del material.
(Fuente: S. P. Timoshenko, Mecánica de Materiales.)

$$\#impactos = \frac{22,89kN}{1,4kN}$$

$$\#impactos = 16,35 \text{ impactos}$$

Este es el número de impactos que necesita una partícula se divida, suponiendo que se divide por la mitad cada vez que reciba la fuerza necesaria para dividirse vamos a tener:

Dimension de la Particula (m)	Fuerza de Fallo (kN)	Numero de Impactos para provocar el Fallo
0,052	22,89	16,35
0,026	5,72	4
0,013	1,43	1
0,0065	0,36	0,25
Total de Impactos		22

Tabla 4.4 Numero de Impactos Necesarios para Desmenuzar el Material.
(Fuente: El Autor)

Impactos por segundo de los Martillos:

Para el cálculo del número de impactos por segundo, tenemos como variables al número de revoluciones por segundo y el número de hileras de martillos colocadas; de esta forma vamos a tener:

$$1260 \text{ rpm} \bullet \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 21 \text{ rps}$$

$$21 \text{ rps} \bullet 4 \text{ ejes de martillos} = 84 \text{ golpes por segundo}$$

Tiempo de Trituración:

El tiempo de trituración esta en base del número de impactos necesarios para desmenuzar el material sobre el número de impactos que ha de recibir el material en una revolución.

Numero de Impactos x rev.	Tiempo de Trituracion (seg)
1	1,05
2	0,52
3	0,35
4	0,26

Tabla 4.5 Tiempos de Triturado.
(Fuente: El Autor)

4.2.4 DISEÑO DE LOS EJES SECUNDARIOS PORTA MARTILLOS

En este análisis se toma en cuenta que los ejes soportan, en primera instancia, la carga muerta del martillo, es decir su propio peso, además, se considera la fuerza centrífuga y el momento flector al que está sometido cuando está completamente instalado y, al realizar su movimiento rotacional al trabajar.

Los martillos están distribuidos en los ejes secundarios en grupos de 5 y en grupos de 4, esto con la finalidad de obtener los 18 martillos calculados anteriormente; la carga que soportan los ejes secundarios es distinta debido al punto mencionado anteriormente, por tal motivo se realizara el análisis del eje secundario para el caso de 5 martillos y de 4 martillos.

Fuerza Centrífuga

La fuerza centrífuga de cada martillo esta relacionada con el peso del martillo, su radio y su velocidad de giro; pero debido a que el martillo no tiene la forma de un disco de inercia, la fuerza centrífuga se la calcula con la siguiente formula empírica:

$$F_c = \frac{W \bullet r \bullet n^2}{35200}$$

Ecuación 4.20 Fuerza Centrifuga.
(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

$$F_c = \frac{5,131kg \bullet 0,2mts \bullet 1260rpm^2}{35200} \Rightarrow F_c = 46,284N$$

Diagrama de Cuerpo Libre

El diagrama simplificado de cuerpo libre del eje secundario con las fuerzas que intervienen en el diseño y sus reacciones, es el siguiente:

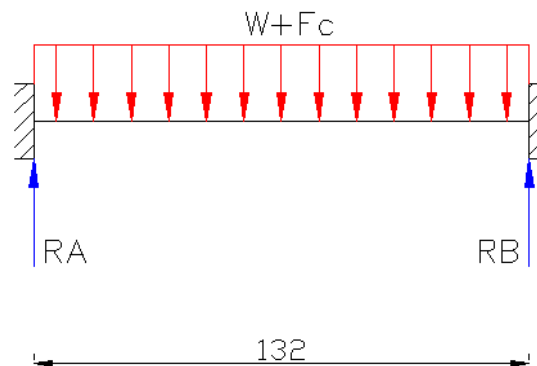


Figura 4.3 Diagrama de Cuerpo libre de un eje secundario.
(Fuente: El autor).

EJE DE 5 MARTILLOS

- Tomando en cuenta que el eje soporta a 5 martillos y que el mayor momento se concentrara en el centro, se tiene:

Sumatoria de Fuerzas

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum Fy = 0$$

$$RA + Fc - W + RB = 0$$

$$RA + (5 \bullet 46,284 N) + (5 \bullet 5,131 N) + RB = 0$$

Donde $RA = RB$, por lo tanto:

$$RA = RB = 128,53N$$

Esfuerzo Cortante Máximo

$$V_{\max} = \frac{q \bullet L}{2}$$

Ecuación 4.21 Esfuerzo Cortante Máximo.
(***Fuente:*** Mecánica de Materiales, S.P. Timoshenko)

Donde q es fuerza sobre metro aplicada sobre el eje secundario, por lo tanto:

$$q = \frac{W_{\text{martillos}} + Fc_{\text{martillos}}}{L}$$

$$q = \frac{5(5 \bullet 46,284 N) + (5 \bullet 5,131 N)}{0,132m} \Rightarrow q = 1947,533 \frac{N}{m}$$

De esta manera podemos remplazar los datos en la ecuación 4.8:

$$V_{\max} = \frac{1947,533 \frac{N}{m} \bullet 0,132m}{2}$$

$$V_{\max} = 128,537 N$$

Diagrama del Esfuerzo Cortante.

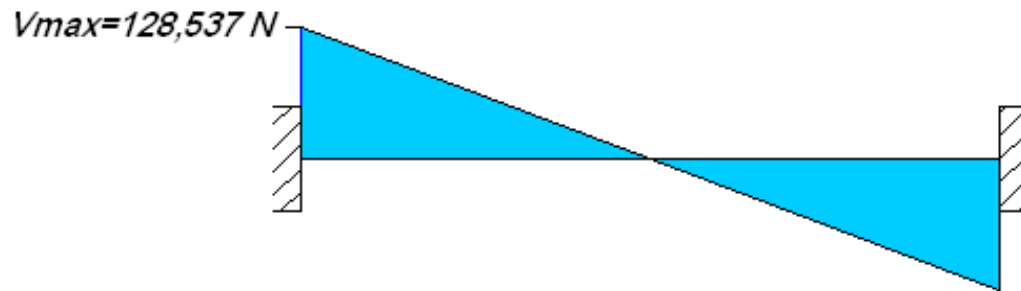


Figura 4.4 Diagrama del Esfuerzo Cortante del Eje Secundario.
(Fuente: El autor).

Momento Flector Máximo

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8}$$

Ecuación 4.22 Momento Flector Máximo.
(Fuente: Mecánica de Materiales, S.P. Timoshenko)

$$M_{\max} = \frac{1947,533 \frac{N}{m} \cdot 0,132^2 m}{8}$$

$$M_{\max} = 4,242 N - m$$

Diagrama del Momento Flector.

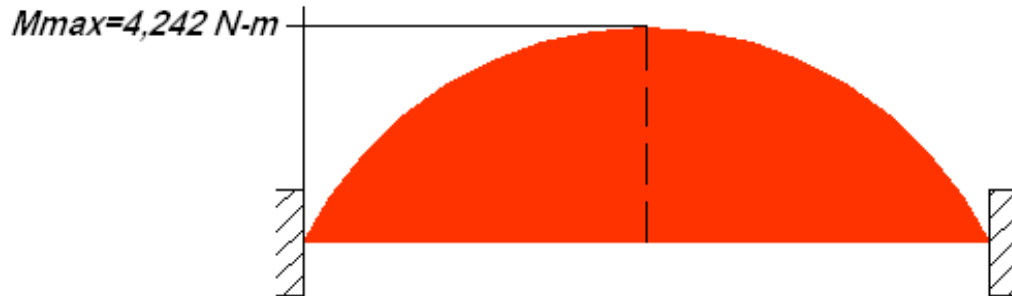


Figura 4.5 Diagrama del Momento Flector del Eje Secundario.
(Fuente: El autor).

Diámetro del Eje Secundario Porta Martillos

El diámetro del eje sometido a flexión se obtiene aplicando la ecuación 4.6.

$$d_{epm} = \left(\frac{32 \bullet n_s \bullet M}{S_y \bullet \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 4.23 Diámetro de un eje sometido a Flexión
(Fuente: MOTT, Robert L. Diseño de elementos de maquinas)

Para el cálculo del diámetro del eje secundario el factor de seguridad es de 3 debido a que el modelo matemático se aproxima al sistema real, por lo tanto el diámetro mínimo del eje es:

$$d_{epm} = \left(\frac{32 \bullet 3 \bullet 4,242 N - m}{207 E^6 MPa \bullet \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow d_{epm} = 0,009 mts.$$

Análisis de Esfuerzos.

En los ejes secundarios solamente se generan esfuerzos a la flexión y al corte. No se genera esfuerzo a la torsión ya que el análisis indica que los extremos del eje están fijos, por lo tanto:

Esfuerzo a la flexión:

$$\sigma = \frac{M \bullet c}{I}$$

Ecuación 4.24 Esfuerzo a la Flexión.
(Fuente: MOTT, Robert L. Diseño de elementos de maquinas)

$$\sigma = \frac{4,242N - m \bullet 0,0045m}{\pi \bullet \frac{(0,009m)^4}{32}} = 29,6MPa$$

Esfuerzo Cortante:

$$\tau = \frac{16 \bullet V}{3 \bullet A}$$

Ecuación 4.25 Esfuerzo Cortante.
(Fuente: MOTT, Robert L. Diseño de elementos de maquinas)

$$\tau = \frac{16 \bullet 128,537N}{3 \bullet \pi \bullet (0,009m)^2} = 10,8MPa$$

EJE DE 4 MARTILLOS

- De manera similar se diseña el eje secundario para soportar 4 martillos.

Sumatoria de Fuerzas

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$RA + F_c - W + RB = 0$$

$$RA + (4 \bullet 46,284N) - (4 \bullet 5,131N) + RB = 0$$

Donde $RA = RB$, por lo tanto:

$$RA = RB = 102,83N$$

Esfuerzo Cortante Máximo

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2} = \frac{1558,026 \frac{N}{m} \cdot 0,132m}{2}$$

$$V_{\max} = 102,83N$$

Diagrama de Esfuerzo Cortante Máximo.

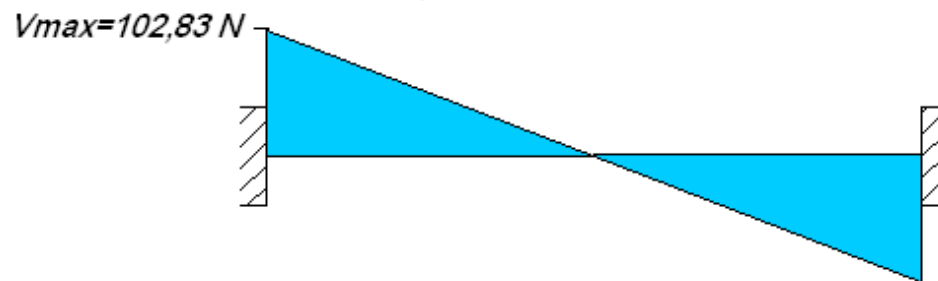


Figura 4.6 Diagrama del Esfuerzo Cortante del Eje Secundario.
(Fuente: El autor).

Momento Flector Máximo

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{1558,026 \frac{N}{m} \cdot (0,132m)^2}{8}$$

$$M_{\max} = 3,393N - m$$

Diagrama de Momento Flector Máximo.

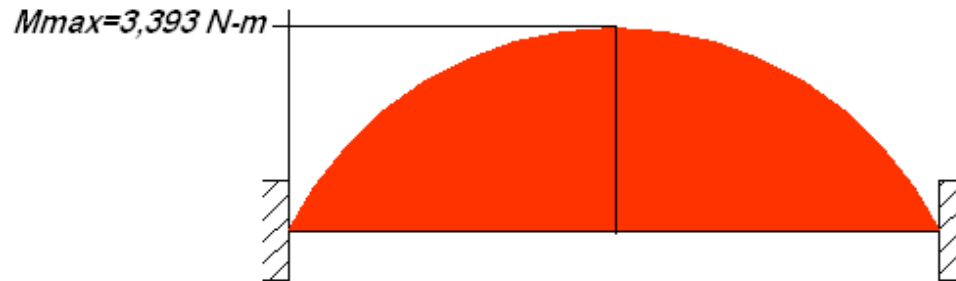


Figura 4.7 Diagrama del momento Cortante del Eje Secundario.
(Fuente: El autor).

Diámetro del Eje Secundario Porta Martillos

El diámetro del eje sometido a flexión se obtiene aplicando la ecuación 4.10, por lo tanto:

$$d = \left(\frac{32 \cdot 3 \cdot 3,393 \text{ N} \cdot \text{m}}{207 \text{ E}^6 \text{ MPa} \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow d = 0,008 \text{ mts.}$$

Análisis de esfuerzos.

En los ejes secundarios solamente se generan esfuerzos a la flexión y al corte. No se genera esfuerzo a la torsión ya que el análisis indica que los extremos del eje están fijos, por lo tanto:

Esfuerzo a la flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{3,393 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,004 \text{ m}}{\pi \cdot \frac{(0,008 \text{ m})^4}{32}} = 33,8 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Cortante:

$$\tau = \frac{16 \bullet V}{3 \bullet A} = \frac{16 \bullet 102,83N}{3 \bullet \pi \bullet (0,008m)^2} = 10,9MPa$$

ANÁLISIS DEL EJE SECUNDARIO EN PROGAMA DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis usando el programa de elementos finitos, es muy utilizado en diversos tipos de diseños, desde elementos de máquinas hasta estructuras complejas.

El programa trabaja con los parámetros que se le indica, tales como apoyos, materiales, longitudes, pesos, cargas, torques, forma de construcción, etc.

Los resultados del programa son un complemento del trabajo realizado en base a los métodos tradicionales de diseño, en donde se aplica los conocimientos adquiridos y aplicarlos de manera efectiva.

Verificación de Diseño del Eje Secundario

Para el análisis del eje secundario, se asignaron las fuerzas generadas, el tipo de material y las restricciones a las que está sometido el eje. En base a estos datos el programa calculo los momentos y esfuerzos concluyendo que el diámetro del eje calculado soportara sin ningún problema.

De esta manera se puede realizar una comparación entre los valores de los esfuerzos calculados y los resultados del programa; si estos valores son semejantes se dice que los cálculos son correctos.

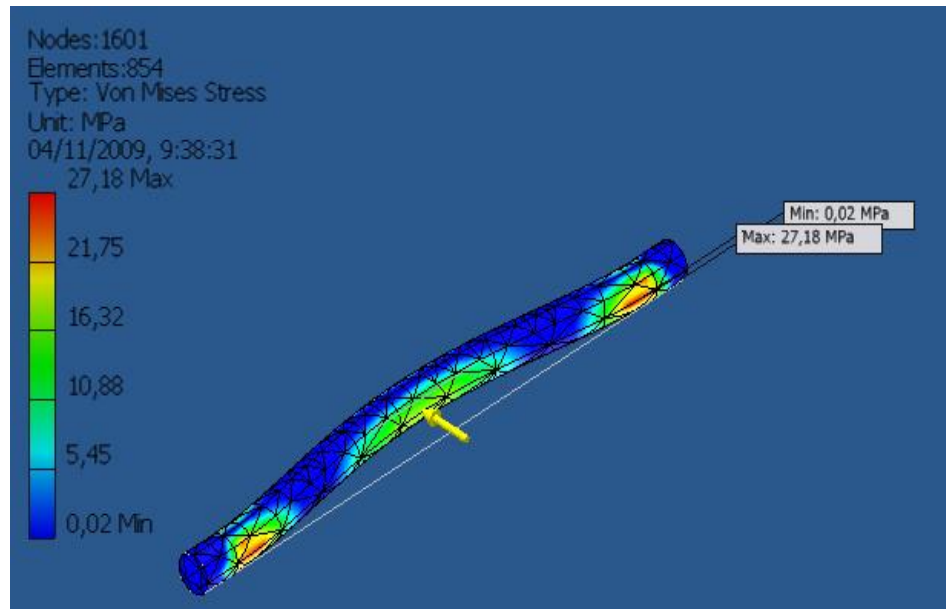


Figura 4.8 Análisis de esfuerzos del eje secundario.
(Fuente: El autor)

En la figura 4.4 se puede observar la deformación que producirá debido a las fuerzas de flexión el eje. (Información completa en el archivo digital)

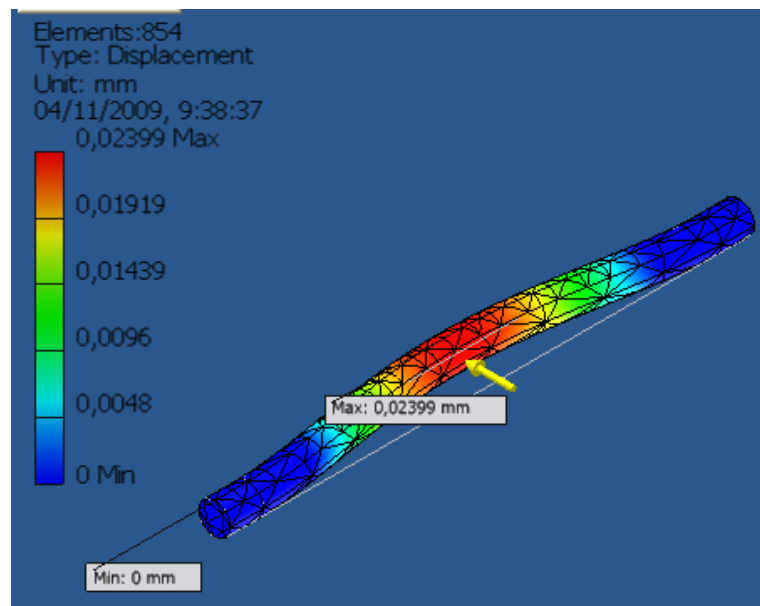


Figura 4.9 Análisis de deformación del eje secundario.
(Fuente: El autor)

Como se puede observar el valor del máximo esfuerzo que soportara el eje secundario obtenido en el programa de elementos finitos se aproxima de forma muy significativa al esfuerzo calculado anteriormente.

El programa al realizar el análisis de un elemento nos entrega un informe completo de las fuerzas que se crean y esfuerzos ha los que se encuentra sometido el elemento (informe adjunto en archivo digital), de acuerdo a estos datos y a los valores calculados se puede llegar a la conclusión de que el eje esta diseñado de forma correcta.

4.2.5 CALCULO DEL EJE PRINCIPAL

En el cálculo del eje principal se procede de manera similar al diseño de los ejes secundarios, teniendo en cuenta que este eje soporta cargas adicionales como el peso de los discos que sujetan al sistema y la carga dinámica que implica la trituración de los residuos, el momento torsor dado por el motor, etc.

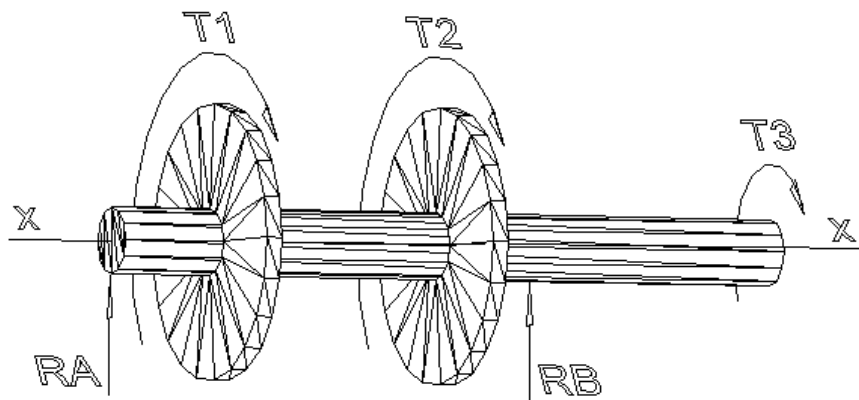


Figura 4.10 Fuerzas y momentos en el eje principal
(Fuente: El autor)

Diagrama de Cuerpo Libre

Como se observa en el diagrama de cuerpo libre (fig. 4.11), se toma en cuenta los torques que se generan en los discos y el torque que será aplicado al eje principal en función de las velocidades angulares.

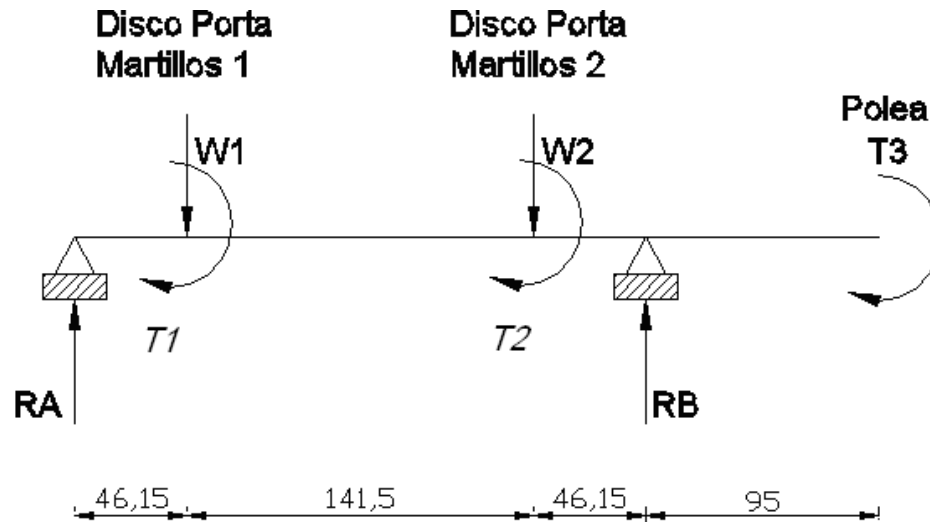


Figura 4.11 Diagrama de Cuerpo Libre del eje principal (distancias)
(Fuente: El Autor.)

Torque de Polea de Transmisión de Potencia

El torque 3 es a causa de la transmisión de movimiento por la polea, la cual también ocasiona fuerzas de flexión y de torsión, el torque 3 es calculado por la siguiente ecuación:

$$T3 = \frac{\text{Potencia} \bullet 9555}{n}$$

Figura 4.26 Fuerzas de Transmisión.
(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

Donde la potencia esta en KW y el numero de r.p.m. en el eje principal.

$$T3 = \frac{5,22kW \bullet 9555}{1260r.p.m}$$

$$T3 = 39,585N - m$$

Fuerza Producidas por la Transmisión:

$$F_n = \frac{T}{r} \quad F_s = F_n \bullet 1.5$$

Figura 4.27 Fuerzas de Transmisión.
(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

F_n = Fuerza de Torsión.

F_s = Fuerza de Flexión.

$$F_n = \frac{39,585 N - m}{\frac{4.5 \bullet 0,025 m}{2}} = 629,65 N \quad F_s = 629,65 N \bullet 1,5 = 1038,97 N$$

Sumatoria de Fuerzas y Momentos

Las fuerzas de reacción que se originan en los apoyos se determinan mediante las sumatorias de fuerzas.

$$\sum F_y = 0$$

$$RA - W1 - W2 + RB - F_s = 0$$

$$\sum M_B = 0$$

$$- RA \bullet 0.2338 + W1 \bullet 0.18765 + W2 \bullet 0.04615 - F_s \bullet 0.095 = 0$$

$$RA = -383,3 N$$

$$RB = 1344,54 N$$

Torque de Discos Porta Martillos.

Las fuerzas que genera torques, están relacionadas con el peso de los discos que contienen a los martillos, su radio y su velocidad de giro y la fuerza tangencial.

Fuerza Tangencial:

$$F_t = \frac{I \cdot \alpha}{r}$$

Figura 4.28 Fuerza Tangencial.
(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

Masa de los discos porta martillos:

$$\begin{aligned} d &= 0,16m \\ e &= 0,009m \\ m &= V \cdot \rho \\ m &= \pi \cdot (0,08m)^2 \cdot 0,009m \cdot 7800 \frac{kg}{m^3} \\ m &= 1,411kg \end{aligned}$$

Inercia de los discos porta martillos:

$$\begin{aligned} I &= \frac{m \cdot r^2}{2} \\ I &= \frac{1,41kg \cdot (0,08m)^2}{2} \\ I &= 0,0045kg - m^2 \end{aligned}$$

Donde la aceleración angular de los discos porta martillos será igual a la aceleración angular de los martillos calculada anteriormente.

Por lo tanto la fuerza tangencial del disco es:

$$F_t = \frac{0,0045 \frac{Kg}{m^2} \cdot 26667,07 \frac{rad}{seg^2}}{0,08m} = 1505,57N$$

Torque Discos Porta Martillos:

Una vez calculada la fuerza tangencial que ejerce cada disco porta martillos podemos calcular el torque que producen con la siguiente expresión:

$$T = Ft \bullet r_{disco}$$

Figura 4.29 Fuerza Tangencial.
(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

Donde:

$$T = T_1 = T_2$$

$$T = 1505,57N \bullet 0,08m$$

$$T = 120,44N - m$$

Torque Total Aplicado al Eje Principal

$$\sum M_x = 0$$

$$T_{max} = T1 + T2 + T3$$

$$T_{max} = 120,44N - m + 120,44N - m + 39,58N - m$$

$$T_{max} = 280,47N.m$$

Calculo del Momento Flector y Esfuerzo Cortante.

$$\sum Fy = 0$$

$$\sum Mx = 0$$

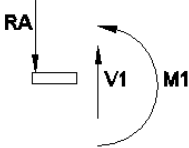
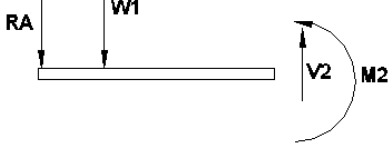
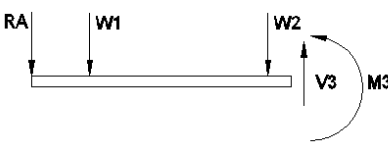
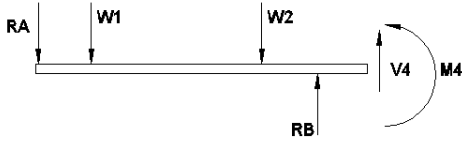
	$V_1 = RA = 383,3 \text{ N}$ $M_1 = -270.0953 \cdot x$ $0 \text{ mts} \leq x \leq 0.0465 \text{ mts}$
	$V_2 = RA + W1 = 344,43 \text{ N}$ $M_2 = -RA \cdot x - W1 \cdot (x - 0.0465)$ $0.0465 \text{ mts} \leq x \leq 0.18765 \text{ mts}$
	$V_3 = +RA + W1 + W2 = 305,56 \text{ N}$ $M_3 = -RA \cdot x - W1 \cdot (x - 0.0465) - W2 \cdot (x - 0.1877)$ $0.18765 \text{ mts} \leq x \leq 0.2338 \text{ mts}$
	$V_4 = +RA + W1 + W2 - RB = 883,51 \text{ N}$ $M_4 = -RA \cdot x - W1 \cdot (x - 0.0465) - W2 \cdot (x - 0.1877) + RB \cdot (x - 0.2338)$ $0.2338 \text{ mts} \leq x \leq 0.3888 \text{ mts}$

Tabla 4.6 Ecuaciones de Cortes y Momentos.

(Fuente: El Autor)

Esfuerzo Cortante		Momento Flector	
V1 =	- 383,3 N	M1 =	- 17,68 N-m
V2 =	- 344,43 N	M2 =	- 77,42 N-m
V3 =	- 305,56 N	M3 =	- 98,70 N-m
V4 =	1038,97N	M4 =	98,70 N-m

Tabla 4.7 Resultados de los Esfuerzos Cortante y Flector.

(Fuente: El Autor)

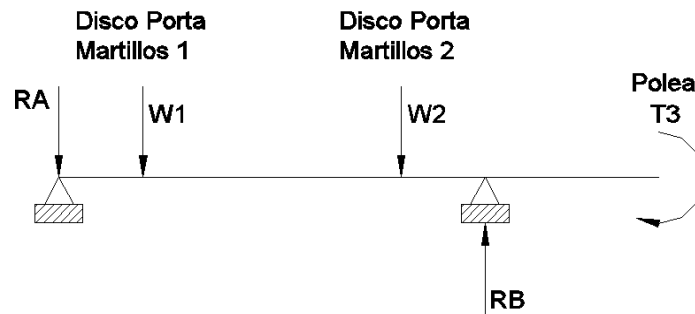
Diagrama de Cuerpo Libre

Figura 4.12 Diagrama de Cuerpo Libre del eje principal
(Fuente: El Autor.)

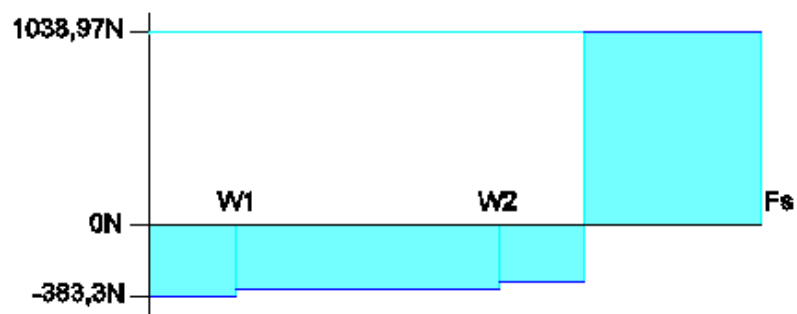
Diagrama de Esfuerzo Cortante Máximo.

Figura 4.13 Diagrama de Momentos Flectores.
(Fuente: El Autor)

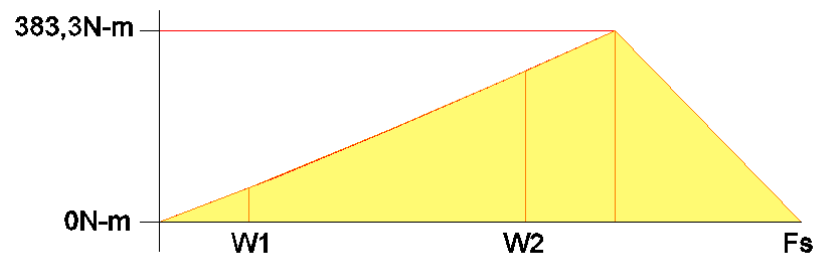
Diagrama de Momento Flector Máximo.

Figura 4.14 Diagramas de Esfuerzos Cortantes.
(Fuente: El Autor)

Diámetro del Eje Principal

El diámetro del eje sometido a flexión y torsión se puede calcular mediante la ecuación:

$$d_p = \left[\frac{32 \bullet n}{\pi \bullet S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

Ecuación 4.30 Diámetro de un eje sometido a Flexión y Torsión

(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

$$d_p = \left[\frac{32 \bullet 3}{\pi \bullet 207E^6} (98,7^2 + 280,47^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d_p = 0,035m \approx 1,5 \text{ pulg}$$

Análisis de Esfuerzos

Se procede al cálculo de los esfuerzos de flexión y de torsión.

Esfuerzo Flexionante:

$$\sigma = \frac{M \bullet c}{I} = \frac{98,7N - m \bullet 0,01905m}{\frac{\pi \bullet (0,0381m)^4}{32}} = 9,09MPa$$

Esfuerzo Cortante:

$$\tau_{Flexion} = \frac{4 \bullet V}{3 \bullet A} = \frac{16 \bullet V}{3 \pi \bullet d^2} = \frac{16 \bullet 1038,97N}{3 \bullet \pi \bullet (0,0381m)^2} = 1,21MPa$$

Esfuerzo Torsor:

$$\tau_{Torsion} = \frac{T \cdot r}{J} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 280,47 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi \cdot (0,0381 \text{ m})^3} = 25,82 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max} = \tau_{Flexion} + \tau_{Torsion} = 1,21 + 25,82 = 27,04 \text{ MPa}$$

ANÁLISIS DEL EJE PRINCIPAL EN PROGAMA DE ELEMENTOS FINITOS

A partir de estos cálculos se empieza a desarrollar el análisis del programa computacional de Elementos Finitos debido a que anteriormente se colocó un pre cálculo de acuerdo a los métodos tradicionales de diseño.

El uso del programa es para refinar el diseño del molino, y esto nos permite conocer como se va a comportar la estructura.

Verificación de Diseño del Eje Principal

En el mercado el eje con el diámetro más aproximado para el eje principal que se calculo, es de $1\frac{1}{2}$ pulgada.

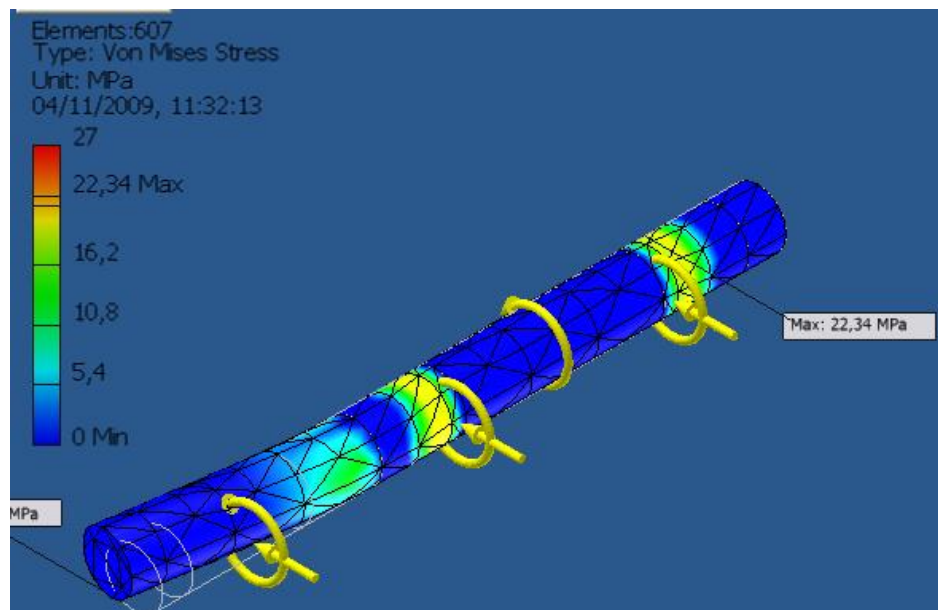


Figura 4.15 Análisis de esfuerzos del eje principal.
(Fuente: El autor)

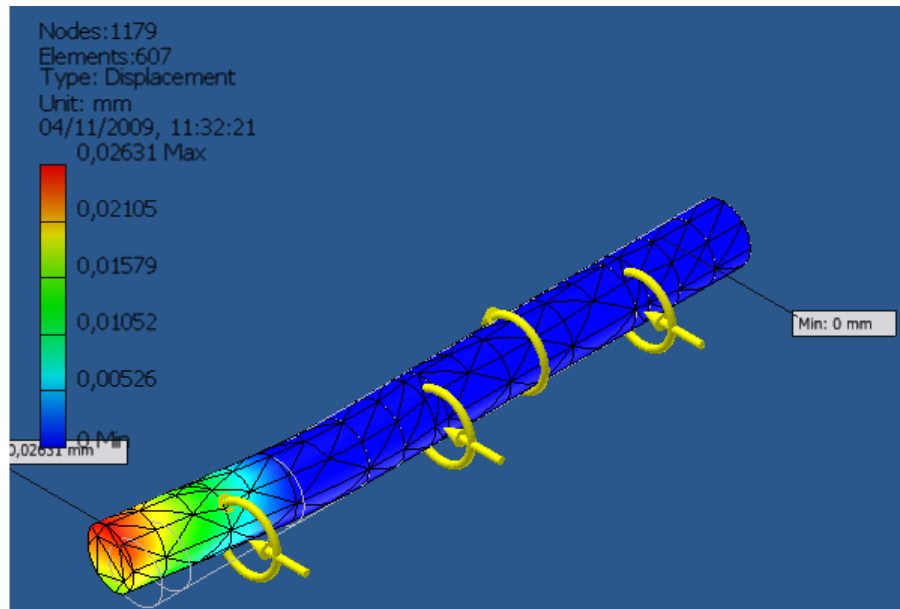


Figura 4.16 Análisis de deformación del eje principal.
 (Fuente: El autor)

Al igual que el análisis del eje secundario el informe entregado por el programa de elementos finitos contiene valores muy semejantes a los valores obtenidos en los cálculos realizados anteriormente, por tal motivo se llega a la conclusión de que el principal esta dimensionado correctamente.

ANÁLISIS DEL EN CONJUNTO DEL MOLINO DE MARTILLOS EN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

Una vez realizado el análisis de cada elemento individualmente, procedemos a analizar el conjunto completo del mecanismo de impacto, con la finalidad de determinar de observar la deflexión máxima que poseen los martillos durante el proceso de molido.

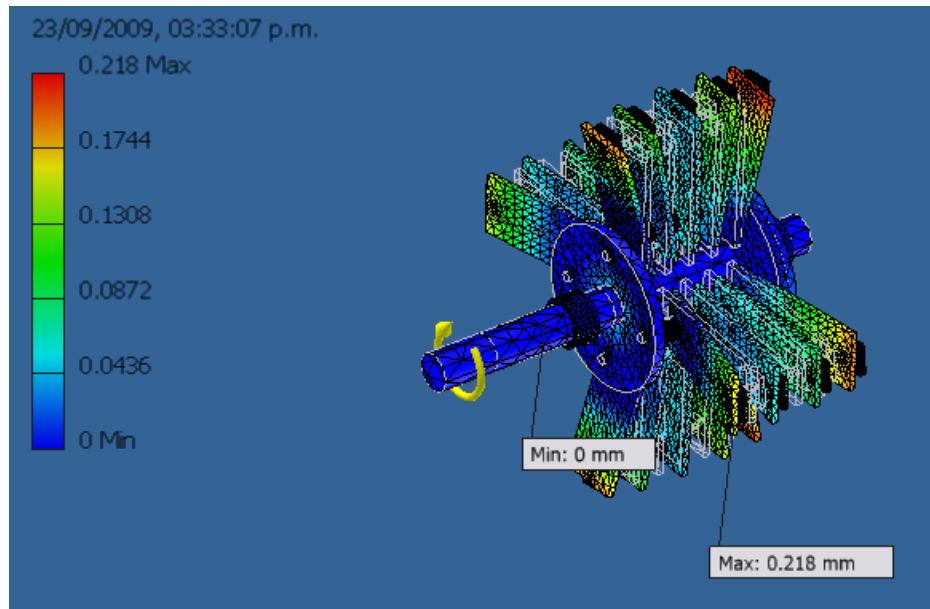


Figura 4.17 Análisis del Mecanismo de Molido.
(Fuente: El autor)

Los martillos como se puede observar en la figura 4.17 poseen un deflexión no significativa al girar a 1260r.p.m, por lo tanto se dice que el mecanismo no tendrá problemas durante el proceso de molturación,

4.2.6 DISEÑO Y SELECCIÓN DE CUÑAS Y CHAVETEROS.

La forma de fijación de ejes con los elementos que ayudan a transmitir potencia, son las cuñas. Estos elementos van en la interface entre el eje y la maza (poleas, engranes, piñones, etc.), siendo su objetivo de transmitir torque.

Estas cuñas son diseñadas de acuerdo a los esfuerzos que van a soportar, y poseen dos formas de sección transversal, cuadrada y rectangular. El ancho se lo denomina con la letra “b” y el alto con la letra “h”. (Norma UNE 17102).

De acuerdo a la tabla del Anexo 4.7 se selecciona un tipo de cuña para el eje de la máquina. Como el eje de la máquina es de 1,5plg, se escoge la chaveta con $b = 12\text{mm}$ y $h = 8\text{mm}$ de acero.

Lo que resta por dimensionar es la longitud de la chaveta necesaria para que no se produzca el fallo. En la siguiente figura se esquematiza la unión con una chaveta de dimensiones $b \times h$, y longitud l

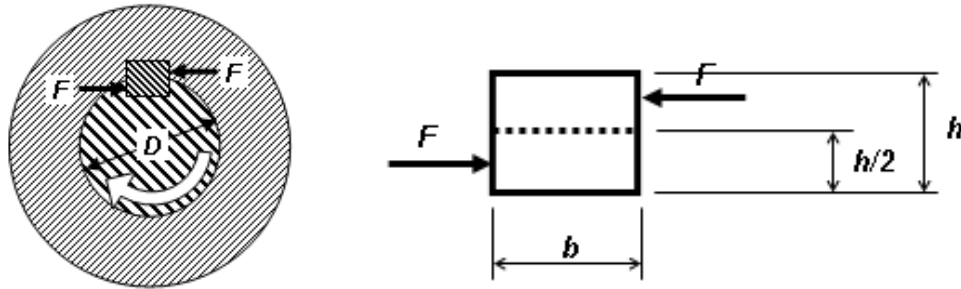


Figura 4.18 Esfuerzos en la chaveta
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Fallo por Cizallamiento.

La fuerza de corte F sobre la chaveta, debida al momento M que se transmite será:

$$F_{ch} = \frac{2 \cdot M}{D}$$

Figura 4.31 Esfuerzos en la chaveta
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$F_{ch} = \frac{2 \cdot 280,47 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,0381 \text{ m}} = 14,72 \text{ kN}$$

Tensión de Corte:

$$\tau = \frac{2 \cdot M}{D \cdot A}$$

Figura 4.32 Tensión Cortante.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$\tau = \frac{2 \bullet 280,47 N - m}{0,0381m \bullet (0,008m \bullet 0,012m)} = 153,36 MPa$$

Longitud Necesaria de Chaveta para Cizallamiento.

Si se utiliza el criterio de Tresca para su dimensionado, la longitud l necesaria para que no se produzca el fallo, con un coeficiente de seguridad n_s será:

$$l \geq \frac{4 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet b \bullet S_y}$$

Ecuación 4.33 Longitud necesaria para que no se produzca fallo
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$l \geq \frac{4 \bullet 280,47 N - m \bullet 3}{0,0381m \bullet 0,012m \bullet 207 E^6 MPa} = 0,0355m$$

Fallo por Aplastamiento

Se considera una tensión admisible de aplastamiento 2 veces la tensión normal máxima admisible del material, con lo que la longitud necesaria para que no se produzca el fallo, con un coeficiente de seguridad n_s es:

Longitud Necesaria de Chaveta para Aplastamiento

$$l \geq \frac{2 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet h \bullet S_y}$$

Ecuación 4.34 Longitud necesaria para fallo por aplastamiento.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$l \geq \frac{2 \bullet 280,47 N - m \bullet 3}{0,0381m \bullet 0,008m \bullet 207 E^6 MPa} = 0,0266m$$

Tensión de Compresión

La tensión de compresión sobre las caras laterales de la chaveta será:

$$\sigma_{apl} = \frac{F}{A_{apl}} = \frac{2 \bullet M}{D \bullet \frac{h}{2} \bullet l}$$

Ecuación 4.35 Tensión de Compresión.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

$$\sigma_{apl} = \frac{2 \bullet 280,47 N - m}{0,0381m \bullet \frac{0,008m}{2} \bullet 0,0266m} = 138MPa$$

Finalmente, se escogerá la longitud más desfavorable obtenida de las dos comprobaciones anteriores. Hay que considerar la situación de espacio de la polea para determinar la longitud de las cuñas, ya que no se puede colocar cuñas demasiado grandes. Por fabricación las poleas tiene una longitud transversal de 3pulgadas, por lo tanto la cuña a utilizar debe ser menor a esta distancia, porque que se decide utilizar una cuña de 2 pulgadas de longitud.

Por lo tanto hasta ahora la cuña seleccionada para el eje principal de la máquina es una cuña rectangular de las siguientes dimensiones: 8 x 12 x 50,8(mm.).

4.2.7 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

La determinación del tamaño necesario del rodamiento (unidad) se basa en las cargas esperadas y en la vida nominal deseada.

El rodamiento se escoge de acuerdo al diámetro del eje y a la carga dinámica equivalente, se escoge el rodamiento 61907 (marca SKF) con soporte de pie (Anexo 4.8), que posee las siguientes especificaciones:

Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera, no están obturados							Tolerancias, ver también el texto Juego radial interno, ver también el texto Ajustes recomendados Tolerancias del eje y del alojamiento	
Dimensiones principales			Capacidades de carga dinámica estática		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades Velocidad de referencia Velocidad límite	Masa	Designación
d	D	B	C	C_0				
mm			kN		kN	rpm	kg	-
35	55	10	9,56	6,8	0,29	26000	16000	0,080
								61907

Tabla 4.8 Tabla de las Características del Rodamiento.
(Fuente: <http://SKF.com>)

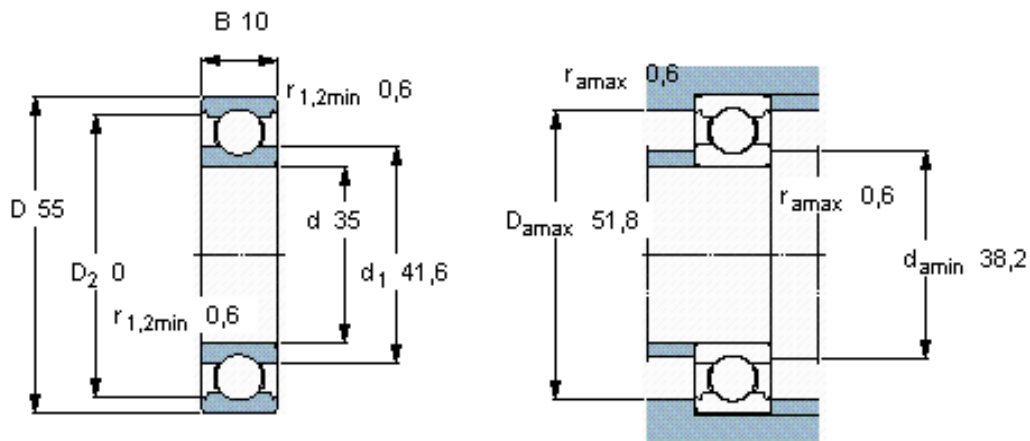


Figura 4.19 Dimensiones del Rodamiento SKF 61907.
(Fuente: SKF)

Vida nominal del Rodamiento.

El método normal es aquel utilizado por la industria, es decir, la vida nominal se calcula según la normativa ISO 281:1990, siendo la ecuación para los rodamientos de bolas.

Vida Nominal en Número de R.P.M.:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Ecuación 4.36 Vida nominal del rodamiento (millones de revoluciones).
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Donde:

L = Vida nominal, millones de revoluciones

C = Capacidad de carga dinámica, KN

P = Carga dinámica equivalente del rodamiento

p = exponente de la ecuación de la vida (3 para rodamientos de bolas).

$$L = \left(\frac{9,56kN}{1,344kN} \right)^3 = 3,59E^2 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida Nominal en Número de Horas:

Al ser la velocidad constante, se puede obtener la vida nominal expresada en horas de funcionamiento utilizando la formula:

$$L_h = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Ecuación 4.37 Vida nominal del rodamiento (horas de funcionamiento)

(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Donde

L_h = vida nominal, horas de funcionamiento

n = Velocidad de giro, r.p.m.

$$L_h = \frac{1000000}{60 \bullet 1260rpm} \left(\frac{55,3kN}{1,344kN} \right)^3 = 4,74E^4 \text{ horas de funcionamiento}$$

4.2.8 DISEÑO DE MALLA DE CRIBADO

La malla de cribado de acuerdo a consideraciones de diseño mencionadas en el capítulo 3, debe cubrir un ángulo de 60° desde el centro en ambos sentidos es decir un ángulo

total de 120° . La superficie de la malla posee agujeros de diámetro de 10mm, debido a que la materia prima no debe superar esta dimensión para su posterior peletizado.

La malla de cribado según las recomendaciones de diseño vistas en el *capítulo 3* debe tener una separación de 3mm con respecto a los martillos, por lo tanto el radio de rolado de la malla debe ser de 230mm.

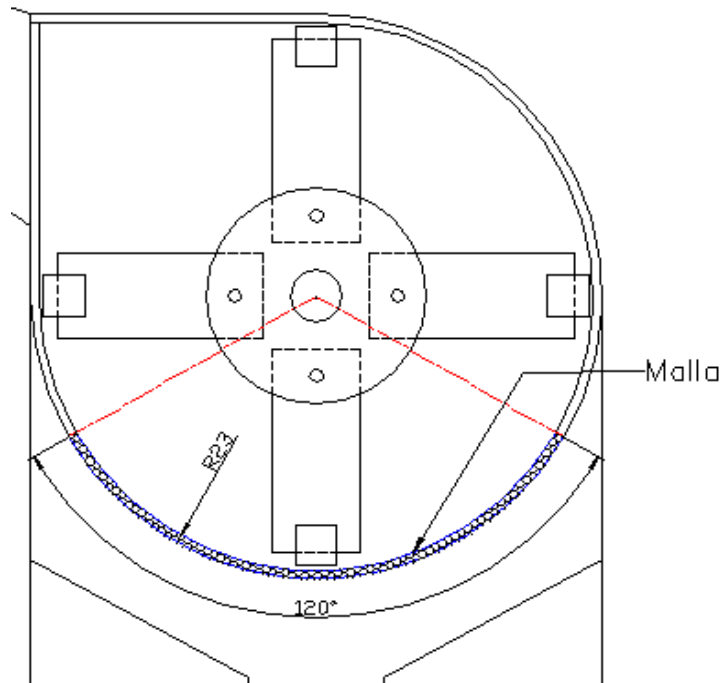


Figura 4.20 Ubicación de Malla de cribado.
(Fuente: El Autor)

De acuerdo a al ángulo y al radio de rolado de la malla se puede obtener una longitud de la malla de cribado de 445mm.

Para el cálculo de el espesor de la malla se la ha tomado como una superficie horizontal apoyada en sus extremos que soporta una carga uniforme equivalente al peso de la materia prima que se acumula sobre la malla durante el proceso de molturación.

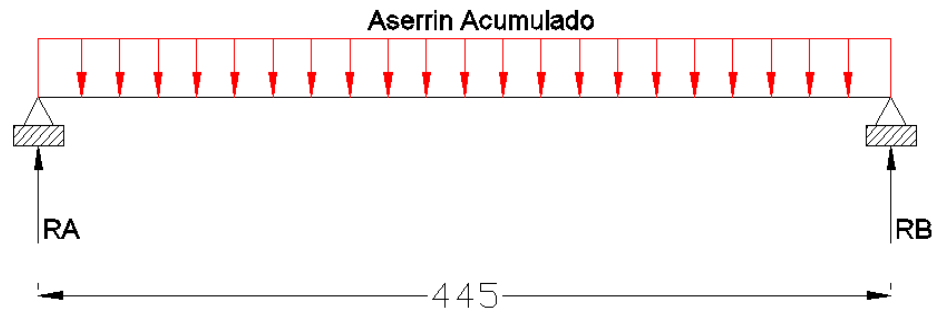
Diagrama de Cuerpo Libre.

Figura 4.21 Diagrama de Cuerpo Libre de la Malla de Cribado.
(Fuente: El Autor)

Sumatoria de Fuerzas:

$$\sum F_y = 0$$

$$RA - W + RB = 0$$

Peso del Aserrín sobre la criba:

El aserrín sobre la criba va a ocupar una superficie equivalente a la superficie de la criba y un espesor igual a la separación entre la criba y los martillos de trituración, por lo tanto:

Masa del Aserrín:

$$m_{aserrin} = V \cdot \rho_{aserrin}$$

$$m_{aserrin} = 0,445m \cdot 0,018m \cdot 0,003m \cdot 250 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{aserrin} = 0,006kg$$

Peso del Aserrín:

$$W_{aserrin} = 9,81 \frac{N}{kg} \bullet m_{aserrin}$$

$$W_{aserrin} = 9,81 \frac{N}{kg} \bullet 0,006kg$$

$$W_{aserrin} = 0,0589N$$

Por lo tanto las reacciones en los extremos son igual a:

$$\sum M_B = 0$$

$$RA = RB = 0,0294N$$

Momento Flector Máximo

$$M_{max} = \frac{q \bullet L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{0,1324 \frac{N}{m} \bullet 0,445^2 m}{8}$$

$$M_{max} = 0,0033N - m$$

Esfuerzo Permisible

Las especificaciones del AISC limita el esfuerzo permisible en placas de apoyo a:

$$Fb = 0,75 \bullet fy$$

Ecuación 4.38 Esfuerzo Permisble.
(Fuente: Norton Robert, Diseño de Maquinas)

Para el cálculo del esfuerzo permisible se parte de que el Esfuerzo elástico de cadencia del acero es de 250MPa, por lo tanto:

$$Fb = 0,75 \bullet 250MPa$$

$$Fb = 188MPa$$

Modulo de Sección

$$S = \frac{M}{\sigma_{adm}}$$

Ecuación 4.39 Modulo de Sección
(Fuente: S. P. Timoshenko, Mecanica de Materiales.)

$$S = \frac{0,0294N - m}{188MPa}$$

$$S = 2,19E^{-11}m^3$$

Espesor de Criba

$$h = \sqrt[3]{\frac{6 \bullet S}{b}}$$

Ecuación 4.40 Espesor de Sección
(Fuente: S. P. Timoshenko, Mecanica de Materiales.)

$$h = \sqrt[3]{\frac{6 \bullet 2,19E^{-11}m^3}{0,018m}}$$

$$h = 0,002m$$

El espesor de la criba calculado es de 2mm el cual puede ocasionar problemas de pandeo por lo que se recomienda utilizar una criba de espesor de 3mm.

Número de agujeros de la Criba.

El número de agujeros va a depender de varios factores, como son el espesor de la criba calculado, la velocidad de salida del material, el área de salida y el flujo volumétrico del aserrín a moler.

Flujo volumétrico de Entrada:

Se considera como el flujo volumétrico de entrada al volumen producido por las fábricas por hora, de esta manera tenemos:

$$\dot{V}_{entra} = 6,345 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600seg} = 0,00176 \frac{m^3}{seg}$$

Flujo volumétrico de Salida:

Durante el proceso de molturación no existe pérdida de masa por lo tanto:

$$\dot{V}_{entra} = \dot{V}_{sale}$$

Para obtener partículas con un tamaño equivalente a 6mm, hemos decidido perforar agujeros de 10mm en la criba, con este diámetro se obtiene la granulometría necesaria para el posterior peletizado.

Si se considera como caída libre la salida de las partículas, sin tomar en cuenta otras variables, de esta manera nos podemos plantear que:

$$v_{particula} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Ecuación 4.41 Velocidad en Caída Libre.

(Fuente: Flujo y atascos en un Medio Granular en la Descarga de Silos, Univ. De Navarra, España 2005)

La velocidad que toma la partícula en la distancia de 6mm es:

$$v_{particula} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{m}{seg^2} \cdot 2mm}$$

$$v_{particula} = 0,198 \frac{m}{seg}$$

Área de los Agujeros de Salida:

$$A_{agujero} = \pi \cdot r^2$$

$$A_{agujero} = \pi \cdot (0,005m)^2$$

$$A_{agujero} = 7,85E^{-5} m^2$$

Volumen de Salida por segundo:

$$\dot{V}_{salida} = v_{particula} \cdot A_{agujero} \cdot \#agujeros$$

Ecuación 4.42 Flujo Volumétrico.

(Fuente: Flujo y atascos en un Medio Granular en la Descarga de Silos, Univ. De Navarra, España 2005)

$$\#agujeros = \frac{0,00176 \frac{m^3}{seg}}{0,198 \frac{m}{seg} \cdot 7,85E^{-5} m^2}$$

$$\#agujeros = 113,3 \text{ agujeros} \approx 114 \text{ agujeros}$$

La malla de cribado llevara un total de 114 agujeros mínimo, de 10mm de diámetro, la malla con estas características cumple con el flujo volumétrico necesario para que el molino cumpla con $\dot{V}_{entra} = \dot{V}_{sale}$, hay que tener en cuenta factores muy importante como

son el tiempo de molido, el amontonamiento del material sobre la malla, que afectarán a la salida del material en un flujo constante.

Por las razones mencionadas hemos decidido que la mejor opción es que la malla este completamente perforado con agujeros alternados sobre toda la superficie de la misma, esto permitirá un mejor flujo de salida del material y menos amontonamiento.

De acuerdo a las sugerencias realizadas la malla de criba llevara

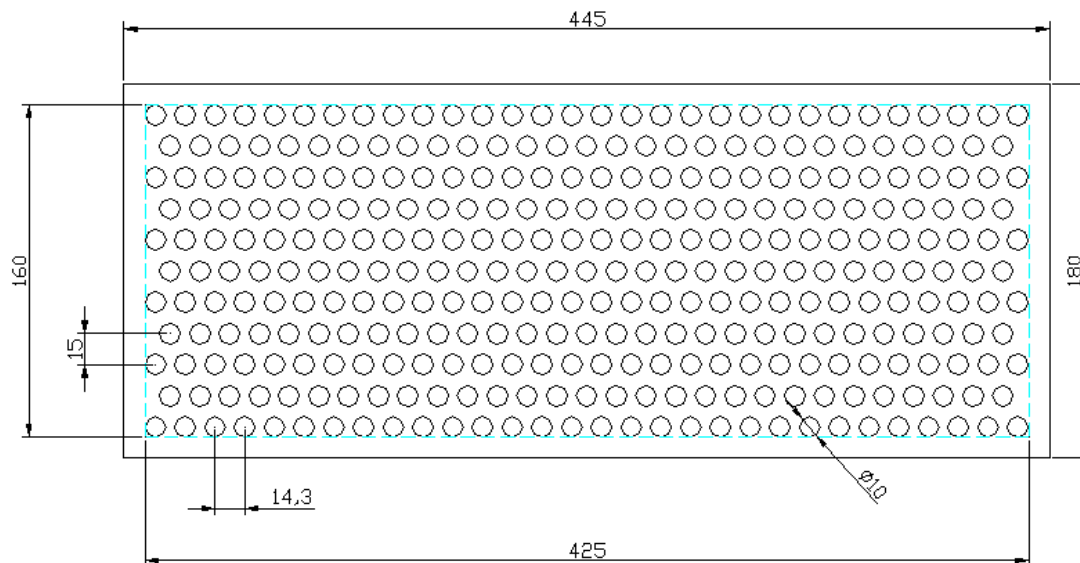


Figura 4.22 Malla de Cribado.

(Fuente: El Autor)

4.2.9 DISEÑO DE LA TOLVA DE ALIMENTACION

Para la alimentación del aserrín se diseña un sistema de doble tolva, donde la prima tiene como función principal la acumulación del aserrín y control del flujo volumétrico que ingresara al proceso de molido, este control se lo realiza mediante una compuerta graduable colocada en un costado de la parte inferior de la tolva de acumulación; la entrada del aserrín se la realiza manual mente por la parte superior de la tolva, la cual esta en función de las dimensiones del agujero de salida del material.

La segunda tolva tiene la función de llevar el material hacia adentro de la cámara de molturación, pero esta diseñada principalmente para el caso de que el operario desee

ingresar leña (madera sólida), la leña no puede ser ingresada por la tolva de acumulación por lo tanto se la ingresa manualmente por medio de la tolva secundaria.

Este sistema permitirá que el operador no tenga problemas por las dimensiones del material que llegue para el proceso de trituración, como se puede observar en el siguiente grafico:

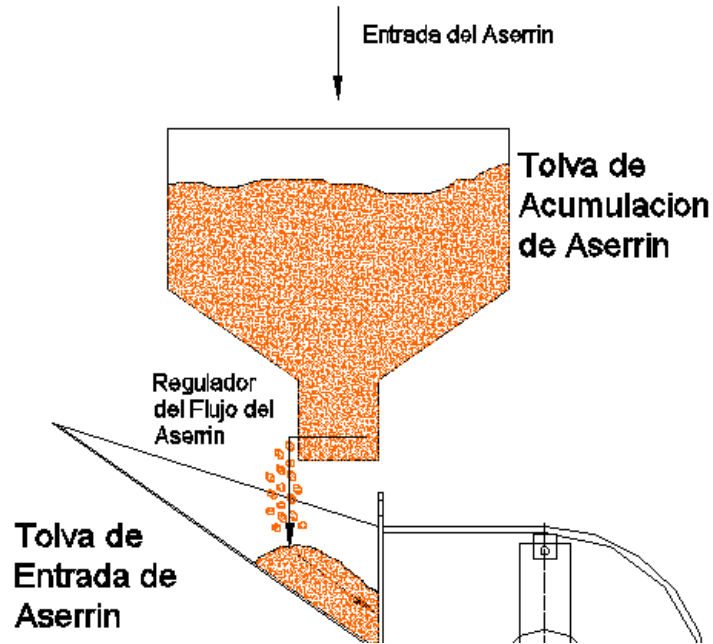


Figura 4.23 Esquema del Sistema de Tolva.
(Fuente: El Autor)

Tolva de Acumulación de Aserrín:

El molino debe triturar un caudal de $6,345 \frac{m^3}{h}$ por lo tanto la tolva debe alimentar a la cámara de molido:

$$Q = 6,345 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600seg} \Rightarrow Q = 0,00176 \frac{m^3}{seg}$$

El principal objetivo para el diseño de la tolva es calcular la velocidad a la salida del orificio, para ello se supone que las partículas al interior del silo tienen una velocidad

nula, por lo tanto las partículas que salen por el orificio de alimentación de la tolva ganan una velocidad en caída libre partiendo del reposo.

Utilizando la ecuación 4.41, que relaciona la altura y la velocidad desde la que comienza la caída libre respecto a la parte superior del orificio, se obtiene:

$$v = \sqrt{H \cdot 2 \cdot g}$$

Donde la altura de caída del material es: 10cm.

$$v = \sqrt{0,1m \cdot 2 \cdot 9,81 \frac{m}{seg^2}}$$

$$v = 1,4 \frac{m}{seg}$$

Como se menciona anteriormente el flujo volumétrico de entrada del material es igual a:

$$\dot{V} = v \cdot A_{necesaria}$$

Donde podemos despejar el área mínima necesaria para el flujo volumétrico calculado:

$$A_{necesaria} = \frac{\dot{V}}{v}$$

$$A_{necesaria} = \frac{0,00176 \frac{m^3}{seg}}{1,4 \frac{m}{seg}}$$

$$A_{necesaria} = 0,00125m^2$$

Las dimensiones del orificio para que nos de un área equivalente son:

$$l = 0,035m$$

$$a = 0,035m$$

$$A_{diseno} = 0,035m \bullet 0,035m$$

$$A_{diseno} = 0,00123m^2$$

Para que el operador tenga la posibilidad de controlar el flujo volumétrico en base a las necesidades de producción, se diseña el área de salida de la tolva de acumulación más grande con un mecanismo de regulación del flujo de salida de tornillo, por lo tanto el área de salida propuesta en el diseño es de:

$$l = 0,08m$$

$$a = 0,06m$$

El cálculo del ángulo de inclinación de la tolva se lo realiza geométricamente mediante el coeficiente de rozamiento (μ_s) y el ángulo descrito por la inclinación de la tolva a utilizar.

$$\theta = \tan^{-1} \mu_s$$

Ecuación 4.43 Angulo de inclinación de una superficie
(Fuente: Mecánica Vectorial para Ingenieros, Dinámica)

El coeficiente de fricción cuando la madera se desplaza sobre acero varía entre 0,55 – 0,7, tomando $\mu_s = 0,7$ el ángulo de inclinación de la tolva será:

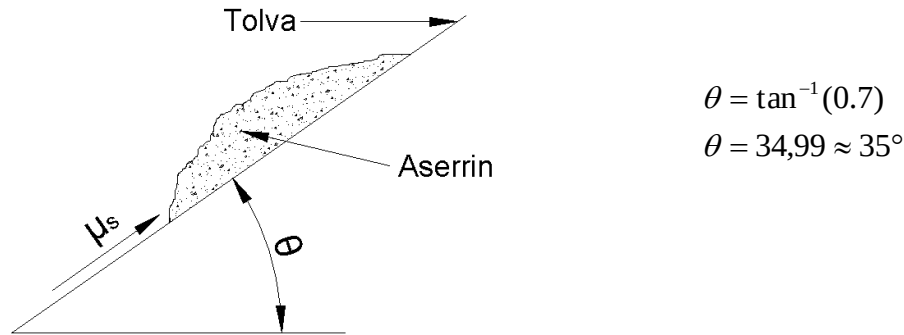


Figura 4.24 Angulo de Inclinación de Tolva.
(Fuente: El Autor).

La Ley Beverloo³⁰, establece que la altura H_g de material granular en una tolva de alimentación, está en función de su radio de salida:

$$H_g = 2,5 \bullet D_{salida}$$

Ecuación 4.44 Altura de la Tolva de Almacenamiento.

(Fuente: Flujo y atascos en un Medio Granular en la Descarga de Silos, Univ. De Navarra, España 2005)

Con las dimensiones propuestas de diseño tenemos un área de:

$$A_{salida} = 0,08m \bullet 0,06m$$

$$A_{salida} = 0,0048m^2$$

El radio equivalente para el área calculada es:

$$r = \sqrt{\frac{A_{salida}}{\pi}}$$

$$r = \sqrt{\frac{0,0048}{\pi}}$$

³⁰ MANKOC Cristian, Universidad de Navarra, Flujo de medios granulares en la descarga de silos, España 2007.

$$r = 0,039m$$

Por lo tanto la altura 1 es igual a:

$$H1 = 2,5 \bullet 0,078m$$

$$H1 = 0,195m$$

La altura calculada provoca que la tolva tenga en su parte superior una dimensión muy elevada lo que provocaría problemas para el operario y problemas de equilibrio de la maquina, por lo que se calcula un volumen equivalente.

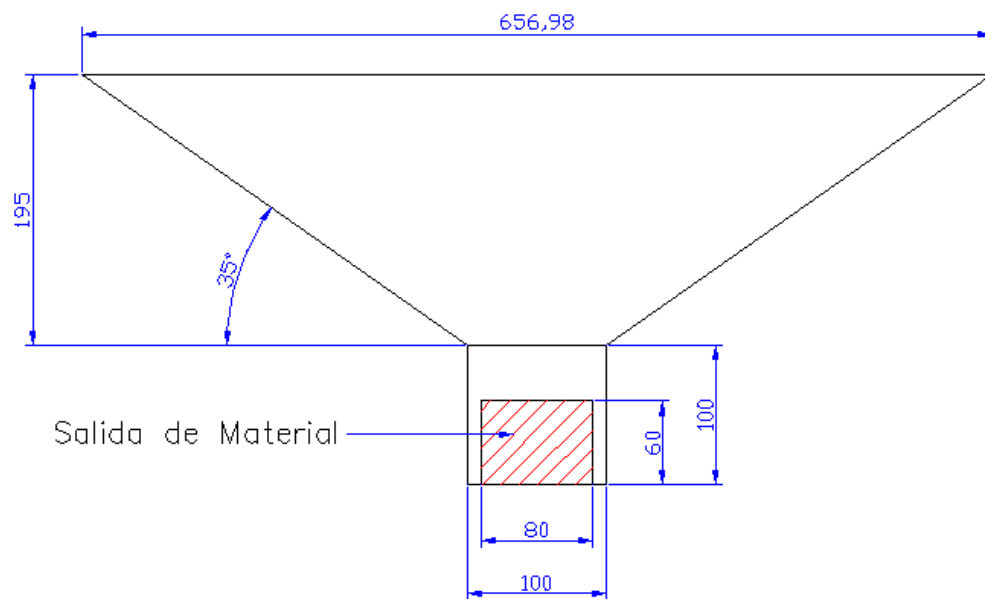


Figura 4.25 Tolva de Almacenamiento inicial
(Fuente: El Autor)

El volumen equivalente será:

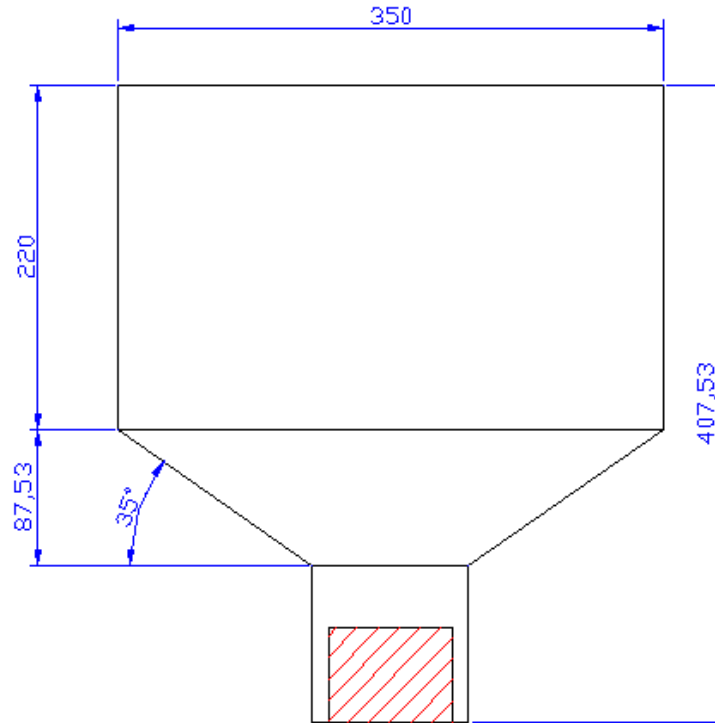


Figura 4.26 Tolva de Almacenamiento Final.
(Fuente: El Autor)

Tolva de Entrada de Aserrín:

Como podemos observar el área de salida del material necesaria es muy semejante al área de salida de diseño, lo que nos indica que el flujo volumétrico no tendrá variaciones significativas durante la alimentación en el proceso de molturación.

El molino de martillos posee una tolva de alimentación la cual debe cumplir con las debidas consideraciones para que la materia prima ingrese sin problema alguno. El principal factor a determinar es el rozamiento que existe entre la materia prima y las paredes de la tolva ya que de este dependerá el grado de inclinación que debe poseer la tolva para que el material pueda fluir sin problema hacia el molino.

Dimensionado de Toba de entrada de material:

La tolva tiene un ángulo de inclinación de 35° con respecto a la horizontal, puede ser construida de plancha de Tool galvanizado con espesores de 2mm a 3mm, para asegurar la rigidez de la misma.

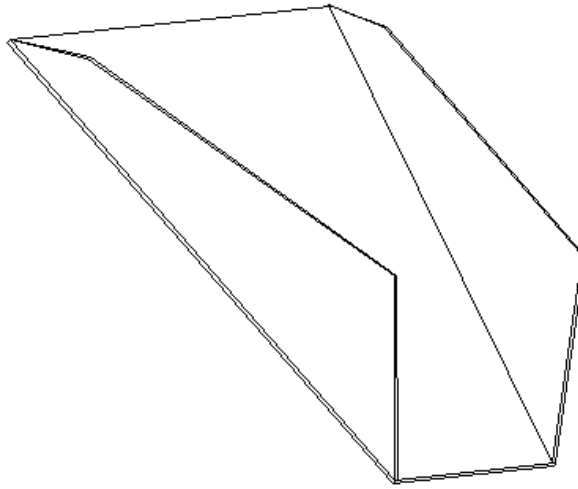


Figura 4.27 Tolva de Entrada del Material.
(Fuente: El Autor).

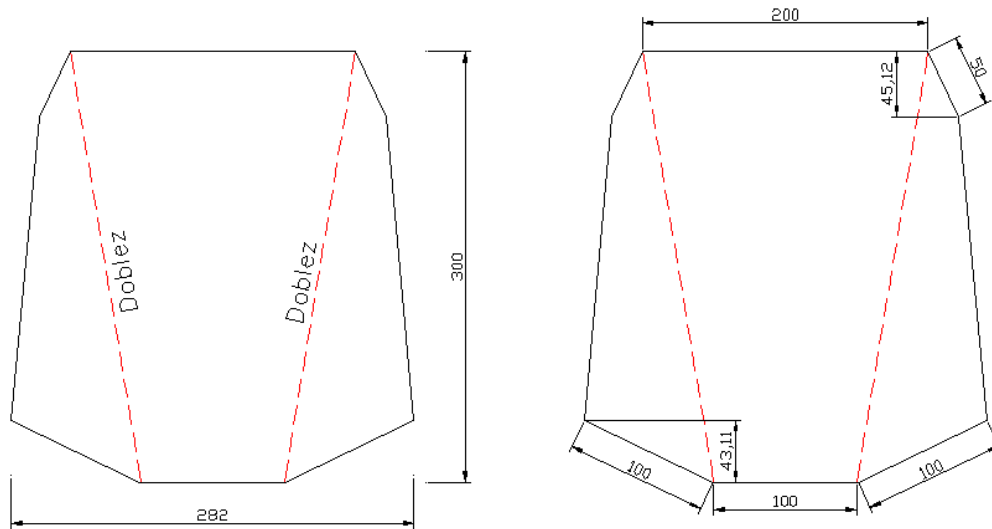


Figura 4.28 Dimensiones de la Tolva de Alimentación.
(Fuente: El Autor).

4.3 DISEÑO DEL TAMIZ VIBRADOR

Los procedimientos para determinar la superficie de cribado necesaria en una clasificación concreta, son absolutamente empíricos basados en experiencias de los fabricantes de cribas, por lo que deberán ser tanto más acertados cuanto mayor experiencia tenga dicho fabricante y por supuesto cuanto mayor sea su conocimiento sobre el tema en cuestión.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CRIBADO

El método de cálculo que se aplicara es el “*Método pasante*”, basado en la masa sólida por unidad de tiempo que pasa por una superficie específica de malla de una determinada luz de paso. El sistema de cribado diseñado con *el método pasante* parte de valores iniciales del producto, con densidad aparente de $1,6 \text{ t/m}^3$ que pasa por una malla de luz determinada, con área libre del 50 %, colocada en la primera posición de una criba instalada con una inclinación de 20° . El producto de alimentación con un contenido de partículas superiores a la luz de malla, rechazo, del 25 % y de partículas inferiores al tamaño mitad de la malla, semitamaño, del 40 %. La eficiencia de cribado considerada es del 94 % (es decir, el 6 % de las partículas finas que debería haber pasado por la luz de la malla no pasaron). A partir de estos valores, mediante coeficientes de corrección procedemos a calcular nuestro sistema de cribado.

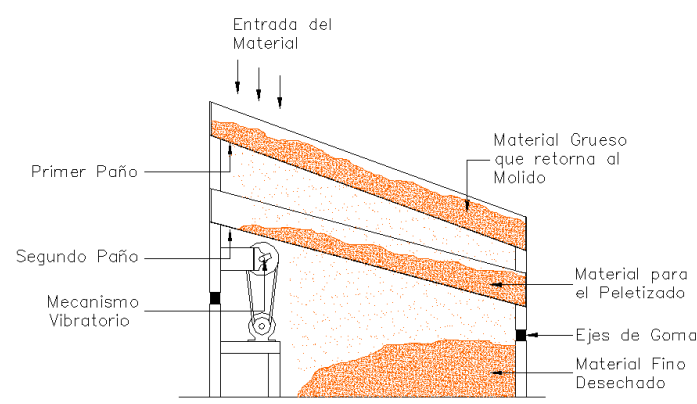


Figura 4.29 Esquema del Tamiz vibrador
(Fuente: El Autor)

4.3.2 CALCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN DEL SISTEMA DE CRIBADO PARA EL PRIMER PAÑO

Se requiere una superficie de cribado para clasificar, en el primer paño materia prima a 6 mm, 1.6 T/h de aserrín que contiene 15 % de partículas superiores a 6 mm, y 35 % de partículas inferiores a 6 mm. En el segundo paño se clasificara la materia prima ≥ 3 mm con 90% de partículas superiores a 3 mm y 50% partículas inferiores a 3 mm. Se requiere una eficiencia de cribado del 85 %. La distancia entre tamices es de 20 cm.

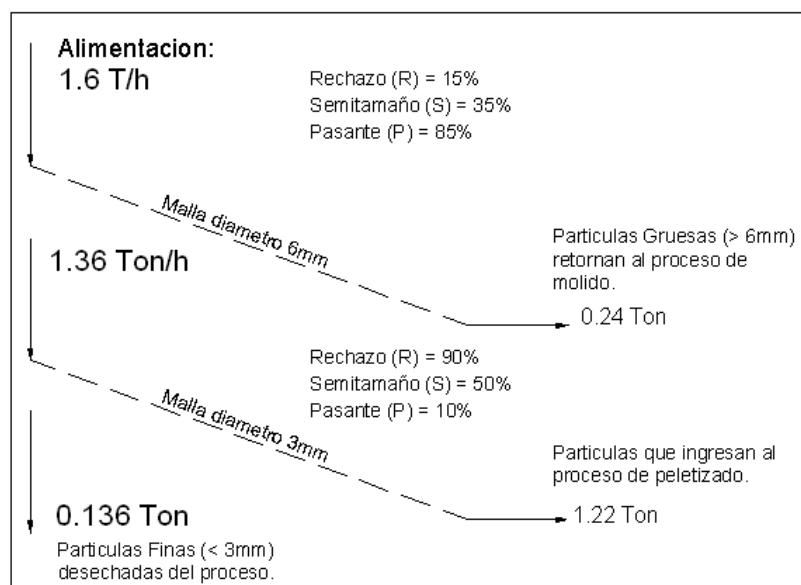


Figura 4.30 Esquema del proceso de tamizado
(Fuente: El Autor)

Factor de corrección de la densidad específica aparente (f_d)

La densidad específica aparente del aserrín es 250 kg/m^3 , por lo tanto el factor de corrección (f_d) será:

$$f_d = \frac{\rho_a}{1.6} = \frac{0.25}{1.6}$$

$$f_d = 0.15625$$

Factor de corrección de las partículas inferiores al tamaño de la clasificación (f_r)

El porcentaje de rechazo sobre 6 mm es 15 %, por lo cual el factor de corrección (Anexo 4.9) a aplicar es:

$$f_r = 1,04$$

Factor de corrección de las partículas superiores al tamaño de la clasificación (f_s)

El porcentaje de partículas inferiores a la mitad de la luz de la malla (6 mm), es 35 %, por lo que el factor de corrección (Anexo 4.10) a aplicar es:

$$f_s = 0.92.$$

Factor de corrección de la eficiencia de cribado (f_e)

La eficiencia de cribado que se requiere es del 85 % por lo cual el factor a aplicar por eficiencia (Anexo 4.11) es:

$$f_e = 1,26$$

Factor de corrección de cribado en seco (f_a)

La capacidad básica a sido obtenida en base a un cribado en seco, o con una humedad de los residuos inferior al 15 %. El factor de corrección que se aplica es ⁽³¹⁾.

$$(f_a = 1.5)$$

Factor de corrección del tipo de apertura de la malla (f_m)

La capacidad básica ha sido calculada con malla de acero de sección de paso circular, por lo tanto el factor de correlación es ⁽³²⁾

$$(f_m = 0.8).$$

³¹⁻³² Bouso, Juan Luis, Arte del Cribado, España 1969.

Factor de corrección según la posición de la malla en la criba (f_p)

Las partículas al caer sobre la criba debido a su componente de avance horizontal describen una parábola, lo que significa que los paños inferiores no son aprovechados en toda su longitud, por lo que la superficie efectiva de cribado es menor a medida que la malla está colocada en las posiciones más inferiores.

Consecuentemente hay que aplicar un factor corrector en función de la posición del paño de cribado (f_p).

Si está en el primer piso, $f_p = 1,0$

Factor de corrección según el ángulo de inclinación de la criba (f_i)

Los cálculos de la capacidad básica han sido hechos en cribas inclinadas por lo cual el factor a aplicar es:

Cribas inclinadas (20°) $f_i = 1,00$

Factor de corrección según el área libre de paso (f_o)

Los cálculos de la capacidad básica han sido realizados con mallas de alambre de acero, de ejecución “media”, es decir, con un diámetro de hilo medio de acuerdo a la luz de la malla, lo que da una superficie libre de paso determinada.

La superficie libre considerada en el cálculo propuesto para una malla normal de acero de 6 mm es del 56% (Anexo 4.12), por lo tanto el factor (f_o) a considerar es:

$$f_o = 56/50 = 1,12$$

FACTOR TOTAL DE CORRECCIÓN (f_T)

El factor total de corrección para el primer paño, es el producto de todos los factores que se obtuvieron anteriormente.

$$f_T = f_d * f_r * f_s * f_e * f_a * f_m * f_p * f_i$$

$$f_T = 0.15625 * 1.04 * 0.92 * 1.26 * 1.5 * 0.8 * 1 * 1$$

$$f_T = 0.2264$$

4.3.3 SUPERFICIE DE CRIBADO DEL PRIMER PAÑO

La superficie de cribado se calcula en base a la capacidad volumétrica del aserrín que se obtiene del proceso de molido y de la capacidad básica modificada por los factores de corrección.

$$S_C = \frac{\text{Tonelaje a cribar}(T)}{\text{Capacidad básica}(B) \bullet \text{Factores de corrección}(f_T)}$$

Ecuación 4.45 Superficie de cribado

(Fuente: www.concretonline.com)

La capacidad básica (B) está dada por las tablas del anexo 4.13, por lo tanto la superficie de cribado será:

$$S_C = \frac{1.6 \left(\frac{T}{h} \right)}{2.9 \frac{T}{m^2 h} \bullet 0.2264}$$

$$S_C = 2.4 m^2$$

4.3.4 CALCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN DEL SISTEMA DE CRIBADO PARA EL SEGUNDO PAÑO

El procedimiento a seguir para el cálculo del área de cribado para el segundo paño es básicamente el mismo que se empleo anteriormente, modificado en base a los

requerimientos del tamaño de material y la posición que ocupa el paño en el sistema de cribado.

Factor de corrección de la densidad específica aparente (f_d)

La densidad específica aparente es la misma calculada para el primer paño

$$f_d = \frac{\rho_a}{1.6} = \frac{0.25}{1.6}$$

$$f_d = 0.15625$$

Factor de corrección de las partículas inferiores al tamaño de la clasificación (f_r)

El porcentaje de rechazo sobre 3 mm es 90 %, por lo cual el factor de corrección (Anexo 4.9) a aplicar es:

$$f_r = 0.76$$

Factor de corrección de las partículas superiores al tamaño de la clasificación (f_s)

El porcentaje de partículas inferiores a la mitad de la luz de la malla (3 mm), es 50 %, por lo que el factor de corrección (Anexo 4.10) a aplicar es:

$$f_s = 1.2$$

Factor de corrección de la eficiencia de cribado (f_e)

La eficiencia de cribado que se requiere es del 85 % por lo cual el factor a aplicar por eficiencia (Anexo 4.11) es:

$$f_e = 1.26$$

Factor de corrección de cribado en seco (f_a)

Los valores de la capacidad básica han sido obtenidos en base a un cribado en seco, o con una humedad de los residuos inferior al 15 %. El factor de corrección que se aplica es: ($f_a = 1.5$).

Factor de corrección del tipo de apertura de la malla (f_m)

La capacidad básica ha sido calculada con malla de acero de sección de paso circular, por lo tanto el factor de correlación es:

$$(f_m = 0.8).$$

Factor de corrección según la posición de la malla en la criba (f_p)

Las partículas al caer sobre la criba debido a su componente de avance horizontal describen una parábola, lo que significa que los paños inferiores no son aprovechados en toda su longitud, por lo que la superficie efectiva de cribado es menor a medida que la malla está colocada en las posiciones más inferiores.

Consecuentemente hay que aplicar un factor corrector en función de la posición del paño de cribado (f_p).

Si está en el segundo, $f_p = 0.9$.

Factor de corrección según el ángulo de inclinación de la criba (f_i)

Los cálculos de la capacidad básica han sido hechos en cribas inclinadas por lo cual el factor a aplicar es:

Cribas inclinadas (15°) $f_i = 0.96$

Factor de corrección según el área libre de paso (f_o)

La superficie libre considerada en el cálculo propuesto para una malla normal de acero de 3 mm es del 56% (Anexo 4.12), por lo tanto el factor (f_o) a considerar es:

$$f_o = 44/50 = 0.88$$

FACTOR TOTAL DE CORRECCIÓN (f_T)

$$f_T = f_d * f_r * f_s * f_e * f_a * f_m * f_p * f_i$$

$$f_T = 0.15625 * 1.2 * 0.92 * 1.26 * 1.5 * 0.9 * 0.96 * 0.88$$

$$f_T = 0.24780$$

4.3.5 SUPERFICIE DE CRIBADO DEL SEGUNDO PAÑO

$$S_C = \frac{\text{Tonelaje a cribar}(T)}{\text{Capacidad básica}(B) \bullet \text{Factores de corrección}(f_T)}$$

La capacidad básica (B) está dada por las tablas del anexo 4.13, por lo tanto la superficie de cribado será:

$$S_C = \frac{1.36 \left(\frac{T}{h} \right)}{2.3 \frac{T}{m^2 h} \bullet 0.24780}$$

$$S_C = 2.38 m^2$$

4.3.6 DIMENSIONES DEL TAMIZ

Considerando que las superficies de cribado del primer y segundo paño son similares, asumimos una superficie de cribado de $S_C = 2.4 m^2$, en consecuencia las dimensiones del tamizador serán:

Longitud = 1.6 m.

Ancho = 1.5 m.

Volumen del tamiz

Se considera una altura del tamiz 15 cm, en consecuencia:

$$V_{Tamiz} = (1.5m \bullet 1.6m) \bullet 0.15m$$

$$V_{Tamiz} = 0.36 m^3$$

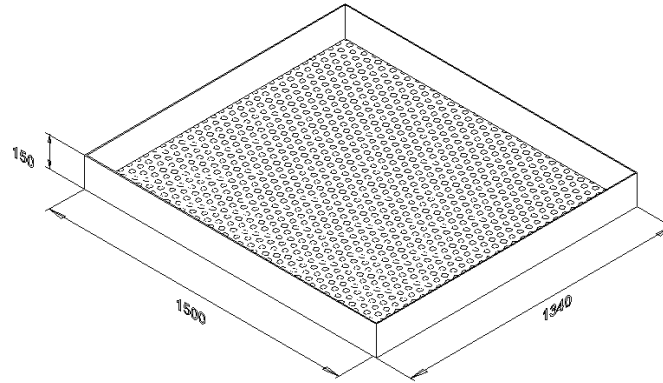


Figura 4.31 Dimensiones de los tamices de la maquina
(Fuente: El Autor)

Peso del aserrín en el tamiz

$$\gamma = 250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$W = V * \gamma$$

$$W = 0.36\text{m}^3 \bullet 250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$W = 90\text{kg}$$

$$W = 882.9\text{N}$$

4.3.7 CALCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

La transmisión de potencia se realizara por medio de bandas y poleas que serán las encargadas de mover el eje que está unido a la masa de desbalance por medio de pernos.

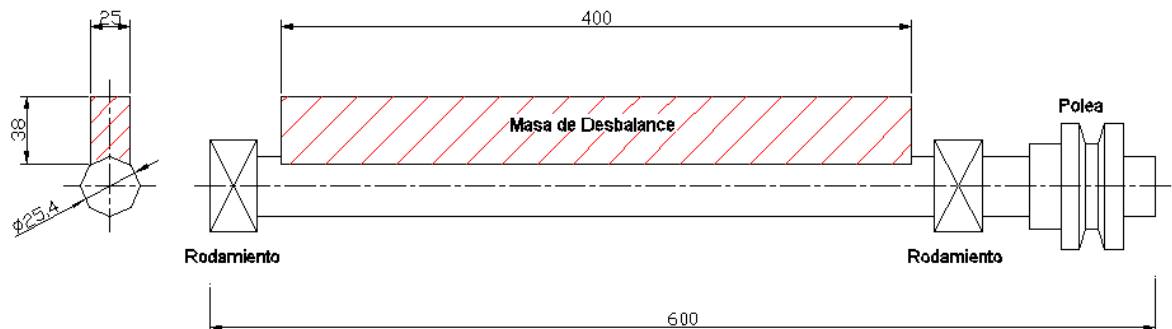


Figura 4.32 Esquema del eje de desbalance
(Fuente: El Autor)

Para garantizar una correcta clasificación del material, para un sistema de cribado con una capacidad $\leq$ a 2 Toneladas, se requiere una carrera de vibración de 5-6 mm y una velocidad de rotación del motor $\leq$ 1750 rpm.³³

El momento torsor y la velocidad angular respectivamente serán:

$$M = F \cdot d$$

$$M = 882.9N \cdot 0.005m$$

$$M = 4.414N.m$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 1750rpm}{60} = 183.259rad/s$$

La potencia del motor será:

$$P = M \cdot \omega$$

$$P = 4.414N \cdot 183.259rad/s$$

$$P = 880.99w \approx 1.08Hp$$

Partiendo de esta potencia inicial se procede al cálculo de la potencia de diseño tomando en cuenta el factor de servicio del motor (Anexo 4.1)

$$Potencia \text{ de diseño} = 1.2 \cdot 1.08HP$$

$$Potencia \text{ de diseño} = 1.3HP \approx 1.5HP$$

³³ BOUSO, Luis, "EQUIPOS DE CRIBADO" <http://www.eralgroup.com>

Torque generado por el Motor:

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{1119W}{183.25 \frac{rad}{s}}$$

$$T = 6.106 N - m$$

4.3.7.1 CÁLCULO DE BANDAS Y POLEAS

Utilizando la grafica del Anexo 4.2, se selecciona la sección adecuada para la combinación de potencia de diseño y velocidad. 3V o 3VX para transmitir 1.5 Hp a 1750 rpm.

En la tabla del Anexo 4.3 se verifica diámetro mínimo de polea recomendado para el motor que se va a emplear, para un motor eléctrico estándar de 1.5 Hp a 1750 rpm se recomienda que el diámetro de la polea motriz sea mayor o igual a 2.4 pulgadas.

La relación de reducción es igual a la velocidad de la polea motriz entre la velocidad de la polea conducida.

$$r_{red} = \frac{r.p.m. \text{ polea motriz}}{r.p.m. \text{ polea conducida}}$$

Tomando en cuenta un 20% de reducción de velocidad por el tipo de transmisión (poleas y bandas).

$$r_{red} = \frac{1750}{1400} = 1.25$$

En las tablas de selección que proporciona el fabricante, correspondiente a la sección de banda determinada (banda 3V), se escoge una combinación de poleas que ofrezca la relación deseada y que tenga un diámetro aproximado recomendado.

$$\frac{D}{d} = 1.25 \therefore d \geq 2.4 \text{ pulg}$$

$$D = 2.4 \bullet 1.25 \text{ pulg} = 3 \text{ pulg}$$

Distancia entre los centros de las poleas

$$a_{\min} \leq a_o \leq a_{\max}$$

$$a_{\min} = 0.7(d + D) = 0.7(60.96\text{mm} + 76.20\text{mm}) = 96.012\text{mm}$$

$$a_{\max} = 2(d + D) = 0.2(60.96\text{mm} + 76.20\text{mm}) = 27.432\text{mm}$$

La longitud de la banda será:

$$Lo \approx 2 \bullet a_o + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \bullet a_o} \quad (\text{mm})$$

$$Lo \approx 2 \bullet 61.722 + 1.57(76.20 + 60.96) + \frac{(76.20 - 60.96)^2}{4 \bullet 61.722} \quad (\text{mm})$$

$$Lo \approx 339.4\text{mm}$$

Según la tabla de longitudes normalizadas para bandas 3V (anexo 4.4), se escoge la longitud $Ln = 635 \text{ mm}$ (25 pulg).

El ángulo de contacto de la banda es:

$$\alpha_1 = 2 \bullet \cos^{-1} \left[\frac{D - d}{2a} \right]$$

$$\alpha_1 = 2 \bullet \cos^{-1} \left[\frac{76.20 - 60.96}{2 \bullet 61.722} \right] = 165.816^\circ$$

El número de bandas necesarias será calculado en base a la *ecuación 4.25*. En el anexo 4.5 se determinan los coeficientes de ángulo de contacto y correlación de longitud respectivamente, por lo tanto:

$$z \geq \frac{1.5 \bullet 1.2}{2 \bullet 0.97 \bullet 0.84} = 1.10 \approx 1 \text{ banda}$$

Fuerza radial de la polea sobre el eje:

$$F_n = \frac{T}{r}$$

$$F_n = \frac{6.106 \text{ N} \cdot \text{m}}{0.038 \text{ m}}$$

$$F_n = 160.68 \text{ N}$$

$$F_s = 1.5 \bullet F_n$$

$$F_s = 1.5 \bullet 160.68 \text{ N}$$

$$F_s = 241.026 \text{ N}$$

4.3.8 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESBALANCE

La clasificación del aserrín se da por medio de la vibración de los tamices. Para producir el efecto vibratorio, se utiliza un eje unido a una masa de desbalance, el eje transmitirá la potencia del motor a la estructura inferior que a su vez está unida por medio de cuatro ejes de goma a la estructura superior que contiene los tamices. El giro del eje de desbalance origina un movimiento vibratorio que permite la caída del material.

El sistema de desbalance básicamente consta de:

1. Estructura inferior	2. Ejes de Goma
3. Estructura superior	4. Base de soporte del eje
5. Eje principal	6. Masa de desbalance
7. Rodamientos	8. Poleas de transmisión
9. Banda “V”	10. Motor C.A

Tabla 4.9 Partes del sistema de desbalance
(Fuente: El Autor.)

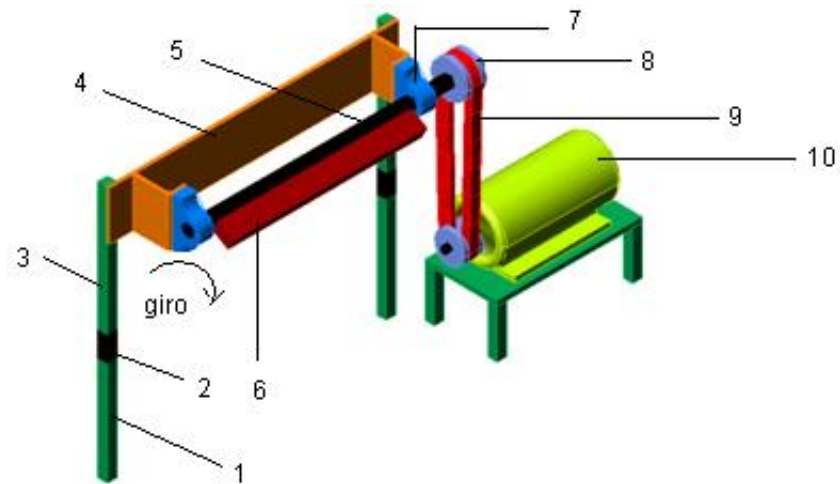


Figura 4.33 Esquema del sistema de desbalance
(Fuente: El Autor)

4.3.8.1 CALCULO DE LA FUERZA DE DESBALANCE DEL EJE

En base al área de cribado se dimensiona la masa de desbalance que producirá la fuerza de oscilación necesaria para la clasificación del material.

Dimensiones de la masa de desbalance:

$$l = 0.4m$$

$$a = 0.038m$$

$$h = 0.025m$$

Por lo tanto la masa de desbalance será:

$$m = v \cdot \rho$$

$$m = 0.00038m^3 \cdot 7800 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m = 2.964Kg$$

$$W = m \cdot g$$

$$W = 2.964kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$W = 29.07N$$

La inercia se calcula aplicando el teorema de ejes paralelos, y tomando como consideración de diseño el diámetro del eje de 1.5 pulgadas (este diámetro será recalculado).

$$\begin{aligned}
 I_T &= I_{eje} + I_{des} \\
 I_T &= \frac{m_{eje} \cdot r^2}{2} + m_{des} \cdot d^2 \\
 I_T &= \frac{5.30Kg \cdot 0.019m^2}{2} + 2.964Kg \cdot 0.0315m^2 \\
 I_T &= 0.00389Kg \cdot m^2
 \end{aligned}$$

Para calcular la fuerza de desbalance se aplica la siguiente formula empírica:

$$U_d = I_T \cdot r \cdot \omega$$

Ecuación 4.46 Fuerza de desbalance
(Fuente: www.concretonline.com)

$$U_d = 0.00389Kg \cdot m^2 \cdot 0.0315m \cdot 1750rpm^2$$

$$U_d = 376.13N$$

TORQUE ORIGINADO POR LA FUERZA DE DESBALANCE

La fuerza de desbalance al estar desplazada con respecto al eje produce el siguiente momento:

$$\begin{aligned}
 T &= U_d \cdot r \\
 T &= 376.13N \cdot 0.0631m \\
 T &= 23.73N - m
 \end{aligned}$$

El momento torsor máximo estará dado por la sumatoria de los torques que afectan al eje de desbalance.

$$T_{\max} = 23.73N - m + 6.106 N - m$$

$$T_{\max} = 29.839N - m$$

4.3.8.2 CALCULO DEL EJE PRINCIPAL DEL TAMIZ VIBRATORIO

En el diagrama de cuerpo libre se grafican todas la fuerzas que actúan en el eje principal, en base a ello se calculan las reacciones y los momentos y cortantes máximos que se producen en el eje.

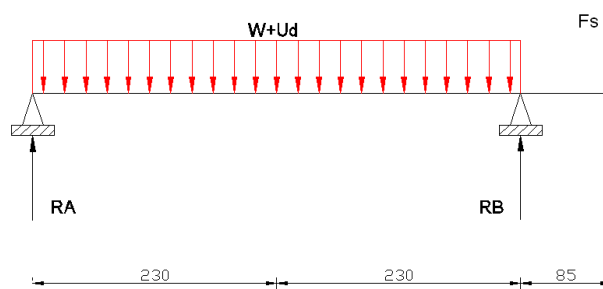


Figura 4.34 Diagrama de cuerpo libre del eje principal
(Fuente: El Autor)

$$\sum M_A = 0$$

$$RB(0.46m) - Fs(0.545m) - q(0.46m)(0.230m) = 0$$

$$RB(0.46m) - 241.06(0.545m) - 880.86 \frac{N}{m} (0.46m)(0.230m) = 0$$

$$RB = 488.16N$$

$$\sum Fy = 0$$

$$RA + RB - q(0.46m) - Fs = 0$$

$$RA + 488.16 - 405.19 - 241.026 = 0$$

$$RA = 158.18N$$

$$RA = 158.18 N$$

$$RB = 488.16 N$$

CALCULO DEL CORTANTE MAXIMO

Analizando el diagrama de cuerpo libre se determina los momentos y cortantes para la viga cargada

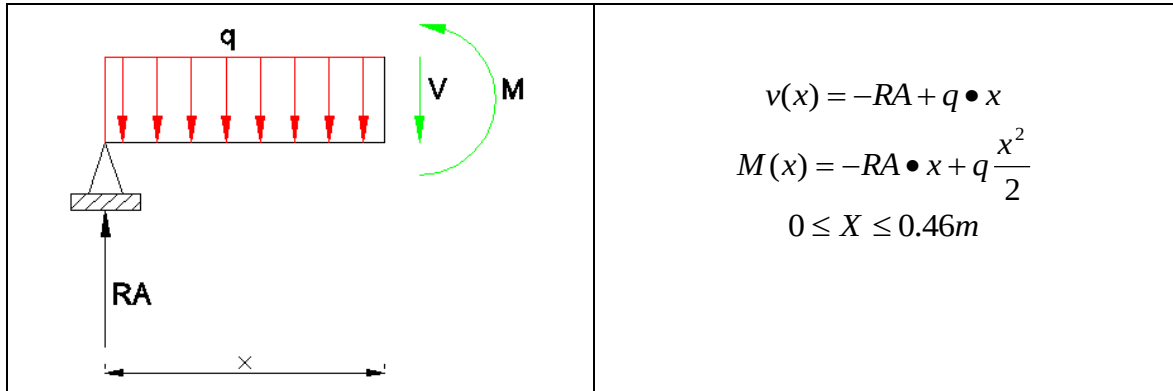


Tabla 4.10 Diagrama de cuerpo libre y ecuaciones de viga sometida a cortante
(Fuente: El Autor.)

El valor del cortante máximo para las cargas aplicadas será:

$$V_{\max} = -RA + q \cdot x$$

$$V_{\max} = -158.18N + 880.86 \frac{N}{m} \cdot 0.46m$$

$$V_{\max} = 247.015N$$

El momento máximo se producirá donde el cortante se interseca con el eje x es decir $V = 0$, en consecuencia se determina la distancia donde se produce el momento máximo.

$$x = \frac{RA}{q}$$

$$x = \frac{158.18N}{880.86 \frac{N}{m}} = 0.1795 \approx 0.18m$$

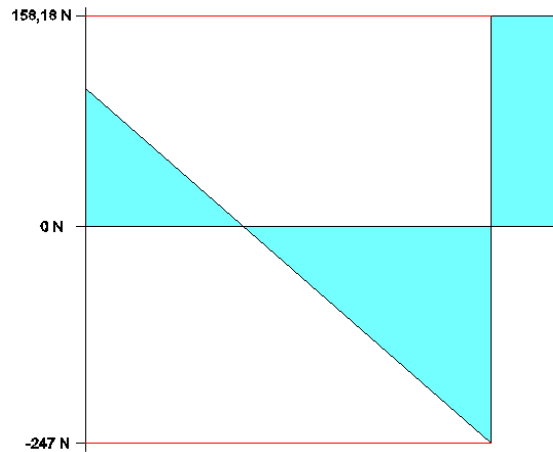


Figura 4.35 Diagrama de cortante del eje de desbalance
(Fuente: El Autor)

El momento máximo se produce a 0.18 m, este valor será:

$$M(0.18) = -158.18N \cdot 0.18m + 880.86 \frac{N}{m} \cdot \frac{(0.18m)^2}{2}$$

$$M_{\max} = 42.74N \cdot m$$

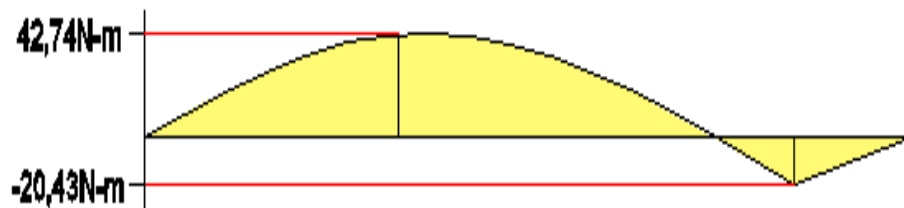


Figura 4.36 Diagrama de momentos del eje de desbalance
(Fuente: El Autor)

DIÁMETRO DEL EJE PRINCIPAL

El diámetro del eje sometido a flexión y torsión se puede calcular mediante la ecuación:

$$d = \left[\frac{32 \cdot n}{\pi \cdot S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

Ecuación 4.30 Diámetro de un eje sometido a Flexión y Torsión
(Fuente: Norton, Robert, Elementos de Máquinas)

$$d = \left[\frac{32 \bullet 3}{\pi \bullet 207E^6} (42.74^2 + 29.839^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = 0,0197m \approx 0.8 \text{ pulg}$$

Se escoge el diámetro comercial más próximo al valor calculado, por lo tanto el diámetro del eje será de $d = 1$ pulgada.

ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Se procede al cálculo de los esfuerzos de flexión, cortante y torsión.

Esfuerzo Flexionante:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{42.74N - m \bullet 0.01270m}{\frac{\pi \times (0.0254m)^4}{32}} = 13,28MPa$$

Esfuerzo Cortante:

$$\tau_{Flexion} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi \times d^2} = \frac{16 \bullet 247.015N}{3 \bullet \pi \bullet (0,0254m)^2} = 0.65MPa$$

Esfuerzo Torsor:

$$\tau_{Torsion} = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16 \bullet 29.839N - m}{\pi \times (0,0254m)^3} = 9.27Mpa$$

4.3.9 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

El rodamiento se selecciona de acuerdo al diámetro del eje y a la carga dinámica equivalente. Para ello, en base a las reacciones que soportan los apoyos del eje se escoge el rodamiento 61805 (marca SKF) con soporte de pie (Anexo 4.14), que posee las siguientes especificaciones:

Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera, no están obturados									
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38000	24000	0,022	61805

Tabla 4.11 Tabla de las Características del Rodamiento.
(Fuente: <http://www.SKF.com>)

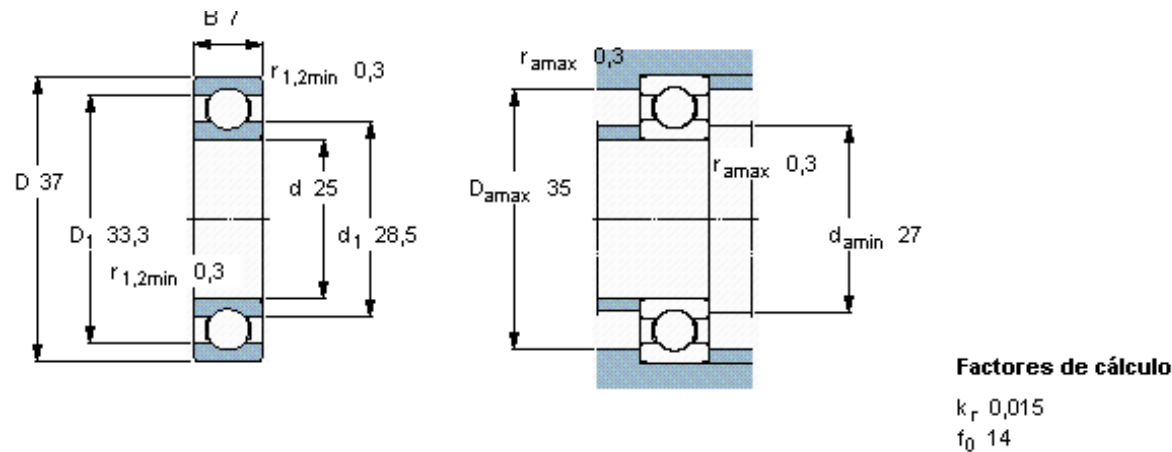


Figura 4.37 Dimensiones del Rodamiento SKF61805.
(Fuente: <http://www.SKF.com>)

VIDA NOMINAL DEL RODAMIENTO.

La vida nominal del rodamiento se calcula según la normativa ISO 281:1990, siendo la ecuación para los rodamientos de bolas la siguiente.

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

L = Vida nominal, millones de revoluciones

C = Capacidad de carga dinámica, KN

P = Carga dinámica equivalente del rodamiento

p = exponente de la ecuación de la vida (3 para rodamientos de bolas).

$$L = \left(\frac{4.360 \text{ KN}}{0.488 \text{ KN}} \right)^3 = 7.13E^{11} \text{ millones de revoluciones}$$

VIDA NOMINAL EN NÚMERO DE HORAS:

Al ser la velocidad constante, se puede obtener la vida nominal expresada en horas de funcionamiento utilizando la formula:

$$L_h = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde

L_h = vida nominal, horas de funcionamiento

n = Velocidad de giro, r.p.m.

$$L_h = \frac{1000000}{60 \bullet 1400 \text{ rpm}} \left(\frac{4.360 \text{ KN}}{0.488 \text{ KN}} \right)^3 \approx 8490 \text{ horas de funcionamiento}$$

El cálculo de rodamiento se realizó para la mayor carga, por lo tanto el rodamiento seleccionado es considerado para los dos apoyos.

4.3.10 ANALISIS DEL EJE DE DESBALANCE EN UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

Los esfuerzos determinados con el cálculo tradicional se comprueban mediante un programa de elementos finitos el mismo que brinda información completa tanto de esfuerzos como deformaciones.

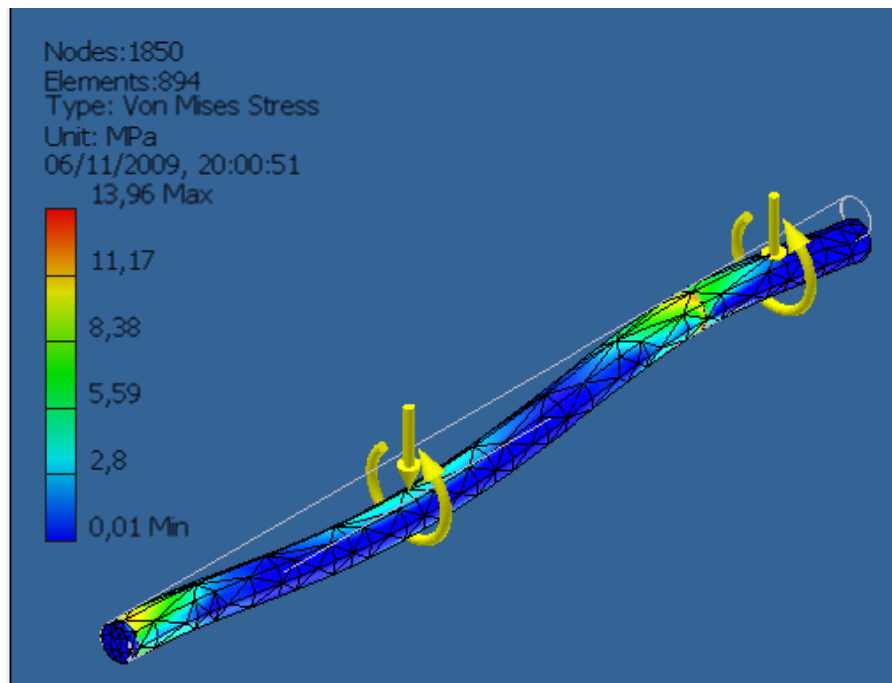


Figura 4.38 Análisis de esfuerzos máximos del eje.
(Fuente: El Autor)

4.4 DISEÑO DEL SECADOR SOLAR

En base al análisis de humedad realizado en el capítulo 3 se determina que aproximadamente el 80% del aserrín no necesita un proceso de secado ya que los niveles de humedad están dentro de los niveles óptimos para el proceso de peletizado (8 – 15% de humedad). El 20% de aserrín que se encuentra almacenado a la intemperie contiene niveles de humedad mayores a los especificados anteriormente, por lo tanto requieren un proceso de secado previo al peletizado.

En consecuencia, con el 80% del aserrín con la humedad optima, se garantiza un abastecimiento constante de la materia prima disponible para la peletización. Sin embargo con el afán de optimizar el 20% de los residuos demasiado húmedos, se prevé un proceso de secado utilizando energía solar con aire forzado.

Este método de secado se usa debido al bajo volumen de residuos disponible para el secado y a la factibilidad económica que esto implica en comparación con otros sistemas de secado, el tiempo de secado es variable y dependerá de las condiciones climáticas. En base a las experiencias de constructores de secadores solares, se establece que el tiempo aproximado de secado para el aserrín con humedad inicial aproximada al 50% es de 10 a 15 días para alcanzar una humedad final de aproximadamente 12%. ⁽³⁴⁾

4.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO SOLAR

El secador solar es una cámara que tiene la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La idea es que el calor que se genera sea útil en el proceso de secado de los residuos de madera.

Las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales:

³⁴ Benítez, R.; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR.

- La primera se ubica en la parte superior de la cámara, comúnmente denominado colector solar y es la responsable de que el aire se caliente y a su vez sea transmitido hacia el área de apilado.



Figura 4.39 Esquema del panel solar
(Fuente: Benítez, R.; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera.)

- La segunda es el área de apilado de los residuos de madera que se requieren secar, y está constituida por una estructura que contiene bandejas separadas entre sí para que permita la circulación del aire para evacuar la humedad.

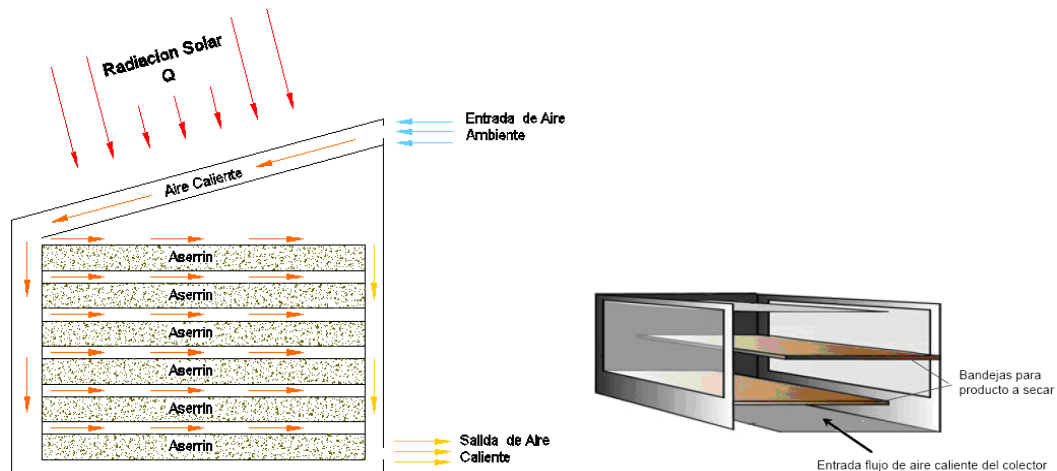


Figura 4.40 Esquema del cuarto de secado.
(Fuente: El Autor.)

El principio de funcionamiento del secador solar es simple. Una vez que el aire se calienta, en el interior de la secadora, ese aire se pone a circular entre las bandejas de material gracias a un sistema de ventiladores. La masa de aire caliente se hace circular

continuamente a través de los residuos de madera con el fin de que estos se calienten. Al elevar la temperatura el material empieza a liberar el agua que contiene y por ende se seca. Esto permite que el aserrín descienda sus contenidos de humedad a los niveles deseados. El control de las condiciones de temperatura interna se realiza gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior de la cámara.

4.4.2 VOLUMEN DE LOS RESIDUOS A SECAR

Como se menciona en párrafos anteriores, el volumen de material a secar será aproximadamente el 20% del total de los residuos analizados en el capítulo 1.

$$V_{\text{secado}} = 42.3m^3 \bullet 0.2$$

$$V_{\text{secado}} = 8.46m^3$$

4.4.3 DIMENSIONES Y MATERIALES DEL CUARTO DE SECADO

En base al volumen de secado que se calculó, se dimensiona la cámara tomando en consideración la separación que deben tener las bandejas de aserrín para que pueda circular el aire, tal como se observa en la *figura 4.41*.

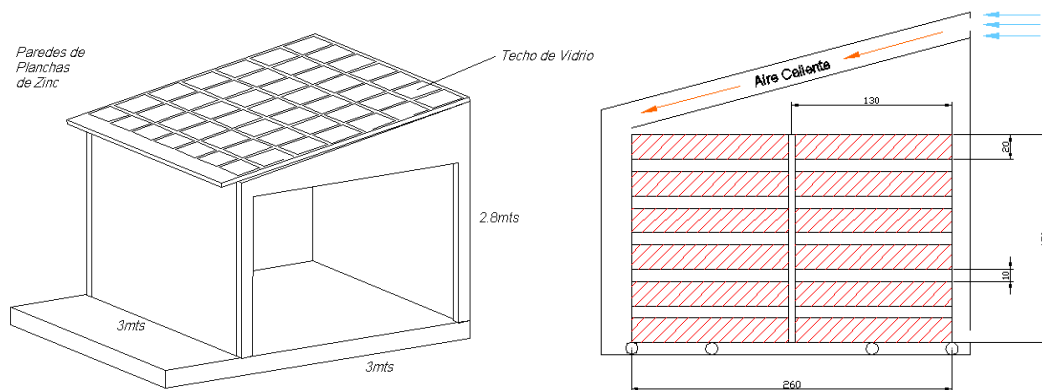


Figura 4.41 Dimensiones de la cámara de secado.
(Fuente: El Autor.)

DIMENSIONES DE LA CAMARA DE SECADO		DIMENSIONES DE LAS BANDEJAS QUE CONTIENEN EL ASERRIN	
ALTURA	2.8m	ALTURA	0.20m
PROFUNDIDAD	3m	PROFUNDIDAD	2.8m
ANCHO	3m	ANCHO	1.3
		SEPARACION ENTRE BANDEJAS	0.1m
		N° DE BANDEJAS	12

Tabla 4.12 Dimensiones de la cámara de secado y bandejas
(Fuente: El Autor.)

MATERIALES DEL CUARTO DE SECADO			
PAREDES Y PUERTAS	Planchas de hierro galvanizado	espesor = 2mm	
AISLANTE	Fibra de Vidrio	espesor = 5cm	
PISO	Concreto 210Kg/cm ²	espesor = 10 cm	
ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL TECHO	Tiras de madera de Roble	6 Longitudinales	3.10mx0.05mx0.03
		20 transversales	0.60mx0.05mx0.03m
		2 apoyos transversales	3mx0.05m*0.03m

Tabla 4.13 Materiales del cuarto de secado
(Fuente: El Autor.)

4.4.4 DIMENSIONES Y MATERIALES DE LA CUBIERTA Y DEL COLECTOR SOLAR

La cubierta se ajusta a las dimensiones del cuarto de secado y básicamente consta de 3 componentes:

- Material transparente (vidrio)
- Colector
- Aislante

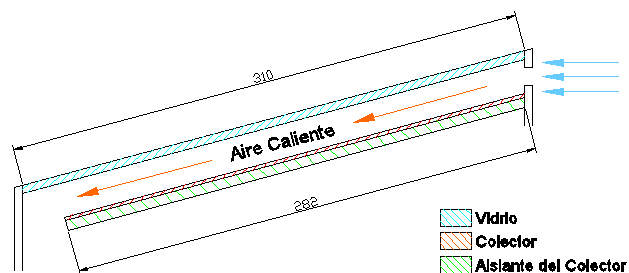


Figura 4.42 Materiales del colector solar.
(Fuente: El Autor.)

Para la elección del material transparente se hace una comparación entre los materiales usados en este campo (tabla 4.14).

Materiales	Ventajas	Desventajas
Vidrio	- Material estable - Alta transmitancia - Durable - Pocas pérdidas de calor - Disponibilidad local	- Pesado - Difícil de manejar - Construcción especial - Frágil
Plástico transparente	- Bajo costo - Liviano - Fácil de instalar - Disponibilidad local	- Poco durable - Regular transmitancia - Regular aislamiento - Frágil
Lámina transparente	- Liviano - Bajo costo - Fácil de instalar - Resistente - Durable - Disponibilidad local	- Baja transmitancia - Poco aislamiento

Tabla 4.14 Materiales para la cubierta.

(Fuente: Benítez, R.; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera.)

Entre todos estos materiales, el más recomendable para construir el techo, es el vidrio. Sin embargo, al instalarlo debe realizarse con cuidado y precisión para evitar que se quiebre. Para un mejor manejo se recomienda que el techo se coloque en cuadros de 0.60 m² y utilizando vidrios de 4 mm de espesor.

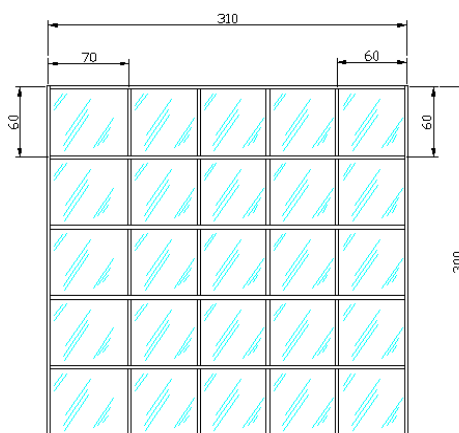


Figura 4.43 Cubierta del colector solar.

(Fuente: El Autor.)

La distancia entre el vidrio y el colector es de 40 cm, con esto se garantiza que el aire caliente forzado por el ventilador circule sin ningún problema hacia el interior de la cámara para el proceso de secado.

DIMENSIONES DE LA CUBIERTA		
ELEMENTO	MATERIAL	DIMENSIONES
MATERIAL TRANSPARENTE	4 VIDRIOS	0.06mX0.06mx0.004m
	20 VIDRIOS	0.06mx0.07mx0.004m
COLECTOR	LAMINA DE HIERRO PINTADA DE COLOR NEGRO MATE	2.82mx3mx0.003m
AISLANTE	LANA DE ROCA MINERAL	2.82mx3mx0.03m

Tabla 4.15 Dimensiones de la cubierta
(Fuente: El Autor.)

4.4.5 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ASERRÍN A SECAR

Como se menciona anteriormente, el aserrín se colocara dentro de la cámara en bandejas divididas, esto con la finalidad de realizar un secado homogéneo. En consecuencia el volumen total de aserrín que entrara en la cámara será:

$$\begin{aligned}
 L &= 2,8m \\
 a &= 1,3m \\
 h &= 0,2m \\
 \#bandejas &= 12
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 V &= L \bullet a \bullet h \bullet N^{\circ}bandejas \\
 V &= 2,8m \bullet 1.3m \bullet 0,2m \bullet 12 \\
 V &= 8,736m^3
 \end{aligned}$$

4.4.6 CÁLCULO DEL PESO DE AGUA A EVAPORAR

En condiciones iniciales, el aserrín a secar posee una humedad aproximada de 48%, en consecuencia su peso es mayor que el aserrín con 15% de humedad, por lo tanto la diferencia de pesos nos dará la cantidad de agua a evaporar.

$$\begin{aligned}
 W_{aserrin} &= V \bullet \rho \\
 W_{aserrin} &= 8,736m^3 \bullet 250 \frac{kg}{m^3} \\
 W_{aserrin} &= 2184kg
 \end{aligned}$$

Peso del aserrín con humedad del 48%

$$W_1 = \left(\frac{100 + BH}{100} \right) \bullet W_{aserrin}$$

$$W_1 = \left(\frac{100 + 48}{100} \right) \bullet 2184kg$$

$$W_1 = 3232,32kg$$

Peso del aserrín con humedad del 15%

$$W_2 = \left(\frac{100 + BH}{100} \right) \bullet W_{aserrin}$$

$$W_2 = \left(\frac{100 + 15}{100} \right) \bullet 2184kg$$

$$W_2 = 2511,6kg$$

Peso del agua a Evaporar.

$$W_{H_2O} = W_1 - W_2$$

$$W_{H_2O} = 3232,32kg - 2511,6kg$$

$$W_{H_2O} = 720,72kg \text{ agua}$$

Es muy importante el valor del peso de agua a evaporar debido a que este nos permitirá calcular el calor necesario para que el aserrín se deshidrate y obtenga una humedad del 15% con la cual estará listo para que ingrese al proceso de peletizado.

4.4.7 CALCULO DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN DEL COLECTOR.

Como se conoce la tierra tiene una breve inclinación con respecto al plano del Ecuador con un ángulo de 23°45' y ello hace que sobre un punto determinado de la Tierra los rayos del Sol caigan unas veces más perpendicularmente que en otros y, por lo tanto, que la radiación incidente sobre la misma sea diferente.

La Tierra recibe en el exterior de su atmósfera una constante solar de $G_c = 1367 \text{ W/m}^2$, y cuyo valor fluctúa en un $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol.

Declinación solar del día δ : Es la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto al plano del Ecuador terrestre; el valor de este ángulo se suele tomar cada día al mediodía solar.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{Seno} \left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

Ecuación 4.47 Declinación solar del día

(Fuente: INCROPERA, FRANK P Fundamentos de transferencia de calor., México, 1999)

n = Día en el que se desea calcular la declinación solar.

Mes	n	δ
Ene	31	(-) 17,7823°
Feb	59	(-) 8,67°
Mar	90	3,618°
Abr	120	14,587°
May	151	21,898°
Jun	181	23,184°
Jul	212	18,171°
Ago	243	8,104°
Sep	274	(-) 4,215°
Oct	305	(-) 15,056°
Nov	336	(-) 22,107°
Dic	366	(-) 23,085°

Tabla 4.16 Declinación solar del día para cada mes.

(Fuente: El Autor.)

El ángulo horario ω :

Es el desplazamiento angular del Sol, respecto al mediodía, que es el instante en que el Sol se encuentra más alto en el cielo y se corresponde con un ángulo cenital solar mínimo, es decir, con un ángulo horario igual a 0. Cada hora es igual a 15° de longitud, tomando un valor (+) por las mañanas y (-) por las tardes.

Para la ciudad de Cuenca tenemos:

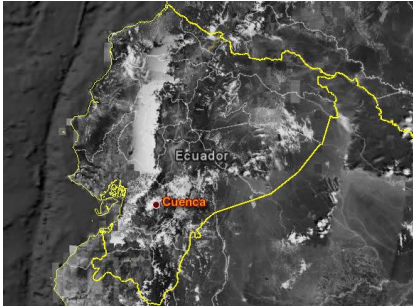
Latitud:	Longitud:	
$2^{\circ}59'10'' = 2,9861^{\circ}$	$79^{\circ}00'41''$	

Tabla 4.17 Posición Geográfica de Cuenca
(Fuente: El Autor.)

La ubicación geográfica de Cuenca no tiene desplazamiento horario por lo tanto $\omega = 0$, la variación horaria empieza cuando la latitud de un punto geográfico es mayor a 3° .

La altura solar o ángulo de elevación α :

Es mejor si se encuentra por encima del horizonte, debido a que a mayores alturas solares, la radiación recorre una distancia más corta al atravesar la atmósfera, mientras que para alturas solares más bajas, la radiación procedente del Sol es forzada a recorrer una masa de aire mucho mayor, $m > 1$.

$$\text{Seno } \alpha = \text{Seno } \delta \bullet \text{Seno } \theta + \text{Cos } \delta \bullet \text{Cos } \theta \bullet \text{Cos } \omega = \text{Cos } z$$

Mes	δ	α
Ene	(-) $17,7823^{\circ}$	$75,29^{\circ}$
Feb	(-) $8,67^{\circ}$	$84,55^{\circ}$
Mar	$3,618^{\circ}$	$83,59^{\circ}$
Abr	$14,587^{\circ}$	$72,50^{\circ}$
May	$21,898^{\circ}$	$65,16^{\circ}$
Jun	$23,184^{\circ}$	$63,87^{\circ}$
Jul	$18,171^{\circ}$	$68,90^{\circ}$
Ago	$8,104^{\circ}$	$79,02^{\circ}$
Sep	(-) $4,215^{\circ}$	90°
Oct	(-) $15,056^{\circ}$	$78,03^{\circ}$
Nov	(-) $22,107^{\circ}$	$70,94^{\circ}$
Dic	(-) $23,085^{\circ}$	$69,96^{\circ}$

Tabla 4.18 Angulo de elevación de la cubierta
(Fuente: El Autor.)

Media del Angulo de Elevación.

$$\bar{\alpha} = \frac{901,86}{12}$$

$$\bar{\alpha} = 75,15^\circ$$

Por lo tanto el ángulo de inclinación de la cubierta es:

$$\alpha = 90^\circ - \bar{\alpha}$$

$$\alpha = 90^\circ - 75,15^\circ$$

$$\alpha = 14,84^\circ \approx 15^\circ$$

4.4.8 INCIDENCIA MÁXIMA DE RADIACIÓN SOLAR SOBRE EL COLECTOR.

La radiación Solar que ha recibido Cuenca durante este año se la puede observar en la siguiente grafica:

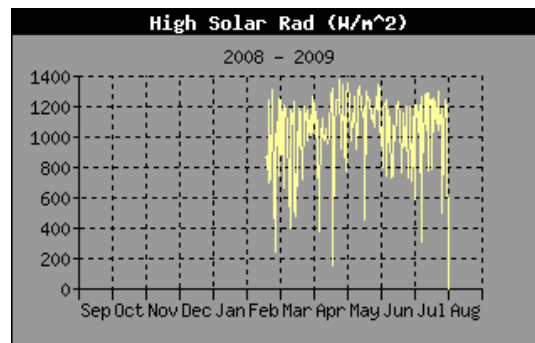


Figura 4.44 Grafico estadístico de la radiación Solar en Cuenca.
(Fuente: EXA)

La radiación solar media en cuenca es aproximadamente:

$$G_c = 1000 \frac{W}{m^2}$$

Radiación incidente en el colector con relación a su ángulo es:

$$Q_r = G_c \cdot \cos \alpha$$

Ecuación 4.48 Radiación en el colector
(Fuente: www.textoscientificos.com)

$$Q_r = 1000 \frac{W}{m^2} \cdot \cos 14,84^\circ$$

$$Q_r = 966,62 \frac{W}{m^2}$$

4.4.9 EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR:

En base a las horas diarias de radiación que absorben los secadores, todos los sistemas de secado solar poseen una eficiencia que varía entre el 50 – 60%.³⁵

4.4.10 CALOR APROVECHABLE DEL SECADOR

En base a la eficiencia y el área de la placa absorbadora tenemos:

$$Q_{apro} = Q_r \cdot A \cdot \eta$$

Ecuación 4.49 Calor del aprovechable del secador
(Fuente: www.textoscientificos.com)

$$Q_{apro} = 966,62 \frac{W}{m^2} \cdot 3,1m \cdot 3m \cdot 0,55$$

$$Q_{apro} = 4944,28W$$

4.4.11 TEMPERATURA DEL COLECTOR

Para determinar la temperatura de la superficie del colector se utiliza la ecuación 4.31, que está en función de la radiación absorbida por el área del colector y a su vez emitida al aire que gana temperatura para el secado.

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \cdot \sigma_z \cdot A \cdot T_s^4$$

Ecuación 4.50 Calor de Emitancia
(Fuente: YANUS, CENGEL “Termodinámica”)

Donde:

$\dot{Q}_{emit}$ Radiación emitida por el colector

³⁵ Benítez, R.; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR.

ε Emitancia del colector; $\varepsilon = 0,17$ para el acero

σ_z Constante de Stefan – Boltzman ; $\sigma = 5,67E^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ K^4$

A Área del colector

Ts Temperatura de la superficie del colector

Despejando Ts de la ecuación 4.31 tenemos:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}_{emit}}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A}}$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{4944,283W}{0,17 \cdot 5,67E^{-8} \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K^4} \cdot 8,46m^2}}$$

$$T_s = 329,96^\circ K \Rightarrow 56,96^\circ C$$

4.4.12 TEMPERATURA DE CIRCULACION DEL AIRE SECO

El calor del aire que ingresa a la cámara se transmite por convección, por lo tanto se aplica la ecuación 4.31.

$$\dot{Q}_{conv} = hc \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

Ecuación 4.51 Calor de Convección
(Fuente: Termodinámica de Cengel)

$\dot{Q}_{conv}$ Calor de convección

hc Coeficiente de convección del aire $hc = 6 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ K$

A Área del colector

T_f Temperatura del aire seco

Despejando T_f de la ecuación 4.32 tenemos:

$$T_f = T_s - \frac{\dot{Q}_{conv}}{hc \cdot A}$$

$$T_f = 329,96^\circ K - \frac{4944,283W}{6 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \cdot 8,46m^2}$$

$$T_f = 232,56^\circ K \Rightarrow 40,44^\circ C$$

4.4.13 ENERGÍA NECESARIA PARA EVAPORAR EL AGUA EXCEDENTE

Cuando el aire pasa través del aserrín, absorbe agua de este y poco a poco se va saturando, por lo que se debe asegurar que el aire tenga el potencial necesario para absorber agua en el último instante antes de salir de las bandejas de secado. La Energía necesaria para evaporar $1kg$ de H_2O , es $Q = 600Kcal - kg H_2O$.³⁶

Tomando en cuenta el peso del agua que se debe evaporar en base a las humedades inicial y final, el calor necesario para evaporar el volumen de agua excedente es:

$$Q_{evap} = 600 \frac{Kcal}{kg H_2O} * 720,72kg H_2O$$

$$Q_{evap} = 432432Kcal \Rightarrow 502918,42W$$

4.4.14 TIEMPO DE SECADO DEL ASERRÍN

Durante el proceso de secado del aserrín, el aire atmosférico pasa por tres estados: el aire ambiente (punto 1), incrementa su capacidad de absorber humedad al aumentar su temperatura (punto 2), luego circula a través del cuarto, hasta llegar al punto de máxima capacidad de absorbencia de agua (punto 3) con la correspondiente disminución de su temperatura, y finalmente es expulsado por medio de dos ventilas colocadas en la parte superior del cuarto. Para determinar el tiempo de secado del aserrín básicamente se realiza un modelo matemático que abarca los tres puntos antes descritos. En base a la temperatura del colector y del aire en condiciones iniciales además de de la energía

³⁶ ANANÍAS, Rubén "Bases físicas del secado de la madera".

necesaria para evaporar el agua del aserrín húmedo se obtiene el tiempo necesario para que el aserrín se encuentre con la humedad optima para el peletizado.

El tiempo necesario para el secado del aserrín depende básicamente de las temperaturas (condiciones climáticas), la humedad del aserrín y del flujo másico del aire que se manejan en el interior de la cámara. La mejor manera de determinar la temperatura de secado es a través de la experimentación empleando instrumentos de medición adecuados, (higrómetros, sensores de velocidad del aire, termómetros), que deberán ser regulados en base a los requerimientos del secado.

En vista que para nuestro caso de estudio no se dispone de esta información, el tiempo de secado para este proyecto se ha determinado en base al calor necesario para evaporar el agua y alcanzar la humedad deseada (CH=15%), empelando el calor de radiación absorbido por la placa colectora (tomando en cuenta 10 horas de sol diarias).

$$t_{\text{secado}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{\# \text{ horas de sol} * Q_{\text{aprov}}}$$

$$t_{\text{secado}} = \frac{502918,42W}{10 * 4944,283W}$$

$$t_{\text{secado}} = 10,17 \text{ dias} \approx 10 \text{ dias}$$

4.4.15 CALCULO DEL FLUJO MÁSIICO DE AIRE QUE CIRCULA A TRAVÉS DEL ASERRÍN

Es importante conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire $\dot{m}_{a1}$ que se necesita para extraer la humedad adecuada del aserrín ya que la etapa del secado es de gran importancia para garantizar una buena calidad del producto.

Para conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire $\dot{m}_{a1}$ se parte de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por el aserrín $\dot{Q}_w$ es igual al producto del calor perdido o cedido por el aire y la eficiencia de secado η_s :

$$\dot{Q}_w = \eta_s \cdot \dot{Q}_{a1}$$

$$\dot{m}_w \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg}) = \eta_s \cdot \dot{m}_{a1} \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}$$

Ecuación 4.52 Calor de vaporización ganado por el aserrín
(Fuente: Termodinámica de Cengel)

Despejando $\dot{m}_{a1}$ de la ecuación tenemos:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_w (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{\eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}}$$

Donde:

Cp_w Calor específico del vapor de agua

ΔT_w Cambio de temperatura que experimenta el aserrín en la etapa de secado

h_{fg} Entalpia de vaporización del agua

Cp_{a1} Calor específico del aire atmosférico

ΔT_{a1} Cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa de secado.

$\dot{m}_w$ Es igual a la masa de agua extraída del aserrín en un período de tiempo.

Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{aserrin}}{t} \cdot (CH_o - CH_f)$$

Ecuación 4.53 Masa de agua extraída del aserrín
(Fuente: Termodinámica de Cengel)

CH_o y CH_f Son los contenidos de humedad inicial y final del aserrín respectivamente.

Reemplazando la ecuación 4.52 en la ecuación 4.53 tenemos:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{aserrin} \cdot (CH_o - CH_f) \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{t \cdot \eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}}$$

En la tabla 4.19 se pueden ver los valores de temperaturas y calores específicos (determinados en el Anexo 4.16) que intervienen en la ecuación del flujo másico del aire. (La entalpia se determina a partir del diagrama psicométrico Anexo 4.17)

% HUMEDAD (HR)		ΔT (°C)		Calor Especifico Cp
HR inicial	48	Temp vapor ΔT_w	40°C	1.87 (KJ/Kg°C)
HR final	12	Temp aire ΔT_{a1}	15°C	1.055 (KJ/Kg°C)

Tabla 4.19 Propiedades Termodinámicas del aire seco y húmedo.
(Fuente: El Autor.)

$$\dot{m}_{a1} = \frac{2184 \text{ Kg} \cdot (48 - 15)^\circ\text{C} \cdot \left(1.87 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 40^\circ\text{C} + 56 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)}{360000 \text{ seg} \cdot 0.55 \cdot 1.055 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 15^\circ\text{C}}$$

$$\dot{m}_{a1} = 3.16 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \approx 11369.8388 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Para escoger el ventilador adecuado para el cuarto de secado, es necesario determinar el flujo volumétrico del aire que circulara en su interior, para ello se utiliza el peso específico del aire en la ciudad de Cuenca.

Según la Agencia Civil Espacial Ecuatoriana (EXA) la densidad del aire en la ciudad de Cuenca bajo condiciones estándar es de 1.2 Kg/m^3 .⁽³⁷⁾

El peso específico del aire es el inverso de su densidad, por lo tanto el flujo volumétrico del aire será:

$$\dot{q}_{\text{Aire}} = \dot{m}_{a1} \cdot \gamma$$

³⁷ Agencia Espacial Civil Ecuatoriana EXA

$$\dot{q}_{Aire} \dot{q} = 11369.8388 \frac{Kg}{h} \cdot \left(\frac{1}{1.2 \frac{Kg}{m^3}} \right)$$

$$\dot{q}_{Aire} = 9474.86 \frac{m^3}{h}$$

4.4.16 SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES PARA EL CUARTO DE SECADO

Para una correcta distribución del aire se divide en dos el flujo volumétrico calculado, de tal manera que se puedan emplear dos ventiladores que estarán situados en la parte superior del cuarto, cada uno de $4737.43 \text{ m}^3/\text{h}$.

Utilizando el catalogo de ventiladores OTAM (Anexo 4.15), se escogen dos ventiladores axiales con hélice de álabes con paso fijo modelo 315 y 1 HP, cada uno con capacidad de flujo volumétrico de $4748 \text{ m}^3/\text{h}$.

A continuación se presentan las dimensiones de estos ventiladores.

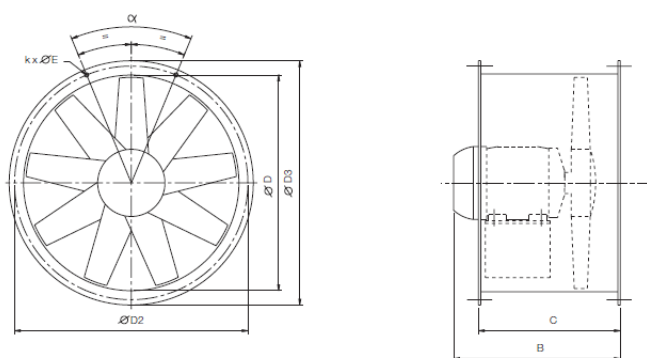


Figura 4.45 Ventilador axial modelo 315
(Fuente: CATALOGO DE VENTILADORES OTAM)

TAMAÑO	CARCASA DEL MOTOR	PESO S/MOTOR (kgf)	B	C	ØD	ØD2	ØD3	k x ØE	α
315	63	7,5	281	224	315	358	382	8 x Ø9	45°
	71	7,5	306	224					

Tabla 4.20 Medidas del ventilador axial modelo 315
(Fuente: CATALOGO DE VENTILADORES OTAM)

VELOCIDAD DEL AIRE DE LOS VENTILADORES

Es importante verificar la velocidad con la que circula el aire en el cuarto de secado. La velocidad promedio del aire a través de la pila de aserrín que se seca debe estar entre 1.2 y 3.0 m/s. Si se tiene una velocidad más baja, el secado no es eficiente y si la velocidad es más alta, se pueden causar daños severos a la estructura molecular de la madera.³⁸

El flujo volumétrico por segundo que cada ventilador proporciona es de:

$$\dot{v} = 4748 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 1.318 \frac{m^3}{s}$$

Los dos ventiladores serán ubicados simétricamente en la parte superior del cuarto tal como se ilustra en la siguiente figura.

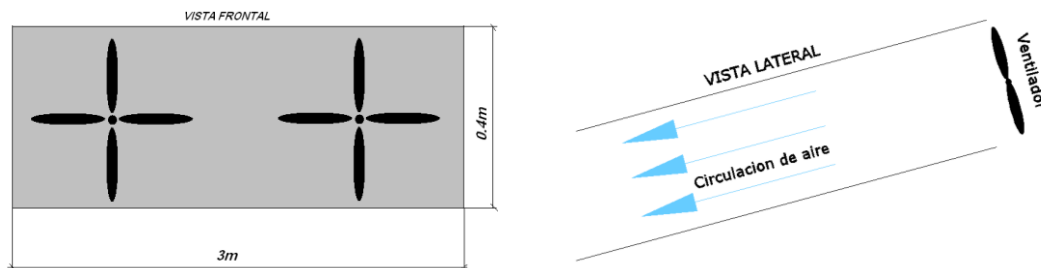


Figura 4.46 Esquema de la ubicación de los ventiladores
(Fuente: El Autor)

En el espacio que existe entre la cubierta de vidrio y el colector (Figura 4.46) circulará el aire forzado por los ventiladores. La velocidad del aire caliente de circulación está en función del flujo volumétrico y el área transversal que dicho flujo deberá atravesar.

$$v_{Aire} = 1.318 \frac{m^3}{s} \cdot (3m \cdot 0.4m)$$

$$v_{Aire} = 1.58 \frac{m}{s} \approx 1.6 \frac{m}{s}$$

³⁸ ANANÍAS, Rubén “Bases físicas del secado de la madera”.

4.4.17 TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AIE HUMEDO EN EL CUARTO

El aire exterior ingresa al colector, aquí se calienta y es forzado por los ventiladores hacia cuarto de secado, aquí interactúa con el aserrín que se encuentra con elevado porcentaje de humedad. El aire húmedo debe permanecer cierta cantidad de tiempo en el cuarto (hasta su punto máximo de saturación), y posteriormente ser evacuado para que permita nuevamente el ingreso del aire seco repitiendo el proceso hasta obtener la humedad deseada.

Para determinar el tiempo de permanencia del aire húmedo es necesario usar el diagrama psicrométrico que nos permite determinar la humedad específica del aire en función de la humedad relativa y las temperaturas en el cuarto (Tabla 4.20)

% HUMEDAD (HR)		ΔT (°C)		Humedad específica w
HR inicial	48	Temp aire ΔT_{a1}	15°C	0.0067 Kg H ₂ O/Kg Aire seco
HR final	12	Temp vapor ΔT_w	40°C	0.007 Kg H ₂ O/Kg Aire seco

Tabla 4.21 Humedad específica @ %HR y ΔT especificadas
(Fuente: El Autor.)

El flujo volumétrico del aire húmedo se obtiene partiendo de la ecuación que define su comportamiento.

$$w_2 - w_1 = \frac{\dot{q}_w}{\dot{q}_{a1}}$$

Ecuación 4.54 Flujo volumétrico del aire húmedo
(Fuente: Termodinámica de Cengel.)

$$\dot{q}_w = 9474.86 \frac{m^3}{h} (7E^{-3} - 6.67E^{-3})$$

$$\dot{q}_w = 3.126 \frac{m^3}{h}$$

El volumen que ocupara el aire húmedo en el interior del cuarto será la diferencia entre el volumen del cuarto y el volumen que ocupa el aserrín:

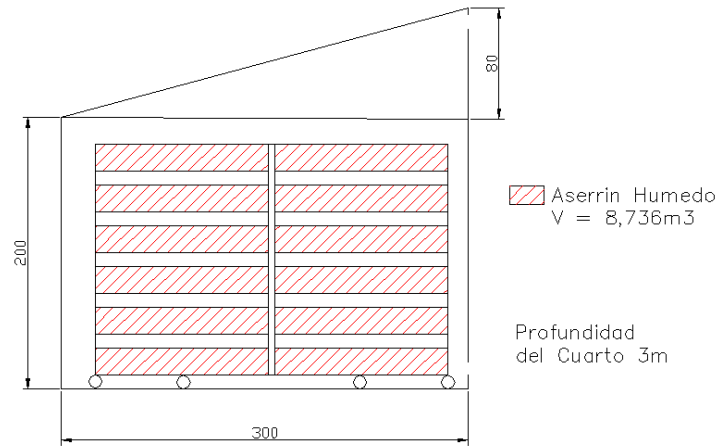


Figura 4.47 Volumen que ocupa el aire húmedo
(Fuente: El Autor)

$$V_{\text{cuarto}} = (3m \cdot 3m \cdot 2m) + \left(\frac{0.8m \cdot 3m}{2} \cdot 3m \right)$$

$$V_{\text{cuarto}} = 21.6m^3$$

El volumen neto por donde circulara el aire húmedo será:

$$V_w = 21.6m^3 - 8.736m^3$$

$$V_w = 12.864m^3$$

En consecuencia el tiempo que el aire húmedo (saturado) permanecerá en el cuarto antes de su renovación es

$$t = \frac{12.864m^3}{3.126 \frac{m^3}{h}}$$

$$t = 4.114h \approx 4h$$

4.4.18 TIEMPO DE RENOVACION DE AIRE SECO

Para la renovación del aire se dispone de dos ventilas ubicadas en la parte superior de la pared posterior del cuarto, estas ventilas permitirán que ingrese el aire seco del exterior para que posteriormente se caliente y elimine la humedad del aserrín completando de esta manera su ciclo de secado.

Dos ventilas mas de similares dimensiones estarán ubicadas en la parte inferior, estas permitirán evacuar el aire húmedo. Tanto las ventilas superiores como inferiores se deben abrir al mismo tiempo para renovar el aire en el interior del cuarto de secado.

El tiempo de renovación de aire seco depende del área de las ventanas por donde ingresara el aire, para ello Se dispone de dos ventanas de 15cm x 15cm cada una.



Figura 4.48 Ventanas para ingreso y extracción de aire
(Fuente: El Autor)

La velocidad del viento en la ciudad de Cuenca es 1,6m/s, esta será la velocidad con la que el aire ingresa al cuarto de secado.³⁹

$$A_{ventanas} = 2 \cdot (0,15m \cdot 0,15m)$$

$$A_{ventanas} = 0,045m^2$$

El caudal de ingreso del aire de renovación será

$$\dot{q}_{renovacion} = v_{aire} \cdot A_{ventanas}$$

Ecuación 4.55 Flujo volumétrico del aire seco de renovación
(Fuente: Termodinámica de Cengel.)

³⁹ CUENCAIRE, “Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Cuenca”. Cuenca-Ecuador 2007.

$$\dot{q}_{renovacion} = 1,6 \frac{m}{s} \bullet 0,045 m^2$$

$$\dot{q}_{renovacion} = 0,072 \frac{m^3}{s}$$

El volumen del aire requerido para llenar el cuarto de secado es $12,854 m^3$, por lo tanto el tiempo de renovación del aire será:

$$t_{renovacion} = \frac{\text{Volumen de aire que ocupa el cuarto}}{\dot{q}_{renovacion}}$$

$$t_{renovacion} = \frac{12,864 m^3}{0,072 \frac{m^3}{s}}$$

$$t_{renovacion} = 178,67 s = 2,97 \text{ min}$$

$$t_{renovacion} \approx 3 \text{ min}$$

4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE PELETIZACION

En el capítulo 3 se indicó, el fundamento teórico del sistema del peletizado que básicamente se refiere al proceso de compactación de material lignocelulósico. En esta etapa del proyecto se diseñaran cada uno de los componentes principales de la peletizadora (Fig. 4.49), partiendo de la capacidad de alimentación del aserrín proveniente del sistema de cribado.

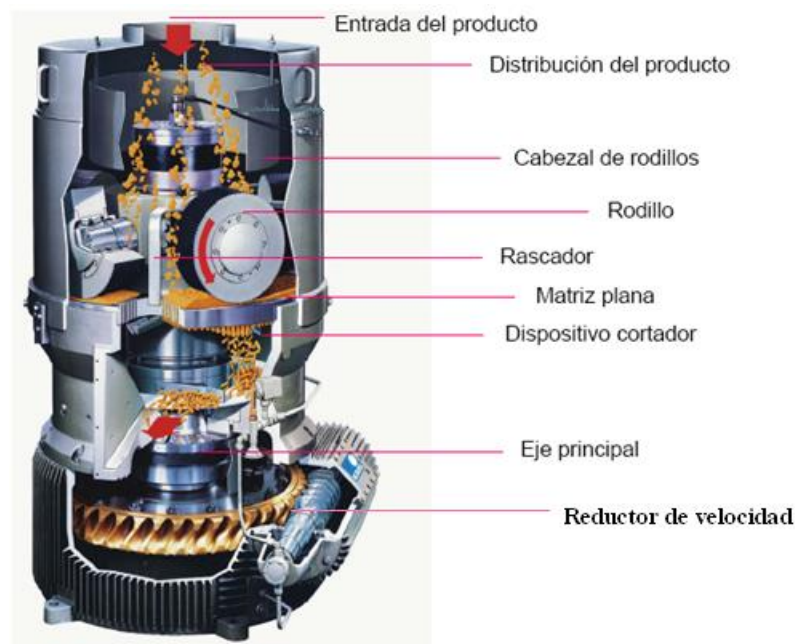


Figura 4.49 Máquina Peletizadora con Matriz Plana.
(Fuente: <http://www.Inderfor S. A.>)

4.5.1 CONSIDERACIONES INICIALES

- Según la Norma CEN/TS 14691: Certificación Europea para biocombustibles sólidos (Anexo2), fue seleccionado un pellet de diámetro 6 mm considerando que es el menos propenso a desmenuzamiento a granel.
- Las características del avellanado cónico de los agujeros de la matriz son importantes, porque un avellanado cónico demasiado profundo puede transmitir un efecto de pre compresión a la matriz, con riesgo de atascamiento y de bloqueo sobre todo en las primeras horas de trabajo. El avellanado normalmente tiene una conicidad de 55 - 60°. ⁽⁴⁰⁾

⁴⁰ <http://www.lamec-pellets.com>

- En base a la bibliografía de varios autores, se ha demostrado que para obtener buenos registros de compactación de pellets, las presiones oscilan entre 1100 y 2500 Kg/cm² (188 Mpa – 295 Mpa).⁴¹
- Partiendo del análisis del esquema de tamizado se determino que el flujo másico de aserrín que ingresan al proceso de peletizado es:

$$\text{Flujo Masico del Aserrin} = 1220 \frac{\text{Kg}}{h}$$

4.5.2 CALCULO DEL PELLET

Longitud del Pellet.

La longitud del pellet se determina en base a las especificaciones de la Norma CEN/TS 14691.

Para pellet con $\varnothing = 6\text{mm}$

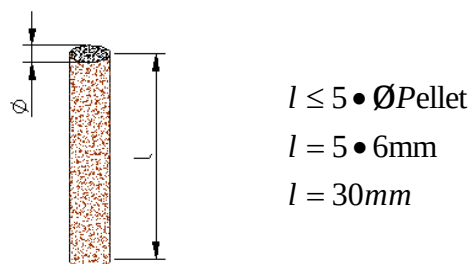


Figura 4.50 Dimensiones del Pellet.
(Fuente: El Autor.)

Volumen de cada pellet.

En base a las del pellet se determina su volumen unitario.

$$V_{\text{Pellet}} = \pi \bullet r^2 \bullet l$$

$$V_{\text{Pellet}} = \pi \bullet 0.003\text{m}^2 \bullet 0.03\text{m}$$

$$V_{\text{Pellet}} = 8.48\text{E}^{-7}\text{m}^3$$

⁴¹ <http://www.teembioenergi.se> Leaver, R. (1970)

Relación de compresión.

Es la relación que existe entre el espesor efectivo de compresión y el diámetro del hueco, esta relación determina el grado de compactación del aserrín.

$$Rc = \frac{1}{d/l}$$

Ecuación 4.56 Relación de compresión del aserrín.

(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002)

$$Rc = \frac{1}{6mm/30mm}$$

$$Rc = 5$$

Volumen de aserrín necesario para cada pellet.

El volumen necesario de aserrín para formar un pellet es:

$$V_{Aserrin} = V_{Pellet} \cdot Rc$$

$$V_{Aserrin} = 8.48E^{-7} m^3 \cdot 5$$

$$V_{Aserrin} = 4.24E^{-6} m^3$$

Densidad del pellet.

La densidad del aserrín se modifica debido a la compresión dando como resultado la densidad del pellet.

$$\rho_{Pellet} = \rho_{Aserrin} \cdot Rc$$

$$\rho_{Pellet} = 250 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5$$

$$\rho_{Pellet} = 1250 \frac{Kg}{m^3}$$

4.5.3 COMPRESION DEL ASERRIN

Los rodillos de presión son los encargados de comprimir el aserrín dentro de los agujeros o dados que contiene la matriz circular plana. En este proceso de

compresión se generan presiones y fuerzas en el interior del dado, las mismas que dependerán de varios factores que posteriormente serán analizados.

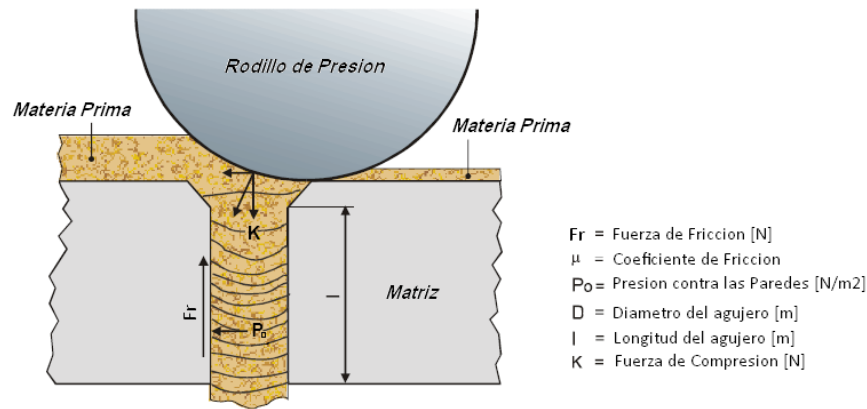


Figura 4.51 Fuerzas de compresión del aserrín.

(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002)

Presión de compactación del aserrín.

La presión con la cual se comprime en el aserrín en el interior de cada uno de los dados de la matriz está en función de la clasificación de la madera y la deformación que se produce en la extrusión del material.

La presión de compactación del aserrín equivale la presión que debe ejercer el rodillo para formar el pellet.

$$P_{Rodillo} = \overline{Y}_f \bullet \varepsilon_x$$

Ecuación 4.57 Presión de compactación del aserrín.

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$\overline{Y}_f$ Esfuerzo de fluencia promedio de la madera durante la deformación, (Anexo 4.18).

ε_x Deformación de extrusión.

A su vez la deformación de extrusión depende de la relación de compresión y los ángulos de avellanado que tengan los agujeros de la matriz.

$$\varepsilon_x = a + b \bullet \ln(Rc)$$

Ecuación 4.58 Deformación de extrusión

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

a - b Constantes empíricas para el ángulo del dado (extraídas del anexo 4.19)

Para un ángulo (50° - 60°)	
a	0,8 - 0,9
b	1,2 - 1,5

Tabla 4.22 Constantes empíricas para el ángulo del dado
(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

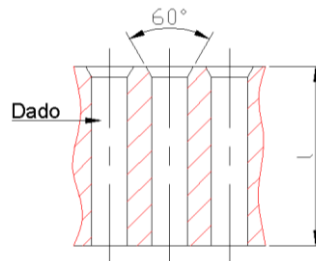


Figura 4.52 Ángulo de entrada del Dado.
(Fuente: El Autor.)

$$\varepsilon_x = 0.9 + 1.5 \cdot \ln(5)$$

$$\varepsilon_x = 3.314$$

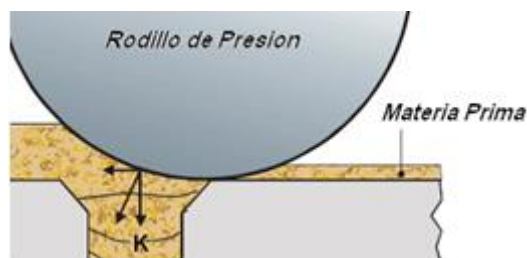
$$P_{Rodillo} = 60 \text{ Mpa} \cdot 3.314$$

$$P_{Rodillo} = 199 \text{ MPa} \approx 200 \text{ MPa}$$

La presión de compresión teórica del aserrín que se calculó justificadamente se encuentra en el intervalo dentro del cual se dan buenos registros de pellets (188 Mpa – 295 Mpa).

4.5.4 FUERZA DE COMPACTACION DEL RODILLO (K)

La fuerza que el rodillo debe ejercer sobre el dado de la matriz es:



$$K = P_{Rodillo} \cdot A_{dado}$$

$$K = 200 \text{ Mpa} \cdot \pi \cdot (0.003 \text{ m})^2$$

$$K = 5654.87 \text{ N}$$

Figura 4.53 Fuerzas de compresión del aserrín.
(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002)

4.5.5 FUERZA Y PRESION EN EL DADO

Cuando el material ingresa a la cámara de peletización se forma una capa con una altura inicial h_0 , que después de pasar por el área de trabajo del rodillo se reducirá a una altura final h_f (Fig. 4.54).

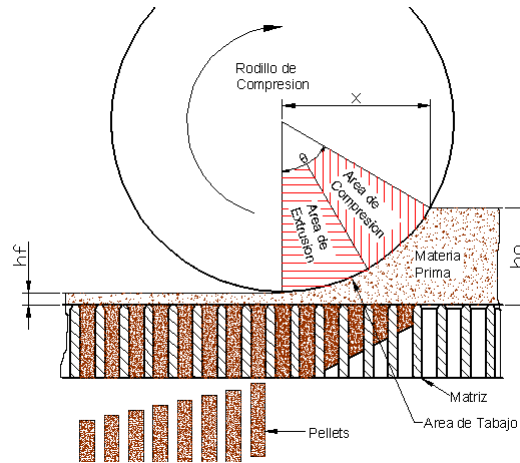


Figura 4.54 Zona de compresión del aserrín.
(Fuente: El Autor).

La fricción originada por el contacto entre el material a peletizar y el dado de la matriz genera una fuerza opuesta a la que produce el rodillo.

Por esta razón los rodillos deben generar una presión extra, de tal manera que se pueda superar la fuerza de fricción para que salgan los pellets.

$$P_f = \overline{Y}_f \frac{2h_f}{D}$$

Ecuación 4.59 Presión adicional para superar la fricción.
(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002).

P_f Presión adicional requerida para superar la fricción, (Mpa)

h_f Altura final del material luego de pasar por el área de trabajo del rodillo. La distancia mínima entre la matriz y los rodillos debe ser 0,2 – 0,3 mm. ⁽⁴²⁾

D Diámetro del pellet

⁴² <http://www.lamec-pellets.com>

El esfuerzo de fluencia promedio de la madera durante la deformación Y_f para distintos tipos de madera es (Anexo 4.18) $\overline{Y_f} = 60\text{Mpa}$

$$P_f = 60\text{Mpa} \cdot \frac{2(0.0002\text{m})}{0.006\text{m}}$$

$$P_f = 4\text{Mpa}$$

Presión en las paredes del dado.

La presión que se genera en el interior de las paredes del dado (Fig. 4.55) debido a la fuerza de fricción entre ambos materiales se puede determinar mediante la ecuación 4.60.

$$P_o = \frac{p_f \cdot D}{4 \cdot \mu \cdot h_f}$$

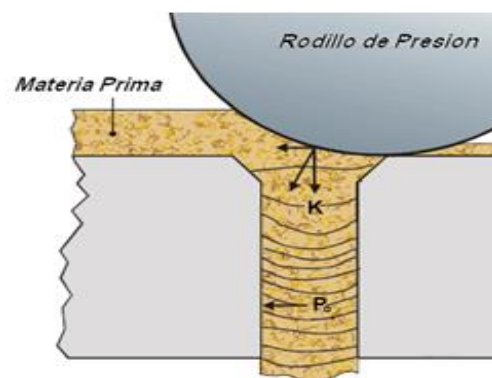
Ecuación 4.60 Presión en las paredes del dado de la matriz.
(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

P_o Presión del material comprimido contra la pared del contenedor

D Diámetro del pellet

μ Coeficiente de fricción entre la madera y el acero

h_f Altura inicial del material antes de pasar por el área de trabajo del rodillo



$$P_o = \frac{4\text{Mpa} \cdot 0.006\text{m}}{4 \cdot 0.7 \cdot 0.0002\text{m}}$$

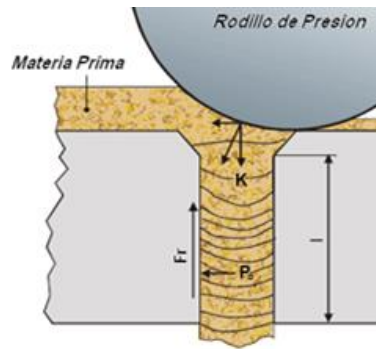
$$P_o = 42.9\text{Mpa}$$

Figura 4.55 Presión en la pared del Dado.

(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002)

Fuerza de fricción en el interior del dado.

La fuerza de fricción entre el dado de peletización y el aserrín deber ser tal que permita que el material se compacte en el interior del dado, pero a su vez debe ser menor a la fuerza ejercida por el rodillo para que el pellet pueda salir de la matriz.



$$F_R = \mu \cdot P_o \cdot D \cdot l$$

$$F_R = 0.7 \cdot P42.9MPa \cdot 0.006m \cdot 0.03m$$

$$F_R = 5400N$$

Figura 4.56 Fuerza de Fricción en el Interior del Dado.

(Fuente: <http://www.city.north-bay.on.ca> "Technical Research Center of Finland 2002)

Comparamos los dos valores y comprobamos que efectivamente esta condición se cumple.

$$F_R < K$$

$$5400N < 5654.87N$$

4.5.6 DIMENSIONES DEL RODILLO

El radio del rodillo de compactación se puede calcular a partir de la ecuación 4.61

$$h_o - h_f = \mu^2 \cdot r$$

Ecuación 4.61 Radio del rodillo en función del material.

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

μ Coeficiente de fricción entre la madera y el acero.

r Radio del Rodillo de compactación

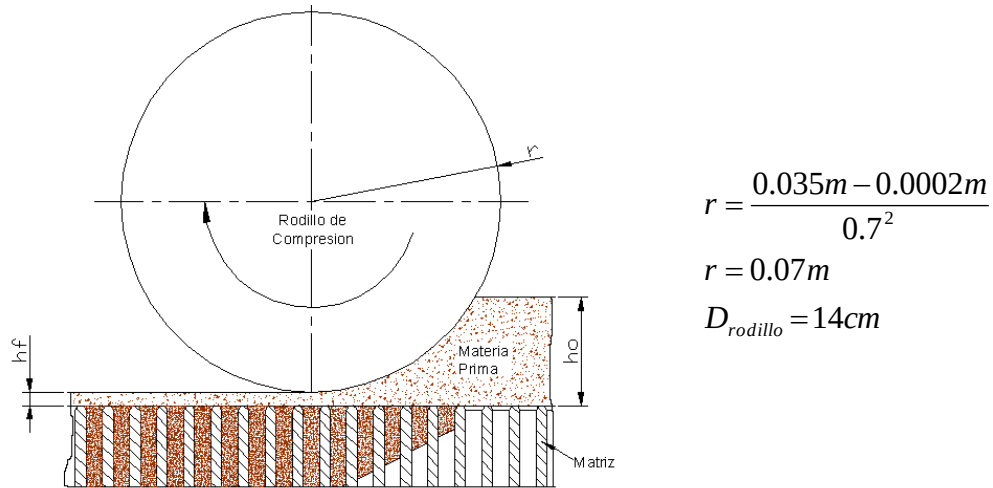


Figura 4.57 Diámetro del Rodillo de Compactación.

(Fuente: El Autor.)

El ancho del rodillo de compactación, para este proyecto será considerado como la mitad de su diámetro.

$$a_{rodillo} = \frac{D_{rodillo}}{2}$$

$$a_{rodillo} = \frac{14cm}{2}$$

$$a_{rodillo} = 7cm$$

Velocidad del rodillo.

La velocidad de giro del rodillo está en función de de su masa y la aceleración normal que se produce durante su trabajo.

Masa del rodillo.

Los rodillos de compresión son de acero por lo tanto:

$$m_{rodillo} = V_{rodillo} \cdot \rho_{acero}$$

$$m_{rodillo} = (\pi \cdot r^2 \cdot a_{rodillo}) \cdot \rho_{acero}$$

$$m_{rodillo} = (\pi \cdot 0.07m^2 \cdot 0.07m) \cdot 7850 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{rodillo} = 8.46Kg$$

Aceleración normal del rodillo.

La aceleración que se produce por el giro de los rodillos está en función a las fuerzas de compresión y fricción que se calcularon anteriormente.

$$an_{rodillo} = \frac{K - Fr}{m_{rodillo}}$$

Ecuación 4.62 Aceleración normal del rodillo
(Fuente: HIBBELER, R.C DINAMICA. Prantice Hall 2006)

$$an_{rodillo} = \frac{5654.86 \frac{Kg \cdot m}{seg^2}}{8.46 Kg}$$

$$an_{rodillo} = 668.51 \frac{m}{seg^2}$$

Velocidad tangencial del rodillo.

La velocidad tangencial del rodillo se determina a partir de la ecuación:

$$v_{rodillo} = \sqrt{an_{rodillo} \cdot r}$$

Ecuación 4.62 Aceleración normal del rodillo
(Fuente: HIBBELER, R.C DINAMICA. Prantice Hall 2006)

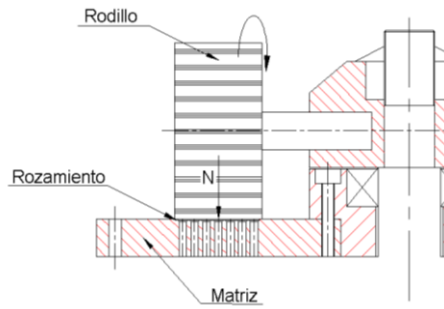
$$v_{rodillo} = \sqrt{668.51 \frac{m}{seg^2} \cdot 0.07m}$$

$$v_{rodillo} = 6.84 \frac{m}{s}$$

Fuerza de fricción de los rodillos.

El giro de los rodillos sobre la matriz circular origina una fuerza de fricción entre el material y los rodillos, el mismo que se determina mediante la siguiente ecuación.

$$F_{F_{rodillos}} = N \cdot \mu$$



$$F_{F_{rodillos}} = m \cdot g \cdot \mu$$

$$F_{F_{rodillos}} = 8.46 \text{ Kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.7$$

$$F_{F_{rodillos}} = 58.08 \text{ N}$$

Figura 4.58 Fuerza de Rozamiento entre el Rodillo y la Matriz.
(Fuente: El Autor.)

Calculo de la fuerza total de los rodillos.

La fuerza total del rodillo se determina en base a la fuerza de fricción y a la fuerza de compactación de los rodillos.

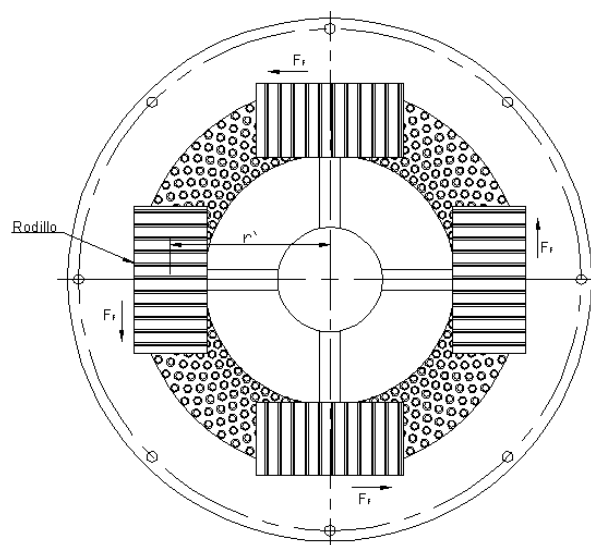
$$F_{T_{RODILLOS}} = F_{F_{rodillos}} + K$$

$$F_{T_{RODILLOS}} = 58.08 \text{ N} + 5654.86 \text{ N}$$

$$F_{T_{RODILLOS}} = 5712.95 \text{ N}$$

Torque originado por los rodillos.

La velocidad de giro del eje principal provoca que la masa de los rodillos generen un torque debido a la inercia que captan.



$$T_{Rodillos} = F_{T_{RODILLOS}} \cdot r'$$

Figura 4.59 Esquema de Torque de los Rodillos.
(Fuente: El Autor.)

$$T_{\text{Rodillos}} = 5712.95N \bullet 0.152m \bullet 4\text{Rodillos}$$

$$T_{\text{Rodillos}} = 3473.47 N.m$$

4.5.7 CALCULO DE LA MATRIZ

Velocidad del eje principal.

El eje principal acoplado a la transmisión sin fin corona transfiere la velocidad a los rodillos. Al estar en contacto los rodillos con la matriz circular, estarán relacionados mediante su velocidad tangencial, a partir de ésta se puede determinar la velocidad de giro de la matriz reflejada como la velocidad del eje principal para la compactación.

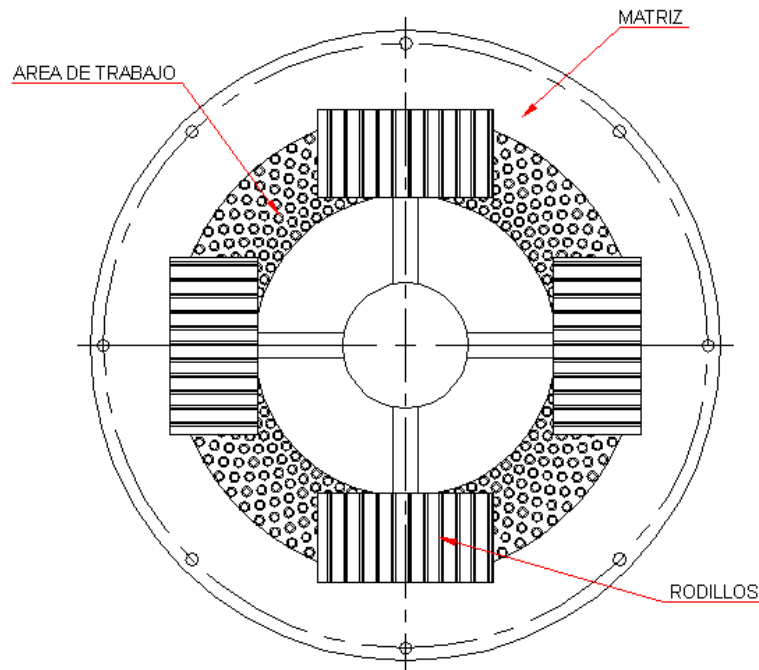


Figura 4.60 Esquema de los rodillos de compresión y matriz principal.
(Fuente: El Autor).

La velocidad angular de la matriz circular es:

$$\omega = \frac{v}{R}$$

$$\omega = \frac{6.84 \text{ m/s}}{0.25 \text{ m}}$$

$$\omega = 27.36 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 261.29 \text{ rpm}$$

Desplazamiento angular del área de trabajo.

La longitud del desplazamiento angular del área de trabajo del rodillo se puede determinar a partir de la *ecuación 4.63*

$$X \approx \sqrt{r \bullet (h_o - h_f)}$$

Ecuación 4.63 Longitud del desplazamiento angular del rodillo

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$X \approx \sqrt{0.07m \bullet (0.035m - 0.0002m)}$$

$$X \approx 0.049m \approx 0.05m$$

El ángulo del área de trabajo del rodillo es el área en donde el material será comprimido poco a poco hasta que finalmente se extruye (Fig. 4.49):

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$$

Ecuación 4.64 Angulo de desplazamiento del rodillo

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.05m}{0.07m}\right)$$

$$\theta = 35.537^\circ = 0.62 \text{ rad}$$

Tiempo de salida de los pellets.

En función del ángulo del área de trabajo del rodillo y la velocidad angular de la matriz principal que se determinaron anteriormente, se obtienen el tiempo de extrusión o tiempo de salida de cada pellet.

$$t_{extrusion} = \frac{\theta}{\omega}$$

$$t_{extrusion} = \frac{0.62rad}{27.36rad/s} = 0.0226seg$$

Aceleración en el interior del dado de la matriz.

Cuando el rodillo pasa por cada sector de la matriz plana, el material es forzado a pasar por los agujeros, por lo tanto adquiere valores de aceleración y velocidad que a la final nos ayudara a determinar el número de agujeros que debe tener la matriz para cumplir con la capacidad de la maquina.

$$K - Fr = m_{aserrin} \bullet a_{extrusion}$$

Ecuación 4.65 Fuerza de extrusión de un pellet

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$a_{extrusion} = \frac{5654.86N - 5400N}{1220Kg}$$

$$a_{extrusion} = 0.208 \frac{m}{s^2}$$

Velocidad de extrusión del pellet.

En base a las ecuaciones cinemáticas de velocidad lineal se determina la velocidad de extrusión de los pellets.

$$v_{extrusion} = v_o + a_{extrusion} \bullet t_{extrusion}$$

Ecuación 4.66 velocidad de extrusión de un pellet

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$v_{extrusion} = 0 + 0.208 \frac{m}{s^2} \bullet 0.0226s$$

$$v_{extrusion} = 0.0047 \frac{m}{s}$$

Flujo volumétrico de peletizado.

En base a capacidad de producción de la peletizadora se determina el flujo volumétrico del material a la salida de la maquina.

$$Q = 1220 \frac{Kg}{h} \cdot \gamma_{pellet}$$

$$Q = 1220 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1m^3}{1250Kg} = 0.976 \frac{m^3}{h} = 0.000271 \frac{m^3}{s}$$

Número de agujeros de extrusión.

El número de agujeros que la matriz debe tener para alcanzar la capacidad de producción establecida se determina en función de la ecuación del flujo volumétrico de donde se despeja el valor que se necesita.

Para obtener el numero de agujeros de acuerdo al flujo volumétrico calculado se realizó un proceso iterativo en base a la al número de rodillos necesarios.

$$Q = (v_{extrusion} \cdot \#Rodillos) \cdot (A_{dado} \cdot \#Agujeros)$$

Ecuación 4.67 Flujo volumétrico de un pellet

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$\#Agujeros = \frac{0.000271 \frac{m^3}{s}}{\left(0.00473 \frac{m}{s} \cdot 4Rodillos \right) \cdot (\pi \cdot 0.003m^2)}$$

$$\#Agujeros = 506.42$$

Finalmente se determino que con 4 rodillos y 507 agujeros en la matriz plana se obtiene el flujo volumétrico deseado (Capacidad Producción de la peletizadora).

4.5.8 CALCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA LA COMPACTACION

La potencia total de la peletizadora se calcula en base a la fuerza que requiere cada rodillo para comprimir el material y a la velocidad de giro de la matriz principal.

$$P = 2\pi \cdot rpm_{matriz} \cdot K \cdot X$$

Ecuación 4.68 Potencia de la peletizadora

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$P = 2\pi \cdot 261.29rpm \cdot \left(\frac{1min}{60s}\right) \cdot (4Rodillos \cdot 5654.86N) \cdot 0.05m$$

$$P = 30548.11 \text{ w} \approx 41Hp$$

4.5.9 SISTEMA DE TRANSMISION

Las transmisiones sin fin- corona se emplean generalmente para transmitir potencias pequeñas y medianas, que no rebasan los 60 KW, además en un pequeño espacio se pueden obtener satisfactoriamente relaciones de velocidad comparativamente altas.⁴³ Por estas razones se ah elegido esta transmisión para dar movimiento al eje principal de la maquina q a su vez se acopla con los rodillos de presión.

Los tornillos sinfín se fabrican, generalmente, de aceros al carbono de contenido medio (contenido de 0,40 a 0,50 % C) y de aceros de baja aleación al Cr o Cr-Ni.

Las coronas de las ruedas sinfín se fabrican preferiblemente de bronce, cuya composición depende de la velocidad de deslizamiento y del esfuerzo de la transmisión.⁴⁴

Calculo de la transimison.

Para el diseño de la transmision, fundamentandonos en la base teoria y con los datos iniciales conocidos, se procedio a realizar el calculo.

Datos iniciales

$$n_1 = 1750rpm$$

$$n_2 = 262rpm$$

⁴³ - ⁴⁴ <http://www.wikipedia.org/wiki/Engranajes>

Angulo de Presion $\phi = 25^\circ$

Distancia entre centros $C = 180mm$ (7.08in)

modulo = 8

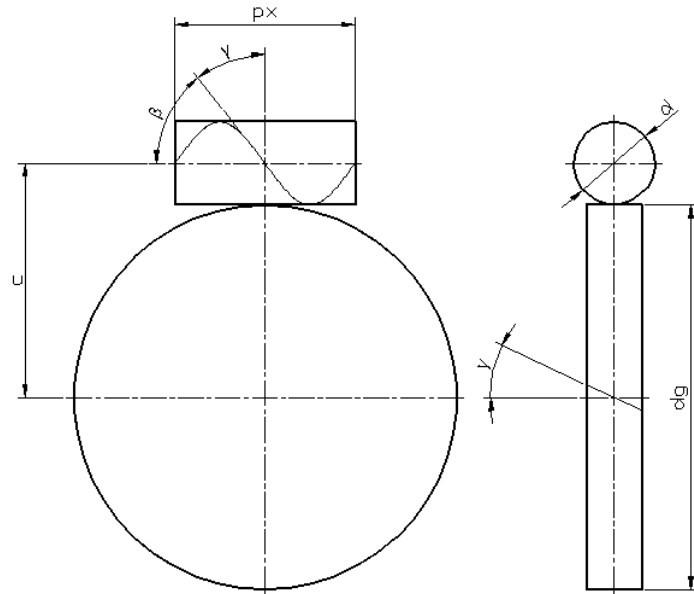


Figura 4.61 Análisis de la transmisión sin fin - corona.
(Fuente: El Autor).

Relación de transmisión.

La relación entre las velocidades de entrada y salida está dado mediante la siguiente expresión:

$$m_G = \frac{n_1}{n_2}$$

$$m_G = \frac{1750rpm}{262rpm} = 6.68$$

Diámetro del tornillo sin fin.

Mediante la ecuación empírica 4.69 se puede determinar el diámetro del tornillo sin fin.

$$d \cong \frac{C^{0.875}}{2.2}$$

Ecuación 4.69 Diámetro del tornillo sin fin
(Fuente: NORTON, Robert, “Diseño de Maquinas”, México 1999)

$$d \cong \frac{7.08^{0.875}}{2.2}$$

$$d \cong 2.52in \approx 64.053mm$$

Diámetro de la corona.

De la ecuación empírica 4.70 se puede determinar el diámetro adecuado de la rueda helicoidal.

$$d_g = 2C - d$$

Ecuación 4.70 Diámetro de la corona
(Fuente: NORTON, Robert, “Diseño de Maquinas”, México 1999)

$$d_g = 2(7.08) - 22.52$$

$$d_g = 11.65 in \approx 295.94mm$$

Longitud de avance del tornillo sin fin.

El avance del tornillo sin fin es:

$$L = \pi \cdot d_g \cdot \frac{N_w}{N_g}$$

Ecuación 4.71 avance del tornillo
(Fuente: NORTON, Robert, “Diseño de Maquinas”, México 1999)

$$L = \pi \cdot 11.65in \cdot \frac{1}{6.68}$$

$$L = 5.465 in \approx 138.8mm$$

Angulo de avance y de pendiente de la hélice.

Cuando los ejes se cortan 90° el ángulo de la hélice de la rueda es $\gamma = \beta$. La inclinación del dentado es del mismo sentido en el piñón y la rueda.

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{L}{\pi \bullet d}$$

Ecuación 4.72 Angulo de avance del tornillo

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{5.465in}{\pi \bullet 2.52in}$$

$$\gamma = \beta = 34.6^\circ \approx 35^\circ$$

γ Angulo de avance de la hélice

β Angulo de inclinación de la hélice

Ancho de la corona

El ancho de la cara de la rueda helicoidal está limitado por el diámetro del tornillo sin fin. AGMA recomienda un valor máximo para el ancho de cara como:

$$a_{\max} \cong 0.67d$$

Ecuación 4.73 Ancho de cara de la corona

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$a_{\max} \cong 0.67 \bullet (2.52)$$

$$a_{\max} \cong 1.689in \approx 43mm$$

Numero de dientes de la corona.

En base al diámetro de la corona y al modulo se determina el numero de dientes de la corona.

$$Z = \frac{d_g}{m}$$

Ecuación 4.84 Numero de dientes de la corona.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$Z = \frac{295.94mm}{6}$$

$$Z = 36.99 \approx 37 \text{ dientes}$$

Número de entradas del tornillo.

Para determinar el número de entradas que debe tener el tornillo igualamos el paso axial del tornillo y el paso circunferencial de la corona.

$$P_x = \frac{L}{N_w} = p_c = \frac{\pi \bullet d_g}{N_g}$$

Ecuación 4.85 Relación de paso del tornillo y la corona.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

P_x Paso axial del tornillo

P_C Paso circunferencial de la corona

N_w Numero de entradas del tornillo

N_g Numero de dientes de la corona

$$N_w = \frac{L \bullet N_g}{\pi \bullet d_g}$$

$$N_w = \frac{5.465in \bullet 37}{\pi \bullet 11.65in}$$

$$N_w = 5.5247 \approx 6 \text{ entradas}$$

Paso del tornillo y de la corona.

Partiendo de la ecuación 4.85 podemos determinar el paso de la corona y el tornillo sin fin

$$P_x = P_C = \frac{\pi \bullet d_g}{N_g}$$

$$P_x = P_C = \frac{\pi \cdot 11.65in}{37}$$

$$P_x = P_C = 0.989in$$

Dimensiones del diente de la corona.

Las dimensiones del diente se pueden calcular a partir del paso circunferencial de la corona como sigue:

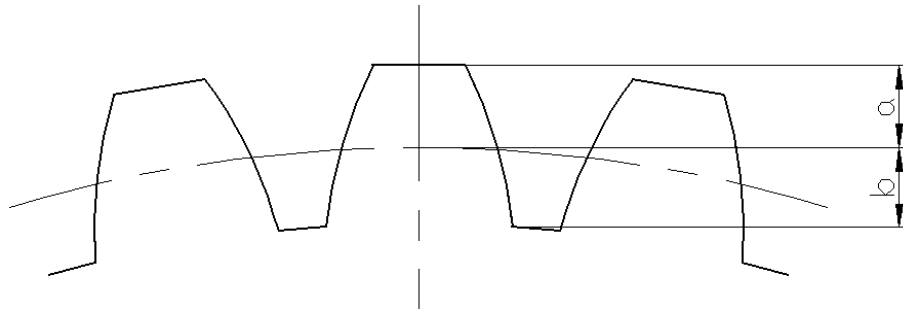


Figura 4.62 Dimensiones del diente de la Corona.
(Fuente: El Autor).

$$a = 0.3183P_C$$

Ecuación 4.86 Altura de la cabeza.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$a = 0.3183 \cdot 0.989in$$

$$a = 0.314in \approx 7.8mm$$

$$b = 0.3683P_C$$

Ecuación 4.87 Altura de la raíz.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$b = 0.3683 \cdot 0.989in$$

$$b = 0.3642in \approx 9.2mm$$

La altura del diente será la sumatorias de las alturas calculadas anteriormente.

$$h_{diente} = 7.8mm + 9.2mm$$

$$h_{diente} = 17mm$$

4.5.10 POTENCIA DE ENTRADA

Factor del material (C_s).

El factor de material definido por la AGMA para el bronce es:

Si $C < 8 \text{ in}$

$$C_s = 1000$$

Factor de corrección de razón (C_m).

El factor de corrección de de razón definido por la AGMA será:

Si $3 < m_G \leq 20$

$$C_m = 0.0200\sqrt{-m_G^2 + 40m_G - 76} + 0.46$$

Ecuación 4.74 Factor de corrección de razón
(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$C_m = 0.0200\sqrt{-6.68^2 + 40(6.68) - 76} + 0.46$$

$$C_m = 0.702$$

Velocidad tangencial (V_t).

La velocidad tangencial en el diámetro de paso del tornillo sin fin es:

$$V_t = \frac{\pi \cdot n_1 \cdot d}{12 \cos \psi}$$

Ecuación 4.75 Velocidad tangencial
(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$V_t = \frac{\pi \cdot 1750 \text{rpm} \cdot 2.52 \text{in}}{12 \cdot \cos(35)}$$

$$V_t = 1410.43 \text{ fpm} \approx 7.16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Factor de velocidad (Cv).

El factor de velocidad definido por la AGMA será:

Si $700 < V_t \leq 3000 \text{ fpm}$

$$C_v = 13.31 \cdot V_t^{-0.571}$$

Ecuación 4.76 Factor de velocidad

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$C_v = 13.31 \cdot 1410.43^{-0.571}$$

$$C_v = 0.211$$

Carga tangencial (W_{tg}).

La carga tangencial sobre la rueda helicoidal se determina a partir de:

$$W_{tg} = C_s \cdot C_m \cdot C_v \cdot d_g^{0.8} a_{\max}$$

Ecuación 4.77 Carga tangencial

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$W_{tg} = 1000 \cdot (0.702) \cdot (0.211) \cdot (11.65 \text{ in})^{0.8} \cdot 1.689 \text{ in}$$

$$W_{tg} = 1792.44 \text{ lb} \approx 7.97 \text{ KN}$$

Coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción en un acoplamiento de engrane sin fin no es constante. En función de la velocidad la AGMA propone la siguiente relación.

$$\mu = 0.103e^{(-0.110V_t^{0.450})} + 0.012$$

Ecuación 4.78 Coeficiente de fricción.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$\mu = 0.103e^{(-0.110(1410.43)^{0.450})} + 0.012$$

$$\mu = 0.0178$$

Fuerza de fricción (Wf).

La fuerza de fricción sobre la rueda es:

$$W_f = \frac{\mu \bullet W_{tg}}{\cos \psi \bullet \cos \phi}$$

Ecuación 4.79 Fuerza de fricción.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$W_f = \frac{0.0178 \bullet 1792.44lb}{\cos(35) \bullet \cos(25)}$$

$$W_f = 43lb$$

Potencia nominal de salida.

La potencia de salida se define según la ecuación 4.80.

$$\Phi_o = \frac{N_1 \bullet W_{tg} \bullet d_g}{126000 \bullet m_G}$$

Ecuación 4.80 Fuerza de fricción.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$\Phi_o = \frac{1750rpm \bullet 1792.44lb \bullet 11.65in}{126000 \bullet (6.68)}$$

$$\Phi_o = 40.93Hp$$

Potencia de pérdida en el acoplamiento.

La potencia perdida por fricción en el acoplamiento se define por:

$$\Phi_l = \frac{Vt \bullet W_f}{33000}$$

Ecuación 4.81 Potencia perdida en el acoplamiento.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$\Phi l = \frac{1410.43 \text{ fpm} \bullet 43 \text{ lb}}{33000}$$

$$\Phi l = 1.83 \text{ Hp}$$

Potencia de entrada nominal.

La potencia de entrada nominal se determina a partir de:

$$\Phi = \Phi_o + \Phi l$$

Ecuación 4.82 Potencia nominal de entrada.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$\Phi = 40.93 \text{ Hp} + 1.83 \text{ Hp}$$

$$\Phi_o = 42.76 \text{ Hp}$$

Eficiencia del engrane.

La eficiencia de la corona es:

$$e = \frac{\Phi_o}{\Phi l}$$

Ecuación 4.83 Eficiencia del engrane.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$e = \frac{40.93 \text{ Hp}}{42.76 \text{ HP}}$$

$$e = 0.957 = 95.7\%$$

Par nominal de torsión de salida.

$$T_g = W_g \frac{d_g}{2}$$

Ecuación 4.83 Par de torsión a la salida.

(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$T_g = 1792.44lb \frac{11.65in}{2}$$

$$T_g = 10442.25 lb - in \approx 1179.81N - m$$

4.5.11 DISEÑO DE LAS CUCHILLA DE CORTE

Cuando el rodillo ha extruido el pellet en su totalidad, alcanzando la longitud de 3cm, inmediatamente un juego de cuchillas giratorias cortan el material, el mismo que cae por gravedad a su posterior proceso de enfriado.

Las cuchillas están acopladas al eje principal de la peletizadora, por lo tanto posee el misma velocidad de giro (261 rpm). Para que las cuchillas corten los pellets del largo especificado, deben estar ubicadas aproximadamente 5° con respecto al eje del rodillo (Fig. 4.63).

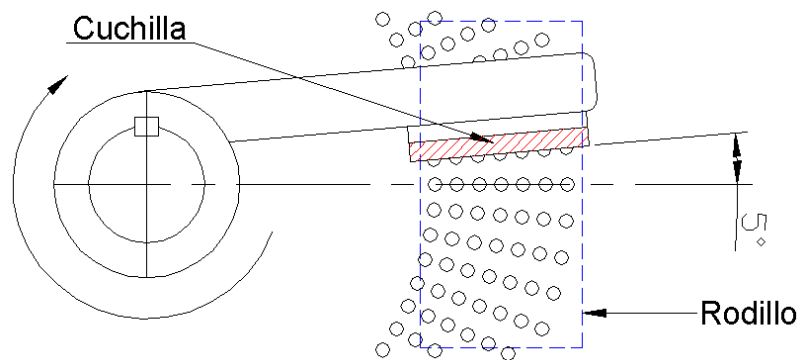


Figura 4.63 Detalle de una cuchilla de corte.
(Fuente: El Autor).

El ángulo de incidencia tiene como misión disminuir el rozamiento entre la herramienta y el material, su valor oscila entre 6° y 10°, dependiendo del material de la herramienta y el material que se trabaja.⁴⁵

Los materiales que generalmente se utilizan para las cuchillas de corte son aceros con una dureza aproximada de 62-64 HRC, tal como se observa en la tabla 4.21.

Dentro de esta categoría se encuentran las cuchillas de acero rápido(HSS) al 18 por ciento, que se caracterizan por ser más duras y por ofrecer un corte que dura hasta

⁴⁵ <http://www.espatentes.com>

cinco veces más que las utilizadas en trabajos de carpintería que no requieren de procesos en serie; razón por la cual son ideales para trabajar maderas duras.⁴⁶

Aplicación	Aceros marca BOHLER	Dureza HRC
Cuchillas para cepillar listones	K105	58-60
	K110	58-60
	S600	62-64
Cuchillas para cortar chapas de madera	K460	K460
	K720	K720
Puntas marcadoras	S600	62-64
Cuchillas para cortar virutas	K455	56-58
	K105	58-60
	K110	58-60
	S600	60-63
Cuchillas cepilladoras para lana de madera	K105	58-60
	K110	58-60
	S600	60-63
Puntas marcadoras para la fabricación de chapas de madera, planchas, viruta y lana de madera	K105	57-59
	K110	57-59
	S600	62-64
Cuchillas descortezadoras	K455	55-58
	K460	55-58
	K720	55-58

Tabla 4.23 Aceros de las cuchillas de corte
(Fuente: <http://www.revista-mm.com>)

Según el diseño propuesto existen 4 rodillos que están ubicados a 90° entre sí, cada rodillo extruira una columna de pellets en cada pasada, en consecuencia también existirán 4 cuchillas que están ubicadas 90° entre sí (Fig. 4.64).

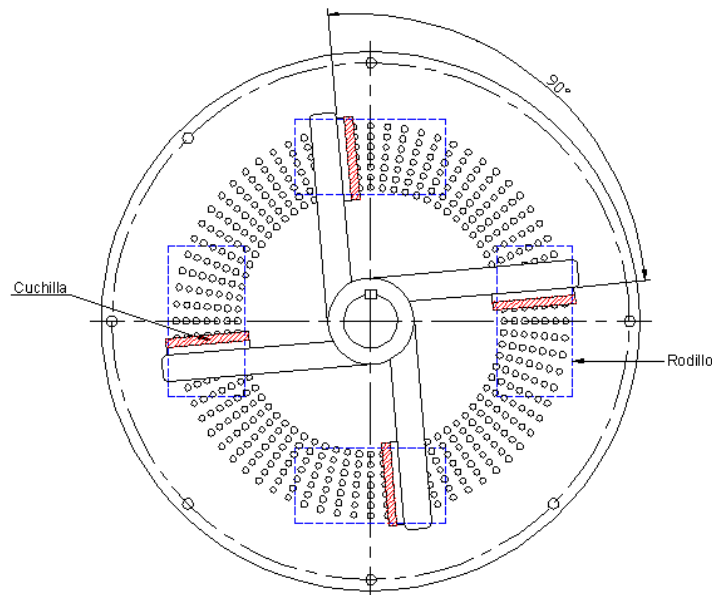


Figura 4.64 Vista inferior de las 4 cuchillas de corte.
(Fuente: El Autor).

⁴⁶ <http://www.orbitalum.com>

Calculo de la fuerza de corte de la cuchilla.

La fuerza de corte de la cuchilla se calcula en función del esfuerzo de corte de la madera (τ_{madera}) que se determino mediante la tabla 4.3.

$$\tau_{madera} = \frac{F_{corte}}{A_{corte}}$$

$$F_{corte} = \tau_{madera} \cdot A_{corte}$$

$$F_{corte} = 1.176Mpa \cdot (2.827E^{-5}m^2) \cdot 7_{agujeros}$$

$$F_{corte} = 232.918N$$

Calculo de la fuerza de fricción de la cuchilla.

Cuando la cuchilla gira para realizar el corte del pellet, se origina una fuerza de fricción entre el material y la cuchilla, esta fuerza se determina mediante la ecuación 4.88. El esfuerzo promedio de tendencia a la tensión de la madera (S_{py}) se determina en el Anexo 4.20.

$$F_{friccion} = A_T \cdot S_{py} \cdot \mu$$

Ecuación 4.88 Fuerza de fricción de las cuchillas.
(Fuente: forraje de alimentos Universidad de Navarra)

$$A_T = A_{pellet} \cdot \# \text{ Agujeros tapados}$$

$$F_{friccion} = (2.827E^{-5}) \cdot 7 \cdot 9.1MPa \cdot 0.7$$

$$F_{friccion} = 1260.75N$$

Calculo de la fuerza total de la cuchilla.

La fuerza de fuerza total que ejercen las cuchillas es:

$$F_{TOTAL} = F_{friccion} + F_{Corte}$$

$$F_{TOTAL} = 1260.75N + 232.918N$$

$$F_{TOTAL} = 1493.66N$$

Torque de las cuchillas.

El torque originado por la fuerza total del juego de cuchillas en función de su radio está definido por:

$$T_{Cuhilla} = F_{TOTAL} \bullet r_{cuchillas}$$

$$T_{Cuhilla} = 1493.66N \bullet 0.196m \bullet 4cuchillas$$

$$T_{Cuhilla} = 1171.03 \approx 1171N.m$$

4.5.12 DISEÑO DEL EJE PRINCIPAL

Las fuerzas producidas por la transmisión, las cuchillas y los rodillos originan torques en el eje principal. En la *figura 4.65* se observa un esquema general de los mecanismos de transmisión de potencia y compactación, a partir del cual se determinan las fuerzas y torques que intervienen en el diseño del eje.

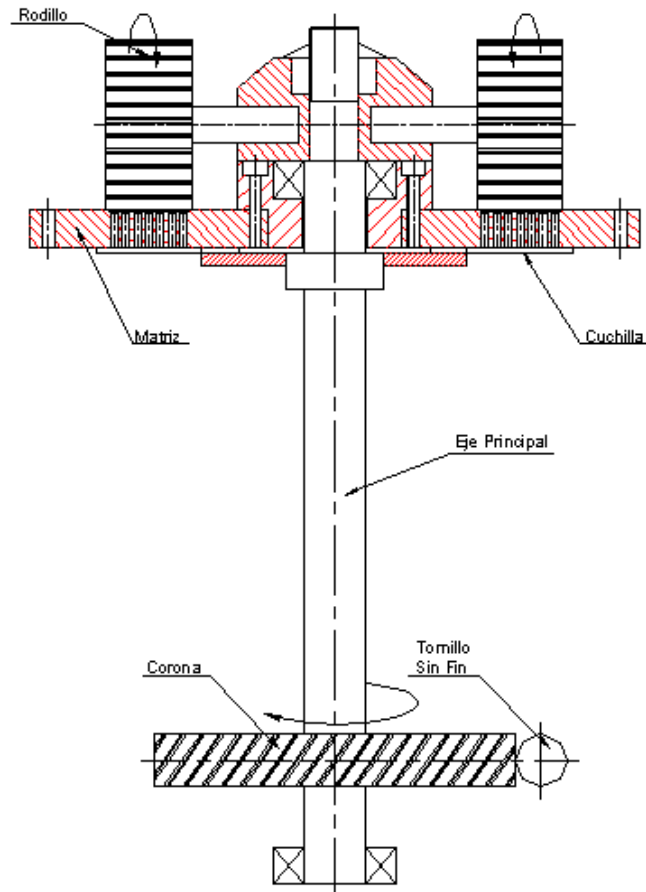


Figura 4.65 Mecanismos de transmisión de potencia y compactación.
(Fuente: El Autor).

Como se observa en la figura 4.66, se toma en cuenta los torques que se generan en los rodillos, cuchillas y la transmisión que a su vez crea una fuerza radial.

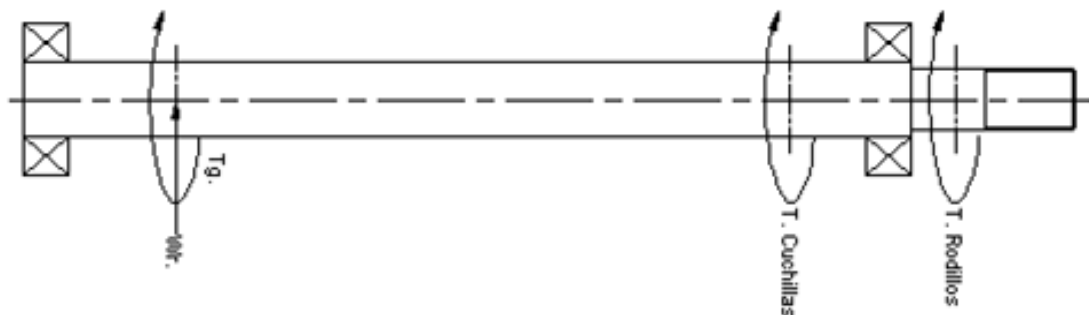


Figura 4.66 Torques generados en el eje principal
(Fuente: El Autor.)

Las fuerzas de reacción que se originan en los apoyos se determinan mediante las sumatorias de fuerzas.

Fuerza Producidas por la Transmisión (W_r):

$$W_r = \frac{W_{tg} \bullet \tan \phi}{\cos \lambda}$$

Ecuación 4.89 Fuerza radial de la transmisión.
(Fuente: NORTON, Robert, "Diseño de Maquinas", México 1999)

$$W_r = \frac{1792.44lb \bullet \tan(25^\circ)}{\cos(35^\circ)}$$

$$W_r = 1020.36lb \approx 4.54KN$$

Diagrama de Cuerpo Libre

El torque máximo que soportara el eje principal se calcula con la sumatoria de los torques individuales calculados anteriormente.

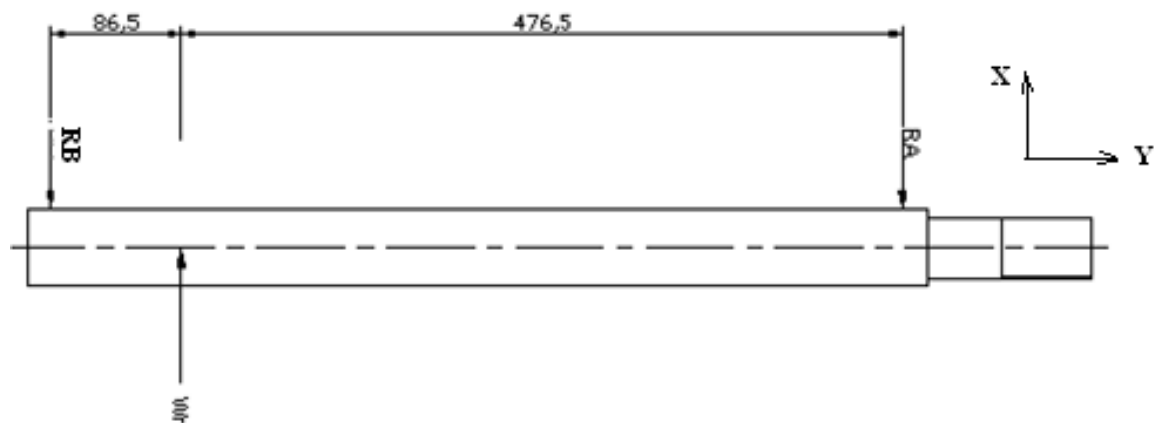


Figura 4.67 Diagrama de Cuerpo Libre del eje principal
(Fuente: El Autor.)

$$\sum M_B = 0$$

$$- RA \bullet (0.563m) + W_r \bullet (0.0865m) = 0$$

$$- RA \bullet (0.563m) + 4.54KN \bullet (0.0865m) = 0$$

$$RA = 697.34N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$W_r - RA - RB = 0$$

$$4.54KN - 0.697KN - RB = 0$$

$$RB = 3.84KN$$

Calculo del Momento Flector y Esfuerzo Cortante.

$$\sum Fy = 0$$

$$\sum Mx = 0$$

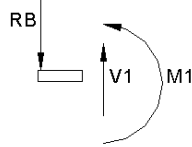
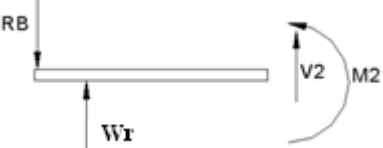
	$V_1 = RB = 3.84KN$ $M_1 = 3.84KN \cdot x$ $0mts \leq x \leq 0.0865mts$
	$V_2 = -RB + W_r = 0.697KN$ $M_2 = -RB \cdot x + W_r \cdot (x - 0.0865m)$ $0.0865mts \leq x \leq 0.4765mts$

Tabla 4.24 Ecuaciones de Cortes y Momentos del eje principal.
(Fuente: El Autor)

Esfuerzo Cortante		Momento Flector	
V1 =	3,84 KN	M1 =	- 332 N-m
V2 =	0,697KN	M2 =	0 N-m

Tabla 4.25 Resultados de los Esfuerzos Cortante y Flector.
(Fuente: El Autor)

Diagrama de Esfuerzo Cortante Máximo.

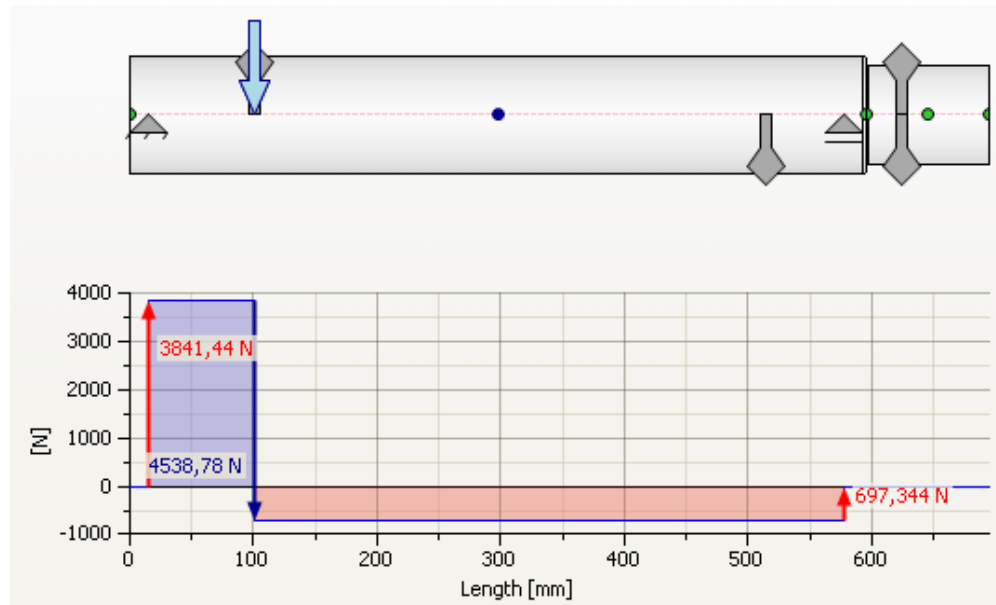


Figura 4.68 Diagrama de Momentos Flectores.
(Fuente: El Autor)

Diagrama de Momento Flector Máximo.

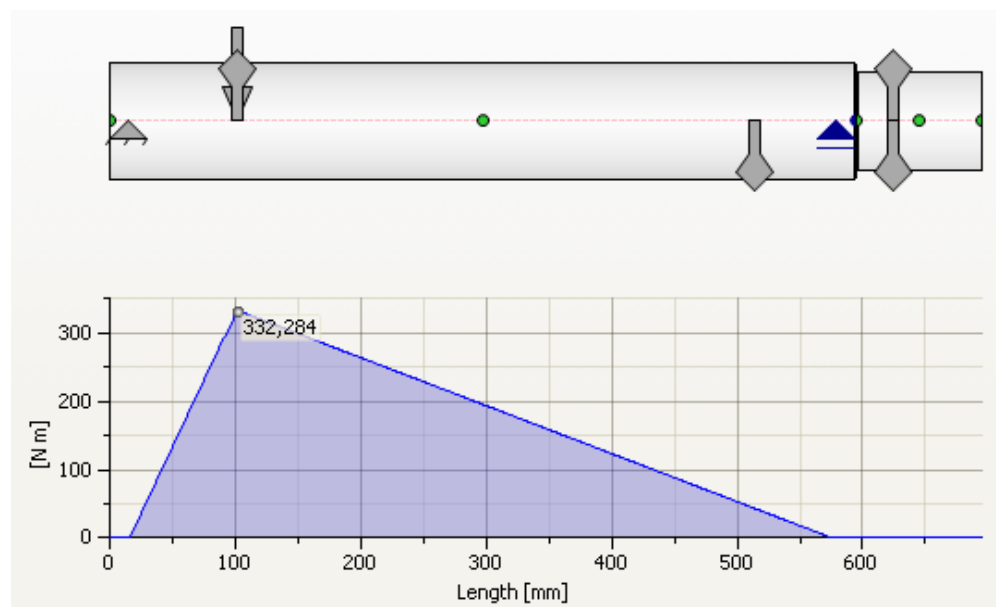


Figura 4.69 Diagramas de Esfuerzos Cortantes.
(Fuente: El Autor)

Diámetro del Eje Principal

El diámetro del eje sometido a flexión y torsión se calcula mediante la ecuación:

$$d = \left[\frac{32 \bullet n}{\pi \bullet S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

Acero de transmisión ASTM A36

$$d = \left[\frac{32 \bullet 3}{\pi \bullet 250E^6} (332.28N.m^2 + 5824.32N.m^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = 0,0889m \approx 3.5 pulg$$

Inercia del eje principal:

$$I = \frac{\pi \bullet d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi \bullet 0.0889^4}{64}$$

$$I = 3.12E^{-6} m^4$$

Análisis de Esfuerzos

Se procede al cálculo de los esfuerzos de flexión y de torsión.

Esfuerzo Flexionante:

$$\sigma = \frac{M \bullet c}{I} = \frac{332.28N - m \bullet 0.0446m}{3.12E^{-6} m^4} = 4.75MPa$$

Esfuerzo Torsor:

$$\tau_{Torsion} = \frac{T \bullet r}{J} = \frac{16 \bullet T}{\pi \bullet d^3} = \frac{16 \bullet 5824.32N - m}{\pi \bullet (0.0893m)^3} = 27,4MPa$$

$$\tau_{max} = \tau_{Flexion} + \tau_{Torsion} = 4.75MPa + 27.4MPa = 32.2MPa$$

4.5.13 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA EL EJE PRINCIPAL

Rodamiento inferior

En la parte inferior del eje principal se escoge un rodamiento de rodillos cónicos que soporte las cargas mixtas generadas por la corona. En base al diámetro del eje y a la carga dinámica equivalente, se escoge el rodamiento 32016 (marca SKF) (Anexo 4.21), que posee las siguientes especificaciones:

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	T	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
80	125	29	138	216	24,5	3600	5000	1,30	32016 X/Q

Tabla 4.26 Tabla de las Características del Rodamiento 32016.
(Fuente: <http://SKF.com>)

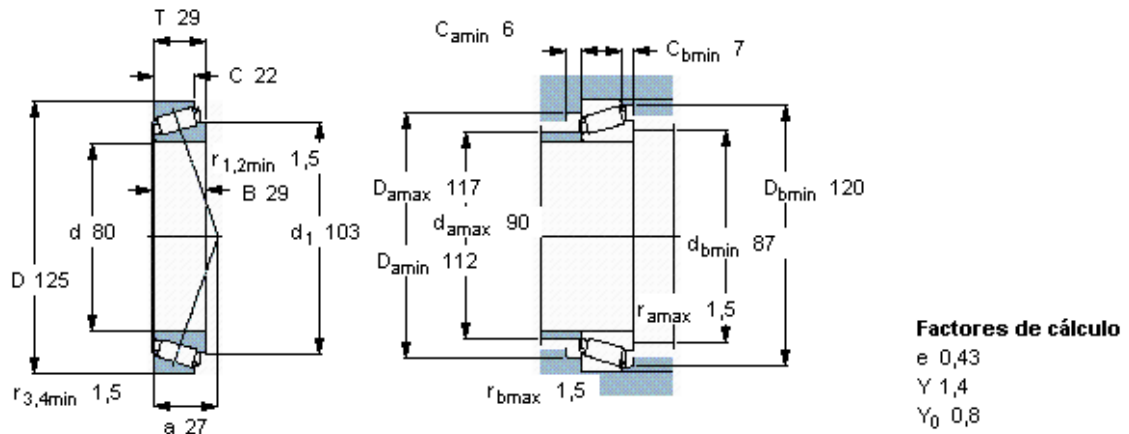


Figura 4.70 Dimensiones del Rodamiento SKF 32016.
(Fuente: Catalogo SKF)

Vida nominal del Rodamiento inferior

En base a la carga dinámica que soporta el rodamiento se determina la vida del rodamiento.

$$L = \left(\frac{138 \text{ kN}}{3.84 \text{ kN}} \right)^{\frac{10}{3}} = 15.31 E^4 \text{ millones de revoluciones}$$

$$L = 15.31 E^4 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida Nominal en Número de Horas:

Al ser la velocidad constante, se puede obtener la vida nominal expresada en horas de funcionamiento utilizando la formula:

$$L_h = \frac{1000000}{60 \bullet 262rpm} \left(\frac{138kN}{3.84kN} \right)^{\frac{10}{3}} = 97.43E^5 \text{ horas de funcionamiento}$$

$$L_h = 97.43E^5 \text{ horas de funcionamiento}$$

Rodamiento Superior

En la parte superior del eje principal se escoge un rodamiento de bolas que soportara las cargas radiales generadas por los rodillos. En base al diámetro del eje y a la carga dinámica equivalente, se escoge el rodamiento rígido de bolas 6215 (marca SKF) (Anexo 4.22), que posee las siguientes especificaciones:

Vida nominal del Rodamiento 2

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	* - Rodamiento SKF Explorer
75	130	25	68,9	49	2,04	10000	6700	1,20	6215 *

Tabla 4.27 Tabla de las Características del Rodamiento 6215.

(Fuente: <http://SKF.com>)

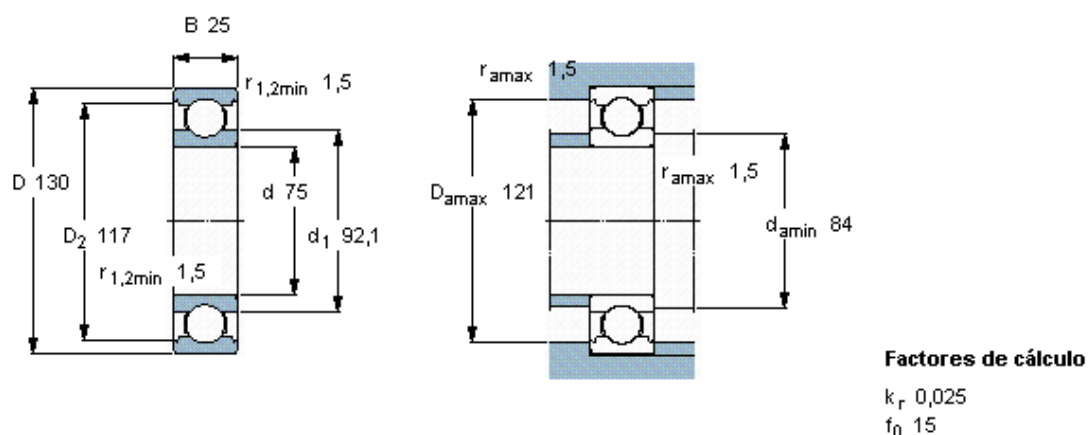


Figura 4.71 Dimensiones del Rodamiento SKF 6215.

(Fuente: Catalogo SKF)

Vida Nominal en Número de R.P.M.:

El tiempo de vida del rodamiento rígido de bolas es:

$$L = \left(\frac{68.9kN}{0.697kN} \right)^3 = 96.59E^4 \text{ millones de revoluciones}$$

$$L = 96.59E^4 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida Nominal en Número de Horas:

El tiempo de vida en horas de funcionamiento es:

$$L_h = \frac{1000000}{60 \bullet 262rpm} \left(\frac{68.9kN}{0.697kN} \right)^3 = 61.44E^6 \text{ horas de funcionamiento}$$

$$L_h = 61.44E^6 \text{ horas de funcionamiento}$$

4.5.14 CALCULO DE LA CHAVETA PARA LA TRANSMISION.

De acuerdo a la tabla del Anexo 4.7 se selecciona un tipo de cuña para el eje principal de la máquina. Como el eje de la peletizadora es de 3,5plg, se escoge la chaveta de acero **C45K** ($S_y = 685 \text{ Mpa}$) con dimensiones, $b = 28\text{mm}$ y $h = 16\text{mm}$.

Lo que resta por dimensionar es la longitud de la chaveta necesaria para que no se produzca el fallo.

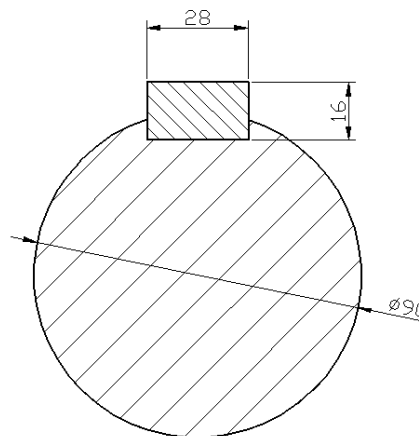


Figura 4.72 Dimensiones de la chaveta para la corona
(Fuente: El Autor)

Longitud Necesaria de Chaveta sometida a Cizallamiento.

Utilizando el criterio de tensión tangencial para su dimensionado, la longitud l necesaria para que no se produzca el fallo, con un coeficiente de seguridad n_s será:

$$l \geq \frac{4 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet b \bullet S_y}$$

$$l \geq \frac{4 \bullet 1179.81N - m \bullet 3}{0,0889m \bullet 0,028m \bullet 685E^6 Pa} = 0,0083m$$

$$l \geq 0,0083m$$

Longitud Necesaria de Chaveta sometida a aplastamiento

Se considera una tensión admisible de aplastamiento 2 veces la tensión normal máxima admisible del material, con lo que la longitud necesaria para que no se produzca el fallo, con un coeficiente de seguridad n_s es:

$$l \geq \frac{2 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet h \bullet S_y}$$

$$l \geq \frac{2 \bullet 1179.81N - m \bullet 3}{0,0889m \bullet 0,016m \bullet 685E^6 Pa} = 0,0073m$$

Finalmente, se escogerá la longitud más desfavorable obtenida de las dos comprobaciones anteriores. Hay que considerar la situación de espacio de la corona para determinar la longitud de las cuñas, en este caso el ancho de la corona que se calcula es de 43mm, por lo tanto la longitud de la cuña debe ser aproximada a dicha medida.

La cuña seleccionada para el eje principal de la peletizadora es de tipo rectangular de las siguientes dimensiones: 28x 16 x 40 (mm.).

Fallo por Cizallamiento.

La fuerza de corte F sobre la chaveta, debida al momento M que se transmite será:

$$F = \frac{2 \bullet M}{D}$$

$$F = \frac{2 \bullet 1179.81N - m}{0,0889m} = 26.54kN$$

Tensión de Corte:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{26.54KN}{(0,028m \bullet 0.040m)} = 23.69MPa$$

Tensión de Compresión

La tensión de compresión sobre las caras laterales de la chaveta será:

$$\sigma_{apl} = \frac{F}{A'}$$

$$\sigma_{apl} = \frac{26.54KN}{0.016m \bullet 0.040} = 41.46MPa$$

4.5.15 CALCULO DE LA CHAVETA PARA LAS CUCHILLAS

De acuerdo a la tabla del *Anexo 4.7* se selecciona un tipo de cuña para las cuchillas de corte. El diámetro del eje en este punto es el mismo (3,5plg), por lo tanto se selecciona la misma chaveta de acero C45K con dimensiones, b = 28mm y h = 16mm.

Las longitudes necesarias para la chaveta sometida a cizallamiento y aplastamiento son las mismas que se calcularon anteriormente.

En consecuencia las dimensiones de la chaveta seleccionada en función del espacio disponible para el acople de las cuchillas son: b =28mm; h = 16mm; l = 30mm

Fallo por Cizallamiento.

La fuerza de corte F sobre la chaveta, debida al momento M que se transmite será:

$$F = \frac{2 \bullet M}{D}$$

$$F = \frac{2 \bullet 1171.033N - m}{0,0889m} = 26.34kN$$

Tensión de Corte:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{26.34KN}{(0,028m \bullet 0.030m)} = 31.36MPa$$

Tensión de Compresión

La tensión de compresión sobre las caras laterales de la chaveta será:

$$\sigma_{apl} = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_{apl} = \frac{26.34KN}{0.016m \bullet 0.030} = 54.875MPa$$

4.5.16 CALCULO DE LA CHAVETA PARA EL CABEZAL PORTARODILLOS

De acuerdo a la tabla del Anexo 4.7 se selecciona un tipo de cuña para las cuchillas de corte. El diámetro del eje es de 70 mm, por lo tanto se selecciona chaveta de acero **C45K** (Sy = 685 Mpa) con dimensiones, b = 20mm y h = 12mm.

Longitud Necesaria de Chaveta sometida a Cizallamiento.

$$l \geq \frac{4 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet b \bullet Sy}$$

$$l \geq \frac{4 \bullet 3473.47 N - m \bullet 3}{0,0889m \bullet 0,020m \bullet 685E^6 Pa} = 0,034m$$

Longitud Necesaria de Chaveta para Aplastamiento

$$l \geq \frac{2 \bullet M \bullet n_s}{D \bullet h \bullet Sy}$$

$$l \geq \frac{2 \bullet 3473.47 N - m \bullet 3}{0,0889m \bullet 0,012m \bullet 685E^6 Pa} = 0,02851m$$

En consecuencia las dimensiones de la chaveta seleccionada en función del espacio disponible para el acople de las cuchillas son: b =20mm; h = 12mm; l = 50mm

Fallo por Cizallamiento.

La fuerza de corte F sobre la chaveta, debida al momento M que se transmite será:

$$F = \frac{2 \bullet M}{D}$$

$$F = \frac{2 \bullet 3473.47 N - m}{0,0889m} = 78.14kN$$

Tensión de Corte:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{78.14KN}{(0,020m \bullet 0.050m)} = 78.14MPa$$

Tensión de Compresión

La tensión de compresión sobre las caras laterales de la chaveta será:

$$\sigma_{apl} = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_{apl} = \frac{78.14KN}{0.012m \bullet 0.050} = 123.56MPa$$

4.5.17 CALCULO DEL EJE PORTA RODILLOS

El eje esta acoplado en un extremo con el rodillo de compactación y en el otro extremo con el cabezal de giro tal como se observa en la figura 4.73

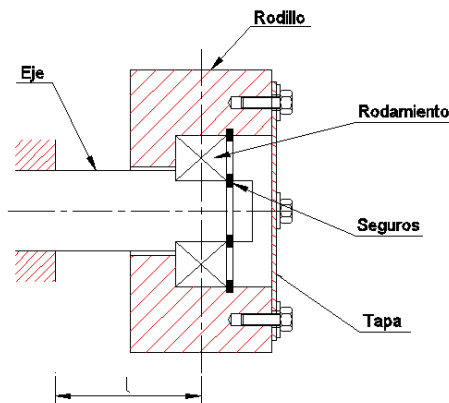


Figura 4.73 Eje porta rodillos
(Fuente: El Autor)

El eje al estar sujeto al cabezal produce un momento de giro originado por la fuerza F , y en el otro extremo se produce un torque originado por el contacto del rodillo con la matriz (Fig. 4.74).

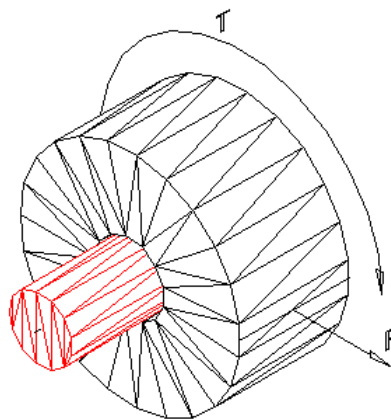


Figura 4.74 Esquema de fuerzas originadas en el eje principal
(Fuente: El Autor)

Diagrama de cuerpo libre

La fuerza que el rodillo ejerce sobre el dado de la matriz es $K = 5654.86\text{N}$, por lo tanto en el lado izquierdo del eje actúan las fuerzas tal como se observa en la figura 4.75.

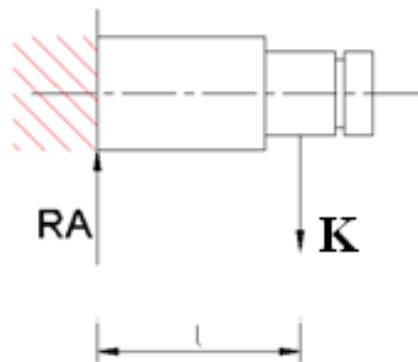


Figura 4.75 Diagrama de cuerpo libre del eje (lado del cabezal)
(Fuente: El Autor)

$$\sum F_x = 0$$

$$RA - K = 0$$

$$RA = 5654.86\text{N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$RA \cdot l - M = 0$$

$$M = RA \cdot l$$

$$M = 5654.86 \cdot 0.052\text{m}$$

$$M = 294\text{ N.m}$$

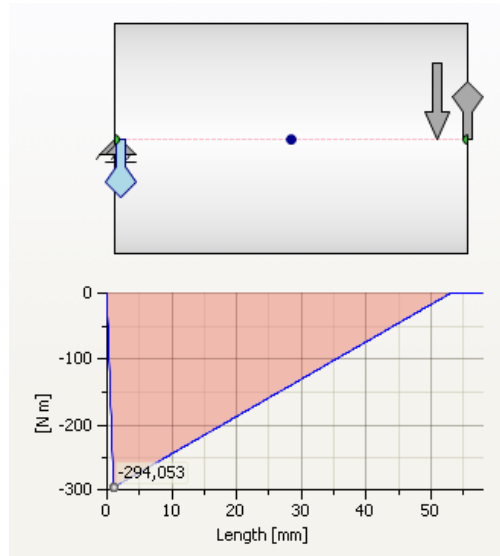


Figura 4.76 Diagrama de Momento del eje porta rodillo
(Fuente: El Autor)

Calculo del torque

En el diagrama de cuerpo libre del eje acoplado con el rodillo se observa las fuerzas que actúan en este lado. El torque se calcula tomando en cuenta la inercia del rodillo y su aceleración de giro.

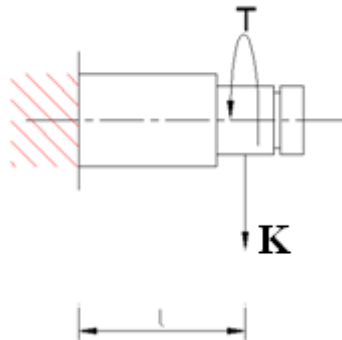


Figura 4.77 Diagrama de cuerpo libre del eje (lado del Rodillo)
(Fuente: El Autor)

$$T = I_{\text{Rodillo}} \cdot \alpha$$

$$\text{Velocidad del Rodillo} = 933.2 \text{rpm} = 97.72 \text{rad/s}$$

$$t = \frac{60 \text{s} \cdot 1 \text{rpm}}{933.2 \text{rpm}}$$

$$t = 0.064 \text{s}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

$$\alpha = \frac{97.72 \text{ rad/s}}{0.064 \text{ s}}$$

$$\alpha = 1519.95 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$I_{\text{Rodillo}} = \frac{m_{\text{Rodillo}} \cdot r^2}{2}$$

$$I_{\text{Rodillo}} = \frac{8.46 \text{ Kg} \cdot (0.07 \text{ m})^2}{2}$$

$$I_{\text{Rodillo}} = 0.0207 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$T = I_{\text{Rodillo}} \cdot \alpha$$

$$T = 0.0207 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 1519.95 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 31.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Diámetro del Eje porta rodillos

$$d = \left[\frac{32 \cdot n}{\pi \cdot S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

Acero de transmisión ASTM A36

$$d = \left[\frac{32 \cdot 3}{\pi \cdot 250 E^6} ((294 \text{ N.m})^2 + (31.5 \text{ N.m})^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = 0.033 \text{ m} \approx 1.3 \text{ pulg}$$

Inercia del eje porta rodillo:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi \cdot 0.033 \text{ m}^4}{64}$$

$$I = 5.867 E^{-8} \text{ m}^4$$

Análisis de Esfuerzos

Se procede al cálculo de los esfuerzos de flexión y de torsión.

Esfuerzo Flexionante:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{294 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0.0165 \text{ m}}{5.867 \text{ E}^{-8} \text{ m}^4} = 82.9 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Torsor:

$$\tau_{\text{Torsion}} = \frac{T \cdot r}{J} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 31.5 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi \cdot (0.033 \text{ m})^3} = 4.46 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{Flexion}} + \tau_{\text{Torsion}} = 82.9 \text{ MPa} + 4.46 \text{ MPa} = 87.3 \text{ MPa}$$

4.5.18 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA LOS RODILLO

El mecanismo de peletización consta de cuatro rodillos de compactación, en consecuencia se requieren de 4 rodamientos de las mismas características. Estos rodamientos estarán sometidos a fuerzas radiales y axiales.

En base al diámetro del eje y a la carga dinámica equivalente, se escoge el rodamiento de rodillos cónicos de una hilera 31307 J2/Q (marca SKF) (Anexo 4.23), que posee las siguientes especificaciones:

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	T	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
35	80	22,75	61,6	67	7,8	6000	8500	0,52	31307 J2/Q

Tabla 4.28 Tabla de las Características del Rodamiento 31307 J2/Q.
(Fuente: <http://www.SKF.com>)

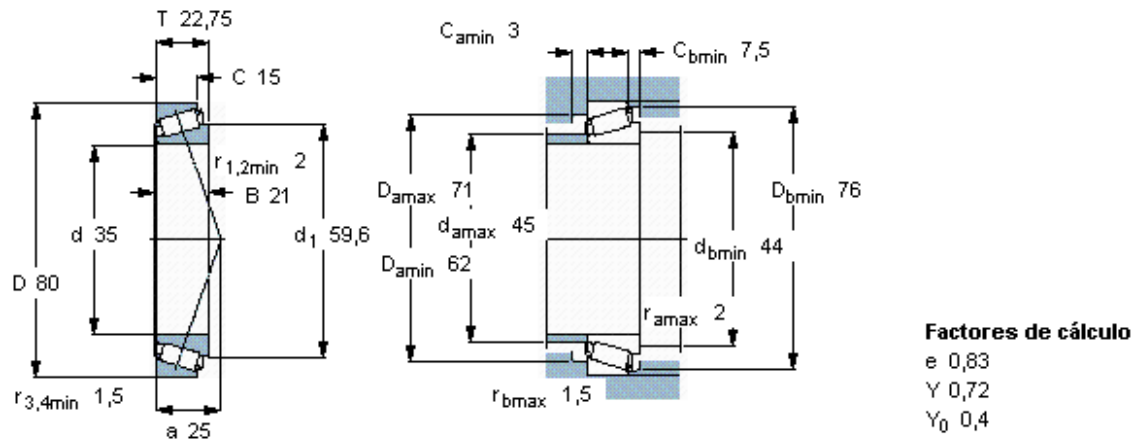


Figura 4.78 Dimensiones del Rodamiento 31307 J2/Q.
(Fuente: Catalogo SKF)

Vida nominal del Rodamiento inferior

En base a la carga dinámica que soporta el rodamiento se determina la vida del rodamiento.

$$L = \left(\frac{61.6kN}{5.654kN} \right)^{\frac{10}{3}} = 2.86E^3 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida Nominal en Número de Horas:

Al ser la velocidad constante, se puede obtener la vida nominal expresada en horas de funcionamiento utilizando la formula:

$$L_h = \frac{1000000}{60 \bullet 933.2rpm} \left(\frac{61.6kN}{5.654kN} \right)^{\frac{10}{3}} = 5.12E^4 \text{ horas de funcionamiento}$$

4.6 DISEÑO DEL ENFRIADOR

Los pellets que salen del proceso de peletizado poseen elevadas temperaturas (debido a las altas presiones ejercidas por los rodillos sobre los dados de la matriz en el proceso de extrusión), esto causa en los pellets un efecto de fragilidad también conocido como friabilidad, por tal motivo se hace necesario un proceso de enfriado .

La transferencia paulatina de calor durante el proceso de enfriado aumenta considerablemente la calidad del producto, disminuyendo la formación, grietas y finos garantizando un alto nivel de friabilidad del pellet que es sinónimo de calidad.

4.6.1 CONSIDERACIONES INICIALES

El enfriador se diseñara en base al principio de contra flujo con aire forzado, siendo este el más óptimo debido a que durante la exposición de los pellets al flujo de aire forzado ascendente a temperatura ambiente se lleva el calor del pellet de forma más eficiente. El sistema de enfriado básicamente consta de las partes que se observan en la figura 4.79

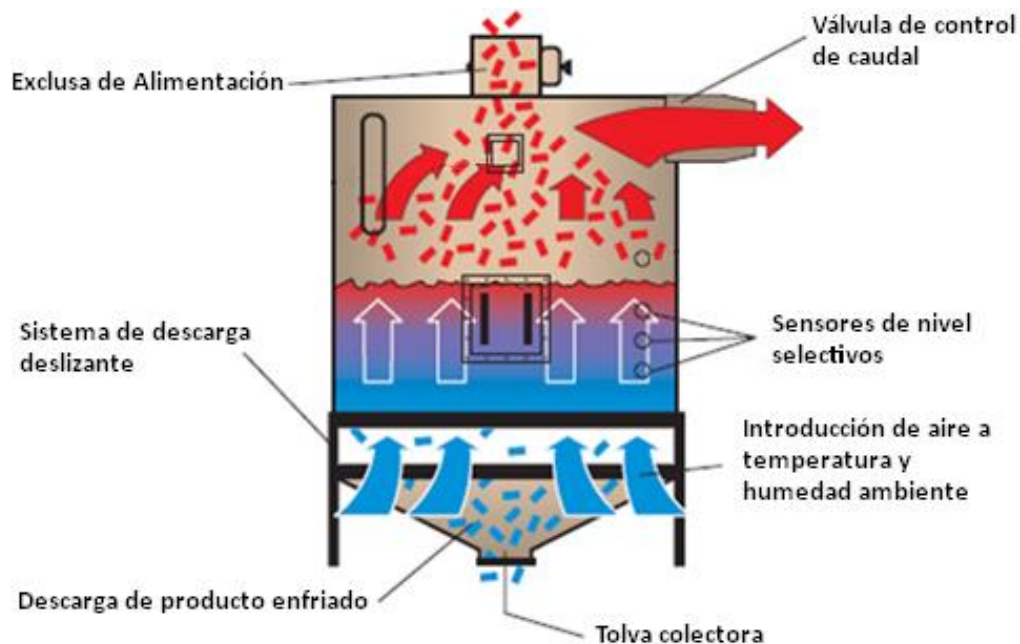


Figura 4.79 Enfriador de pellets.

(Fuente: www.AgrWorld.nl)

Los pellets que salen del sistema de peletizado se almacenan momentáneamente en una tolva y mediante una exclusiva de alimentación se proporciona un flujo uniforme de los pellets que caen por gravedad a la cámara de enfriado.

El diseño circular de la cámara elimina las esquinas y permite la distribución pareja del producto por toda la unidad, aumentando así la uniformidad de enfriamiento.

Cuando el producto entra por la parte superior de la cámara de enfriamiento posee temperaturas elevadas (65-85 °C) por lo tanto se expone al aire más caliente disponible dentro del enfriador minimizando el choque de temperatura. El producto que sale por la parte inferior se enfría dentro de un rango de temperaturas de 3° - 6° C por encima de la temperatura del aire ambiental en un tiempo aproximado de 10 minutos. La velocidad del aire que proporcionan los ventiladores convencionales no se excede de $U_{\infty} = 0.5 \text{ m/s}$, en los enfriadores modernos este valor oscila entre 0.8 y 1.5 m/s. ⁽⁴⁷⁾

4.6.2 DIMENSIONES DE LA CAMARA DE ENFRIADO

La capacidad de producción de la maquina peletizadora es de 1220 Kg/h, este será el flujo másico de pellets que ingresan al enfriador y como se menciona anteriormente el tiempo aproximado para el enfriado es de 10 min, es decir que el producto se secase en 6 tandas. En consecuencia el volumen del enfriador quedara determinado como se muestra a continuación.

Capacidad de almacenamiento del enfriador

$$\dot{Q}_{\text{Enfriador}} = 1220 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1250 \text{ Kg}} = 0,976 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,0163 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

El volumen del material que se almacena en la cámara es durante el tiempo de 10min, es:

⁴⁷ www.AgriWorld.nl

$$V_{\text{Almacenamiento}} = 0,0163 \frac{m^3}{\text{min}} * 10 \text{ min}$$

$$V_{\text{Almacenamiento}} = 0,163m^3$$

Dimensiones del enfriador.

Con la finalidad de evitar una sobrecarga del producto dentro de la cámara, es importante determinar la altura a la que deben llegar los pellets que se acumulan al caer por gravedad.

Para el cálculo de la altura del enfriador se tomo como factores de influencia, el volumen a enfriar y las dimensiones de la plancha negra que se comercializa en nuestro mercado (2,4 x 1,22 m) para no tener un desperdicio exagerado de material, por lo tanto tenemos:

Al rolar la plancha negra en la longitud de 2,4m se obtiene un diámetro de:

$$D = \frac{P}{\pi} \Rightarrow D = \frac{2,4m}{\pi} \Rightarrow D = 0,86m$$

Relacionando el volumen de almacenamiento de $0,163m^3$ y el diámetro de la cámara, vamos a tener una altura del material de:

$$V_{\text{Almacenamiento}} = \pi \bullet r^2 \bullet h_o$$

$$h_o = \frac{V_{\text{Almacenamiento}}}{\pi \bullet r^2}$$

$$h_o = \frac{0.163m^3}{\pi \bullet (0.43m)^2}$$

$$h_o = 0.28m$$

Para garantizar que los pellets lleguen a la altura calculada se emplean sensores de nivel para sólidos (los más comunes son de tipo capacitivo).

Para que exista un flujo de aire permanente y evitar que se acumule dentro de la cámara durante el proceso de enfriado se deja un espacio igual a la altura calculada h_o por lo que la altura total de la cámara de enfriamiento es de 56cm.

Existen elementos que alargan más el cilindro como el mecanismo de salida de los pellets y el propio ventilador, estos elementos están ubicados y diseñados de tal manera que se ajusten a la altura de la plancha de 1,22m.

En base a las dimensiones de la cámara de enfriamiento y la altura de la plancha, se realiza una distribución previa del espacio que ocupara el mecanismo deslizante, el ventilador y la salida de los pellets, quedando de esta manera:

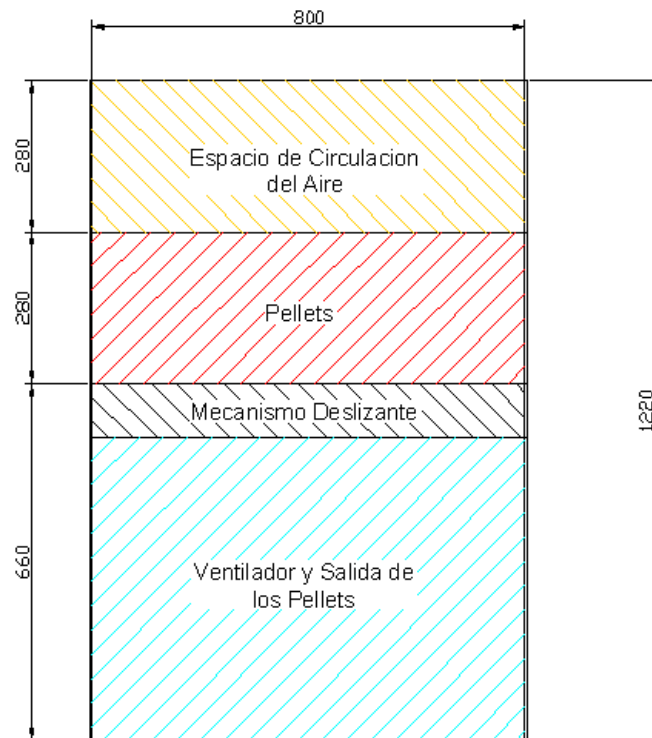


Figura 4.80 Distribución de espacios del Enfriador.
(Fuente: El Autor)

Cantidad de pellets

En base al volumen de cada pellet se determina el número total de pellets que ingresaran a la cámara de enfriado en el tiempo establecido de 10 minutos.

$$\text{Volumen de cada Pellet} = 8.4823 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ Pellet} & \dots\dots\dots 8.4823E^{-7} \text{ m}^3 \\ \# \text{ pellets} & \dots\dots\dots 0.163 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$\# \text{ pellets} = \frac{0.163 \text{ m}^3}{8.4823E^{-7} \text{ m}^3} \approx 192165$$

El número de pellets calculados se usará posteriormente para el cálculo de calor total de transferencia de los pellets al aire.

4.6.3 TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LOS PELLETS Y EL AIRE

Cuando los pellets caen a la cámara de enfriamiento por gravedad son atravesados por una corriente de aire forzado que provoca una transferencia de calor del pellet al aire principalmente por convección (Fig. 4.81). Posteriormente mediante el cálculo del número de Biot se determinara si existe conducción en el pellet.

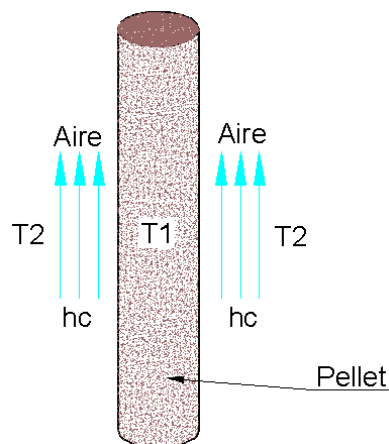


Figura 4.81 Variación de temperaturas en el pellet
(Fuente: El Autor)

Condiciones Iniciales

Básicamente en el proceso de transferencia de calor interviene las condiciones iniciales de entrada de los pellets y del aire proveniente del ventilador.

Condiciones iniciales en el ingreso de Pellets

$$T_{entrada} = 85^{\circ}C$$

$$T_{salida} = 18^{\circ}C$$

$$K_{madera} = 0.17 - 0.25 \text{ W / m.}^{\circ}K$$

$$\alpha_{madera} = 0.012 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / s \text{ (Difusividad Termica)}$$

(48)

Propiedades del aire (Anexo 4.24)

La ciudad de Cuenca se hubica a $h = 2550 \text{msnm}$

$$\rho_{aire} = 0.9554 \frac{Kg}{m^3}$$

La temperatura media a la cual estará el fluido es:

$$\overline{\Delta T} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{85^{\circ}C + 18^{\circ}C}{2}$$

$$\overline{\Delta T} = 51.5^{\circ}C$$

⁴⁸ Teoría de Energía Térmica y Fluidos <http://es.libros.redsauce.net>.

Propiedades del aire @ 51.5°C (Anexo 4.25)

$$\mu = 19.57 \times 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2} \text{ (viscosidad absoluta)}$$

$$C_p = 1.015 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

$$Pr = 0.71$$

$$K_{aire} = 0.0273 W / m \cdot K$$

Cálculo del Número de Reynolds

Como se menciona anteriormente la velocidad del aire que es forzado por los ventiladores para el enfriado es aproximadamente 0.5 m/s.

$$R_E = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot D}{\mu}$$

Ecuación 4.90 Numero de Reynolds.

(Fuente: Frank Kreith y Mark Bohn “Principios de Transferencia de calor”, México 2001)

$$R_E = \frac{0.9554 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.5 \frac{m}{s} \cdot 0.006m}{19.57E^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$R_E = 146.45 < 2300 \quad \text{FLUJO LAMINAR}$$

Cálculo del número de Nusselt

$$N_{UD} = 0.206 R_E^{0.63} \cdot Pr^{0.36}$$

Ecuación 4.91 Numero de Nusselt.

(Fuente: Frank Kreith y Mark Bohn “Principios de Transferencia de calor”, México 2001)

$$N_{UD} = 0.206(146.45)^{0.63} \cdot (0.71)^{0.36}$$

$$N_{UD} = 4.21$$

Cálculo del Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección esta determinado en base al número de Nusselt y a coeficiente de conducción del aire

$$h_c = \frac{N_{UD} \cdot k_{aire}}{D}$$

Ecuación 4.92 Coeficiente de transferencia de Calor por convección.
(Fuente: Frank Kreith y Mark Bohn “Principios de Transferencia de calor”, México 2001)

$$h_c = \frac{4.21 \cdot 0.0273 \text{ W / m} \cdot \text{K}}{0.006 \text{ m}}$$

$$h_c = 19.17 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Cálculo del número de Biot

El cálculo del numero de Biot nos permite determinar si la temperatura interna del pellet es concluyente o no con respecto a la temperatura en su capa superficial.

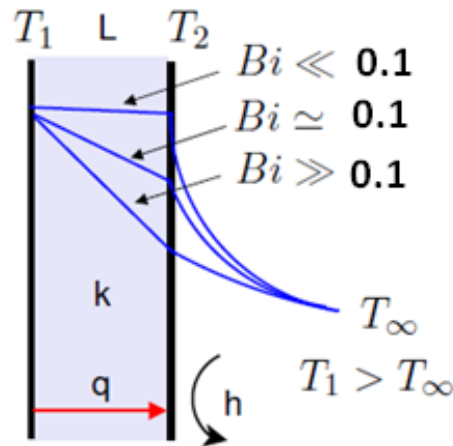


Figura 4.82 Conducción de temperatura en la capa superficial y el centro del pellet
(Fuente: El Autor)

$$Bi = \frac{h_c \cdot r_o}{K}$$

Ecuación 4.93 Numero de Biot

(Fuente: Frank Kreith y Mark Bohn “Principios de Transferencia de calor”, México 2001)

$$Bi = \frac{19.13 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \cdot 0.003m}{0.25 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}$$

$$Bi = 0.22 > 0.1$$

Al ser $Bi > 0.1$ se supone que existirá variación de temperatura de la capa superficial del pellet con respecto a su centro.

4.6.4 VERIFICACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL CENTRO DEL PELLET

Mediante el análisis de sistemas concentrados se verifica la conducción de calor en régimen transitorio para cilindros cortos (pellets). Para llevar acabo este procedimiento se considera que el cilindro corto es la intersección de una pared plana de espesor $2L = 3\text{cm}$ y un cilindro largo de radio $r_o = 0,003\text{m}$ (Fig. 4.83) por lo tanto la conducción de calor en el pellet es bidimensional.

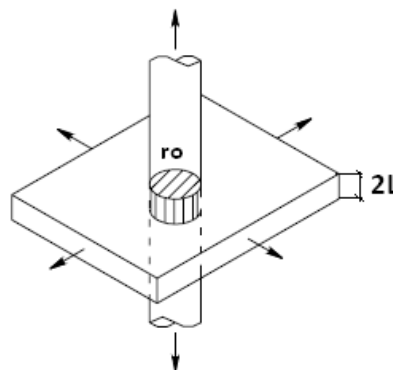


Figura 4.83 Intersección de un cilindro largo y una pared

(Fuente: El Autor)

Análisis de la Temperatura adimensional en el centro de la pared plana

En base a los números de Fourier, Biot y a los diagramas Heisler, se determina la temperatura en la pared plana.

Numero de Fourier

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{L^2}$$

Ecuación 4.94 Numero de Fourier
(Fuente: Cengel, Yanus “Transferencia de calor”, México 2001)

$$\tau = \frac{0.012 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \cdot 600s}{0.015m^2}$$

$$\tau = 0.32$$

Numero de Biot

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h_c \cdot L}$$

$$\frac{1}{Bi} = \frac{0.0273 \frac{W}{m \cdot K}}{19.17 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.015m}$$

$$\frac{1}{Bi} = 0.869$$

Utilizando los diagramas de Heisler (Anexo 4.26) para los valores obtenidos de $\tau = 0.32$ y $1/Bi = 0.869$ tenemos:

$$\theta_{pared}(0,t) = \frac{T(0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = 0.9$$

Ecuación 4.95 Temperatura adimensional.
(Fuente: Cengel, Yanus “Transferencia de calor”, México 2001)

Análisis de la Temperatura adimensional en el centro del cilindro

En base a los números de Fourier, Biot y a los diagramas Heisler, se determina la temperatura en el centro del cilindro.

Numero de Fourier

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2}$$

$$\tau = \frac{0.012 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \cdot 600s}{(0.003m)^2}$$

$$\tau = 8$$

Numero de Biot

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h_c \cdot L}$$

$$\frac{1}{Bi} = \frac{0.0273 \frac{W}{m \cdot K}}{19.17 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.003m}$$

$$\frac{1}{Bi} = 4.34$$

Utilizando los diagramas de Heisler (Anexo 4.27) para $\tau = 8$ y $1/Bi = 0.434$ tenemos:

$$\theta_{cilindro}(0, t) = \frac{T(0, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = 0.045$$

Uniendo los resultados obtenidos para la intersección de la pared y el cilindro se tiene:

$$\left(\frac{T(0,0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindrocorto} = \theta_{cilindro}(0,t) \cdot \theta_{pared}(0,t) = 0.9 \cdot 0.045$$

$$\left(\frac{T(0,0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindrocorto} = 0,0405$$

La temperatura en el centro de pellet será:

$$T(0,0,t) = T_{\infty} + 0,0405 \cdot (T_i - T_{\infty})$$

Ecuación 4.96 Temperatura en el centro del cilindro
(Fuente: Cengel, Yanus “Transferencia de calor”, México 2001)

$$T(0,0,t) = 15^{\circ}\text{C} + 0,0405(85^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})$$

$$T(0,0,t) = 17,835^{\circ}\text{C} \approx 18^{\circ}\text{C}$$

4.6.5 VERIFICACION DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL PELLET

La temperatura superficial de la pared del pellet se determina tomando en cuenta que el centro de la superficie superior del cilindro largo ($r = 0$) coincide con la superficie exterior de la pared plana ($x = L$).

$$\frac{x}{L}$$

Ecuación 4.95 Distancia adimensionales
(Fuente: Cengel, Yanus “Transferencia de calor”, México 2001)

$$\frac{x}{L} = \frac{0,015}{0,015} = 1$$

Número de Biot

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h_c \bullet L}$$

$$\frac{1}{Bi} = \frac{0.0273 \frac{W}{m \cdot K}}{19.17 \frac{W}{m^2 \cdot K} \bullet 0.015m}$$

$$\frac{1}{Bi} = 0.869$$

Utilizando los diagramas de Heisler (Anexo 4.28) para los valores calculados $X/L = 1$ y $1/Bi = 0.869$ tenemos:

$$\left(\frac{T(L,t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = 0,63$$

Entonces:

$$\theta_{pared}(L,t) = \frac{T(L,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \left(\frac{T(L,t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) \bullet \left(\frac{T_0 - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right) = 0,63 \bullet 0,9$$

$$\theta_{pared}(L,t) = 0,63 \bullet 0,9 = 0,57$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{T(L,0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindrocorto} = \theta_{cilindro}(0,t) \bullet \theta_{pared}(L,t)$$

$$\left(\frac{T(L,0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindrocorto} = 0,045 \bullet 0,57$$

$$\left(\frac{T(L,0,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindrocorto} = 0,026$$

La temperatura en la capa superficial del pellet del pellet será:

$$T(L,0,t) = T_{\infty} + 0,026 \cdot (T_i - T_{\infty})$$

Ecuación 4.97 Temperatura la superficie del cilindro
(Fuente: Cengel, Yanus “Transferencia de calor”, México 2001)

$$T(0,0,t) = 15^{\circ}\text{C} + 0,026(85^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})$$

$$T(0,0,t) = 16,82^{\circ}\text{C} \approx 17^{\circ}\text{C}$$

La temperatura superficial del pellet con respecto a su centro varía apenas 1°C debido a que el número de biot calculado ($0.22 > 0.1$) se aproxima al establecido para que se desprece la trasferencia de calor por conducción en el pellet, en conclusión esta variación se puede despreciar para realizar el análisis únicamente por convección.

4.6.6 CALOR DE CONVECCION DE CADA PELLETT

El calor unitario que será transferido por convección de pellet al aire será:

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$q = 19.13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot \pi \cdot (0.03\text{m}) \cdot (0.006\text{m}) \cdot (85^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})$$

$$q = 0.76 \text{ W}$$

Calor Total de Convección

Tomando en cuenta el número total de pellets que ingresan a la cámara de enfriado, el calor total trasferido por convección será:

$$q_T = q \cdot \# \text{ pellets}$$

$$q_T = 0.76\text{W} \cdot 192165 \text{ pellets}$$

$$q_T = 146045.4 \text{ W}$$

4.6.7 FLUJO MASICO DEL AIRE

Para determinar el flujo másico de aire que debe ingresar para enfriar los pellets se hace la siguiente relación:

$$q = h_C \cdot A \cdot (T_S - T_\infty) = \dot{m}_{aire} \cdot C_p \cdot (T_S - T_\infty)$$

Despejando el flujo másico de la relación se tiene:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{q_T}{C_p \cdot (T_S - T_\infty)}$$

$$\dot{m} = \frac{146045.4 \frac{J}{s}}{1015 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ C} \cdot (85^\circ C - 15^\circ C)}$$

$$\dot{m} = 2.05 \frac{Kg}{s} = 7380 \frac{Kg}{h}$$

Caudal de aire Necesario

En base al volumen específico del aire en la ciudad de Cuenca se determina el caudal necesario que el ventilador deberá proporcionar para enfriar el volumen calculado de pellets.

$$q_{AIRE} = \dot{m} \cdot \gamma$$

$$q_{AIRE} = 7380 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1}{1.2 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$\dot{q}_{AIRE} = 6150 \frac{m^3}{h} = 1.70 \frac{m^3}{s}$$

4.6.8 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Con el caudal de aire calculado de $1.70 \text{ m}^3/\text{s}$, del catalogo de ventiladores “Chicago Blower” (Anexo 4.29) se selecciona un ventilador con la siguiente denominación AXP 357-9FA -1 – 3000.

3000 rpm

Tamaño	357					
HP Motor	0,25	0,33	0,5	0,75	1	1,5
Caudal m^3/s	1,18	1,30	1,43	1,63	1,77	1,83
Hélice	3DJ	4DK	4EG	6EK	9FA	12FA

Tabla 4.29 Selección del ventilador enfriador (Extracto de Anexo 4.29)

(Fuente: <http://www.chiblosa.com.ar>)

Las dimensiones del ventilador seleccionado se especifican en base a la figura 4.84 y la tabla 4.28.

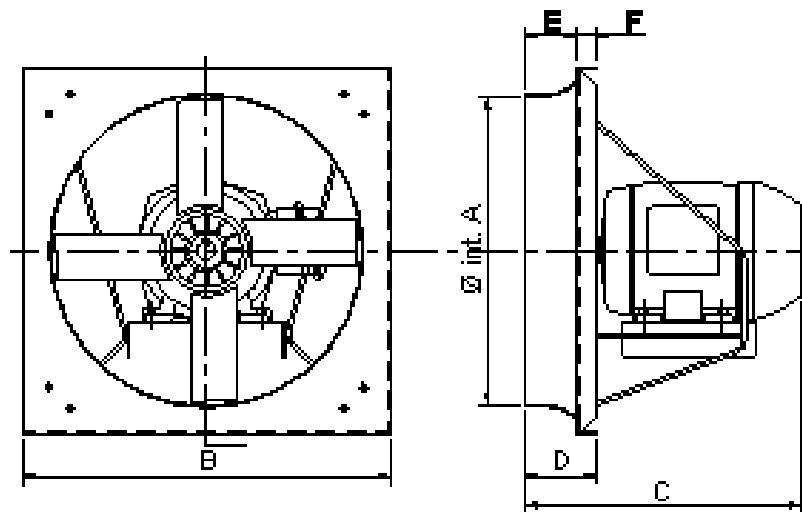


Figura 4.84 Esquema del ventilador AXP 357 – 9FA -1 – 3000

(Fuente: <http://www.chiblosa.com.ar>)

Tamaño Nominal	Superficie Orificio m ²	Dimensiones del Panel (mm)						Dimensiones "C" aproximadas con motores normalizados					
		A	B	D	E	F	=	71	80	90	100	112	132
357	0.100	357	425	91	66	25	1.2	230	264				
400	0.126	400	463	91	66	25	1.2	230	264	322			
450	0.159	450	514	91	66	25	1.2	230	264	311	355		
500	0.196	500	584	127	92	35	1.6	260	269				
560	0.247	560	647	127	92	35	1.6	260	269	327			
630	0.312	630	711	127	92	35	1.6	260	269	317	360		
714	0.400	714	832	176	131	45	1.6	256	300	334	367	416	
800	0.503	800	915	176	131	45	1.6	256	300	334	367	416	526
900	0.636	900	1016	176	131	45	1.6		300	334	367	416	526

Tabla 4.30 Medidas del ventilador AXP 357-9FA -1 – 3000.

(Fuente: <http://www.chiblosa.com.ar>)

4.6.9 SISTEMA DE DESCARGA DESLIZANTE

Para la descarga del material se diseñó un piso de rejilla fija con forma de "V" inversa (Figura 4.85). Este diseño apoya el peso más eficientemente que una superficie horizontal. Las láminas deslizantes se parecen a un peldaño pivotado que permite un fácil flujo del producto cuando están abiertas y detienen completamente el flujo cuando están cerradas.

El piso de rejilla tipo V se abren o cierran mediante un sistema de corredera que está unido a un mecanismo biela manivela comandado por un motoreductor con control electrónico. En este tipo de enfriadores la potencia del motor para el sistema deslizante es mínima debido a que el único trabajo que realiza es empujar el eslabón para bloquear y desbloquear el sistema. Según varios fabricantes, la potencia del motor para el sistema de deslizamiento varia en base a la capacidad de enfriamiento (de 1 a 2 Tph varia entre $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ Hp).⁴⁹

⁴⁹ <http://www.bliss-industries.com> - <http://www.aarsen.com>

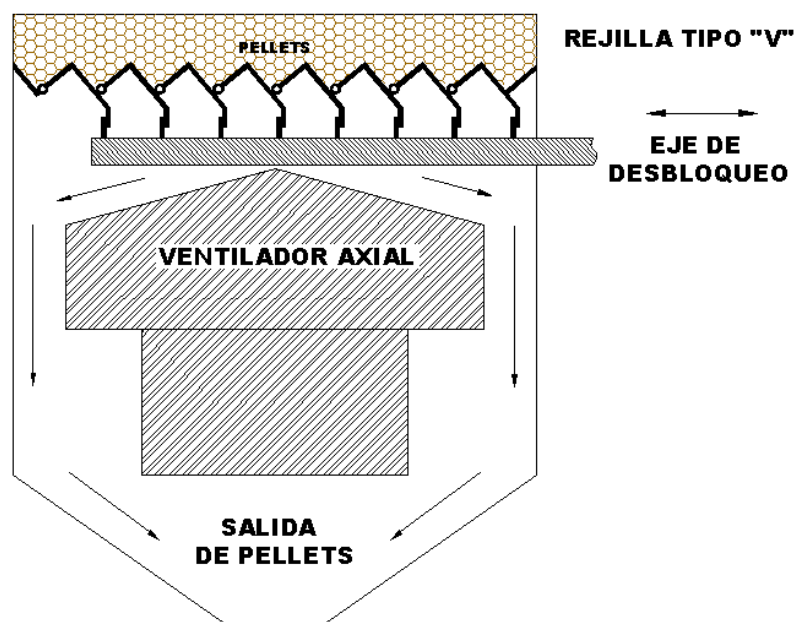


Figura 4.85 Sistema de descarga deslizante bloqueado
(Fuente: El Autor)

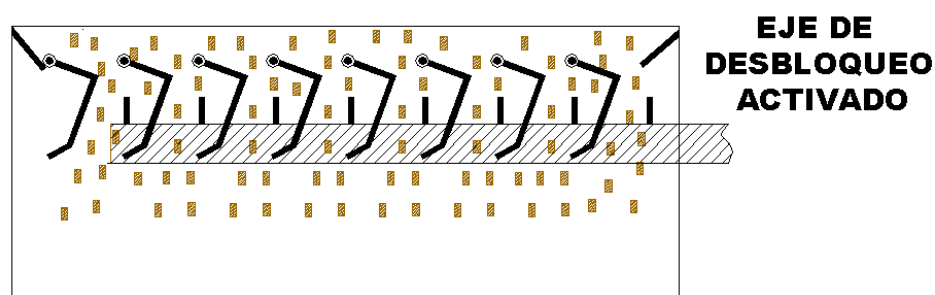


Figura 4.86 Sistema de descarga deslizante desbloqueado
(Fuente: El Autor)

Cuando el tiempo de enfriado concluye el ventilador se desactiva y el sistema deslizante se activa desbloqueado las laminas tipo "V", los pellets caen por gravedad sobre la malla fija que cubre al ventilador axial y se deslizan por la tolva de salida (Fig. 4.85 y 4.86) para que finalmente sean empacados o distribuidos a granel.

CAPÍTULO 5

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UN CALDERO
ALIMENTADO CON PELLETS.**

CAPÍTULO 5

En este capítulo nos enfocaremos específicamente en el análisis de la eficiencia de la combustión de un caldero alimentado por pellets.

Al no existir calderas para pellets en nuestro medio es complicado establecer con exactitud la eficiencia en base a mediciones que deberían realizarse para determinar los productos de los gases de combustión, perdidas por inquemados y perdidas por transferencia de calor. Por todo esto se hará un análisis netamente teórico del proceso de combustión, en base a las propiedades químicas del pellet establecidas por la normativa europea (Anexo 2).

Con la finalidad de establecer comparaciones, se trabajara en base al proyecto de análisis de la eficiencia de la combustión del caldero de vapor de la empresa Colineal ⁵⁰ cuyo combustible de alimentación (leña) teóricamente se reemplazara por el biocombustible (pellets).

Finalmente en base al cálculo se realizara una comparación de la eficiencia utilizando los dos combustibles antes mencionados.

5.1 GENERALIDADES

Como se menciona en el capítulo 2, el principal uso del pellet como biocombustible es la generación de energía calórica para procesos de secado, calefacción y a nivel industrial para la producción de vapor.

En nuestro medio el pellet ofrece a las industrias fabricante de muebles de madera la posibilidad de optimizar sus recursos al utilizar sus desechos de madera como combustible para sus calderos sustituyendo a la leña y sin tener que pagar el sobre costo del combustible fósil (fuel oil o gas), o reducir el costo del combustible, ya que el pellet lo reemplazaría.

⁵⁰ ARPI ELMER, PATINO CARLOS, “PROYECTO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LA CALDERA DE VAPOR EMPRESA COLINEAL”. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca 2006.

5.2 CALDERAS DE PELLETS

Las calderas de pellet poseen un moderno sistema de calefacción, controles totalmente automáticos desde el sistema de alimentación, encendido y combustión, así como control de la regulación de la temperatura digital. Los residuos de cenizas en el quemador son muy bajos, necesiéndose periodos más largos de tiempo para el vaciado del contenedor de cenizas debajo del quemador.

Existen calderos de pellets horizontales y verticales, entre sus grandes ventajas destaca la alta eficiencia que oscila entre 90 y 93%.

En las figuras 5.1 y 5.2 se observan los calderos de pellets vertical y horizontal respectivamente, cada uno con sus componentes.

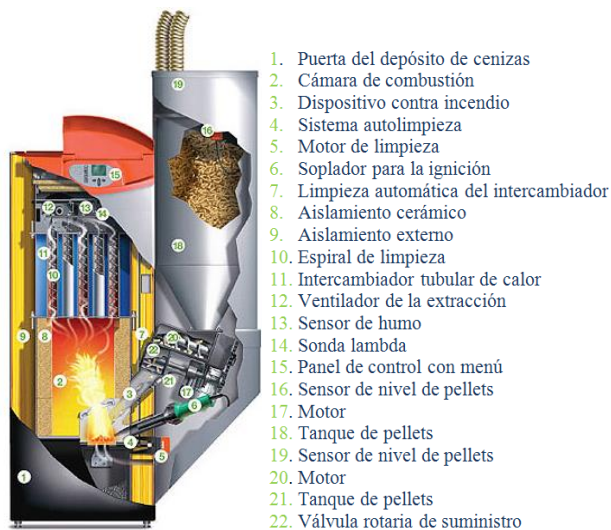


Figura 5.1 Caldero de pellets vertical

Fuente: www.termosun.com

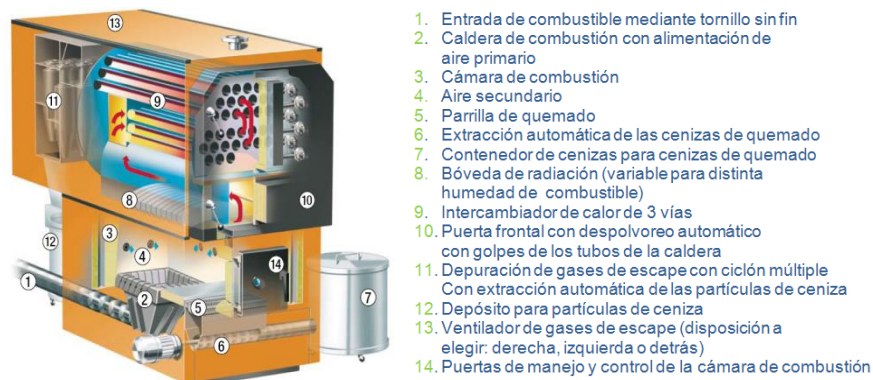


Figura 5.2 Caldero de pellets horizontal

Fuente: www.pelletfeuerung.ch

5.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CALDERAS DE PELLET

El funcionamiento del caldero de pellets trabaja en forma completamente automática. Si el quemador recibe la señal de arrancar o sea se genera la necesidad de calentar, el transportador vierte los pellets en la boquilla del quemador y los inflama mediante un cuerpo calefactor (espiral). En cuanto los pellets empiezan a arder bien, el quemador se activa a la potencia programada en la cual se mantiene hasta que el sistema esté calentado. Luego el quemador se apaga y los pellets terminan su combustión en la cámara del quemador o se suprime la combustión completamente. El quemador está preparado así para arrancar de nuevo. Todo el ciclo se repite siempre de nuevo de acuerdo a la necesidad.

La potencia de la caldera y otras funciones del quemador están controladas por la regulación electrónica que permite ajustar el funcionamiento de la caldera en condiciones concretas del sistema en su totalidad. El llenado con pellets, la limpieza de la cámara de combustión del quemador y la recogida de cenizas se realizan una vez por 30 días, según la calidad de los pellets y la dimensión del depósito. Si hace falta, las calderas pueden disponer de un sistema automático para recoger las cenizas para una operación mínima.

5.3 INTRODUCCION AL CALDERO DE COLINEAL

La empresa Colineal S.A en una de las empresas más importantes en la fabricación de muebles de madera en la ciudad Cuenca, dentro de sus instalaciones posee un caldero de vapor alimentado con leña o retazos de madera de sus procesos de fabricación, por esta razón se eligió esta caldera para la respectiva comparación sustituyendo teóricamente la leña por los pellets.

La caldera de la empresa Colineal actualmente utiliza la leña como único combustible necesario para la producción de vapor que posteriormente será y utilizado en diferentes subprocesos. El análisis completo de la eficiencia de este caldero se realizo en el proyecto referenciado en el pie de página 50, lo resultados de este proyecto se resumen en las siguientes tablas:

$\underbrace{0.0375C + 0.027H_2 + 0.00016 N_2 + 0.0121 O_2 + 0.0000424 \text{ Cenizas}}_{\text{Combustible}} + \underbrace{0.0058 H_2O}_{\text{Humedad}} +$ $\underbrace{+ 0.0626O_2 + 0.235 N_2}_{\text{Aire}} \rightarrow \underbrace{0.03525 CO_2 + 0.00225 CO + 0.0328 H_2O + 0.235 N_2}_{\text{Productos}} +$ $\underbrace{+ 0.0236 O_2 + 0.0000424 \text{ Cenizas}}_{\text{Productos}}$					
PRODUCTOS O GASES DE COMBUSTIÓN HÚMEDOS					
Gases de Combustión	Volumen (kmol)	%Volumen humos	Masa molar (kg/kmol)	Masa (kg)	%Peso humos
CO ₂	0,03524	10,636%	44	1,550	16,173%
CO	0,00226	0,680%	28	0,063	0,658%
H ₂ O	0,03511	10,596%	18	0,632	6,591%
O ₂	0,02356	7,109%	32	0,753	7,862%
N ₂	0,23514	70,964%	28	6,584	68,667%
Cenizas	0,00004	0,012%	106	0,004	0,046%
	Volumen (kmol)	%Volumen humos	Masa molar (kg/kmol)	Masa (kg)	%Peso humos
TOTAL	0,33136	100%		9,588	100%
PRODUCTOS O GASES DE COMBUSTIÓN SECOS					
Gases de Combustión	Volumen (kmol)	%Volumen humos	Masa molar (kg/kmol)	Masa (kg)	%Peso humos
CO ₂	0,03524	11,897%	44	1,550	17,314%
CO	0,00226	0,761%	28	0,063	0,705%
O ₂	0,02356	7,952%	32	0,753	8,416%
N ₂	0,23514	79,375%	28	6,584	73,512%
Cenizas	0,00004	0,014%	106	0,004	0,050%
TOTAL	0,29624	100%		8,956	100%

Tabla 5.1 Análisis de la combustión para el caldero de leña de Colineal**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

Parametro Medido	% Volumetricos de gases secos
O2	7.9%
CO2	12.5%
CO	>8000ppm
N2	78.78%
Nox	169.5ppm
Exceso de aire	60.55%
Eficiencia Combustion	72.95%
Temperatura Gases	377.9 C
Temperatura ambiente	17C

Tabla 5.2 Resultados Promedio del análisis de gases de chimenea**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

Calor de Combustion (Q)		Potencia Calorifica (	
KJ/kmol _{madera}	kJ/kg _{madera}	kJ/hr	kW
-216528,82	18476,73	1108603,8	307,95

Tabla 5.3 Calor Total de combustión proporcionado por la leña.**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

Potencia Calorifica de los gases de combustion en la chimenea	Porcentaje de perdidas de calor por la Chimenea
(KW)	(%)
58,33	18,123

Tabla 5.4 Potencia calorífica perdida por los gases de escape**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

Potencia Calorifica de los Inquemados (KW) $\dot{Q}_{Inquemados}$	Porcentaje de Perdidas de calor por Inquemados (%)
26.821	8.33

Tabla 5.5 Potencia calorífica perdida por Inquemados**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

Combustible	Madera
Eficiencia de la combustion	73,54%

Tabla 5.6 Eficiencia Total de la caldera de leña**Fuente:** Proyecto para mejorar la eficiencia de la caldera de vapor empresa Colineal ⁽¹⁾

5.4 ANALISIS DE LA COMBUSTION

Al tratarse de un combustible sólido como lo es el pellet, en primer lugar este experimenta una gasificación en el hogar, de forma que los gases producidos se combinan con el aire formando la llama; a continuación la parte que contiene el carbono, al alcanzar la temperatura de inflamación, entra en combustión por su superficie.

Los pellets están caracterizados por el alto poder calorífico (comparado con la leña) que suministran al quemarse y por su bajo contenido de materias volátiles y cenizas.

En base a la normativa europea se considera que la estructura química del pellet es la siguiente:

ELEMENTO	PORCENTAJE
C	50%
H ₂	6%
O ₂	43,75%
S	0,03%
N	0,22%
TOTAL	100%

Tabla 5.7 Propiedades Químicas del Pellet ⁵¹
(Fuente: El Autor.)

Cuando el pellet ingresa al hogar de la caldera, contiene aproximadamente 5% de humedad (H₂O), este porcentaje afecta la masa aprovechable del combustible.⁵²

5.5 PORCENTAJE DE MASA APROVECHABLE

Mediante la ecuación 5.1 se determina la masa aprovechable de cada elemento.

$$Y = \frac{X \cdot (100 - Z^a)}{100}$$

Ecuación 5.1 Porcentaje de masa aprovechable
(Fuente: Manual de calderas) ⁵³

De donde:

Y Porcentaje de masa aprovechable de cada elemento.

X Porcentaje de masa seca de cada elemento químico.

Z^a Porcentaje de humedad que contiene la madera (5%).

Los resultados se presentan en la tabla 5.8

ELEMENTO	PORCENTAJE (%)	Y (%)
C	50	47,5
H ₂	6	5,7
O ₂	43,75	41,5625
S	0,03	0,0285
N	0,22	0,209
Kg Pellet	100	95

Tabla 5.8 Porcentaje de masa aprovechable de cada elemento.
(Fuente: El Autor.)

⁵¹ Normativa Europea para los pellets de madera (Anexo 2).

⁵² Para una correcta compactación el pellet debe contener una humedad de 8 a 12% sin embargo luego de este proceso la humedad se reduce hasta que finalmente en el enfriador su humedad final se aproxima a 5%

⁵³ LAWRENCE, Kohan, Manual de Calderas, McGraw Hill, Madrid 2000.

Es decir que por cada kilogramo de pellets el porcentaje de masa aprovechable será de 0.95 kilogramos.

Para efectos de cálculos en la determinación del aire teórico necesario para la combustión, es preciso tratar cada componente químico del pellet en kmol mediante la siguiente relación:

$$m_i = N_i \cdot M_i \quad [Kg]$$

Ecuación 5.2 Masa de una sustancia

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

De donde:

m_i Masa de una sustancia (Kg)

N_i Numero de moles (Kmol)

M_i Masa molar (Kg/kmol)⁵⁴

El resultado para cada elemento se presenta en la tabla 5.9

ELEMENTO	C	H ₂	O ₂	S	N ₂
m_i (Kg componente/Kg pellet)	0,475	0,057	0,4156	0,000285	0,00209
M_i (Kg componente/Kmol componente)	12	2	32	32	28
N_i (Kmol componente/Kmol pellet)	0,0396	0,029	0,01299	0,00000891	0,0000746

Tabla 5.9 Porcentaje de cada elemento expresado en kilomoles.

(Fuente: El Autor.)

5.6 ANALISIS ESTEQUIOMETRICO

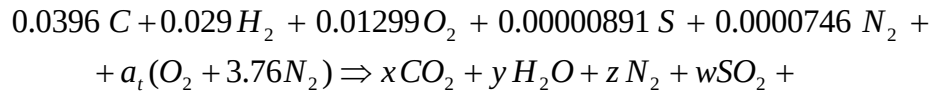
Se analiza una combustión estequiometria para calcular el aire mínimo o teórico necesario para la combustión, es decir teóricamente indispensable para que todo el carbono y todo el hidrogeno del combustible se combinen con el oxigeno del aire.

Se considera que el proceso de combustión teórico tiende a combustionarse completamente con la mínima cantidad de aire necesario (aire teórico) en condiciones normales (25°C, 101.325 kPa), por lo tanto para calcular la cantidad de

⁵⁴ Tomado del anexo 5.1

aire necesario partimos de la ecuación estequiometria expresada en base a los componentes del combustible (pellets) combinado con el aire y sus respectivos productos tal como se observa en la ecuación.

Combustible + Aire = Productos



Ecuación 5.3 Ecuación estequiometria para el pellet

(Fuente: Cengel, Yanus, "Termodinámica")

Realizando el balance de masa se obtienen los respectivos coeficientes:

$$\begin{aligned} x &= 0.0396 & w &= 0.00000891 \\ y &= 0.029 & a_t &= 0.0411 \\ z &= 0.1546 \end{aligned}$$

Determinados estos coeficientes se obtiene la cantidad de aire seco en condiciones normales necesarias para una combustión completa de un kmol de pellet

$$a_t \bullet 4.76$$

$$0.0411 \bullet 4.76 = 0.1956 \text{ kmol aire seco}$$

A este valor se le adiciona la humedad del aire, para ello es necesario encontrar la presión parcial de dicha humedad del aire

$$P_{v,aire} = \phi_{aire} \bullet P_{sat@T^{\circ}C} \quad [kPa]$$

Ecuación 5.4 Presión Parcial del aire

(Fuente: Cengel, Yanus, "Termodinámica")

De donde:

$$\phi_{aire} \quad \text{Humedad Relativa del aire en Cuenca (64\%)}^{55}$$

$$P_{sat@T^{\circ}C} \quad \text{Presión de saturación a la temperatura que ingresa el aire (T = 17^{\circ}C).$$

$$P_{sat@17^{\circ}C} = 2.085 \text{ kPa} \quad (\text{Ver Anexo 5.2})$$

⁵⁵ **Proyecto Cuenca Aire:** Análisis y Revisión de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Cuenca.

La presión parcial que tiene la humedad en el aire será:

$$P_{v,aire} = 0.64 \bullet 2.085 kPa$$

$$P_{v,aire} = 1.3344 kPa$$

Suponiendo un comportamiento de gas ideal, el número de moles de la humedad del aire será:

$$N_{v,aire} = \left(\frac{P_{v,aire}}{P_{Total}} \right) \cdot N_{Total} \quad [kmol]$$

Ecuación 5.5 Cantidad de moles del aire

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

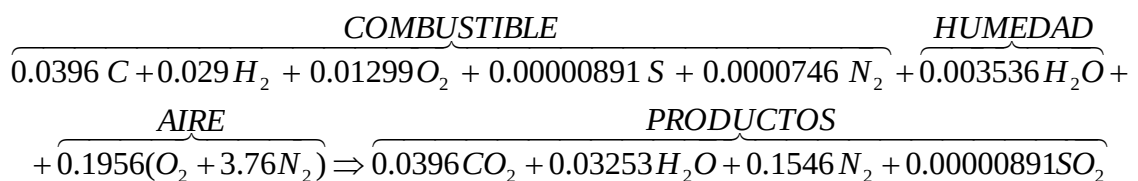
P_{Total} Presión atmosférica en Cuenca (73.8 kPa) ⁽⁵⁵⁾

N_{Total} Cantidad total de kmol de aire

$$N_{v,aire} = \left(\frac{1.3344 kPa}{73.8 kPa} \right) \bullet 0.1956 kmol_{aireseco}$$

$$N_{v,aire} = 0.003536 kmol_{humedad}$$

El porcentaje de humedad queda expresado en la ecuación estequiometria de la siguiente manera:



A la cantidad de aire teórico calculado (0.1956 kmol aire seco) se le adiciona el porcentaje existente de humedad para obtener la masa final de aire.

Masa de aire seco

$$M_{aire} = 29 Kg / kmol$$

$$m_{aire} = 0.1956 \text{ kmol} \cdot 29 \text{ kg / kmol}$$

$$m_{aire} = 5.6724 \text{ Kg}_{aireseco}$$

Masa del agua presente

$$m_{Agua} = 18 \text{ Kg / kmol}$$

$$m_{Agua} = 0.003536 \text{ kmol} \cdot 18 \text{ kg / kmol}$$

$$m_{Agua} = 0.0636 \text{ Kg}_{agua}$$

Masa del aire húmedo

$$m_{Aire Humedo} = 5.6724 \text{ Kg} + 0.0636 \text{ Kg}$$

$$m_{Aire Humedo} = 5.736 \text{ Kg}_{Aire Humedo}$$

5.6.1 RELACION AIRE COMBUSTIBLE

En definitiva la proporción entre la masa de aire y la masa del combustible aprovechable para el proceso de combustión es:

$$AC = \frac{m_{Aire Humedo}}{m_{combustible}}$$

Ecuación 5.6 Relación Aire - Combustible

(Fuente: Cengel, Yanus, "Termodinámica")

$$AC = \frac{5.736}{0.95} = 6.037 \frac{\text{Kg}_{Aire}}{\text{Kg}_{Pellet}}$$

Teóricamente se puede conocer la masa de los productos de combustión basándonos en la ecuación 5.2 o también a partir del concepto de la conservación de masa.

$$(m_{combustible} + m_{aire} = m_{productos})$$

Obteniendo de esta manera:

$$m_{productos} = 6.656 \frac{\text{Kg humos humedos}}{\text{Kg madera}} \quad \text{o} \quad m_{productos} = 6.088 \frac{\text{Kg humos secos}}{\text{Kg madera}}$$

En la *tabla 5.10* se presenta un resumen de los resultados obtenidos además de la masa y volumen de los humos productos de la combustión, acompañados por sus respectivos porcentajes, todo ello referido a los 0.95 Kg de pellet aprovechable, esto permitirá analizar hasta que valores rigen cada uno de los productos.

COMBUSTIBLE + AIRE					
Combustible		Relacion A/C (Kg Aire/Kg Pellet)	Flujo Masico Combustible (Kg Pellet/h)	Flujo Masico Aire (Kg aire/h)	Caudal del Aire (m³/h)
1Kg Pellet		6,037	60	362,22	0,082
PRODUCTOS DE COMBUSTION HUMEDOS					
Gases de Combustion	Volumen (kmol)	%Volumen humos	Masa Molar (Kg/kmol)	Masa (Kg)	% Peso humos
CO2	0,0396	17,46570811	44	1,7424	26,1749745
H2O	0,03253	14,34746174	18	0,58554	8,79619754
N2	0,1546	68,18683015	28	4,3288	65,0288279
TOTAL	0,23	100		6,65674	100
PRODUCTOS DE COMBUSTION SECOS					
Gases de Combustion	Volumen (kmol)	%Volumen humos	Masa Molar (Kg/kmol)	Masa (Kg)	% Peso humos
CO2	0,0396	20,374	44	1,7424	28,6173022
SO2	0,00000891	0,005	64	0,00057024	0,00936566
N2	0,1546	79,540	28	4,3288	71,0965208
Cenizas ()	0,000159	0,400	106	0,016854	0,2768113
TOTAL	0,19436791	100		6,08862424	100

Tabla 5.10 Resumen de resultados del análisis estequiométrico
(Fuente: El Autor.)

5.6.2 TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCIO

Para determinar la Temperatura del punto de Rocío (Temperatura a la cual el vapor de agua en los productos empieza a condensarse cuando los productos se enfrían) se supone comportamiento de gas ideal y se encuentra la presión parcial del vapor de agua.

$$P_v = \left(\frac{N_v}{N_{\text{productos}}} \right) \cdot P_{\text{productos}}$$

$$P_v = \left(\frac{0,03252 \text{ kmol}}{0,226728} \right) \cdot 101,325 \text{ kPa}$$

$$P_v = 14,53 \text{ kPa}$$

Por lo tanto la temperatura del punto de rocío (Anexo 5.3) será:

$$T_{pr} = T_{sat@14,53kPa} = 53.20C$$

5.7 CALOR PROPORCIONADO POR LA COMBUSTION DE PELLETS

El calor que proporcionan los pellets durante la combustión depende de su poder calorífico inferior y de la diferencia de las entalpías sensibles del estado especificado $\bar{h}$ con relación a las entalpías sensibles del estado de referencia estándar (25°C, 1 atm) de los productos y los reactivos. Esto se expresa mediante la *ecuación 5.7*

$$Q - W = PCI + \sum N_{prod}(\bar{h} - \bar{h}^o)_{prod} - \sum N_{react}(\bar{h} - \bar{h}^o)_{react} \quad [KJ / Kmol]$$

Ecuación 5.7 Calor que proporcionan lo pellets durante la combustión

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

Temperatura de flama

Para determinar la temperatura de la flama que producen los pellets como combustible, se deberían realizar mediciones en el hogar con la ayuda de termómetros digitales. Para nuestro caso asumiremos la temperatura de flama que fue medida en el hogar de la caldera utilizando la madera como combustible ($T = 750 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1023 \text{ }^{\circ}\text{K}$)⁽⁵⁰⁾. Esta temperatura permite determinar las entalpías sensibles de los gases de combustión (tablas desde el anexo 5.4 al 5.9).

Poder calorífico inferior de los pellets

El poder calorífico inferior de los pellets según la norma Europea DIN 51731 es de aproximadamente 19 MJ/Kg (Anexo 2). Para trabajar en la *ecuación 5.7* el poder calorífico debe ser expresado en KJ/Kmol. Haciendo referencia al apartado 5.5 de este capítulo en donde se determinó que de 1 Kg de pellet, la masa aprovechable resulta 0.95 Kg (debido al 5% de humedad), según la tabla 5.3 esto es equivalente a:

$$\sum N_i = 0.08167 \text{ kmol de pellet}$$

En consecuencia se deduce que la masa molar del pellet tiene una relación de:

$$M = \frac{m_r}{\sum N_i} = \frac{0.95 \text{ kg de pellet}}{0.08167 \text{ kmol de pellet}}$$

$$M = 11.632 \frac{\text{kg de pellet}}{\text{kmol de pellet}}$$

De esta manera el PCI corresponde a 221008 KJ / kmol pellet

Cabe destacar que por tratarse de un combustible solido, la $\bar{h}_{\text{pellet}} = 0$. En cuanto a Q y W constituyen las iteraciones de calor y trabajo por mol de combustible (KJ/kmol) siendo esta ultima igual a cero (W=0) por tratarse de un proceso de combustión de flujo cerrado que no implica ninguna iteración de este tipo.

Las entalpias sensibles para las condiciones estándar y las temperaturas especificadas a la entrada y la salida de la cámara de combustión se presentan en la tabla 5.11

SUSTANCIA	$\bar{h}_{290 K}$	$\bar{h}_{298 K}$	$\bar{h}_{1023 K}$
	KJ/Kmol	KJ/Kmol	KJ/Kmol
O ₂	8443	8682	32193.15
N ₂	8432	8669	30882.7
H ₂ O	9631	9904	36833.95
CO ₂	—	9364	44023.1

Tabla 5.11 Entalpias sensibles a las temperaturas especificadas
(Fuente: El Autor.)

Basándonos en los parámetros antes expuestos podemos determinar la relación de transferencia de calor que se daría dentro de la cámara de combustión, fundamentados en la relación de conservación de energía para un sistema cerrado (Ecuación 5.7)

$$Q - W = PCI + \sum N_{\text{prod}}(\bar{h} - \bar{h}^0)_{\text{prod}} - \sum N_{\text{react}}(\bar{h} - \bar{h}^0)_{\text{react}} \quad [\text{KJ} / \text{Kmol}]$$

$$Q = 221008 \text{ KJ/kmol}_{\text{pellet}} + \left[\begin{aligned} &(0.0396 \text{ kmol CO}_2)(44023.1 - 9364) \text{ KJ/kmol}_{\text{CO}_2} + \\ &(0.03253 \text{ kmol H}_2\text{O})(36833.95 - 9904) \text{ KJ/kmol}_{\text{H}_2\text{O}} + \\ &(0.1546 \text{ kmol N}_2)(30882.7 - 8669) \text{ KJ/kmol}_{\text{N}_2} \end{aligned} \right] -$$

$$- \left[\begin{aligned} &(0.1956 \text{ kmol O}_2)(8443 - 8682) \text{ KJ/kmol}_{\text{O}_2} + \\ &(0.7354 \text{ kmol N}_2)(8432 - 8669) \text{ KJ/kmol}_{\text{N}_2} + \\ &(0.003536 \text{ kmol H}_2\text{O})(9631 - 9904) \text{ KJ/kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \end{aligned} \right]$$

En conclusión el calor de combustión de los pellets será:

$$Q = \frac{226912.77 \text{ KJ/Kmol}_{\text{pellet}}}{11.632 \text{ Kg}_{\text{pellet}}/\text{kmol}_{\text{pellet}}} = 19507.631 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}_{\text{pellet}}}$$

Potencia Calorífica

En función del flujo másico del combustible que consume la caldera se puede determinar la potencia calórica de la combustión de pellets.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot Q$$

Ecuación 5.8 Tasa de Transferencia de calor

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

$$\dot{Q} = 60 \text{ Kg}_{\text{pellet}}/\text{h} \cdot 19507.631 \text{ KJ/Kg}_{\text{pellet}}$$

$$\dot{Q} = 1170457.86 \text{ KJ/h} \approx 325.12 \text{ KW}$$

5.8 PERDIDAS DE CALOR EN LA CHIMENEA

Cuando se produce la combustión se generan gases que son aprovechados en gran porcentaje por el agua que tiene como fin la evaporación, pero dichos gases tienen una sola trayectoria saliendo por la chimenea en donde se libera el calor a la atmósfera.

Para el caso real del caldero alimentado con leña fueron evaluadas las pérdidas de calor (Analizador de gases TESTO 350) que se producen por estos gases, en donde las mediciones se reflejan en la tabla 5.2.

En base a estos resultados se determinó que la medición de los gases $\text{CO}_2 = 12.5\%$ y $\text{CO} = 0.8\%$ (8000 ppm), representan el 100% de Carbono C que puede combinarse con el O_2 lo que equivale a decir que dicho análisis muestra que en este proceso de combustión solo el 94% se convierte en CO_2 mientras que el 6% restante se transforma en CO.

Para el caso de los pellets, al no existir en nuestro medio la caldera de pellets, no se puede medir los valores reales de temperatura y los porcentajes de los gases que se

producirían con su combustión. Sin embargo para establecer comparaciones se utilizarán las mismas temperaturas que fueron medidas para el caldero de leña, es decir la temperatura de los gases de combustión será $T_{salida} = 378^{\circ}\text{C} \approx 651^{\circ}\text{K}$, y la temperatura de ingreso del aire a la caldera será $T_{salida} = 378^{\circ}\text{C} \approx 651^{\circ}\text{K}$.

Considerando en base a la teoría que el porcentaje de CO del pellet es prácticamente nulo en la combustión se hace un recálculo del calor de perdida aplicando la ecuación 5.9.

$$\dot{Q}_{gases} = \dot{m}_{gases} \cdot C_{p_{gases}} \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad [KW]$$

Ecuación 5.9 Tasa de Transferencia de calor

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

El flujo másico de los gases estará en función de la masa de los productos de combustión secos por lo tanto

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gases} &= 6.088 \frac{\text{Kg}_{gases\ secos}}{\text{Kg}_{pellet}} \cdot 60 \frac{\text{Kg}_{pellet}}{h} = 365.28 \frac{\text{Kg}_{gases\ secos}}{h} \\ \dot{m}_{gases} &= 0.1014 \frac{\text{Kg}_{gases\ secos}}{seg} \end{aligned}$$

El $C_{p_{gases}}$ corresponde al poder calorífico a presión constante de los gases de la combustión, este puede ser determinado a partir de la ecuación 5.10

$$C_{p_{gases}} = \frac{1}{m_{gases}} (m_{CO_2} \cdot C_{p_{CO_2}} + m_{N_2} \cdot C_{p_{N_2}})$$

Ecuación 5.10 Calor específico de los gases de combustión

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

$$\begin{aligned} C_{p_{gases}} &= \frac{1}{6.088 \text{Kg}} \left(1.7424 \text{Kg} \cdot 1.10248 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} + 4.3288 \text{Kg} \cdot 1.086 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right) \\ C_{p_{gases}} &= 1.0877 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación 5.9 tenemos:

$$\dot{Q}_{gases} = -0.1014 \frac{Kg_{gases\ secos}}{seg} \cdot 1.0877 \frac{KJ}{Kg.K} \cdot (651K - 290K)$$

$$\dot{Q}_{gases} = -39.81KW$$

Podemos Cuantificar este valor en porcentaje si tomamos en cuenta que todo el calor de combustión de los pellets (325.12KW) representa el 100%, en consecuencia el calor perdido por los gases que escapan por la chimenea (39.81KW) será aproximadamente el **12.24%**.

5.9 PERDIDAS DE CALOR POR INQUEMADOS

La madera solida que se utiliza actualmente en la empresa Colineal, al quemarse produce ceniza como desecho de la combustión, además de combustible no quemado por la combustión incompleta dándose como resultado la formación de hollín o carbón puro y material particulado (volátiles) que son sólidos más pequeños que el hollín y se encuentran distribuidos en el aire.

En consecuencia todo esto da origen a perdidas de calor y formación de CO en los productos de combustión. El porcentaje exacto de todos estos desechos se debe determinar mediante un análisis químico con la ayuda de instrumentación precisa. Los resultados de de las pérdidas de calor utilizando leña como combustible se reflejan en la tabla 5.5.

En el caso de la combustión de pellets, el porcentaje de inquemados reflejado en la ceniza según pruebas realizadas por un instituto brasileño ⁵⁶ basados en los requerimientos de la norma europea DIN 51731:199 mostro los siguientes resultados

Ensayo	Contenido de Cenizas
1	0.40
2	0.57
3	0.54
4	0.26
Promedio	0.44

Tabla 5.12 Resultado del contenido de cenizas de un pellet

Fuente: CIS ⁽⁶⁾

⁵⁶ Centro de Innovación de servicios (CIS) Tecnológicos de Madera de Galicia, Brazil.

Esto quiere decir que su combustión será casi total (99,6%) y que prácticamente no se producirán cenizas (por 1 kg de pellet se producen menos de 4 gr de ceniza). En consecuencia existe un balance neutro de emisiones de CO₂ es decir que el CO₂ de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación, por lo que no supone un incremento del gas invernadero en la atmósfera. Además de no producir emisiones sulfuradas o nitrogenadas, ni tampoco partículas sólidas volátiles.

Por todo lo anteriormente dicho, considerando el contenido de cenizas de 0.4%, el calor de perdidas producido por inquemados será de 1.3 KW.

5.10 EFICIENCIA DE LA COMBUSTION

Una vez establecido el calor de combustión que genera un kilogramo de pellet, según la ecuación de combustión determinada en condiciones ideales pero con valores reales de temperatura de los gases de salida y flujo másico del combustible determinados para el caldero de la empresa Colineal ⁽¹⁾, este equivale al 100% de calor aportado por los pellets dentro de la cámara de combustión, el cual es afectado por las pérdidas de calor de los gases de combustión y de los inquemados. Por esta razón el rendimiento final de la combustión estar dado por la *ecuación 5.11*

$$\eta_{combustion} = 100\% - \%Q_{gases} - \%Q_{Inquemados}$$

Ecuación 5.11 Calor específico de los gases de combustión

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

$$\eta_{combustion} = 100\% - 12.24\% - 0.4\%$$

$$\eta_{combustion} = 87,36\%$$

En conclusión, si al caldero de la empresa Colineal se le alimentara con pellets, su eficiencia en la combustión se incrementaría en aproximadamente 14%, de esta manera el calor aportado sería más aprovechado y en general la caldera tendría un mejor rendimiento, incluso a nivel de mantenimiento (limpieza de cenizas).

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS TECNICO FINANCIERO DEL PROYECTO

6.1 GENERALIDADES

En este capítulo se determinara el análisis financiero del proyecto que engloba las cinco maquinas con las cuales se hace efectivo el proceso de fabricación de pellets, desde la preparación de los residuos hasta obtener el pellet final, por tal motivo se procederá a desglosar los precios para cada una de la maquinas de la siguiente manera:

- Costo de materiales
- Costo del sistema eléctrico
- Costo de maquinas/herramientas
- Costo de la mano de obra directa
- Costo de la mano de obra indirecta
- Costo por imprevistos
- Costo indirectos de fabricación

Todos los componentes y materiales necesarios para la construcción de las maquinas se encuentran disponibles en las diferentes casas comerciales del medio garantizando de esta manera la rápida construcción e instalación, así como en caso de alguna falla conseguir de manera rápida el repuesto o la fabricación del mismo.

Dentro de la mano de obra indirecta se considera el diseño (planos de construcción) y la dirección del proyecto, el cual estará a nuestro cargo. Además se prevé un valor del 2% de costo del proyecto para imprevistos que se pueden presentar en el momento de la construcción de la maquinas.

El costo por indirectos de fabricación será del 22%, este valor incluirá gastos administrativos y la ganancia prevista por la construcción de cada máquina.

6.2 COSTOS DEL MOLINO DE MARTILLOS

Costos de materiales

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
1	Rodamiento SKF 61907, chumacera CTG215	u	2	28,22	56,44
2	Eje de Acero St36 Ø 1 1/2	m	0,42	26,68	11,2
3	Perno cabeza hexagonal M 10x40	u	4	0,18	0,72
4	Tuerca hexagonal M 10x1.5	u	12	0,08	0,96
5	Arandela plana A10	u	24	0,03	0,72
6	Arandela de presion A10	u	12	0,03	0,36
7	Chaveta A 12x9x32	u	2	0,25	0,5
8	Chaveta A 12x8x50	u	1	0,4	0,4
9	Prisionero cabeza alien M5x12	u	2	0,08	0,16
10	Varilla estructural redonda Ø 8mm	m	0,85	2,5	15
11	Buje M4 Tubo estruct. Ø 1/2 " x 0,02	u	4	0,08	0,32
12	Buje eje porta discos St36 Ø 63.5x0.04	u	2	2,96	5,92
13	Arandela plana A8	u	8	0,02	0,16
14	Arandela de Presion A8	u	8	0,02	0,16
15	Tuerca hexagonal M 8x1.25	u	8	0,07	0,56
16	Buje M5 Tubo estruct. Ø 1/2 " x 0,025	u	18	0,09	1,62
17	Visagra Ø 12 mm	u	1	0,9	1
18	Banda para motor tipo V	u	1	5,8	5,8
19	Polea Ac. St36 Ø 3 pulg x 48mm	u	1	117,4	5,68
20	Polea Ø 4.5 pulg x 48 mm	u	1	264,16	13,2
21	Perno cabeza hexagonal M10 x 25	u	8	0,15	1,2
22	Platina 40x3 (mm)	m	0.2	8,4	1,68
23	Plancha Negra e = 6.4 (mm)	m2	1.50	63,08	94,63
24	Placaha de Acero 450x185x3 (mm)	m2	0.09	27,89	2,82
25	Angulo L 30x30x 4	m	10	2,83	28,33
26	Plancha negra e = 9.5 (mm)	m2	0.05	121,81	6,09
27	Brocas Acero Ø 8	u	3	1,06	3,18
28	Brocas Acero Ø 10	u	3	1,58	4,74
29	Electrodos 6011 1/8	kg	2	1.20xlb	5,28
30	Electrodos 7018 1/8	kg	2	1.70xlb	7,48
31	Disco de corte 7 in	u	1	1.15	1,15
32	Disco de desbaste 7 in	u	1	1.85	1,85
33	Pintura anticorrosiva	Gl	0,5	12,33	6,17
34	Gasolina	Gl	0,25	1.48	0,37

Tabla 6.1 Costo de los materiales del molino de martillos (Continuación).

(Fuente: El Autor.)

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
35	Motor 7 HP con arrancador	u	1	493	493
36	Rele termico Siemens 25 Amp	u	1	34	34
37	Pulsante NA	u	1	7	7
38	Pulsante NC	u	1	7	7
39	Contactador Siemens 3RT1036	u	3	37,3	111,9
40	Señales luminosas 25 Amp	u	3	3	9
41	Tablero electrico 40x30	u	1	24.5	24,5
42	Cable felxible # 10	m	5m	0.22	1,1
	TOTAL				973

Tabla 6.1 Costo de los materiales del molino de martillos (Continuación).

(Fuente: El Autor.)

Costos de maquinas/herramientas

N°	MAQUINA	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	Torno	15	7	105
2	Soldadora electrica	10	8	80
3	Soldadora MIG	12	8	96
4	Taladro	10	6	60
5	Oxicorte	12	4	48
6	Compresor	8	1	8
7	Amoladora	5	6	30
8	Fresadora	15	1	15
COSTO TOTAL \$				442

Tabla 6.2 Costo de maquinaria necesaria para la construcción del molino de martillos.

(Fuente: El Autor.)

Costos de mano de obra directa

Para la construcción del molino, se estima un tiempo aproximado de tres meses, tiempo en el cual se requerirá del siguiente personal.

CARGO	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1 Mecanico	4	120	480
1 Ayudante	2	120	240
1 Electrico	5	4	20
TOTAL			740

Tabla 6.3 Costo de la mano de obra requerida para construir del molino de martillos.

(Fuente: El Autor.)

Costos de mano de obra indirecta

CARGO	Cantidad (Personas)	TIEMPO	PREC. TOTAL
Dirección del proyecto (Ingeniero contratista)	1	3 semanas	900

Tabla 6.4 Costo mano de obra indirecta requerida para construir del molino de martillos.

(Fuente: El Autor.)

Costo total del molino de martillos

DESCRIPCION	VALOR TOTAL
COSTO DE MATERIALES	973,35
COSTO MANO DE OBRA DIRECTA	740
COSTO MANO DE OBRA INDIRECTA	900
COSTO MAQUINA/HERRAMIENTA	442
IMPREVISTOS (2%)	79,1
INDIRECTOS DE FABRICACION (22%)	887,57
TOTAL \$	4022,02

Tabla 6.5 Costo Total del molino de martillos.

(Fuente: El Autor.)

6.3 COSTOS DEL TAMIZ VIBRADOR**Costos de materiales**

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
1	Angulo L 35x35x4	m	20	5,33	106,67
2	Tubo estructural cuadrado 1 1/2"	m	0,4	3	1,2
3	Planca de acero e = 3mm	m2	2,32	27,89	64,71
4	Malla metalica Ø 6mm	m2	2,25	4,75	11,88
5	Malla metalica Ø 3mm	m2	2,25	4,5	11,25
6	Pernos cabeza hexag. Ø 8 mm x 1"	u	48	0,13	6,24
7	Tuerca hexagonal M8x1.25	u	48	0,07	3,36
8	Aranandela plana A8	u	96	0,02	1,92

Tabla 6.6 Costo de los materiales del tamiz vibrador

(Fuente: El Autor.)

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
9	Arandela de presion A8	u	48	0,02	0,96
10	Eje de Goma Ø 45 mm x 110mm	u	4	4,2	16,8
11	Platina plana 35x3mm	m	12,6	1,08	13,6
12	Platina plana 30x3mm	m	3,32	1,08	3,58
13	Tubo estruct. Redondo Ø 1 3/8 x 3mm	m	0,36	2,09	0,75
14	Acero transmision ST36 Ø 1"	m	0,585	11,85	6,94
15	Plancha negra e = 3mm	m2	0,4	27,89	11,15
16	Plancha negra e = 5mm	m2	0,072	63,75	4,59
17	Chaveta rectangular 8x5x20 mm	u	1	0,25	0,35
18	Polea Ø 84x34	u	1	35	27
19	Polea Ø 67x34	u	1	30	23
20	Chumacera SKF Y-61805	u	2	14,3	28,6
21	Banda de caucho tipo V	u	1	5,05	5,05
22	Electrodos 6011 x 1/8"	Kg	2	2,75	11
23	Electrodos 7018	Kg	2	3,74	7,48
24	Pintura anticorrosiva mate	Gl	1	12,33	9,25
25	Gasolina	Gl	1	1,48	1,48
26	Disco de corte 7"	u	2	1,15	2,3
27	Disco de desbaste 7"	u	1	1,85	1,85
28	Motor 1.5 HP	u	1	169,12	169,12
29	Rele termico Siemens 25 Amp	u	1	28	28
30	Pulsante NA	u	1	7	7
31	Pulsante NC	u	1	7	7
32	Contacto Siemens 3RT1036	u	1	30	30
33	Señales luminosas 25 Amp	u	3	3	9
34	Tablero electrico 40x30	u	1	24,5	24,5
35	Cable flexible # 10	m	5	0.22	1,1
	TOTAL				658,68

Tabla 6.6 Costo de los materiales del tamiz vibrador (Continuación)

(Fuente: El Autor.)

Costos de maquinas

N°	MAQUINA	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	Torno	15	4	60
7	Fresadora	15	4	60
2	Soldadora electrica	10	10	100
3	Taladro	10	6	60
4	Oxicorte	12	4	48
5	Compresor	8	2	16
6	Dobladora tool	10	2	20
7	Soldadora MIG	12	8	96
8	Amoladora	5	8	40
COSTO TOTAL \$				500

Tabla 6.7 Costo de maquinaria necesaria para la construcción del tamiz vibrador.

(Fuente: El Autor.)

Costos de mano de obra directa

Para la construcción del tamiz vibrador, se estima un tiempo aproximado de dos semanas, tiempo en el cual se requerirá del siguiente personal.

N°	CARGO	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	1 Mecanico	4	80	320
2	1 Ayudante	2	80	160
3	1 Electrico	5	4	20
	TOTAL \$			500

Tabla 6.8 Costo de la mano de obra requerida para construir del tamiz vibrador
(Fuente: El Autor.)

Costos de mano de obra indirecta

CARGO	Cantidad (Personas)	TIEMPO	PREC. TOTAL
Direccion del proyecto (Ingeniero contratista)	1	2 semanas	600

Tabla 6.9 Costo de la mano de obra indirecta requerida para construir del tamiz vibrador
(Fuente: El Autor.)

Costo total del tamiz vibrador

DESCRIPCION	VALOR TOTAL
COSTO DE MATERIALES	658,68
COSTO MANO DE OBRA DIRECTA	500
COSTO MANO DE OBRA INDIRECTA	600
COSTO MAQUINA/HERRAMIENTA	500
IMPREVISTOS (2%)	57,9
INDIRECTOS DE FABRICACION (22%)	641,64
TOTAL \$	2958,22

Tabla 6.10 Costo Total del Tamiz vibrador.
(Fuente: El Autor.)

6.4 COSTOS DEL CUARTO DE SECADO

Costos de materiales

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
1	Vidrio claro e = 4mm	m2	9,84	9,2	90,53
2	Plancha de hierro galv e = 3mm	m2	8,46	27,89	235,97
3	Lana de vidrio	m2	8,46	5,2	43,99
4	Tablero de madera e = 6mm	m2	35,6	4,64	165,18
5	Plancha de tool e = 2mm	m2	65,28	18,36	1196,94
6	Perfil C 60x30x2	m2	20,8	2,83	30,79
7	Perfil canal G 60x30x10x2	m2	12	1,57	58,94
8	Angulo L 20mmx3mm (estruct. techo)	m2	84	2,8	235,33
9	Angulo L 30mmx3mm (estruct bandeja)	m2	114,8	2,62	301,35
10	Tubo cuadrado 2"x2mm	m2	12	2,33	28
11	Tablon de madera	m2	5	6.8	34
12	Visagras Ø 1"	4	4	1,6	6,4
13	Remaches 1/8	u	500	0,04	20
14	Electrodos 6011	kg	8	2,75	22
15	Electrodos 7018	kg	2	3,74	7,48
16	Pintura anticorrosiva mate	Gl	2	12,33	24,66
17	Esmalte blanco	Gl	2	15,63	31,2
18	Gasolina	Gl	2	1,48	2,96
19	Disco de corte 7 in	u	2	1,15	2,3
20	Disco de desbaste 7 in	u	1	1,85	1,85
21	Ventilador modelo 315 1Hp	u	2	210	420
22	Rele termico Siemens 25 Amp	u	1	20	20
23	Sensor de humedad	u	1	210	210
24	Pulsante NA	u	1	7	7
25	Pulsante NC	u	1	7	7
26	Contactador Siemens 3RT1036	u	1	30	30
27	Señales luminosas 25 Amp	u	3	3	9
28	Tablero electrico 40x30	u	1	24.5	24,5
29	Cable felxible # 10	m	5	0.22	1,1
TOTAL					3268,47

Tabla 6.11 Costo de los materiales del cuarto de secado

(Fuente: El Autor.)

Costos de maquinas/herramientas

N°	MAQUINA	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	Soldadora	10	40	400
2	Taladro mano	5	40	200
3	Compresor	8	6	48
4	Dobladora tool	10	16	160
5	Amoladora	5	24	120
COSTO TOTAL \$				928

Tabla 6.12 Costo de maquinaria necesaria para la construcción del cuarto de secado.*(Fuente: El Autor.)***Costos de la mano de obra directa**

Para la construcción del cuarto de secado, se estima un tiempo aproximado de tres semanas, tiempo en el cual se requerirá del siguiente personal.

N°	CARGO	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	2 Mecanico	4	120	960
2	1 Ayudante	2	120	240
3	1 Electrico	5	4	20
	1 Albañil	3	40	120
	TOTAL			1340

Tabla 6.13 Costo de la mano de obra requerida para construir el cuarto de secado.*(Fuente: El Autor.)***Costos de mano de obra indirecta**

CARGO	Cantidad (Personas)	TIEMPO	PREC. TOTAL
Dirección del proyecto (Ingeniero contratista)	1	3 semanas	900

Tabla 6.14 Costo de la mano de obra indirecta requerida para construir el cuarto de secado.*(Fuente: El Autor.)*

Costo total del cuarto de secado

DESCRIPCION	VALOR TOTAL
COSTO DE MATERIALES	3268,47
COSTO MANO DE OBRA DIRECTA	1340
COSTO MANO DE OBRA INDIRECTA	900
COSTO MAQUINA/HERRAMIENTA	928
OBRA CIVIL	150
IMPREVISTOS (2%)	149,72
INDIRECTOS DE FABRICACION (22%)	1679,96
TOTAL \$	8416,15

Tabla 6.15 Costo Total del cuarto de cuarto de secado.

(Fuente: El Autor.)

6.5 COSTOS DE LA MAQUINA PELEIZADORA**Costos de materiales**

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
1	Perno cabeza hexagonal M8x80	u	6	0,21	1,26
2	Arandela plana A8	u	12	0,02	0,24
3	Arandela de presion A8	u	6	0,02	0,12
4	Arandela plana A13	u	6	0,03	0,18
5	Arandela plana A12	u	6	0,03	0,18
6	Perno cabeza hexagonal M12x40	u	6	0,2	1,2
7	Rodamiento SKF 6006	u	1	27,43	27,43
8	Rodamiento SKF 6215	u	1	30,22	30,22
9	Acero Assab 705 Ø 4 "	m	0,7	485,33	339,73
10	Acero Assab 705 Ø 3"	m	0,29	272,94	79,15
11	Perno cabeza hexagonal M6x20	u	6	0,08	0,48
12	Fundicion de bronce Bronce Ø 300x45mm	u	1	1100	1100
13	Rodamiento SKF 32016 X/Q	u	1	44,44	44,44
14	Chaveta 20x8x56	u	1	0,85	0,85
15	Rodamiento SKF 31307 J2/Q	u	4	42,2	168,8
16	Anillo de seguridad 35x1.5	u	4	6,6	26,4

Tabla 6.16 Costo de los materiales de la Peletizadora.

(Fuente: El Autor.)

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
17	Anillo de retencion 30x1.5	u	1	5,4	5,4
18	Tuerca hexagonal M30x10	u	1	0,82	0,82
19	Plancha de tool e = 2mm	m2	1	18,33	18,33
20	Plancha de tool e = 3mm	m2	2,35	27,89	65,54
21	Plancha negra e = 10 mm	m2	0,5	121,81	60,9
22	Fundicion acero maquinable Ø 555x290x30	u	1	900	900
23	Fundicion gris Ø 555x335x30 mm	u	1	970	970
24	Chumacera inferior Ø 95mm	u	1	32,6	32,6
25	Plancha negra e = 50mm	m2	0,029	561,4	16,22
26	Plancha acero inoxidable = 30 mm	m2	0,38	670,5	335,25
27	Plancha negra 3 = 70mm	m2	0,143	864,43	123,52
28	Plancha negra e = 95mm	m2	0,04	1202,02	48,08
29	Plancha negra e = 9mm	m2	0,014	114,09	1,54
30	Tratamiento termico de rodillos	u	4	32	128
31	Eje ST36 Ø 1 1/2 " (porta rodillos)	m	0,44	26,67	11,74
32	Cuchillas de Acero rapido 85x40	u	4	42,58	170,32
33	Perno Avellanado M5x10	u	8	0,06	0,48
34	Perno Alien M10x60	u	4	0,12	0,48
35	Perno Avellanado M6x40	u	6	0,08	0,48
36	Electrodos 6011	kg	2	2,75	5,5
37	Electrodos 7018	kg	8	3,74	29,92
38	Pintura anticorrosiva mate	Gl	1	12,33	12,33
39	Esmalte blanco	Gl	1	15,63	15,63
40	Gasolina		2Gl	1,48	2,96
41	Disco de corte 7 in		3	1,15	3,45
42	Disco de desbaste 7 in		2	1,85	3,7
43	Motor Siemens 40 Hp	u	1	1740	1740
44	Rele termico Siemens 50 Amp	u	1	153	153
45	Pulsante NA	u	1	7	7
46	Pulsante NC	u	1	7	7
47	Contactor Siemens 3RT1036 70A	u	3	349,3	1047,9
48	Señales luminosas 25 Amp	u	3	3	9
49	Tablero electrico 60x40	u	1	43,2	24,5
50	Cable felxible # 12	m	5	0,22	1,1
51	Cable felxible # 10	m	5	0.22	1,1
	TOTAL				7770,77

Tabla 6.16 Costo de los materiales de la Peletizadora (Continuación).

(Fuente: El Autor.)

Costos de maquinas

N°	MAQUINA	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	Torno	15	100	1500
2	Fresadora	15	80	1200
3	Soldadora electrica	10	12	120
4	Taladro pedestal	12	100	1200
5	Oxicorte (Tortuga)	15	24	360
6	Oxicorte	10	8	80
7	Compresor	8	2	16
8	Dobladora tool	10	4	40
9	Soldadora MIG	12	12	144
10	Amoladora	5	80	400
COSTO TOTAL \$				5060

Tabla 6.17 Costo de maquinaria necesaria para la construcción de la peletizadora.

(Fuente: El Autor.)

Costos de la mano de obra directa

Par la construcción del cuarto de secado, se estima un tiempo aproximado de dos semanas, tiempo en el cual se requerirá del siguiente personal.

N°	CARGO	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	2 Mecanicos	4	320	1280
2	1 Ayudante	2	320	640
3	1 Electrico	5	24	120
	TOTAL \$			2040

Tabla 6.18 Costo de la mano de obra requerida para construir la peletizadora.

(Fuente: El Autor.)

Costos de mano de obra indirecta

CARGO	Cantidad (Personas)	TIEMPO	PREC. TOTAL
Direccion del proyecto (Ingeniero contratista)	1	2 meses	3000

Tabla 6.19 Costo de la mano de obra indirecta requerida para construir el cuarto de secado.

(Fuente: El Autor.)

Costo total de la peletizadora

DESCRIPCION	PREC. TOTAL
COSTO DE MATERIALES	7770,77
COSTO DE MAQUINAS	5060
COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA	2040
COSTO DE MANO DE OBRA IN DIRECTA	3000
INPREVISTOS (2%)	208,7
INDIRECTOS DE FABRICACION (22%)	4637,48
TOTAL	22716,95

Tabla 6.20 Costo Total de la peletizadora.

(Fuente: El Autor.)

6.6 COSTOS DEL ENFRIADOR

Costos de materiales

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
1	Perno hexagonal M6x25	u	4	0,08	0,32
2	Arandela Ø 1/4 "	u	4	0,02	0,08
3	Tuerca hegagonal 1/4 "	u	8	0,03	0,24
4	Arandela de presion 1/4 "	u	8	0,02	0,16
5	Perno hexagonal M6x20	u	4	0,07	0,28
6	Plancha e = 3mm	m2	4,4	27,89	122,72
7	Plancha e = 4mm	m2	0,65	31,18	24,27
8	Visagra 1/2 "	u	1	0,6	0,6
9	Visor de cristal	u	1	5	5
10	Angulo 30x30x3mm	m2	6m	4,78	28,68
11	Perno hexagonal M6x40		8	0,1	0,8
12	Arandela Ø 1/4 "		24	0,02	0,48
13	Tuerca hegagonal 1/4 "		24	0,03	0,72
14	Arandela de presion 1/4 "		24	0,02	0,48
15	Angulo 20x20x3mm		1,5m	2,8	4,2
16	Platina 40x5 mm		1,5m	2,55	3,82
17	Perno hexagonal M6x30		6	0,08	0.48
18	Platina 30x5 mm		1,2m	2,45	2,94
20	Perno hexagonal M3x20		6	0,04	0,24

Tabla 6.21 Costo de los materiales del enfriador.

(Fuente: El Autor.)

N°	DESCRIPCION DE MATERIALES	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
21	Arandela plana A3		6	0,02	0,12
22	Arandela de presion A3		6	0,02	0,12
23	Tueca hegagonal A3		6	0,03	0,018
24	Angulo 30x30x4mm		2,4m	4,5	10,8
25	Perno cabeza hexagonal M10x25		8	0,12	0,96
26	Tuerca hexagonal M10		8	0,05	0,4
27	Arandela plana A10		16	0,03	0,48
28	Arandela de presion A10		8	0,02	0,16
29	Plancha espesor 15mm	m2	0,05	165,54	27
30	Eje transmision Ø 1"	m2	0,5	11,85	5,92
31	Platina 25x5 mm	m2	0,5	2	1
32	Plancha e = 5mm	m2	1,6	63,59	101,75
33	Varilla redonda 1/4	m	4,5	1,83	8,25
34	Seguros	u	2	2	4
35	Perno alien avellanado M4x12	u	4	0,08	0,32
36	Arandela plana A4	u	8	0,02	0,16
37	Arandela de presion A4	u	8	0,02	0,016
38	Varilla redonda Ø 8mm	m	2,5	2,16	5,42
39	Plancha negra e = 8mm	m2	0,016	113,88	1,83
40	Ventilador Modelo 357 1 Hp- 1,77m	u	1	210	210
41	Rele termico Siemens 25 Amp	u	1	20	25
42	Pulsante NA	u	1	7	7
43	Pulsante NC	u	1	7	7
44	Contactor Siemens 3RT1036	u	1	35	30
45	Señales luminosas 25 Amp	u	3	3	9
46	Tablero electrico 60x40	u	1	43,2	24,5
47	Sensor de nivel	u	1		50
48	Motor Siemesn 1/2 Hp	u	1	40	80
49	Cable felxible # 12	m	5	0,22	1,1
50	Cable felxible # 10	m	5	0.22	1,1
	TOTAL				809,46

Tabla 6.21 Costo de los materiales del enfriador (Continuación).

(Fuente: El Autor.)

Costos de maquinas

N°	MAQUINA	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	Torno	15	4	60
2	Fresadora	15	4	60
3	Soldadora electrica	10	40	400
4	Taladro	10	40	400
5	Oxicorte (Tortuga)	15	4	60
6	Oxicorte	10	8	80
7	Compresor	8	2	16
8	Dobladora tool	10	4	40
9	Soldadora MIG	12	8	96
10	Amoladora	5	40	200
COSTO TOTAL \$				1412

Tabla 6.22 Costo de maquinaria necesaria para la construcción del enfriador.*(Fuente: El Autor.)***Costos de la mano de obra directa**

Para la construcción del enfriador, se estima un tiempo aproximado de dos semanas, tiempo en el cual se requerirá del siguiente personal.

N°	CARGO	COSTO/H	HORAS	PREC. TOTAL
1	1 Mecanicos	4	120	480
2	1 Ayudante	2	120	240
3	1 Electrico	5	8	40
TOTAL \$				760

Tabla 6.23 Costo de la mano de obra requerida para construir el enfriador.*(Fuente: El Autor.)***6.6.5 COSTOS DE MANO DE OBRA INDIRECTA**

CARGO	Cantidad (Personas)	TIEMPO	PREC. TOTAL
Direccion del proyecto (Ingeniero contratista)	1	3 semanas	900

Tabla 6.24 Costo de la mano de obra indirecta requerida para construir el cuarto de secado.*(Fuente: El Autor.)*

Costo total del enfriador

DESCRIPCION	PREC. TOTAL
COSTO DE MATERIALES	809,46
COSTO DE MAQUINAS	1412
COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA	760
COSTO DE MANO DE OBRA IN DIRECTA	900
INPREVISTOS	89,62
INDIRECTOS DE FABRICACION (22%)	1005,63
TOTAL	4976,71

Tabla 6.25 Costo Total del enfriador

(Fuente: El Autor.)

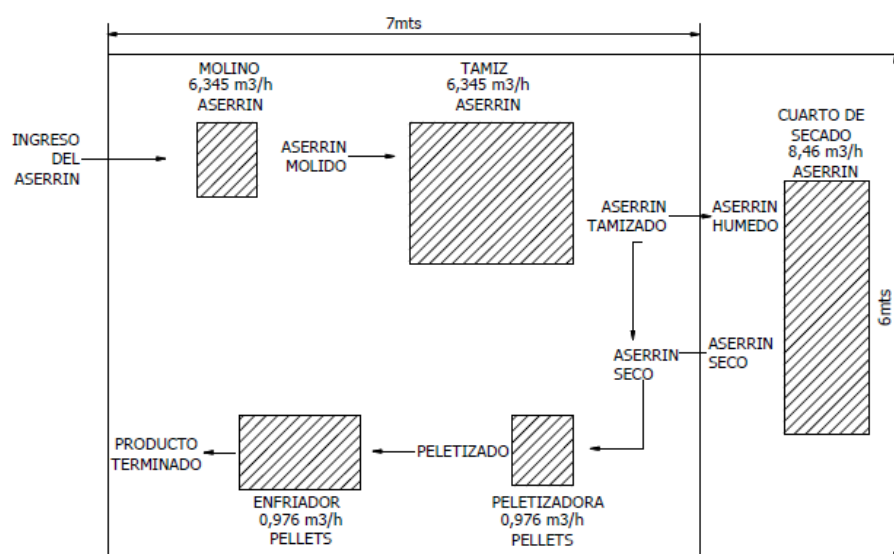


Figura 6.1 Esquema de distribución de las maquinas para el peletizado.

(Fuente: El Autor.)

6.7 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Para determinar el costo de los activos fijos (maquinas) necesarios para la implementación del proyecto, se suman los costos individuales de materiales, mano de obra directa e indirecta, imprevistos y finalmente indirectos de fabricación dentro de los cuales se estima un 22 % de utilidad y gastos administrativos con la implementación del proyecto. El resumen de los costos totales de las maquinas se detalla en la tabla 6.31.

RUBROS	MATERIALES	MAQUINAS	MANO DE OBRA DIRECTA	MANO DE OBRA INDIRECTA	IMPREVISTOS	INDIRECTOS FABRICACION	COSTO TOTAL
MOLINO DE MARTILLOS	973,35	442	740	900	79,1	887,57	4022,02
TAMIZ VIBRADOR	658,68	500	500	600	57,9	641,64	2958,22
CUARTO DE SECADO	3418,5	928	1340	900	149,7	1680	8416,15
PELETIZADORA	7770,8	5060	2040	3000	208,7	4637,5	22716,95
ENFRIADOR	809,46	1412	760	900	89,62	1005,6	4976,71
COSTO FINAL DEL PROYECTO \$							43090,05

Tabla 6.26 Costo total del proyecto

(Fuente: El Autor.)

6.8 FLUJO DE CAJA

El proyecto del flujo de caja constituye uno de los elementos más importantes del estudio de un proyecto, debido a los resultados obtenidos en el flujo de caja se evaluará la realización del proyecto.

La información básica para la construcción de un flujo de caja proviene de los estudios de mercado, técnicos, organizacional y también de los cálculos de los beneficios. Al realizar el flujo de caja, es necesario, incorporar a la información obtenida anteriormente, datos adicionales relacionados principalmente, con los efectos tributarios de la depreciación, de la amortización del activo normal, valor residual, utilidades y pérdidas.

A continuación se describen cada uno los elementos que conforman el flujo de caja:

EGRESO INICIAL DE FONDOS

Corresponden al total de la inversión requerida para la puesta en marcha del proyecto. Para este proyecto se requiere de un préstamo de \$ 50000, que se realizaran en una institución financiera, con una tasa de interés del 16% anual, con el cual el pago total de la deuda ascenderá a \$ 65959,4.

INGRESO MENSUAL ESTIMADO

De acuerdo a la equivalencia del pellet con el gasóleo (Diesel) que es el combustible más usado por las empresas, se establece la siguiente comparación en base al poder calorífico, que permitirá establecer el precio de venta al público de los pellets.⁵⁷

$$2\text{Kg pellets} = 1\text{litro de gasóleo}$$

El precio actual de venta al público del diesel es \$ 1,03 por cada galón, de manera que el litro de diesel cuesta \$ 0,27. Para que el pellet ingrese al mercado, su precio de venta al

⁵⁷ Se hace referencia al Capítulo 2, específicamente a **Tabla 2.9** “Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles fósiles y de la biomasa”.

público debe ser competitivo, por esta razón su precio será 20% menor, es decir cada kilogramo de pellets costara 10 centavos.

En base a la cantidad de residuos recolectaos se estima una producción mensual de 80 toneladas de pellets, de esta manera el ingreso mensual estimado será:

DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
PRODUCCION DE PELLETS MENSUAL	Kg	80000	0,1	8000

Tabla 6.27 Ingreso mensual estimado.

(Fuente: El Autor.)

COSTO DE OPERACIÓN MENSUAL

Los gastos necesarios para poner en funcionamiento la planta de peletizado se describen en la tabla 6.33

DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	PREC. UNIT.	PREC. TOTAL
COSTO DE LA MANO DE OBRA				
Operadores: 5 personas trabajan en dos turnos rotativos de 8 horas	–	5	240	1200
MATERIA PRIMA				
Residuos de madera (Aserrin y viruta)	m3	800	1,00	800
ENERGIA ELECTRICA				
Consumo de motores y dispositivos electricos	Kwh	12294,4	0,08	983,552
MANTENIMIENTO				
Costo promedio mensual	–	1	200	200
GASTOS ADMINISTRATIVOS				
Personal y gastos de administracion	–	1	1200	1200
TRANSPORTE				
Traslado de material	m3	800	1,35	1080
TOTAL				5463,55

Tabla 6.28 Gastos de operación mensual.

(Fuente: El Autor.)

6.9 FACTIBILIDAD ECONOMICA DEL PROYECTO

Para el estudio de la factibilidad económica, nos valemos de los indicadores de inversión como son el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Respecto al VAN, este representa el valor presente de una inversión a partir de una tasa de interés y una serie de pagos futuros. Para este proyecto se tomo una tasa de interés de 18% anual, y la serie de pagos correspondiente al flujo adicional que se obtiene a raíz de la inversión

En términos generales una inversión cuyo valor neto actual es mayor a cero ($VAN > 0$), es rentable; en caso que el valor actual neto sea menor, no sería recomendable la inversión desde el punto de vista económico.

La Tasa Interna de Retorno (TIR), se define como una tasa que devuelve los flujos de caja que deben ocurrir en intervalos regulares, es decir en una tasa de interés que hace que el valor actual neto de una serie de ingresos y egresos de efectivo sea igual a cero. Un proyecto es interesante cuando su TIR es superior al tipo de descuento exigido para proyectos con ese nivel de riesgo.

En base a las definiciones anteriores y de acuerdo al flujo de caja establecido se obtiene los valores de VAN y TIR descritos en la tabla 6.34.

DESCRIPCION	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		96000,00	96000,00	96000,00	96000,00	96000,00
Ventas		46000,00	85979,13	109419,19	120773,03	130082,89
EGRESOS AFECTADOS POR IMPUESTOS	-50000,00	-63754,50	-66964,90	-72595,03	-69345,16	-64715,29
Prestamo	50000,00	13191,88	13191,88	13191,88	13191,88	13191,88
Costo Mano de Obra	0,00	13800,00	14520,00	19800,00	15840,00	16500,00
Consumo Energetico	0,00	11802,62	13573,02	14163,15	14753,28	15343,41
Mantenimiento	0,00	2400,00	3120,00	2880,00	3000,00	3120,00
Transporte	0,00	12960,00	12960,00	12960,00	12960,00	12960,00
Materia Prima	0,00	9600,00	9600,00	9600,00	9600,00	3600,00
GASTO NO DESEMBOLSABLE	0,00	-3579,65	-3579,65	-3579,65	-3579,65	-3579,65
Depreciacion Molino de Martillos	0,00	442,98	442,98	442,98	442,98	442,98
Depreciacion Tamiz Vibrador	0,00	320,24	320,24	320,24	320,24	320,24
Depreciacion Peletizadora	0,00	2314,53	2314,53	2314,53	2314,53	2314,53
Depreciacion Enfriador	0,00	501,90	501,90	501,90	501,90	501,90
UTILIDAD ANTES DE PARTICIPACION	-50000,00	-21334,16	15434,58	33244,52	47848,22	61787,95
Participacion Trabajadores (15%)	0,00	3200,12	-2315,19	-4986,68	-7177,23	-9268,19
UTILIDAD DESPUES DE PARTICIPACION	-50000,00	-18134,03	13119,39	28257,84	40670,99	52519,76
Impuestos (25% Impuesto a la Renta)	0,00	4533,51	-3279,85	-7064,46	-10167,75	-13129,94
UTILIDAD DESPUES DEL IMPUESTO	-50000,00	-13600,52	9839,54	21193,38	30503,24	39389,82
Ajuste por Gastos No Deseables	0,00	-3579,65	-3579,65	-3579,65	-3579,65	-3579,65
Egresos No Afectados por Impuestos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Beneficios No Afectador por Impuestos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FLUJO DE CAJA	-50000,00	-10020,87	13419,19	24773,03	34082,89	42969,47
INVERSION	-50000,00					
TASA	12%					
VAN	\$ 15.425,77					
TIR	19%					

Tabla 6.29 Factibilidad económica del proyecto⁵⁸.

(Fuente: El Autor.)

⁵⁸ **Nota:** Todo el procedimiento de cálculo lo ponemos a disposición del lector en el archivo “Flujo de caja.exe” incorporado en el CD

Del análisis económico con proyecciones futuras que se realizó se obtiene que el VAN es de \$ 15425,77 lo que indica que es viable la inversión con un financiamiento de una institución financiera.

Analizando el TIR se puede apreciar que su tasa interna de retorno es superior a la establecida para este proyecto ($19\% > 12\%$), por lo tanto resulta rentable ejecutar este proyecto.

El porcentaje de rentabilidad que tendrá este proyecto es:

$$Tasa(\%) = \frac{VAN}{INVERSION} \cdot 100$$

$$Tasa(\%) = \frac{15425,77}{50000} \cdot 100$$

$$Tasa(\%) = 30,85\%$$

Por lo tanto se obtiene una rentabilidad de 30.85%, es decir 0,3085 dólares de VAN por cada dólar de pesos invertidos.

CONCLUSIONES

Al finalizar este proyecto se plantean las siguientes conclusiones:

Con el análisis estadístico del porcentaje de utilización de los residuos madereros de las empresas fabricantes de muebles en Cuenca se pudo establecer claramente que existe un alto porcentaje de residuos (aserrín, viruta) que en la actualidad no son aprovechados dentro de las empresas.

Actualmente las los Gobiernos de los países desarrollados y subdesarrollados buscan reducir la emisiones de gases contaminantes e investigan alternativas para sustituir los combustibles hidrocarburos, por tal motivo están incursionando en el campo de la biocombustibles como una alternativa ecológica que contribuya a reducir las emisiones contaminantes que producen el calentamiento global.

En Ecuador actualmente se lleva a cabo un proyecto de implementación de una planta de biomasa residual en la provincia de Santo Domingo, sin embargo en base a investigación realizada se concluye que al ser Cuenca la principal ciudad con un complejo artesanal e industrial que representa el 70% de la producción nacional de muebles de madera, se la debería tomar en cuenta para la creación la planta de biomasa residual en esta ciudad.

En base a la investigación de cada una de las maquinas que componen la planta de biomasa residual se concluyo que esta tecnología aún no incursiona dentro de nuestro país, por tal motivo no existen bases necesarias para el diseño e implementación. En los últimos años, en países como Argentina, Chile y Brasil esta tecnología ha tenido gran acogida, lo que ha dado lugar a la implementación de grandes plantas de peletizacion de madera.

Para el diseño de las maquinas para el sistema de peletizado se considero la capacidad inicial en base a los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado en el capítulo uno además de las características físicas y geométricas que poseen los residuos (aserrín, viruta).

Los materiales y componentes de las máquinas diseñadas fueron seleccionados de acuerdo al cálculo de los esfuerzos que van a soportar, capacidad de producción y diferentes consideraciones de diseño basadas en las normativas existentes (Normativa Europea), para obtener un producto de calidad.

Analizando el contenido químico de los pellets descritos por las normativas Europeas, se realizó una comparación de la eficiencia de la combustión de una caldera alimentada con leña y su equivalente alimentada con pellets, con lo que se pudo comprobar que el rendimiento de la combustión de la caldera alimentada con pellets es mayor, además se reduce la contaminación al eliminar el contenido de CO, carbonilla y elementos volátiles.

En el análisis financiero se utilizaron dos indicadores económicos con proyecciones futuras, mediante los cuales se determinó que el proyecto resulta rentable, y su inversión inicial se recuperará al segundo año de producción de la planta.

Finalmente a manera de comparación se investigaron los costos de las máquinas peletizadoras de igual capacidad que la máquina que se pretende implementar y se constató que los precios de adquisición en Europa y Asia oscilan entre 50.000,00 y 70.000,00 dólares dependiendo del fabricante, estos costos no incluyen la exportación y aranceles implícitos. En conclusión debido a que los costos de fabricación la máquina diseñada en este proyecto son menores se postula como la mejor opción para la implementación.

RECOMENDACIONES

Al momento de construir los componentes de las maquinas se deben utilizar los materiales calculados en el diseño para que de esta manera se pueda garantizar el éxito del proyecto.

Una vez construido y en funcionamiento la planta de peletizado se debe efectuar inspecciones periódicas especialmente en las zonas críticas de desgaste además de llevar el libro de registros para tener un historial de revisiones, daños y reparaciones que permitan implementar un plan de mantenimiento preventivo.

Los costos de materiales de las maquinas diseñadas se deben actualizar a la fecha de construcción ya que estos varían inesperadamente.

El precio del producto (pellet) terminado dependerá del coste de la materia prima, pero a su vez deberá tener un nivel competitivo comparado con el precio del los hidrocarburos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CENGEL, Yanus “Termodinámica”, Tomo II, Edit. Mc Graw Hill, 2da Ed. México 2003.
- [2] NORTON, Robert “Diseño de Maquinas”, Edit. Prentice Hall, 1ra Ed. México 1999.
- [3] BEER, Fernand “Mecánica de Materiales”, Edit. Mc Graw Hill, 3ra Ed. España 2000.
- [4] HIGLEY, J.E “Diseño en ingeniería Mecánica”, Edit. Mc Graw Hill, 5ta Ed. España 1995.
- [5] TIMOSHENKO, James “Mecánica de Materiales”, 1ra Ed. México 1974.
- [6] LARBURU, Nicolás “Prontuario Maquinas”, Edit. Thomson, 13ra Ed. España 2001.
- [7] PATIÑO, Ramón “Proyecto para la mejora de la caldera de Colineal”, UPS. Cuenca – Ecuador 2006.
- [8] MASON, R., LIND, “*Estadística para Administración y Economía*” 10^a Ed. Edit. Alfaomega. Colombia 2001
- [9] ICROPERA, Frank P, “*Fundamentos de transferencia de calor*” Edit. Person, 4ta Ed., México 1999
- [10] CENGEL, Yanus “Transferencia de Calor”, Tomo II, Edit. Mc Graw Hill, 2da Ed. México 2004.
- [11] HOLMAN, J.P “Transferencia de Calor”, Tomo II, Edit. Mc Graw Hill, 8va Ed. España 1998.
- [12] “ERATIC S.A, Empresa de desarrollo e implantación de sistemas de aprovechamiento energético de residuos fabriles de la industria de la transformación de la madera, <http://www.eratic.es>.
- [13] MICHELENA, Manuel “Los Biocombustibles”, Edit. Mundi-Prensa, 2da Ed. España 2008.
- [14] ORTIZ, Luis “Procesos de densificación de Biomasa”, Edit. Gamesa, 1ra Ed. España 2003.

- [15] MONTERO, Irene “Modelado y construcción de un secador solar hibrido para residuos biomasicos”, Tesis Doctoral Universidad de Extremadura, España 2005
- [16] ROJAS, Ariel “Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera”, Tesis Ingeniería Forestal Universidad de Chile, Chile 2004.
- [17] Catalogo de rodamientos SKF
- [18] Catalogo de motores Siemens
-

FUENTES ELECTRONICAS

www.biocarburante.com/category/biocombustible
www.enersilva.org/biomasaenergetica.htm#biomasa
www.cadamda.org.ar
www.obilni-technika.czechtrade.es
www.agroenergien.com
www.energy.rochester.edu
www.pellx.nu
www.sellbergs.se
www.svebio.se
www.teembioenergi.se
www.pelletheat.org
www.woodpelletfuels.com
www.okofen.es
www.monografias.com/trabajos55
www.feed-machinery.com
www.feedmachinery.com/
www.exa.com.ec

ANEXO 1

ANEXO – 1.1 NIVEL DE CONFIANZA

El nivel de confianza se elige en base al intervalo.

Estimación e intervalos de confianza

301

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936

MASON, Robert D., ESTADISTICA PARA ADMINISTRACION Y ECONOMIA,
Alfa Omega 11va Edición, Colombia – Bogota 2004.

ANEXO – 1.2 ENTREVISTA

Entrevistas realizadas a las Empresas en Ciudad de Cuenca y Archivo Fotográfico.

- ESTRUCTURA DE LA ENTREVISTA



ENTREVISTA

La presente entrevista tiene como objetivo recolectar información de las empresas más representativas en el campo de la fabricación de muebles de madera, en la ciudad de Cuenca. La información proporcionada por la empresa será utilizada con fines académicos. (Elaboración de Tesis de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana)

DATOS DE LA EMPRESA

Nombre	
Representante Legal	
Nombre del Entrevistado	
Actividad Económica	
Dirección	
Teléfono	

DATOS ESPECIFICOS DE LA ACTIVIDAD DE LA EMPRESA
--

¿Qué línea de productos son elaborados dentro de su empresa?

.....

¿Qué tipo de madera utilizan para la fabricación de sus productos?

.....

¿Qué cantidad de residuos (aserrín, viruta, astillas) se generan en los procesos de producción y cada qué tiempo?

Aserrín.....

Leña.....

¿Poseen algún tipo de subprocesos en los que se utilicen los residuos de madera? Si la respuesta es afirmativa, especificar los subprocesos y que % de residuos de madera son utilizados.

.....

¿Cómo maneja la empresa los residuos que no son utilizados internamente?

.....

¿Estaría su empresa interesada en adquirir una maquina con la capacidad de aprovechar los residuos de la producción, para emplearlos como combustible en sus procesos de producción de calor (caldero, hornos, etc.)?

.....

Gracias por su colaboración, los datos obtenidos en esta entrevista serán utilizados dentro de un marco estrictamente académico-investigativo.

- **ANEXO -1.3 ARCHIVO FOTOGRAFICO**

➤ **ENTREVISTA # 1.**

Empresa	BIENESTAR
Representante Legal	Cristian Coronel.
Nombre del Entrevistado	Diego Coronel.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Vía al Camal.
Teléfono	2 898 – 820

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.

	
Sistema neumático para desalojar el aserrín.	Silo de almacenamiento del aserrín
	
Retazos de madera solida (Astillas)	Caldero a Leña

➤ **ENTREVISTA # 2.**

Empresa	CARDECA
Representante Legal	Eco. José González.
Nombre del Entrevistado	Ing. José Molina.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina
Dirección	Av. Octavio Chacón.
Teléfono	2 863 – 053

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Aserrín recolectado de los procesos.



Silo de recolección de aserrín



Cuarto de almacenaje de aserrín



Caldero a Leña

➤ ENTREVISTA # 3.

Empresa	CARRUSEL
Representante Legal	Ing. Eduardo Jaramillo.
Nombre del Entrevistado	Germán Quizphe.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	C. Vintimilla y Parque Industrial.
Teléfono	2 806 – 397

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Sacos de recolección del aserrín



Sacos de recolección del aserrín



Estero de aserrín en el exterior.



Leña comprada para alimentar al caldero

	
Retazos de madera	Caldero de Leña

➤ **ENTREVISTA # 4.**

Empresa	COLINEAL
Representante Legal	Ing. Roberto Maldonado.
Nombre del Entrevistado	Ing. Giovanni Ñauta.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Cornelio Vintimilla 2 – 54 y Carlos Tosi.
Teléfono	2 809 – 445

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.

	
Silo de Almacenamiento de aserrín.	Silo de almacenamiento de Aserrín.

	
Almacenamiento de Astillas.	Caldero de Leña.

➤ **ENTREVISTA # 5.**

Empresa	DISERVAL
Representante Legal	Ing. Marcelo Serrano.
Nombre del Entrevistado	Ing. Adriana Serrano.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Calle Palmira 777 Parque Industrial.
Teléfono	2 898 – 891

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.


Tanques de almacenamiento de Aserrín.

➤ ENTREVISTA # 6.

Empresa	LINAJE
Representante Legal	Estuardo Guerrero
Nombre del Entrevistado	Ing. Lauro Rivera.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina
Dirección	Sector Molinopamba alto
Teléfono	2 891 – 472

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Sistema de neumático para desalojo de aserrín.



Silo de Almacenamiento de Aserrín.



Tanques de almacenamiento de Astillas.

➤ **ENTREVISTA # 7.**

Empresa	LINEA A1
Representante Legal	Arq. Jorge Cárdenas.
Nombre del Entrevistado	Arq. Jorge Cárdenas.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina
Dirección	Vía a Misicata 5 – 67
Teléfono	2 854 – 276

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.

	
Tanques de almacenamiento de Astillas.	Tanques de Almacenamiento de Aserrín.

➤ **ENTREVISTA # 8.**

Empresa	MADEFORM
Representante Legal	Teodoro Cedillo.
Nombre del Entrevistado	Damián Cedillo.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Av. Loja y Martin del Campo.
Teléfono	2 818 – 52

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.

	
Sistema de Recolección de Aserrín.	Sistema de Recolección de Aserrín.

	
Tanques de Almacenamiento de Astillas.	Caldero Híbrido (Aserrín, GLP, Diesel).

➤ ENTREVISTAS # 9

Empresas	MADERAMICA
Representante Legal	Pablo Monsalve.
Nombre del Entrevistado	Miguel Salazar.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Av. Del Toril y Guagrahuma.
Teléfono	2 809 – 046

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.

	
Almacenamiento de Aserrín y Astillas.	Almacenamiento de Aserrín y Astillas.



Logo Maderamica.

➤ **ENTREVISTA # 10.**

Empresas	MOBILIART
Representante Legal	John Bustamante
Nombre del Entrevistado	John Bustamante
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina
Dirección	Palmira 1-16 y Camino a Patamarca
Teléfono	2 900 – 057

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Logo Mobili´ Art.

➤ ENTREVISTA # 11.

Nombre	ROMADER
Representante Legal	Dr. Iván Roche Vélez.
Nombre del Entrevistado	Ing. Sebastián Fajardo
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina
Dirección	Camino a Patamarca 1-96
Teléfono	2 901 – 215

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Sistema neumático de desalojo del aserrín.



Silo de almacenamiento de aserrín.



Almacenamiento de Astillas.



Almacenamiento de Aserrín.

➤ ENTREVISTA # 12.

Nombre	VITEFAMA
Representante Legal	Teofilo Castro.
Nombre del Entrevistado	Italo Castro.
Actividad Económica	Muebles para el Hogar y Oficina.
Dirección	Ricaurte – Calle 10 de Agosto
Teléfono	4 085 – 247

Archivo fotográfico de los residuos de la empresa.



Empresa Vitefama.



Silo de almacenamiento de aserrín.



Almacenamiento de astillas.



Caldero de Leña.

- ARCHIVO FOTOGRÁFICO DE LA PEQUEÑA INDUSTRIA.**



Aserradero el Árbol.



Baguanchi centro de acopio de aserrín.



Baguanchi centro de acopio de aserrín.



Carpinterías Turi.



Carpinterías Turi.



Carpinterías Turi.



Carpinterías Turi.



Carpinterías Turi.



Aserradero Autopista a San Juan.



Aserradero Autopista a San Juan.



Aserradero Vía a Sayausi.



Aserradero Autopista a San Juan.



Carpintería Vía Misicata.



Carpintería Vía Misicata.



Carpintería Vía Sayausi.



Carpintería Trigales.



Carpintería Trigales.



Aserradero del Bosque.



Aserradero el Bosque.



Carpintería Eucaliptos.

ANEXO 1.4 – TABLA DE VALORES DE LA t DE STUDENT

Valores t de Student y probabilidad P asociada en función de los grados de libertad gl .

gl	P (de una cola)									
	0.4	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0025	0.001	0.0005
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.326	31.596
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.215	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.706
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
Infinito	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

MASON, Robert D., ESTADISTICA PARA ADMINISTRACION Y ECONOMIA, Alfa Omega 11va Edición, Colombia – Bogota 2004.

ANEXO 2

ANEXO 2.1 NORMATIVAS DE LOS PELLETS.

Los Primeros países productores de pellets fueron:

- Suecia (años 80).
- Finlandia, Dinamarca y Austria (años 90).

En 1994, Suecia elaboró la primera normativa nacional sobre calidad de los pellets.

Se crea el Comité Técnico 336 del CEN (Comité europeo de estandarización) para la elaboración de una Normativa de Biocombustibles Sólidos. Existen especificaciones pendientes de aprobar para ser Normas.

- Especificación Técnica CEN/TS 14588 (Definición de los biocombustibles).
- Especificación Técnica CEN/TS 14961:(Clasificación y especificaciones).

Adicionalmente, en varios países se desarrollan normativas nacionales sobre la logística y almacenamiento de pellets.

Características Químicas.

Parámetro	Efectos *
Características químicas y de composición	
Contenido agua	Almacenamiento, poder calorífico, pérdidas, auto-ignición.
Poder Calorífico	Utilización del combustible, diseño de planta.
Análisis Elemental	
Cl	HCl, emisiones de dioxinas y furanos, corrosión en calentadores.
N	Emisiones de NOx, HCN y NO2.
S	Emisiones de Sox.
K	Corrosión en calentadores, reducción del punto de fusión de las cenizas.
Mg, Ca, P	Aumento del punto de fusión de las cenizas, efectos en la retención de contaminantes en las cenizas y uso de las cenizas.
Metales pesados	Emisiones contaminantes, uso o eliminación de las cenizas.
Contenido cenizas	Emisiones de partículas, costes en el uso o eliminación de las cenizas.
Fusibilidad cenizas	Seguridad en las operaciones, nivel de emisiones contaminantes.
Ésporas hongos	Riesgos de salud durante el manejo del combustible.

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELLETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

*Efectos que produce el parámetro en la combustión, transporte, almacenamiento y logística del combustible.

Características Físicas.

Parámetro	Efectos *
Características físicas	
Densidad aparente	Gastos en el almacenamiento y transporte, planes de logística.
Densidad real	Propiedades de combustión (conductividad térmica específica, rendimiento en gasificación).
Distribución tamaño de partículas	Porosidad, formación de bóvedas, seguridad de operación durante el transporte, propiedades de secado, formación de polvo.
Formación de finos	Densidad aparente, pérdidas en el transporte, formación de polvo.
Durabilidad	Cambios en la calidad durante el transporte, desintegración, pérdidas de combustible.

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

*Efectos que produce el parámetro en la combustión, transporte, almacenamiento y logística del combustible.

Normativas Existentes.

- **Austria.**

Posee tres normativas de pellets en función de la calidad del producto, del transporte y almacenamiento.

ÖNORM M 7135. Especificaciones de los pellets y briquetas de madera con o sin corteza.

Propiedades	Pelels de madera	Pelels de Corteza
Diámetro (mm)	4-10	4 – 10
Longitud (mm)	< 5· diámetro	< 5· diámetro
Densidad (kg/m ³)	< 1,12	< 1,12
Humedad (% masa)	< 10	< 18
Durabilidad (Lignotest)	2,3	2,3
Cenizas (%masa)	< 0,5	< 6
Poder calorífico (MJ/kg)	> 18	> 18
Azufre (%masa)	< 0,04%	< 0,08%
Nitrógeno (%masa)	< 0,3%	< 0,6%
Cloro (%masa)	< 0,02%	< 0,04%
Aditivos (%masa)	< 2%	< 2%

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

ÖNORM M 7136. Requerimientos de calidad de la logística y transporte de los pellets de madera.

- Documentación y declaraciones de conformidad.
- Requerimientos del transporte y almacenamiento temporal.
- Listas de chequeos.

ÖNORM M 7137. Requerimientos de calidad del almacenamiento del consumidor final de pellets de madera.

- Tipo de silos y contenedores.

- **Suecia.**

18 71 20 especifica tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan.

Propiedades	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 2
Diámetro (mm)	< 25 mm	< 25 mm	< 25 mm
Longitud (mm)	< 4* diámetro	< 5 * diámetro	< 5 * diámetro
Durabilidad(%finos <3%)	<0,8	<1,5	<1,5
Humedad (% masa)	< 10	< 10	< 12
Cenizas (%masa)	< 0,7	< 1,5	< 1,5
Poder calorífico (MJ/kg)	> 16,9	> 16,9	> 15,1
Azufre (%masa)	< 0,08%	< 0,08%	indicar
Nitrógeno (%masa)	-	No especificado	No especificado
Cloro (%masa)	< 0,03%	< 0,03%	indicar
Densidad aparente (kg / m ³)	> 600	> 500	> 500
Fusibilidad de cenizas	indicar	indicar	indicar
Aditivos	indicar	indicar	indicar

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

- **Alemania.**

DIN 51731, de pellets y briquetas y la DIN Plus que es específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets.

DIN 51731

Propiedades	Peleats de Madera
Diámetro (mm)	4-10
Longitud (mm)	< 5
Densidad (kg/m ³)	1 – 1,4
Humedad (% masa)	< 12
Cenizas (%masa)	< 1,5
Poder calorífico (MJ/kg)	17,5 – 19,5
Azufre (%masa)	< 0,08%
Nitrógeno (%masa)	< 0,3%
Cloro (%masa)	< 0,03%
Arsénico (mg/kg)	< 0,8
Cadmio (mg/kg)	< 0,5
Cromo (mg/kg)	< 8
Cobre (mg/kg)	< 5
Mercurio (mg/kg)	< 0,05
Plomo (mg/kg)	< 10
Zinc (mg/kg)	< 100

DIN Plus

Propiedades	Peleats de madera
Diámetro (mm)	Indicar
Longitud (mm)	< 5 * diámetro
Densidad real(kg/m ³)	> 1,12 kg/m ³
Humedad (% masa)	< 10
Cenizas (%masa)	< 0.5
Poder calorífico (MJ/kg)	> 18
Azufre (%masa)	< 0,04
Nitrógeno (%masa)	< 0.3
Cloro (%masa)	< 0,02
Arsénico (mg/kg)	< 0,8
Cadmio (mg/kg)	< 0.5
Cromo (mg/kg)	< 8
Cobre (mg/kg)	< 5
Mercurio (mg/kg)	< 0,05
Plomo (mg/kg)	< 10
Cinc (mg/kg)	< 100
Densidad aparente	Indicar
Durabilidad	< 2,3%
Aditivos	< 2%

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

- **Italia.**

CTI R04/05 establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos. Establece 4 categorías en función del origen.

Parámetro	Unidad	Categoría		
		A.1	A.2	A.3
Origen		- Troncos de árboles caducifolios sin corteza. - Troncos de conífera sin corteza. - Madera sin tratar de industrias madereras. - Madera sin corteza y sin tratar tras ser utilizada. - Mezcla de las categorías anteriores.	- Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.1. - Biomasa herbácea sin tratar. - Mezcla de las categorías anteriores.	- Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.2.
Diámetro (D)	mm	$D = 6 \pm 0,5 - 8 \pm 0,5$	$D = 6 \pm 0,5 - 8 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5 \leq D \leq 25 \pm 1,0$
Longitud (L)	mm	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 4 \times D$
Humedad	% peso b.h.	≤ 10	≤ 10	≤ 15
Cenizas	% peso b.h.	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	Indicar
Durabilidad	% peso	$\geq 97,7$	$\geq 95,0$	$\geq 90,0$
Polvo	% peso	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	Indicar
Agentes Aglomerantes	% peso.	No aceptados		
S	% peso b.s.	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	Indicar
N	% peso b.s.	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	Indicar
Cl	% peso b.s.	$\leq 0,03$	Indicar	Indicar
Densidad Aparente	kg/m ³	$\geq 620 - \leq 720$	$\geq 600 - \leq 720$	≥ 550
Poder Calorífico b.h.	MJ/kg (kcal/kg)	$\geq 16,9$ (≥ 4.039)	$\geq 16,2$ (≥ 3.870)	Indicar

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

- ***Normativa Europea.***

El Comité Europeo para la Normalización CEN/TC 335 ha preparado especificaciones técnicas para los biocombustibles sólidos y para los métodos de análisis, donde se incluyen los pellets y briquetas.

La CEN/TS 14961 se aprobó en 2004 y se espera que se convierta en Norma Europea (EN) entre el 2007 y 2008.

Clasificación de la biomasa según su origen:

- Biomasa procedente de la madera.
- Biomasa herbácea.
- Biomasa procedente de la fruta.
- Mezclas de los tres tipos anteriores.

Origen	Madera no tratada químicamente sin corteza
NORMATIVA	
Tamaño	D06 ≤ 6 mm +/- 0,5 mm y L ≤ (5*diámetro) D08 ≤ 8 mm +/- 0,5 mm y L ≤ (4*diámetro) D10 ≤ 10 mm +/- 0,5 mm y L ≤ (4*diámetro) D12 ≤ 12 mm +/- 1,0 mm y L ≤ (4*diámetro) D25 ≤ 25 mm +/- 1,0 mm y L ≤ (4*diámetro)
Finos en % < 3,15 mm	F1.0 ≤ 1,0 % F2.0 ≤ 2,0 % F2.0+ > 2,0 % (valor real por establecer)
Contenido de agua	M10 ≤ 10 % M15 ≤ 15 % M20 ≤ 20 %
Contenido de cenizas	A0.7 ≤ 0,7 % A1.5 ≤ 1,5 % A3.0 ≤ 3,0 % A6.0 ≤ 6,0 % A6.0+ > 6,0 % (valor real por establecer)
Azufre	S0.05 ≤ 0,05 % S0.08 ≤ 0,08 % S0.10 ≤ 0,10 % S0.20+ > 0,20 % (valor real por establecer)
Nitrógeno	N0.3 ≤ 0,3 % N0.5 ≤ 0,5 % N1.0 ≤ 1,0 % N3.0 ≤ 3,0 % N3.0+ > 3,0 % (valor real por establecer)
Aditivos	El tipo y el contenido de las sustancias aglomerantes, inhibidores para resolver los problemas de sistematización de cenizas y otros tipos de aditivos tienen que estar indicado.
Durabilidad	DU97.5 ≥ 97,5 DU95,0 ≥ 95,0 DU90,0 ≥ 90,0

CEN/TS 14961: Certificación europea para biocombustibles sólidos. Anexo 2:
Especificaciones y propiedades para los pellets.

Declaración de Calidad de los Pellets.

El consumidor de pellets deberá recibir una declaración de calidad por parte del suministrador con el formato que se muestra en el ejemplo.

PELETS DE MADERA	Productor:	CARTIF
	Origen:	1.1.1.4.
	Formato:	Pellets
	País de origen:	España
	NORMAS CEN/TS 14961/2005	
	Dimensiones (mm)	D 06
	Diámetro (D) y longitud (l)	
	Humedad (% s/seca)	M 10 ≤ 10 %
	Cenizas (% s/seca)	A3.0 ≤ 3,0 %
	Durabilidad	DU 97.5 ≥ 97,5
	Cantidad de finos	F 1.0 ≤ 1,0 %
	(% <3 mm) en planta	
	Aditivos	Sin aditivos
	INFORMACIÓN CEN/TS 14961/2005	
	Densidad aparente (kg/m³)	670
	P.C.I s/seca (kcal/kg)	4.392

CEN/TS 14961: Certificación europea para biocombustibles sólidos.

Anexo 2: Especificaciones y propiedades para los pellets.

Países sin Normativa de Pellets.

Existe un grupo de países que no tiene Normativa pero han creado unos controles de calidad:), l 14961 se aprobó en 2004 y se espera que se convierte en Norma Europea (EN) entre el 2007 y 2008.

- Francia. La organización ITEBE ha formado el “PELLET CLUB” y han determinado unas etiquetas de calidad.
- Reino Unido. El Departamento de Economía e Industria ha realizado códigos de buenas conductas junto al sector.

Otros países no han establecido Normas y están colaborando en la Norma Europea para posteriormente establecer las suyas propias.

- España (AEN/CTN 164).

- Dinamarca y Finlandia.

Etiquetas del ITEBE en Francia.

Parametros	Unidades	Estufa	Caldera	Grande	Incineración
Longitud (90% de la masa)	mm	10 a 30	10 a 15	No limitado	
Diámetro	mm	6 ±1	8 a 10 ±1	> 16	
Humedad	%	< 10		No limitado	
Densidad aparente	kg/m3	> 650		> 580	
Densidad total	kg/m3	1200 a 1400		No limitado	
Energía producida	kWh/kg	> 4,7		A mostrar en el paquete	
Cenizas	%	< 1		No limitado	
Na	%	< 300		No limitado	
Cl	%	< 0,3		No limitado	
S	%	< 0,08		No limitado	
N	%	< 0,3		No limitado	
Contenido natural (almidón, lignina, aceites vegetales)	mg/kg	Indicar la naturaleza y contenido es obligatorio. Limitado al 5%		Indicar la naturaleza y contenido es obligatorio. Limitado al 5%	No limitado
Tolerancia a residuos de madera	Cualitativo	Prohibido		Prohibido	No limitado

NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS; Dr. Gregorio Antolín Giraldo, Dto. Área de Biocombustibles; Fundación CARTIF

ANEXO 3

ANEXO 3.1 – GRANULOMETRIA.

Para la prueba de granulometría se utilizó como instrumento de medición un calibrado con precisión de 0,001mm, a continuación se presentan los diferentes tamaños granulométricos.



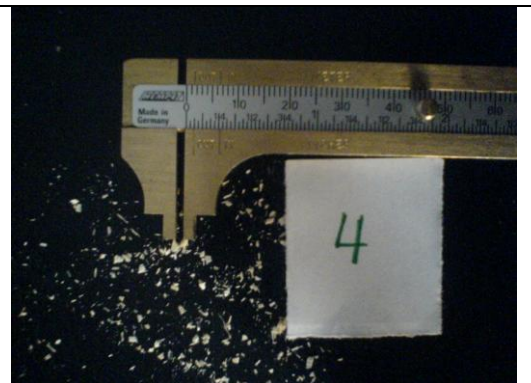
Prueba # 1.



Prueba # 2.



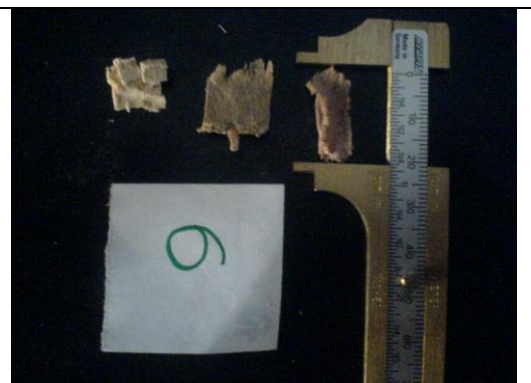
Prueba # 3.



Prueba # 4.



Prueba # 5.



Prueba # 6.



Prueba # 7.



Prueba # 8.

ANEXO 3.2 – PRUEBA DE HUMEDAD.

Recolección de Muestras.

Las muestras de aserrín fueron recolectadas de diferentes sistemas de almacenamiento:

	
Viruta Media. Almacenada Bajo Techo.	Viruta Fina. Almacenada Bajo Techo.
	
Viruta Gruesa. Almacenada Bajo Techo.	Viruta Gruesa. Almacenada a la Intemperie.
	
Viruta Gruesa. Almacenada a la Intemperie.	Viruta Gruesa. Almacenada a la Intemperie.

	
Viruta Media. Almacenada en Silos.	Viruta Media. Almacenada Bajo Techo.

Proceso de Prueba de Humedad.

Para la realización de las pruebas de humedad de las diferentes muestras se utilizaron los siguientes elementos:

- Balanza digital.
- Horno microondas.
- 8 Muestras de aserrín.



La prueba de humedad se basa en la diferencia de pesos del aserrín húmedo (varía de acuerdo al lugar en el que se almacene) y el aserrín seco (el aserrín está seco cuando ha perdido el contenido de humedad de su interior y por lo tanto su peso no puede disminuir más), por lo que se utiliza una balanza digital y un recipiente para la muestra para controlar la variación del peso que va a tener cada muestra.



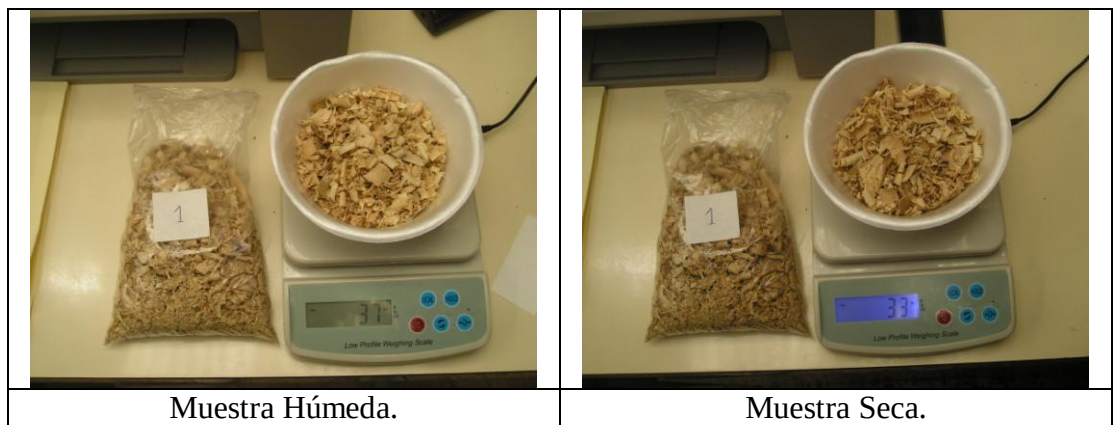
Para realizar el secado de las muestras se utilizo un horno microondas, este nos permitió evaporar el porcentaje de humedad que contenía cada muestra hasta el punto en el que su peso no disminuya más, por lo tanto se considera que la muestra esta completamente seca.



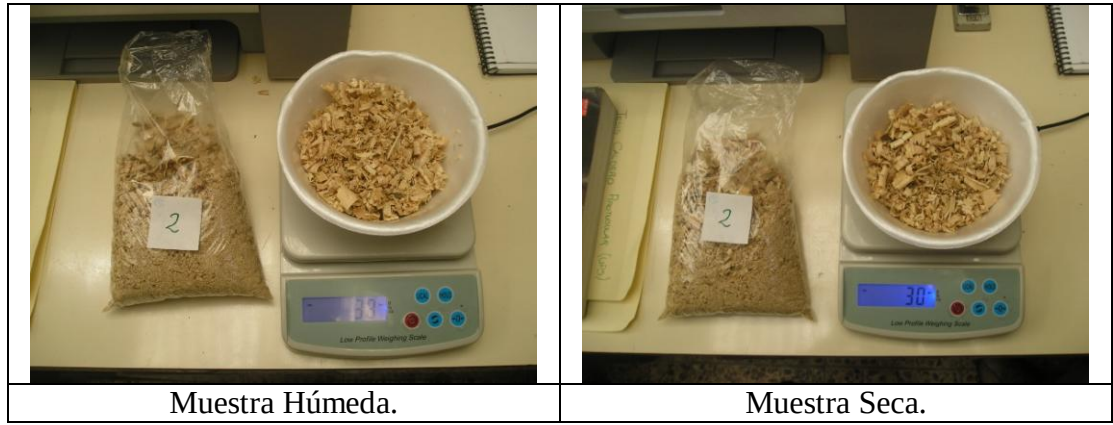
Para un mejor control de las pruebas realizadas, todas las muestras comenzaron el proceso con un peso inicial de 37gr, sin importar su contenido de humedad.

Para el proceso de secado, el horno microondas secaba las muestras en intervalos de tiempo de 30seg, para la comprobación de que la muestra esta seca, se ingresaba nuevamente la muestra al horno microondas durante un periodo de 30seg más y si su peso no variaba se la considera como materia seca, esta secuencia se la repetía hasta que la muestra este totalmente seca.

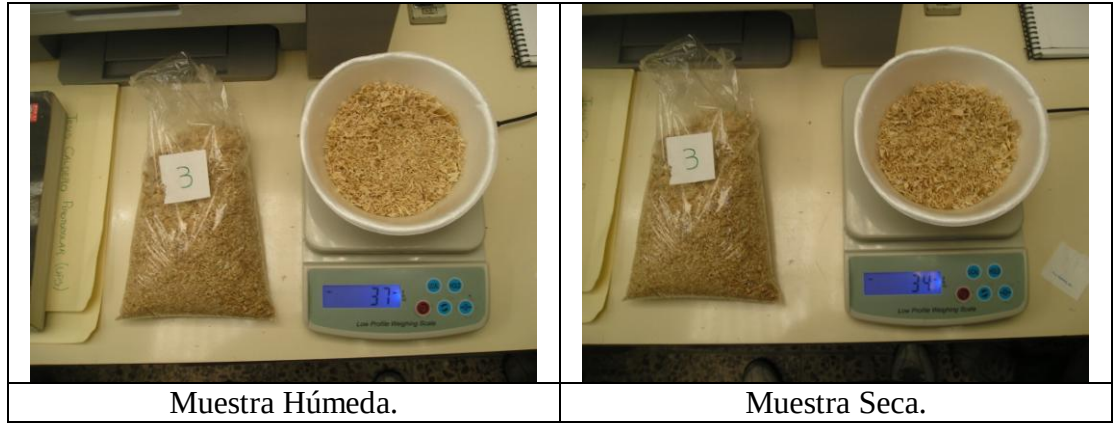
Prueba # 1.



Prueba # 2.



Prueba # 3.



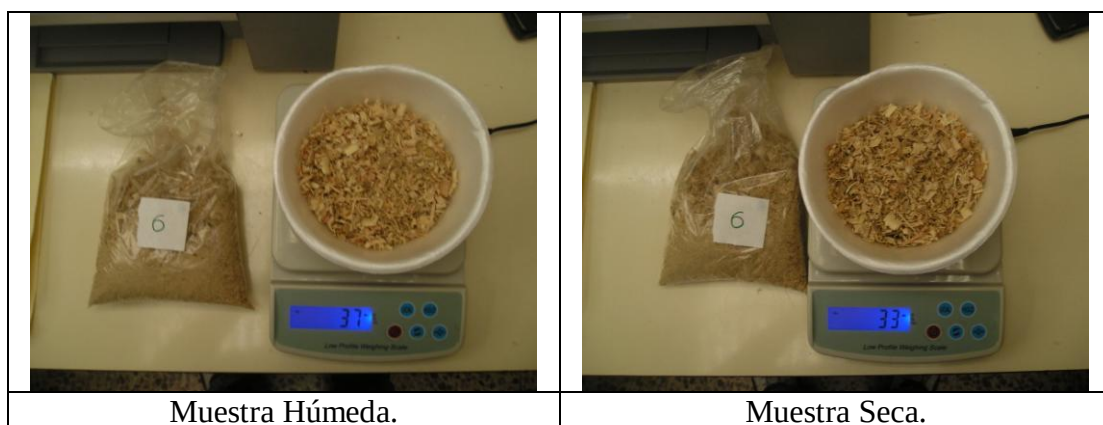
Prueba # 4.



Prueba # 5.



Prueba # 6.



Prueba # 7.



Muestra Húmeda.



Muestra Seca.

Prueba # 8.



Muestra Húmeda.



Muestra Seca.

ANEXO 4

DISEÑO DEL MOLINO

TABLA – 4.1

Factor de Servicio Típicos.

Factor de Servicio Típicos para Motores Eléctricos según su Aplicación.

FACTORES DE SERVICIOS TIPICOS.						
	Motores C.A.: Torque normal Motores CD: bobinado en derivación. Motores: de cilindro múltiple			Motores CA: Torque alto. Motores CD: bobinado en serie, bobinado compuesto Motores: de 4 o menos cilindros.		
Tipo de máquinas que es impulsada	<6 H. por día	6-15 H por día	>15 H. por día	<6 H. por día	6-15 H por día	>15 H. por día
Agitadores, ventiladores, ventiladores con tolva, bombas centrífugas.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Generadores, herramientas para máquinas, mezcladoras, transportes.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Elevadores de baldes, máquinas textiles, molinos de martillos, transportadores, pesados.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Trituradores, molinos de bola, malacates, extrusoras de hule.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8
Cualquier máquina que se pueda ahogar	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

TABLA – 4.2

Sección de la Banda de Transmisión.

Selección de la sección más adecuada de la banda de transmisión según la potencia del motor.

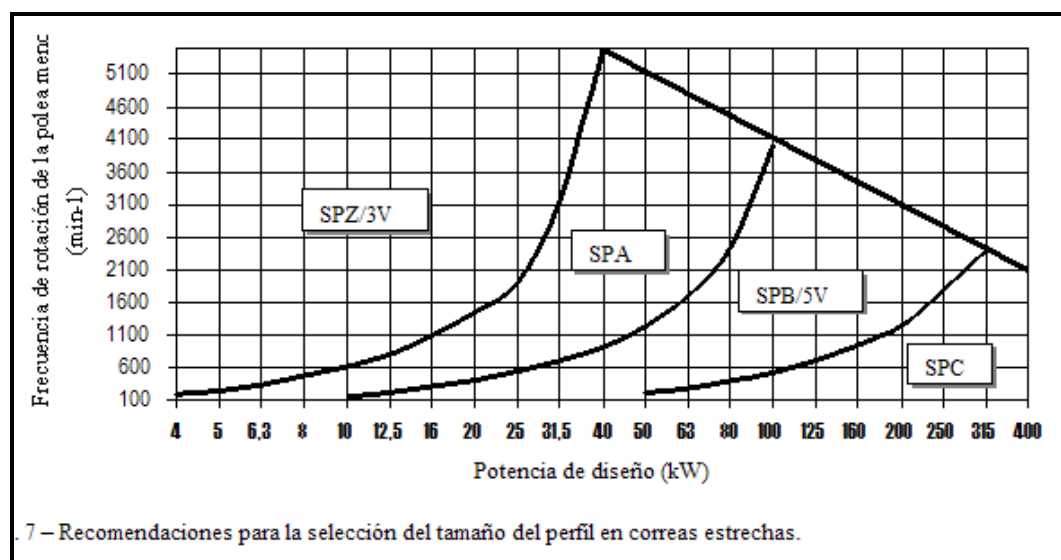


TABLA – 4.3

Diámetro mínimo recomendado para poleas montadas en motores.

El diámetro de la polea se escoge en base a las rpm del motor.

Potencia del Motor Electrico															
[rpm]	1/2	3/4	1	1 1.5	2	3	5	7.5	10	15	20	25	30	40	50
870	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.0	3.8	4.4	4.4	5.2	6.0	6.8	6.8	8.2	8.4
1160	-	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.0	3.8	4.4	4.4	5.2	6.0	6.8	6.8	8.2
1750	-	-	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.0	3.8	4.4	4.4	4.4	5.2	6.0	6.8
3500	-	-	-	2.2	2.4	2.4	2.4	3.0	3.0	3.8	4.4	4.4	-	-	-

TABLA – 4.4

Longitudes de Bandas Estándar.

Longitud estandarizada para bandas estándar.

Longitudes de banda estándar para bandas 3V, 5V y 8V (pulg)				
<i>Sólo 3V</i>	<i>3V y 5V</i>	<i>3V, 5V y 8V</i>	<i>5V y 8V</i>	<i>Sólo 8V</i>
25	50	100	150	375
26.5	53	106	160	400
28	56	112	170	425
30	60	118	180	450
31.5	63	125	190	475
33.5	67	132	200	500
35.5	71	140	212	
37.5	75		224	
40	80		236	
42.5	85		250	
45	90		265	
47.5	95		280	
			300	
165			315	
			335	
			355	

<http://elprisma.com>

TABLA – 4.5

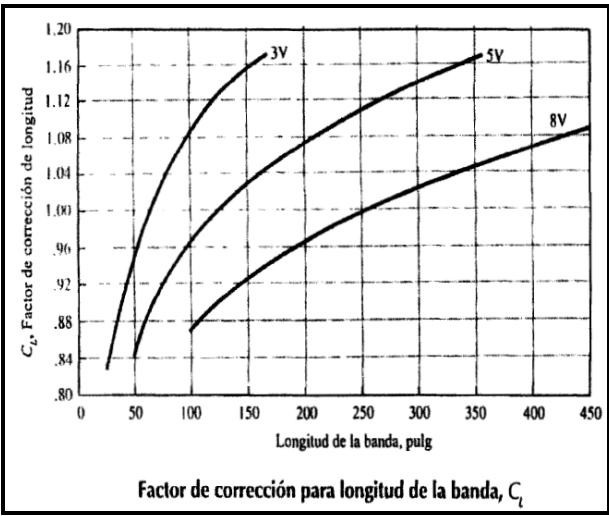
Angulo de contacto entre la polea y la banda.

Coeficiente de ángulo de contacto y correlación de longitud.

Coeficiente por corrección de la longitud (C_L)

$\alpha(^{\circ})$	180	174	169	163	157	151	145	127	120	83
C_{α}	1.00	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.85	0.82	0.65

<http://elprisma.com>



<http://elprisma.com>

TABLA – 4.6

Factor de diseño f en función de la velocidad tangencial.

Velocidad Tangencial m/seg.	Factor f
30	0,016
40	0,01
50	0,0093
60	0,0099

(Fuente: Ing. Walter H. Duda.)

TABLA – 4.7

Chavetas Paralelas.

Medidas en milímetros de las Chavetas según el diámetro del eje, según la norma UNE 17102

Diámetro del árbol d, mm	Medida nominal de la chaveta, mm			Medida nominal del chavetero, mm			
	b x h	Chafilán S		Profundidad		Radio r	
		máx	mín	En el árbol t ₁	En el cubo t ₂	máx	mín
6 a 8	2 x 2	0.25	0.16	1.2	1.0	0.16	0.08
8 a 10	3 x 3			1.8	1.4		
10 a 12	4 x 4			2.5	1.8		
12 a 17	5 x 5	0.40	0.25	3.0	2.3	0.25	0.16
17 a 22	6 x 6			3.5	2.8		
22 a 30	7 x 7			4.0	3.3		
22 a 30	8 x 7			4.0	3.3		
30 a 38	10 x 8	0.60	0.40	5.0	3.3	0.40	0.25
38 a 44	12 x 8			5.0	3.3		
44 a 50	14 x 9			5.5	3.8		
50 a 58	16 x 10			6.0	4.3		
58 a 65	18 x 11			7.0	4.4		
65 a 75	20 x 12	0.80	0.60	7.5	4.9	0.60	0.40
75 a 85	22 x 14			9.0	5.4		
85 a 95	25 x 14			9.0	5.4		
95 a 110	28 x 16			10.0	6.4		
110 a 130	32 x 18			11.0	7.4		
130 a 150	36 x 20			12.0	8.4		
150 a 170	40 x 22	1.2	1.00	13.0	9.4	1.0	0.7
170 a 200	45 x 25			15.0	10.4		
200 a 230	50 x 28			17.0	11.4		

TABLA – 4.8

Selección del Rodamiento.

Selección del rodamiento de acuerdo al diámetro del eje principal y de las cargas que va a soportar.



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera									
Tolerancias , ver también el texto Juego radial interno , ver también el texto Ajustes recomendados Tolerancias del eje y del alojamiento									
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C_0		Velocidad de referencialímite	Velocidad de referencialímite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
30	62	16	20,3	11,2	0,475	-	7500	0,20	6206-RS1 *
30	62	16	20,3	11,2	0,475	24000	15000	0,20	6206-RZ *
30	62	16	20,3	11,2	0,475	24000	15000	0,20	6206-Z *
30	62	20	19,5	11,2	0,475	-	7500	0,24	62206-2RS1
30	72	19	29,6	16	0,67	20000	13000	0,35	6306 *
30	72	19	32,5	17,3	0,735	22000	14000	0,33	6306 ETN9
30	72	19	29,6	16	0,67	-	6300	0,35	6306-2RS1 *
30	72	19	29,6	16	0,67	20000	11000	0,35	6306-2RZ *
30	72	19	29,6	16	0,67	20000	11000	0,35	6306-2Z *
30	72	19	29,6	16	0,67	-	6300	0,35	6306-RS1 *
30	72	19	29,6	16	0,67	20000	13000	0,35	6306-RZ *
30	72	19	29,6	16	0,67	20000	13000	0,35	6306-Z *
30	72	27	28,1	16	0,67	-	6300	0,48	62306-2RS1
30	90	23	43,6	23,6	1	18000	11000	0,74	6406
31,75	69,85	17,462	22,5	13,2	0,55	20000	14000	0,30	RLS 10
31,75	69,85	17,462	22,5	13,2	0,55	-	7000	0,30	RLS 10-2RS1
31,75	69,85	17,462	22,5	13,2	0,55	20000	10000	0,30	RLS 10-2Z
31,75	79,375	22,225	33,2	19	0,815	17000	12000	0,50	RMS 10
34,925	76,2	17,462	27	15,3	0,655	18000	13000	0,35	RLS 11
34,925	88,9	22,225	41	24	1,02	15000	11000	0,63	RMS 11
35	47	7	4,75	3,2	0,166	28000	18000	0,030	61807
35	47	7	4,75	3,2	0,166	-	8000	0,030	61807-2RS1
35	47	7	4,75	3,2	0,166	28000	14000	0,030	61807-2RZ
35	55	10	9,56	6,8	0,29	26000	16000	0,080	61907
35	55	10	9,56	6,8	0,29	-	7500	0,080	61907-2RS1

DISEÑO DEL TAMIZADOR

TABLA – 4.9

FACTOR DE RECHAZO										
<i>R</i>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Factor f_r	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92
<i>R</i>	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

TABLA – 4.10

FACTOR DE SEMITAMAÑO										
<i>Semitamaño</i>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Factor f_s	0,50	0,55	0,60	0,65	0,72	0,77	0,85	0,92	1,00	1,10
<i>Semitamaño</i>	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Factor f_s	1,20	1,30	1,45	1,60	1,75	1,95	2,20	2,55	3,00	3,65

TABLA – 4.11

FACTOR DE EFICIENCIA							
<i>E</i>	98	96	94	92	90	85	80
Factor f_e	0,60	0,85	1,00	1,05	1,12	1,26	1,41
<i>E</i>	75	70	65	60	55	50	45

TABLA – 4.12

FACTOR DE ÁREA LIBRE DE PASO									
Superficie libre %	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Factor, f_O	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,20	1,40

ÁREA LIBRE EN MALLAS								
L_m (mm)		0,50	0,63	1,00	1,25	2,00	3,15	4,00
Superficie	Acero	35	37	38	38	44	44	45
Libre %	PU	10	12	18	20	20	37	38

L_m (mm)		5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0
Superficie	Acero	49	50	56	57	60	61	61
Libre %	PU	39	41	43	45	46	47	48

L_m (mm)		31,5	40	50	63	80	100	120
Superficie	Acero	64	68	71	72	73	75	75
Libre %	PU	47	45	44	41	41	43	43

TABLA – 4.13

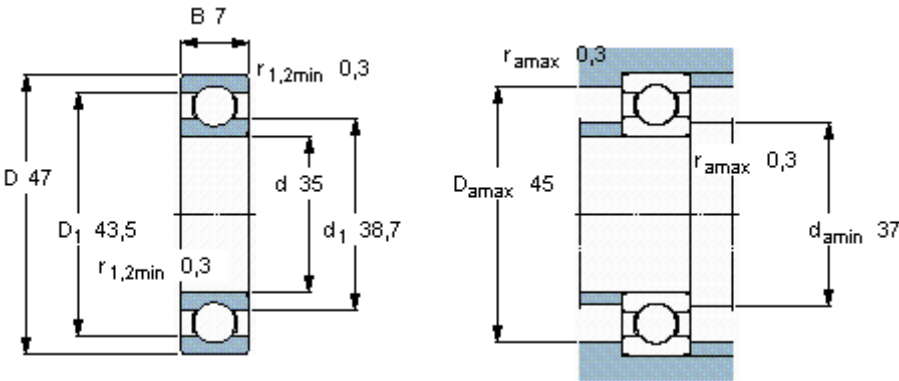
CAPACIDAD BÁSICA B ($l/m^2.h$)			
Luz de malla mm	Material		
	Carbón	Triturado	Natural
0,50	2,0	2,7	3,5
0,80	2,6	3,4	4,4
1,00	2,8	3,7	4,9
1,25	3,1	4,1	5,5
2,0	4,0	5,3	7,1
4,0	6,0	8,0	10,5
5,6	7,5	10,0	13,0
6,3	8,1	10,8	14,0
8,0	9,4	12,5	16,0
10,0	10,8	14,4	18,6
12,5	12,5	16,6	21,5
16,0	14,3	19,0	25,1
20,0	16,5	22,0	29,0
25,0	19,5	26,0	33,4
31,5	22,5	30,0	37,9
40,0	26,0	34,7	42,5
50,0	29,3	39,0	47,4
63,0	33,0	44,0	52,0
80,0	36,8	49,0	57,0
100,0	42,0	56,0	63,0
120,0	47,3	63,0	68,0

TABLA – 4.14

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS DEL SISTEMA DE DESBALANCE

Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera, no están obturados									
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
35	47	7	4,75	3,2	0,166	28000	18000	0,030	61807

Tolerancias , ver también el [texto](#)
Juego radial interno , ver también el [texto](#)
Ajustes recomendados
Tolerancias del eje y del alojamiento



Factores de cálculo

k_r 0,015
f₀ 14

DISEÑO DEL SECADOR

TABLA – 4.15

SELECCIÓN DE VENTILADORES OTAM

Tabla de Selección

AIRE ESTÁNDAR – Temperatura 20°C – Presión Barométrica 760 mmHg – Densidad 1,205 kg/m³.

MODELO	ROTACIÓN r.p.m.	MOTOR hp	CORRIENTE NOMINAL 1) 220V	NIVEL DE RUIDO 2) dB (A)	CAUDAL DE AIRE Q (m ³ /h) X PRESIÓN ESTÁTICA Pst (mmca)										CAUDAL DE AIRE X PRESIÓN EST. MÁX.	
					0	5	10	15	20	25	30	35	40	Q	Pst MÁX.	
315	3500	1	3,4	73	5152	5026	4935	4748	4501	4272	4050	3806	-	3206	37	
	1750	0,16	1,0	57	2576	2250	-	-	-	-	-	-	-	1603	9,3	
	1150	0,16	1,1	46	1692	-	-	-	-	-	-	-	-	1053	4,0	
355	3500	2	6,2	77	7374	7214	7133	6984	6746	6465	6199	5962	5667	4589	47	
	1750	0,25	1,4	60	3687	3373	2833	-	-	-	-	-	-	2294	12	
	1150	0,16	1,1	50	2423	1580	-	-	-	-	-	-	-	1507	5,1	
400	3500	3	10	80	10549	10349	10258	10142	9947	9674	9359	9047	8764	6565	60	
	1750	0,5	2,2	64	5247	4973	4382	-	-	-	-	-	-	3282	15	
	1150	0,16	1,1	54	3466	2768	-	-	-	-	-	-	-	2157	6,5	
450	3500	6	16	84	15021	14773	14656	14556	14405	14179	13883	13539	13180	9348	76	
	1750	0,75	3,2	68	7510	7202	6590	5950	-	-	-	-	-	4674	19	
	1150	0,25	1,4	57	4935	4188	-	-	-	-	-	-	-	3071	8,2	
500	3500	10	28	87	20604	20309	20156	20050	19925	19747	19500	19187	18823	12823	93	
	1750	1,5	5,2	71	10302	9962	9411	8643	7881	-	-	-	-	6411	23	
	1150	0,33	2,2	61	6770	6021	-	-	-	-	-	-	-	4213	10	
	850	0,16	1,3	54	5004	3685	-	-	-	-	-	-	-	3114	5,5	
560	1750	2	6,5	74	14474	14069	13620	12787	11965	11095	-	-	-	9007	29	
	1150	0,75	3,6	64	9511	8795	7543	-	-	-	-	-	-	5919	12	
	850	0,25	2,0	57	7030	5726	-	-	-	-	-	-	-	4375	6,9	
630	1750	4	12	78	20608	20104	19742	18992	18004	17088	16202	14425	-	12825	37	
	1150	1	4,2	67	13542	12846	11438	9576	-	-	-	-	-	8428	16	
	850	0,5	2,6	61	10010	8631	-	-	-	-	-	-	-	6229	8,8	
710	1750	7,5	21	81	29498	28659	28533	27936	26984	25860	24798	23851	22670	18358	47	
	1150	2	7,6	71	19385	18653	17268	15707	-	-	-	-	-	12063	20	
	850	1	4,8	65	14328	12979	10547	-	-	-	-	-	-	8916	11	
800	1750	12,5	34	85	42198	41396	41034	40571	39788	38696	37438	36188	35057	26261	60	
	1150	4	14	75	27730	26887	25712	23822	22144	-	-	-	-	17257	25	
	850	1,5	6,6	68	20496	19210	16783	-	-	-	-	-	-	12755	14	
900	1750	25	66	89	60084	59092	58627	5824	57620	56717	55532	54159	52722	37392	76	
	1150	7,5	22	78	39483	38449	37514	35639	33508	31653	28585	-	-	24572	32	
	850	3	12	72	29183	27896	25280	22557	-	-	-	-	-	18161	18	
1000	1750	40	98	92	82419	81238	80626	80200	79703	78989	78000	76749	75294	51292	93	
	1150	12,5	38	81	54161	52891	52100	50482	48169	45830	43785	41101	-	33706	40	
	850	5	19	75	40032	38641	36211	33118	29323	-	-	-	-	24913	22	

1) In en 380V – In 220V x 0,557

2) distancia 1,5m – sonido directo, campo libre (ver Término de Responsabilidad Técnica OTAM, ítem 5). Valores medidos estimados para aspiración y descarga.

TABLA – 4.16

PROPIEDADES TERMICAS DE VARIOS GASES

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes					
a) A 300 K					
Gas	Fórmula	Constante de gas, R kJ/kg · K	C_p kJ/kg · K	C_v kJ/kg · K	k
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butano	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Dióxido de carbono	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Etano	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Etileno	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hidrógeno	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metano	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrógeno	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octano	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxígeno	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propano	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vapor	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Nota: La unidad kJ/(kg · K) es equivalente a kJ/kg · °C.

Fuente: Gordon J. Van Wylen y Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, versión inglés/SI, 3a. ed. (Nueva York: John Wiley & Sons, 1986), p. 687, tabla A-8SI.

DIAGRAMA PSICOMETRICO DEL AIRE HUMEDO

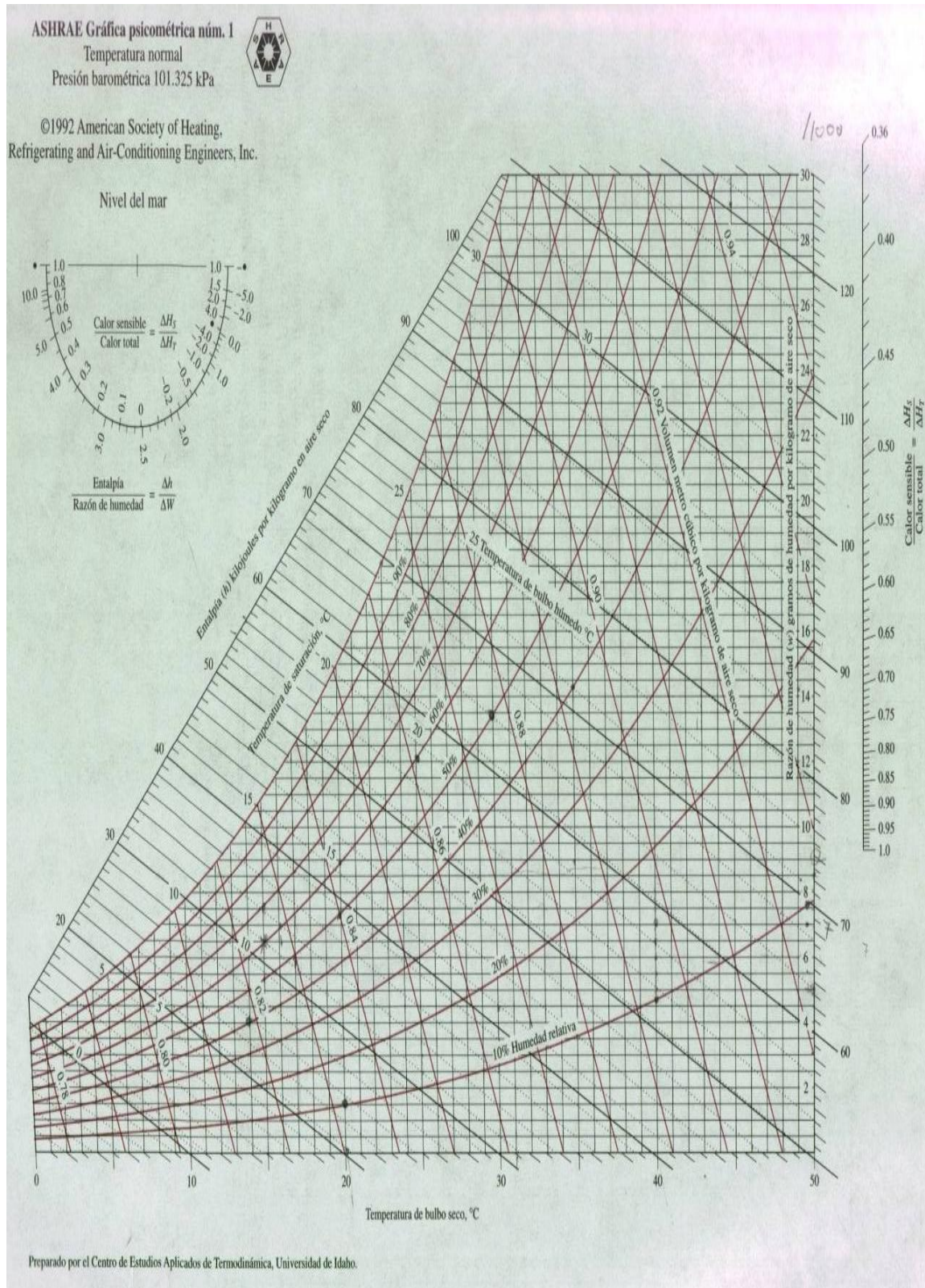


TABLA – 4.18

PROPIEDADES DE ALGUNOS MATERIALES

Material	Módulo de Young E [GPa]	Tensión de Fluencia σ_F [Mpa]	Módulo de Corte G [Gpa]	Módulo de Volumen K [Gpa]	$\alpha \times 10^6$ Coef. Exp. [1/°C]	μ Coef. Poiss.
Hierro Colado	100		40	90		
Hierro	150-170	180	60	120	11.7	
Acero Inox.	195	550			17.3	0.24 0.28
Acero	200		80	140		0.25 0.30
Latón	100		35	80		0.32 0.42
Aluminio	70		25	70	21.0	0.32 0.36
Cobre	110-120	300	38	120	16.5	0.33
Níquel	204	460			13.3	
Bronce	90					
Plata	82.7					0.37
Concreto	20 (compresión)	5- 35 (compresión)			11.7	0.1 0.15
Vidrio	48-78					0.2 0.3
Mármol	50			70		0.10 0.15
Granito	52	5-145 (tracc-comp)				
Madera, pino	1 a 10	40 – 80				
Madera, roble	11	117-59 (tracc-comp)				
Nylon	5	40-100				0.35
Hueso de extremidades	15	160-170 (tracc-comp)				

TABLA – 4.19

ANGULOS DEL DADO

Para un angulo (50° - 60°)		Para un angulo (30° -45°)	
a	0,8 - 0,9	a	0,7 - 0,78
b	1,2 - 1,5	b	1 - 1,1

TABLA – 4.20

VALORES ESPECIFICADOS DE RESISTENCIAS Y MODULOS DE ELASTICIDAD DE MADERAS CONIFERAS, Mpa (Kg/cm²).

		Clase	
		A	B
Flexión	f_{fu}'	15.2 (155)	9.8 (100)
Tensión paralela a la fibra	f_{tu}'	11.3 (115)	6.9 (70)
Compresión paralela a	f_{cu}'	11.8 (120)	9.3 (95)

TABLA – 4.21

SELECCIÓN DE RODAMIENTO DE RODILLOS CONICOS PARA LA PARTE INFERIOR DEL EJE PRINCIPAL

Rodamientos de rodillos cónicos, de una hilera								
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades	Masa	Designación
			dinámica	estática	P_u	Velocidad de referencia	Velocidad límite	
d	D	T	C	C_0				* - Rodamiento SKF Explorer
mm			kN		kN	rpm	kg	-
76,2	139,992	36,512	187	280	32,5	3400	5000	575/572/Q
76,2	161,925	49,212	260	335	38	2800	4000	9285/9220/CL7C
80	125	29	138	216	24,5	3600	5000	32016 X/Q
80	125	36	168	285	32	3600	5000	33016/Q
80	130	35	176	275	32,5	3600	5300	JM 515649/610/Q
80	130	37	179	280	32,5	3600	4800	33116 TH9/Q
80	130	37	179	280	32,5	3600	4800	33116/Q
80	140	28,25	151	183	21,2	3400	4800	30216 J2/Q
80	140	35,25	187	245	28,5	3400	4500	32216 J2/Q
80	140	46	251	375	41,5	3200	4500	33216/Q
80	160	45	229	315	35,5	2800	4000	T7FC 080/QCL7C
80	170	42,5	270	320	38	3000	4300	30316 J2
80	170	42,5	224	265	32	2800	4000	31316 J1/QCL7C
80	170	61,5	380	500	57	3000	4300	32316 J2
82,55	139,992	36,512	187	280	32,5	3400	5000	580/572/Q
85	130	29	140	224	25,5	3400	4800	32017 X/Q
85	130	36	183	310	34,5	3600	4800	33017/Q
85	140	41	220	340	38	3400	4500	33117/Q
85	150	30,5	176	220	25,5	3200	4300	30217 J2/Q
85	150	38,5	212	285	33,5	3200	4300	32217 J2/Q
85	150	49	286	430	48	3000	4300	33217/Q
85	180	44,5	303	365	40,5	2800	4000	30317 J2
85	180	44,5	242	285	33,5	2600	3800	31317 J2
85	180	63,5	391	560	62	2800	4000	32317 BJ2
85	180	63,5	402	530	60	2800	4000	32317 J2

TABLA – 4.22

SELECCIÓN DE RODAMIENTO RIGIDO DE BOLAS PARA LA PARTE SUPERIOR DEL EJE PRINCIPAL

Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera									
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
70	150	51	104	68	2,75	-	3000	3,55	62314-2RS1
70	180	42	143	104	3,9	8500	5300	4,85	6414
75	95	10	12,7	14,3	0,61	14000	8500	0,15	61815
75	95	10	12,7	14,3	0,61	-	4000	0,15	61815-2RS1
75	95	10	12,7	14,3	0,61	14000	7000	0,15	61815-2RZ
75	105	16	24,2	19,3	0,965	13000	8000	0,37	61915
75	105	16	24,2	19,3	0,965	-	3600	0,37	61915-2RS1
75	105	16	24,2	19,3	0,965	13000	6300	0,37	61915-2RZ
75	110	12	28,6	27	1,14	13000	8000	0,38	16115
75	115	13	30,2	27	1,14	12000	7500	0,46	16015 *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	12000	7500	0,64	6015 *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	-	3400	0,64	6015-2RS1 *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	12000	6000	0,64	6015-2RZ *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	12000	6000	0,64	6015-2Z *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	-	3400	0,64	6015-RS1 *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	12000	7500	0,64	6015-RZ *
75	115	20	41,6	33,5	1,43	12000	7500	0,64	6015-Z *
75	130	25	68,9	49	2,04	10000	6700	1,20	6215 *
75	130	25	68,9	49	2,04	-	3200	1,20	6215-2RS1 *
75	130	25	68,9	49	2,04	10000	5300	1,20	6215-2Z *
75	130	25	68,9	49	2,04	-	3200	1,20	6215-RS1 *
75	130	25	68,9	49	2,04	10000	6700	1,20	6215-Z *
75	160	37	119	76,5	3	9000	5600	3,00	6315 *
75	160	37	119	76,5	3	-	2800	3,00	6315-2RS1 *
75	160	37	119	76,5	3	9000	4500	3,00	6315-2Z *

Tolerancias , ver también el texto
 Juego radial interno , ver también el texto
 Ajustes recomendados
 Tolerancias del eje y del alojamiento

* - Rodamiento SKF Explorer

TABLA – 4.23

SELECCIÓN DE RODAMIENTO DE RODILLOS CONICOS PARA EL RODILLO DE COMPACTACION.

Rodamientos de rodillos cónicos, de una hilera									
Tolerancias , ver también el texto Ajustes recomendados Tolerancias del eje y del alojamiento									
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	T	C	C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		* - Rodamiento SKF Explorer
mm			kN		kN	rpm		kg	-
35	62	18	37,4	49	5,2	8000	11000	0,22	32007 J2/Q
35	62	18	42,9	54	5,85	8500	11000	0,22	32007 X/Q
35	72	18,25	51,2	56	6,1	7000	9500	0,32	30207 J2/Q
35	72	24,25	66	78	8,5	7000	9500	0,43	32207 J2/Q
35	72	28	84,2	106	11,8	6300	9500	0,56	33207/Q
35	80	22,75	72,1	73,5	8,3	6700	9000	0,52	30307 J2/Q
35	80	22,75	72,1	73,5	8,3	6700	9000	0,52	30307 RJ2/Q
35	80	22,75	61,6	67	7,8	6000	8500	0,52	31307 J2/Q
35	80	32,75	93,5	114	13,2	6000	8500	0,80	32307 BJ2/Q
35	80	32,75	95,2	106	12,2	6300	9000	0,73	32307 J2/Q
36,487	73,025	23,812	72,1	88	9,8	7000	10000	0,45	25880/25820/Q
36,512	76,2	29,37	78,1	106	11,8	6300	9500	0,64	HM 89449/2/410/2/QCL7C
37	80	32,75	93,5	114	13,2	6000	8500	0,80	32307/37 BJ2/Q
38	63	17	36,9	52	5,4	7500	11000	0,19	JL 69345 F/310/Q
38	63	17	36,9	52	5,4	7500	11000	0,20	JL 69349 A/310/Q
38	63	17	36,9	52	5,4	7500	11000	0,20	JL 69349 X/310/Q
38	63	17	36,9	52	5,4	7500	11000	0,19	JL 69349/310/Q
38	68	19	52,8	71	7,65	7000	9500	0,27	32008/38 X/Q
38,1	65,088	18,034	42,9	57	6,1	7500	11000	0,25	LM 29748/710/Q
38,1	65,088	18,034	42,9	57	6,1	7500	11000	0,25	LM 29749/710/QCL7CVA607
38,1	65,088	19,812	42,9	57	6,1	7500	11000	0,25	LM 29749/711/Q
38,1	65,088	19,812	42,9	57	6,1	7500	11000	0,25	LM 29749/711/QCL7CVA607
38,1	72,238	20,638	49,5	60	6,55	7000	10000	0,39	16150/16284/Q
38,1	72,238	23,812	49,5	60	6,55	7000	10000	0,39	16150/16283/Q
38.1	76.2	23.812	74.8	93	10.6	6700	10000	0.50	2788/2770/QCL 7C

DISEÑO DEL ENFRIADOR

TABLA – 4.24

DENSIDAD DEL AIRE A DIFERENTES PRESIONES

Altitud (ft)	Altitud (m)	Temperatura absoluta (R)	Presión absoluta (lb _f /ft ²)	Relación de presión	Densidad (lb _f /ft ³)	Relación de densidad	Velocidad del sonido (ft/s)
		$\times \frac{5}{9} = (K)$	$\times 47.88 = (N/m^2)$		$\times 16.02 = (kg/m^3)$		$\times 0.3048 = (m/s)$
0	0	518	2,116	1.00	7.65×10^{-2}	1.00	1,120
5,000	1524	500	1,758	8.32×10^{-1}	6.60×10^{-2}	8.61×10^{-1}	1,100
10,000	3048	483	1,456	6.87×10^{-1}	5.66×10^{-2}	7.38×10^{-1}	1,080
20,000	6096	447	972	4.59×10^{-1}	4.08×10^{-2}	5.33×10^{-1}	1,040
30,000	9144	411	628	2.97×10^{-1}	2.88×10^{-2}	3.76×10^{-1}	997
40,000	12,192	392	392	1.85×10^{-1}	1.88×10^{-2}	2.45×10^{-1}	973
50,000	15,240	392	243	1.15×10^{-1}	1.16×10^{-2}	1.52×10^{-1}	973
60,000	18,288	392	151	7.13×10^{-2}	7.32×10^{-3}	9.45×10^{-2}	973
70,000	21,336	392	94.5	4.47×10^{-2}	4.51×10^{-3}	5.90×10^{-2}	974
80,000	24,384	392	58.8	2.78×10^{-2}	2.80×10^{-3}	3.67×10^{-2}	974
90,000	27,432	392	36.6	1.73×10^{-2}	1.67×10^{-3}	2.28×10^{-2}	974
100,000	30,480	392	22.8	1.08×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.4×10^{-2}	975
150,000	45,720	575	3.2	1.5×10^{-3}	9.7×10^{-4}	1.3×10^{-3}	1,190
200,000	60,960	623	0.73	3.6×10^{-4}	2.2×10^{-5}	2.9×10^{-4}	1,240
300,000	91,440	487	0.017	9.0×10^{-6}	6.9×10^{-7}	9.0×10^{-6}	1,110
400,000	121,920	695	0.0011	5.2×10^{-7}	2.7×10^{-8}	3.5×10^{-7}	1,430
500,000	152,400	910	1.2×10^{-4}	8.5×10^{-8}	3.1×10^{-9}	4.1×10^{-8}	
600,000	182,880	1,130	4.1×10^{-5}	1.9×10^{-8}	5.7×10^{-10}	7.5×10^{-9}	
700,000	213,360	1,350	1.3×10^{-5}	6.2×10^{-9}	1.5×10^{-10}	1.9×10^{-9}	
800,000	243,840	1,570	4.6×10^{-6}	2.2×10^{-9}	4.6×10^{-11}	6.0×10^{-10}	
900,000	274,320	1,800	1.9×10^{-6}	9.0×10^{-10}	1.7×10^{-11}	2.2×10^{-10}	

TABLA – 4.25

PROPIEDADES DEL AIRE A TEMPERATURAS ESPECIFICADAS

TABLA 27 Aire seco a presión atmosférica											
Temperatura, <i>T</i>			Densidad, ρ (kg/m ³)	Coefficiente de expansión térmica, $\beta \times 10^3$ (1/°K)	Calor específico, c_p (J/kg °K)	Conductancia térmica, k (W/m °K)	Difusividad térmica, $\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	Viscosidad absoluta, $\mu \times 10^6$ (N s/m ²)	Viscosidad cinemática, $\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Número de Prandtl, Pr	$\frac{g\beta}{\nu^2} \times 10^{-10}$ (1/°K m ³)
°F	°K	°C	$\times 6.243 \times 10^{-2}$ = (lb _m /ft ³)	$\times 0.5556$ = (1/R)	$\times 2.388 \times 10^{-4}$ = (Btu/lb _m °F)	$\times 0.5777$ = (Btu/hr ft °F)	$\times 3.874 \times 10^4$ = (ft ² /hr)	$\times 0.6720$ = (lb _m /ft s)	$\times 3.874 \times 10^4$ = (ft ² /hr)		$\times 1.573 \times 10^{-2}$ = (1/R ft ³)
32	273	0	1.252	3.66	1011	0.0237	19.2	17.456	13.9	0.71	1.85
68	293	20	1.164	3.41	1012	0.0251	22.0	18.240	15.7	0.71	1.36
104	313	40	1.092	3.19	1014	0.0265	24.8	19.123	17.6	0.71	1.01
140	333	60	1.025	3.00	1017	0.0279	27.6	19.907	19.4	0.71	0.782
176	353	80	0.968	2.83	1019	0.0293	30.6	20.790	21.5	0.71	0.600
212	373	100	0.916	2.68	1022	0.0307	33.6	21.673	23.6	0.71	0.472
392	473	200	0.723	2.11	1035	0.0370	49.7	25.693	35.5	0.71	0.164
572	573	300	0.596	1.75	1047	0.0429	68.9	29.322	49.2	0.71	0.0709
752	673	400	0.508	1.49	1059	0.0485	89.4	32.754	64.6	0.72	0.0350
932	773	500	0.442	1.29	1076	0.0540	113.2	35.794	81.0	0.72	0.0193
1832	1273	1000	0.268	0.79	1139	0.0762	240	48.445	181	0.74	0.00236

TABLA – 4.26

DIAGRAMAS DE HEISLER (PARED)

Temperatura en el plano central de la pared.

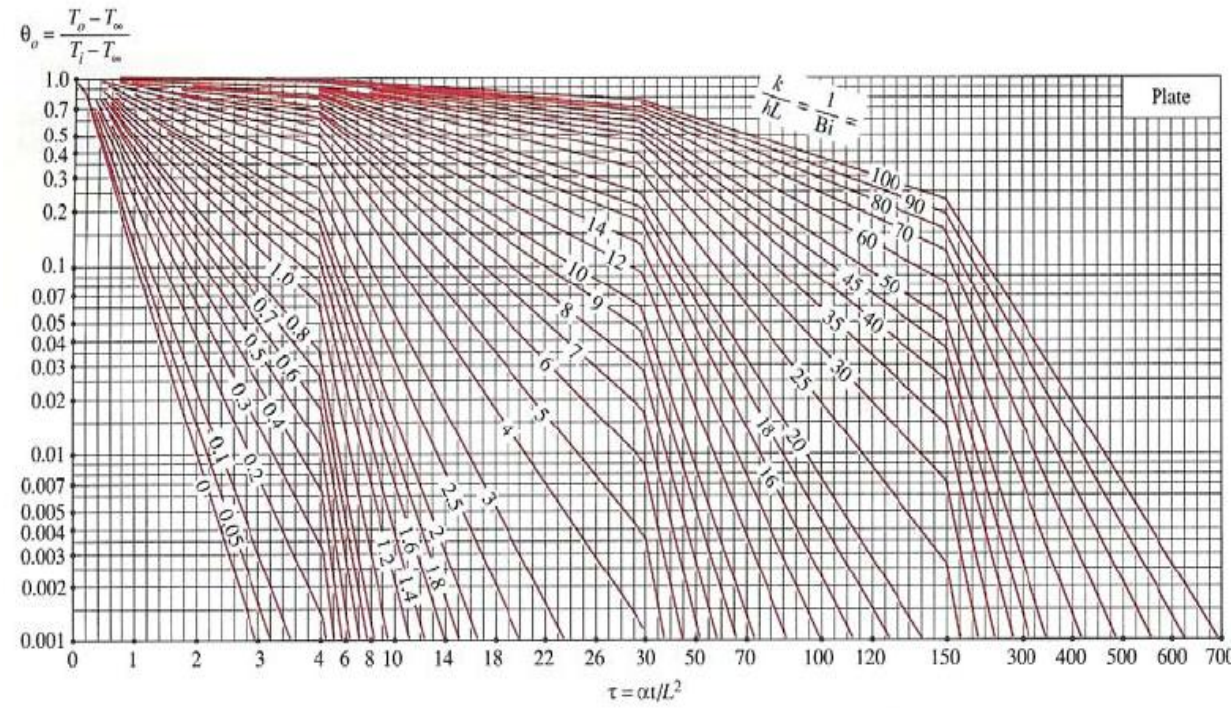


TABLA – 4.27

DIAGRAMAS DE HEISLER (CILINDRO)

Temperatura en el plano central del cilindro.

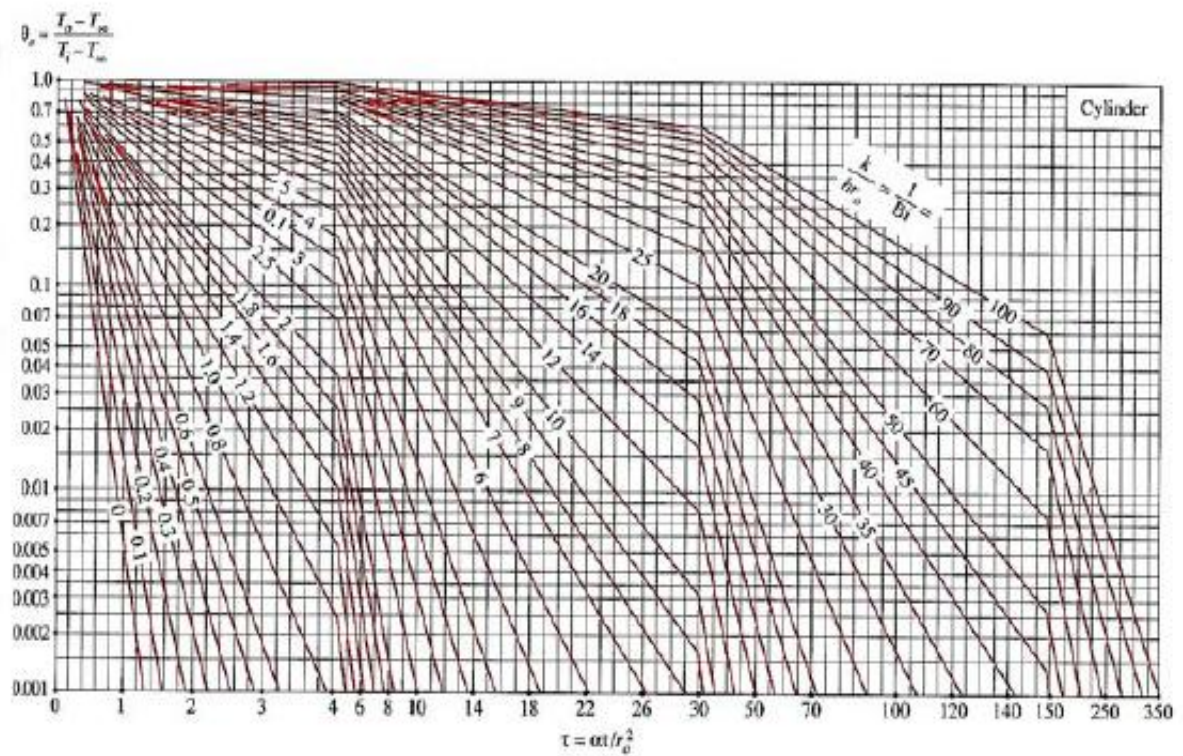


TABLA – 4.28

DIAGRAMAS DE HEISLER (PLANO SUPERFICIAL)

Temperatura en el plano superficial de la pared.

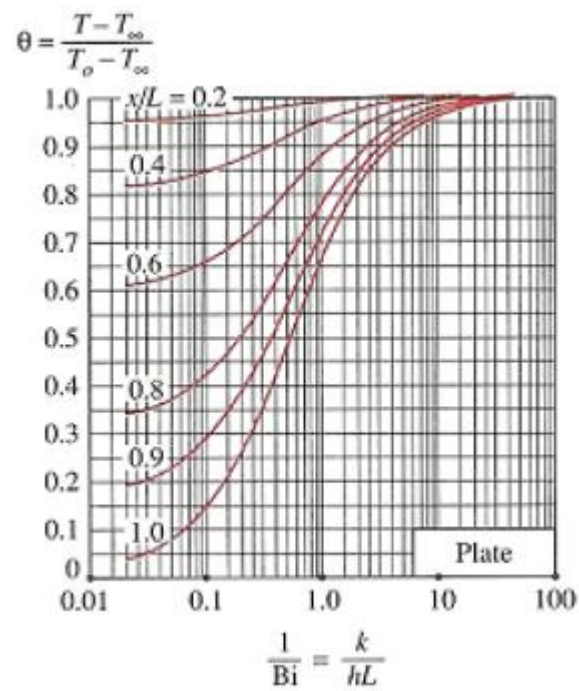
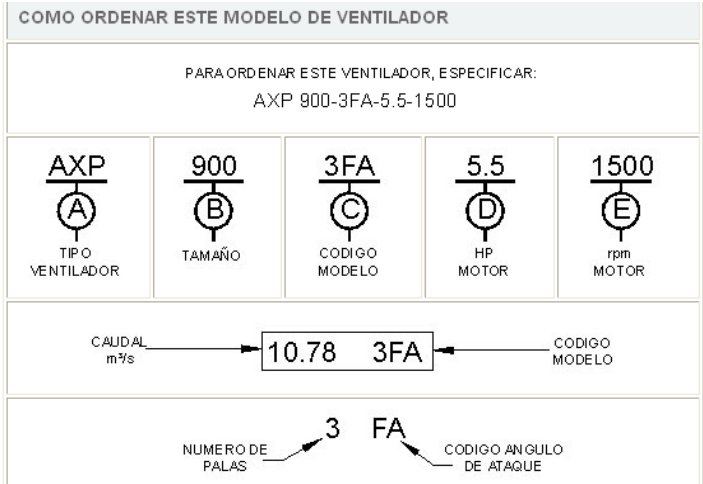


TABLA – 4.29
ELECCION DEL VENTILADOR AXIAL PARA EL ENFRIADOR

CAUDALES A BOCA LIBRE						
3000 rpm						
Tamaño	357					
HP Motor	0,25	0,33	0,5	0,75	1	1,5
Caudal m³/s	1,18	1,30	1,43	1,63	1,77	1,83
Hélice	3DJ	4DK	4EG	6EK	9FA	12FA

Tamaño	400					
HP Motor	0,25	0,33	0,5	0,75	1	1,5
Caudal m³/s	1,22	1,40	1,70	1,85	2,15	2,40
Hélice	3CE	3CJ	3EB	3EI	4FA	9FA

TABLA – 4.29
ELECCION DEL VENTILADOR AXIAL PARA EL ENFRIADOR
(CONTINUACION...)



ANEXO 5

ANÁLISIS DEL PROCESO DE COMBUSTION

TABLA – 5.1

Masa Molar de distintas sustancias

Sustancia	Fórmula	Masa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K*
Agua	H ₂ O	18.015	0.4615
Aire	—	28.97	0.2870
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805
Alcohol metílico	CH ₃ OH	32.042	0.2595
Amoníaco	NH ₃	17.03	0.4882
Argón	Ar	39.948	0.2081
Benceno	C ₆ H ₆	78.115	0.1064
Bromo	Br ₂	159.808	0.0520
Cloro	Cl ₂	70.906	0.1173
Cloroformo	CHCl ₃	119.38	0.06964
Cloruro metílico	CH ₃ Cl	50.488	0.1647
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	0.1889
Dióxido de sulfuro	SO ₂	64.063	0.1298
Etano	C ₂ H ₆	30.070	0.2765
Etileno	C ₂ H ₄	28.054	0.2964
Helio	He	4.003	2.0769
Hidrógeno (normal)	H ₂	2.016	4.1240
Kriptón	Kr	83.80	0.09921
Metano	CH ₄	16.043	0.5182
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430
Neón	Ne	20.183	0.4119
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647
Nitrógeno	N ₂	28.013	0.2968
Óxido nitroso	N ₂ O	44.013	0.1889
Oxígeno	O ₂	31.999	0.2598
Propano	C ₃ H ₈	44.097	0.1885
Propileno	C ₃ H ₆	42.081	0.1976
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153.82	0.05405
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052
Xenón	Xe	131.30	0.06332

*La unidad en kJ/(kg · K) es equivalente a kPa · m³/(kg · K). La constante de gas se calcula de $R = R_u/M$, do
Fuente: K. A. Kobe y R. E. Lynn, *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117-236; y ASHRAE [Sociedad American
Acondicionamiento de Aire], *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refriger
16.4 y 36.1.

(Fuente: Cengel, Yanus, “Termodinámica”)

TABLA – 5.2

Agua Saturada – Tabla de Temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m³/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		
		Líquido, sat., v _f	Vapor, sat., v _g	Líquido, sat., u _f	Evapor., u _{fg}	Vapor, sat., u _g	Líquido, sat., h _f	Evapor., h _{fg}	Vapor, sat., h _g	Líquido, sat., s _f	Evapor., s _{fg}	Vapor, sat., s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2 375.3	2 375.3	0.01	2 501.3	2 501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2 361.3	2 382.3	20.98	2 489.6	2 510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2 347.2	2 389.2	42.01	2 477.7	2 519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2 333.1	2 396.1	62.99	2 465.9	2 528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2 319.0	2 402.9	83.96	2 454.1	2 538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2 304.9	2 409.8	104.89	2 442.3	2 547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2 290.8	2 416.6	125.79	2 430.5	2 556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2 276.7	2 423.4	146.68	2 418.6	2 565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2 262.6	2 430.1	167.57	2 406.7	2 574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2 248.4	2 436.8	188.45	2 394.8	2 583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2 234.2	2 443.5	209.33	2 382.7	2 592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2 219.9	2 450.1	230.23	2 370.7	2 600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2 205.5	2 456.6	251.13	2 358.5	2 609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2 191.1	2 463.1	272.06	2 346.2	2 618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2 176.6	2 469.6	292.98	2 333.8	2 626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2 162.0	2 475.9	313.93	2 321.4	2 635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2 147.4	2 482.2	334.91	2 308.8	2 643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2 132.6	2 488.4	355.90	2 296.0	2 651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2 117.7	2 494.5	376.92	2 283.2	2 660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2 102.7	2 500.6	397.96	2 270.2	2 668.1	1.2500	6.1659	7.4159

TABLA – 5.3

Agua Saturada – Tabla de Presiones

Presión, P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m³/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg · K		
		Líquido, sat., v _f	Vapor, sat., v _g	Líquido, sat., u _f	Evapor., u _{fg}	Vapor, sat., u _g	Líquido, sat., h _f	Evapor., h _{fg}	Vapor, sat., h _g	Líquido, sat., s _f	Evapor., s _{fg}	Vapor, sat., s _g
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2 375.3	2 375.3	0.01	2 501.3	2 501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2 355.7	2 385.0	29.30	2 484.9	2 514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2 338.6	2 393.3	54.71	2 470.6	2 525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2 326.0	2 399.5	73.48	2 460.0	2 533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2 315.9	2 404.4	88.49	2 451.6	2 540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2 307.5	2 408.5	101.05	2 444.5	2 545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2 293.7	2 415.2	121.46	2 432.9	2 554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2 282.7	2 420.5	137.82	2 423.7	2 561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2 261.7	2 430.5	168.79	2 406.0	2 574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2 246.1	2 437.9	191.83	2 392.8	2 584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2 222.8	2 448.7	225.94	2 373.1	2 599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2 205.4	2 456.7	251.40	2 358.3	2 609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2 191.2	2 463.1	271.93	2 346.3	2 618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2 179.2	2 468.4	289.23	2 336.1	2 625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2 159.5	2 477.0	317.58	2 319.2	2 636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2 143.4	2 483.9	340.49	2 305.4	2 645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2 112.4	2 496.7	384.39	2 278.6	2 663.0	1.2130	6.2434	7.4564

TABLA – 5.4

Entalpía de formación de distintas sustancias a 25 °C y 1 atm.

Sustancia	Fórmula	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
Acetileno	C ₂ H ₂ (g)	+226 730	+209 170	200.85
Agua	H ₂ O(ℓ)	-285 830	-237 180	69.92
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(ℓ)	-277 690	-174 890	160.70
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(g)	-235 310	-168 570	282.59
Alcohol metílico	CH ₃ OH(ℓ)	-238 660	-166 360	126.80
Alcohol metílico	CH ₃ OH(g)	-200 670	-162 000	239.70
Amoníaco	NH ₃ (g)	-46 190	-16 590	192.33
Benceno	C ₆ H ₆ (g)	+82 930	+129 660	269.20
Carbón	C(s)	0	0	5.74
Dióxido de carbono	CO ₂ (g)	-393 520	-394 360	213.80
Etano	C ₂ H ₆ (g)	-84 680	-32 890	229.49
Etileno	C ₂ H ₄ (g)	+52 280	+68 120	219.83
Hidrógeno	H(g)	+218 000	+203 290	114.72
Hidrógeno	H ₂ (g)	0	0	130.68
Hidroxilo	OH(g)	+39 460	+34 280	183.70
Metano	CH ₄ (g)	-74 850	-50 790	186.16
Monóxido de carbono	CO(g)	-110 530	-137 150	197.65
n-butano	C ₄ H ₁₀ (g)	-126 150	-15 710	310.12
n-dodecano	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291 010	+50 150	622.83
Nitrógeno	N(g)	+472 650	+455 510	153.30
Nitrógeno	N ₂ (g)	0	0	191.61
n-octano	C ₈ H ₁₈ (ℓ)	-249 950	+6 610	360.79
n-octano	C ₈ H ₁₈ (g)	-208 450	+16 530	466.73
Oxígeno	O(g)	+249 190	+231 770	161.06
Oxígeno	O ₂ (g)	0	0	205.04
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂ (g)	-136 310	-105 600	232.63
Propano	C ₃ H ₈ (g)	-103 850	-23 490	269.91
Propileno	C ₃ H ₆ (g)	+20 410	+62 720	266.94
Vapor de agua	H ₂ O(g)	-241 820	-228 590	188.83

TABLA – 5.5

Propiedades del gas ideal H₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
0	0	0	0
260	7 370	5 209	126.636
270	7 657	5 412	127.719
280	7 945	5 617	128.765
290	8 233	5 822	129.775
298	8 468	5 989	130.574
300	8 522	6 027	130.754
320	9 100	6 440	132.621
340	9 680	6 853	134.378
360	10 262	7 268	136.039
380	10 843	7 684	137.612
400	11 426	8 100	139.106
420	12 010	8 518	140.529
440	12 594	8 936	141.888
460	13 179	9 355	143.187
480	13 764	9 773	144.432
500	14 350	10 193	145.628
520	14 935	10 611	146.775
560	16 107	11 451	148.945
600	17 280	12 291	150.968
640	18 453	13 133	152.863
680	19 630	13 976	154.645
720	20 807	14 821	156.328
760	21 988	15 669	157.923
800	23 171	16 520	159.440
840	24 359	17 375	160.891
880	25 551	18 235	162.277
920	26 747	19 098	163.607
960	27 948	19 966	164.884
1 000	29 154	20 839	166.114
1 040	30 364	21 717	167.300

TABLA – 5.6

Propiedades del gas ideal N₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
1 000	30 129	21 815	228.057
1 020	30 784	22 304	228.706
1 040	31 442	22 795	229.344
1 060	32 101	23 288	229.973
1 080	32 762	23 782	230.591
260	7 558	5 396	187.514
270	7 849	5 604	188.614
280	8 141	5 813	189.673
290	8 432	6 021	190.695
298	8 669	6 190	191.502

TABLA – 5.7

Propiedades del gas ideal O₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
1 000	31 389	23 075	243.471
1 020	32 088	23 607	244.164
1 040	32 789	24 142	244.844
1 060	33 490	24 677	245.513
1 080	34 194	25 214	246.171
0	0	0	0
220	6 404	4 575	196.171
230	6 694	4 782	197.461
240	6 984	4 989	198.696
250	7 275	5 197	199.885
260	7 566	5 405	201.027
270	7 858	5 613	202.128
280	8 150	5 822	203.191
290	8 443	6 032	204.218
298	8 682	6 203	205.033

TABLA – 5.8

Propiedades del gas ideal H₂O

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
1 000	35 882	27 568	232.597
1 020	36 709	28 228	233.415
1 040	37 542	28 895	234.223
1 060	38 380	29 567	235.020
1 080	39 223	30 243	235.806

TABLA – 5.9

Propiedades del gas ideal CO₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
1 000	42 769	34 455	269.215
1 020	43 859	35 378	270.293
1 040	44 953	36 306	271.354
1 060	46 051	37 238	272.400
1 080	47 153	38 174	273.430