



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**REDISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA
MÁQUINA PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR
DE BIOMASA**

Trabajo de titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: CRISTHIAN ANDRÉS ALMACHE VILLACÍS

DIRECTOR: Ing. OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO

RIOBAMBA – ECUADOR

2020

©2020, Cristhian Andrés Almache Villacís

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Cristhian Andrés Almache Villacís, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 09 de marzo de 2020



Cristhian Andrés Almache Villacís

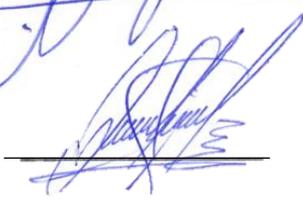
060449347-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Propuesta Tecnológica, **REDISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE BIOMASA**, realizado por el señor: **CRISTHIAN ANDRÉS ALMACHE VILLACÍS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2020 - 03 - 09
Ing. Otto Fernando Balseca Sampedro DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2020 - 03 - 09
Ing. Santiago Alejandro López Ortiz MIEMBRO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2020 - 03 - 09

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado principalmente a mis padres Mario y Marlene, quienes durante toda mi etapa académica me brindaron todo su apoyo y confianza para poder finalizar mis estudios universitarios. A Ricardo y Leonardo, que en cada momento me brindaron su apoyo incondicional además de siempre darme sus palabras de aliento para no ceder a las dificultades que se presentaba cada semestre. Finalmente, a mi esposa Jeniffer y mi hija Angie que llegaron a formar parte de mi vida y se convirtieron en un motivo más para alcanzar el propósito anhelado.

Cristhian

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a mis padres, hermanos, esposa y tíos quienes me apoyaron económica y moralmente para realizar mi trabajo de titulación, que gracias a su ayuda fueron el pilar fundamental que permitió la finalización exitosa del mismo.

Finalmente, el más profundo agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, que por medio de todos los docentes de la carrera compartieron todos sus conocimientos para mi formación y culminación académica.

Cristhian

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS	XVII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT	XIX
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	MARCO REFERENCIAL	2
1.1	Antecedentes	2
1.2	Formulación del Problema	3
1.3	Justificación	3
1.3.1	<i>Justificación Práctica.....</i>	3
1.3.2	<i>Justificación Teórica.....</i>	4
1.3.3	<i>Justificación Metodológica.....</i>	4
1.4	Alcance	4
1.5	Objetivos	4
1.5.1	<i>Objetivo General.....</i>	4
1.5.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	4

CAPÍTULO II

2.	ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO DE LAS CARACTERÍSTICAS Y PROCESO DE LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA.....	6
2.1	Características de la Biomasa	6
2.1.1	<i>Biomasa</i>	6
2.1.2	<i>Características Físicas de la Biomasa.....</i>	7
2.1.3	<i>Tipos de biocombustibles obtenidos de biomasa</i>	8
2.2	Briquetas, Pellets o Bloques sólidos de combustible	9
2.2.1	<i>Tamaño y forma de las briquetas</i>	10
2.2.2	<i>Principales parámetros para la fabricación de briquetas</i>	11

2.2.2.1	<i>Contenido de humedad</i>	11
2.2.2.2	<i>Tamaño de partículas</i>	11
2.2.2.3	<i>Presión de Compactación</i>	12
2.2.2.4	<i>Temperatura de Secado</i>	13
2.2.2.4.1	Secado al aire libre	13
2.2.2.4.2	Secado forzado	14
2.3	Tipos de maquinarias para la fabricación de briquetas	15
2.3.1	<i>Máquinas Artesanales</i>	15
2.3.2	<i>Máquinas semi industriales</i>	16
2.3.3	<i>Máquinas industriales</i>	16
2.4	Materia Prima para briquetado	17
2.4.1	<i>Borra de Café</i>	17
2.4.1.1	<i>Usos de la borra de café</i>	18
2.4.1.2	<i>Poder calórico de la borra de café</i>	19
2.4.2	<i>Cascarilla de arroz</i>	20
2.4.2.1	<i>Usos de la cascarilla de arroz</i>	22
2.4.3	<i>Bagazo de caña de azúcar</i>	23
2.4.3.1	<i>Usos del bagazo de caña de azúcar</i>	24
2.4.4	<i>Residuos de cebada</i>	25
2.4.4.1	<i>Usos de los residuos de cebada</i>	26
2.5	Sistemas de control Neumático y Térmico	26
2.5.1	<i>Sistema Neumático</i>	26
2.5.1.1	<i>Ventajas de un sistema neumático</i>	26
2.5.1.2	<i>Desventajas de un sistema neumático</i>	27
2.5.1.3	<i>Elementos de control de un sistema neumático</i>	27
2.5.2	<i>Sistema térmico</i>	28
2.5.2.1	<i>Hornos Eléctricos de Resistencias</i>	28
2.5.2.1.1	Aplicaciones de los hornos de resistencias	28
2.6	Automatización	29
2.6.1	<i>Elementos para un proceso automático</i>	29
2.6.2	<i>Control Automático de un sistema</i>	30

CAPÍTULO III

3.	REDISEÑO SISTEMA NEUMÁTICO DE LA MÁQUINA BRIQUETADORA Y DISEÑO DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	32
3.1	Estado Actual de la Máquina Briquetadora	32

3.1.1	<i>Tiempo en el proceso de compactado</i>	35
3.1.2	<i>Control de presión del aire comprimido</i>	35
3.1.3	<i>Control de temperatura del sistema térmico</i>	35
3.2	Rediseño del circuito neumático	36
3.2.1	<i>Parámetros del sistema neumático de la máquina briquetadora</i>	36
3.2.1.1	<i>Elementos equipados en la máquina briquetadora</i>	36
3.2.2	<i>Selección de la Unidad Neumática</i>	37
3.2.3	<i>Selección del transmisor de presión</i>	39
3.2.4	<i>Selección de la válvula reguladora de presión</i>	40
3.2.5	<i>Selección de los accesorios de conexión</i>	40
3.2.6	<i>Armado e instalación del sistema neumático</i>	41
3.2.6.1	<i>Medición y control de la presión en los actuadores neumáticos</i>	42
3.2.6.2	<i>Diagrama de control del circuito neumático</i>	43
3.3	Diseño del sistema térmico	44
3.3.1	<i>Consideraciones iniciales</i>	44
3.3.2	<i>Selección del tipo de horno de resistencias eléctricas</i>	45
3.3.2.1	<i>Forma y dimensiones de las resistencias tipo abrazadera</i>	46
3.3.3	<i>Consideraciones físicas y ambientales para el diseño</i>	46
3.3.4	<i>Análisis térmico del sistema</i>	47
3.3.4.1	<i>Determinación de la mica térmica</i>	47
3.3.4.2	<i>Analogía Eléctrica</i>	48
3.3.4.3	<i>Determinación del flujo de calor acumulado en las paredes de las resistencias</i>	49
3.3.4.4	<i>Cálculo de las pérdidas de calor.</i>	49
3.3.4.4.1	<i>Pérdidas de calor por conducción.</i>	50
3.3.4.4.2	<i>Pérdidas de calor por convección</i>	51
3.3.4.4.3	<i>Pérdidas de calor por radiación</i>	53
3.3.4.5	<i>Cálculo de la cantidad de calor útil de trabajo</i>	54
3.3.4.5.1	<i>Calor necesario para calentar el molde cilíndrico de las briquetas</i>	54
3.3.4.5.2	<i>Calor necesario para calentar las biomásas dentro del molde cilíndrico</i>	55
3.3.4.6	<i>Cálculo calor total suministrado por el sistema</i>	55
3.3.5	Cálculo de los elementos de la resistencia eléctrica	56
3.3.5.1	<i>Calentamiento de la resistencia por efecto Joule</i>	56
3.3.5.2	<i>Variables necesarias para el cálculo de la resistencia</i>	57
3.3.5.3	<i>Cálculo de las dimensiones del alambre de la resistencia</i>	59
3.3.5.3.1	<i>Diámetro del alambre (d)</i>	59
3.3.5.3.2	<i>Longitud radiante del alambre (L)</i>	59
3.3.5.3.3	<i>Diámetro de la hélice (D)</i>	60

3.3.5.3.4	Número de espiras (n)	60
3.3.6	<i>Selección de los dispositivos de medición y control</i>	61
3.4	Rediseño del sistema de control.	62
3.4.1	<i>Descripción del sistema de Control</i>	62
3.4.2	<i>Selección de los elementos y dispositivos para el sistema de control</i>	63
3.4.3	<i>Diseño del circuito electrónico</i>	64

CAPÍTULO IV

4.	CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y COSTOS DE LA MÁQUINA BRIQUETADORA	65
4.1	Construcción de las resistencias tipo abrazadera	65
4.1.1	<i>Trazado y Corte de las placas externas de la resistencia</i>	65
4.1.2	<i>Conformación de las resistencias eléctricas</i>	65
4.2	Montaje del sistema de calefacción	66
4.2.1	<i>Implementación resistencias eléctricas</i>	66
4.2.2	<i>Implementación relés de estado sólido</i>	67
4.2.3	<i>Implementación del transmisor de temperatura</i>	67
4.3	Montaje del sistema neumático	68
4.3.1 I	<i>Implementación del transmisor de presión</i>	68
4.3.2	<i>Implementación de la válvula reguladora proporcional de presión</i>	68
4.4	Armado del tablero de control	70
4.4.1	<i>Gabinete metálico</i>	70
4.4.2	<i>Rieles Din</i>	70
4.4.3	<i>Controlador y elementos de protección</i>	71
4.4.4	<i>Borneras</i>	71
4.4.5	<i>Selector eléctrico y luz piloto</i>	71
4.4.6	<i>Router</i>	72
4.5	Programación del sistema de control	73
4.5.1	<i>Componentes para la programación del proceso</i>	73
4.5.1.1	<i>Controlador PLC LOGO 8</i>	73
4.5.1.2	<i>Software Logo Web Editor</i>	74
4.5.1.2.1	Diseño del programa Logo Web Editor	74
4.5.1.2.2	Variables almacenadas para la programación	77
4.5.1.3	<i>Software Logo Soft Comfort V8.2</i>	78
4.5.1.3.1	Diseño del programa	78
4.5.1.3.2	Carga y transferencia del programa	80

4.6	Costos directos, indirectos y totales de la máquina briquetadora	81
4.6.1	Costos directos.....	81
4.6.1.1	<i>Costo de mano de obra, equipos y herramientas.....</i>	82
4.6.1.2	<i>Costos por transporte.....</i>	82
4.6.1.3	<i>Total, de costos directos.....</i>	83
4.6.2	Costos Indirectos	83
4.6.3	Costos totales	83

CAPÍTULO V

5.	FABRICACIÓN DE BRIQUETAS Y DETERMINACIÓN DE PODER CALÓRICO.....	84
5.1	Elaboración de briquetas.....	84
5.1.1	<i>Borra de café</i>	84
5.1.1.1	<i>Obtención de la borra de café.....</i>	84
5.1.1.2	<i>Parámetros para la obtención de briquetas de borra de café</i>	84
5.1.2	<i>Cascarilla de arroz</i>	87
5.1.2.1	<i>Obtención de la cascarilla de arroz.....</i>	87
5.1.2.2	<i>Parámetros para la obtención de briquetas de cascarilla de arroz.....</i>	87
5.1.3	<i>Bagazo de caña de azúcar.....</i>	90
5.1.3.1	<i>Obtención del bagazo de la caña de azúcar</i>	90
5.1.3.2	<i>Parámetros para la obtención de briquetas de bagazo caña de azúcar.....</i>	90
5.1.4	<i>Residuos de cebada</i>	93
5.1.4.1	<i>Obtención residuos de cebada</i>	93
5.1.4.2	<i>Parámetros para la obtención de briquetas de cascarilla de cebada.....</i>	93
5.2	Análisis de Resultados	96
5.2.1	<i>Determinación poder calorífico de las briquetas de biomasa.....</i>	96
5.2.1.1	<i>Poder calorífico superior (Bruto)</i>	96
5.2.1.1.1	<i>Procedimiento para cálculo de poder calorífico.</i>	96
5.2.2	<i>Briquetas con nanopartículas de alofán</i>	98
5.2.3	<i>Comparativa del poder calorífico entre briquetas con y sin aglutinante</i>	98
5.2.4	<i>Comparativa del poder calorífico briqueta de borra de café</i>	100
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Características físicas de los diferentes tipos de biomasa.....	7
Tabla 2-2:	Composición de la borra de café.....	18
Tabla 3-2:	Tabla comparativa de las biomasas con su respectivo poder calorífico.....	20
Tabla 4-2:	Principales componentes de la cascarilla de arroz.....	21
Tabla 5-2:	Características y condiciones energéticas de la cascarilla de arroz.....	21
Tabla 6-2:	Características químicas del bagazo de caña de azúcar.....	23
Tabla 7-2:	Propiedades y condiciones energéticas del bagazo de caña de azúcar.....	24
Tabla 8-2:	Especificaciones técnicas bio briquetas de Cascarilla de cebada.....	25
Tabla 1-3:	Elementos neumáticos presentes en la máquina briquetadora.....	37
Tabla 2-3:	Características de la unidad neumática AirFlow.....	38
Tabla 3-3:	Accesorios de conexión para el circuito neumático.....	41
Tabla 4-3:	Datos meteorológicos de la ciudad de Riobamba.....	47
Tabla 5-3:	Propiedades térmicas de los materiales de las paredes de las resistencias.....	48
Tabla 6-3:	Temperaturas en cada nodo del circuito térmico.....	50
Tabla 7-3:	Propiedades del aire para T_m	51
Tabla 8-3:	Valores de las pérdidas de calor en cada iteración.....	54
Tabla 9-3:	Propiedades de las aleaciones Ni-Cr.....	57
Tabla 10-3:	Diámetro de la espiral según el material y temperatura.....	60
Tabla 1-4:	Definición de variables a utilizar.....	77
Tabla 2-4:	Costos de materiales en rediseño y automatización de máquina briquetadora.....	81
Tabla 3-4:	Costos de equipos y herramientas.....	82
Tabla 4-4:	Total de costos directos.....	83
Tabla 5-4:	Total de costos indirectos.....	83
Tabla 1-5:	Parámetros de fabricación briquetas de borra de café.....	85
Tabla 2-5:	Propiedades físico térmicas de la borra de café.....	86
Tabla 3-5:	Parámetros de fabricación briquetas de cascarilla de arroz.....	88
Tabla 4-5:	Propiedades físico-térmicas de la cascarilla de arroz.....	89
Tabla 5-5:	Parámetros de fabricación briquetas de bagazo caña de azúcar.....	91
Tabla 6-5:	Propiedades físico-térmicas del bagazo de caña de azúcar.....	92
Tabla 7-5:	Parámetros de fabricación briquetas de cascarilla de cebada.....	94
Tabla 8-5:	Propiedades físico térmicas de la cascarilla de cebada.....	95
Tabla 9-5:	Resultados poder calorífico briquetas sin aglutinante.....	98
Tabla 10-5:	Poder calorífico borra de café con nanopartículas de alofán.....	98
Tabla 11-5:	Resultados poder calorífico briquetas con aglutinante.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Fuentes para la obtención de la biomasa	6
Figura 2-2:	Briquetas de diferentes tipos de biomasa	10
Figura 3-2:	Variedad de formas de manufactura de las briquetas	10
Figura 4-2:	Esquema simple de una máquina briquetadora	13
Figura 5-2:	Secado de briquetas al aire libre	14
Figura 6-2:	Secadero solar tipo invernadero de biomasa	14
Figura 7-2:	Máquina artesanal para fabricación de briquetas	15
Figura 8-2:	Prensa de pistón hidráulico y neumático	16
Figura 9-2:	Tecnología industrial para la fabricación de briquetas de biomasa	17
Figura 10-2:	Sección transversal y longitudinal de un grano de café	17
Figura 11-2:	Briquetas de borra de café	19
Figura 12-2:	Cascarilla de arroz	20
Figura 13-2:	Briquetas de Cascarilla de arroz	22
Figura 14-2:	Bagazo de caña de azúcar	23
Figura 15-2:	Residuos de Cebada	25
Figura 16-2:	Elementos de un circuito neumático sencillo	27
Figura 17-2:	Representación de un horno eléctrico de resistencias	28
Figura 1-3:	Condición inicial de la maquina briquetadora	32
Figura 2-3:	Moldes de la briquetadora sin sistema de calefacción	33
Figura 3-3:	Cajetín con botonera para control de los cilindros neumáticos	33
Figura 4-3:	Componentes de control actual de la máquina briquetadora	34
Figura 5-3:	Cableado entre los elementos neumáticos de la máquina	34
Figura 6-3:	Compresor de banda AirFlow	38
Figura 7-3:	Transmisor de presión de la marca Danfoss	39
Figura 8-3:	Válvula reguladora de presión marca SMC	40
Figura 9-3:	Instalación y conexión de los elementos neumáticos	42
Figura 10-3:	Instalación de las dos nuevas componentes neumáticas	42
Figura 11-3:	Diagrama de todo el circuito neumático	43
Figura 12-3:	Equipos de calentamiento directo	45
Figura 13-3:	Disposición típica de resistencias de calentamiento indirecto	45
Figura 14-3:	Resistencias eléctricas tipo abrazadera	46
Figura 15-3:	Dimensiones para las resistencias eléctrica tipo abrazadera	46
Figura 16-3:	Analogía eléctrica de las resistencias eléctrica tipo abrazadera	48
Figura 17-3:	Relación entre magnitudes eléctricas	56

Figura 18-3:	Forma del alambre de la resistencia	58
Figura 19-3:	Representación 3D resistencias eléctrica tipo abrazadera	61
Figura 20-3:	Medidor de temperatura pt100	61
Figura 21-3:	Transmisor de temperatura	62
Figura 1-4:	Corte de las chapas metálicas	65
Figura 2-4:	Bobinado del alambre de resistencia	66
Figura 3-4:	Disposición de las resistencias en la máquina	66
Figura 4-4:	Conexión de los relés de estado sólido	67
Figura 5-4:	Instalación del transmisor de temperatura	67
Figura 6-4:	Instalación del transmisor de presión	68
Figura 7-4:	Instalación de silenciadores a la válvula neumática	69
Figura 8-4:	Conexión de la válvula proporcional neumática	69
Figura 9-4:	Gabinete metálico	70
Figura 10-4:	Disposición interior gabinete metálico.....	70
Figura 11-4:	Instalación y conexión del sistema de control automático	71
Figura 12-4:	Instalación y conexión de borneras	71
Figura 13-4:	Instalación del selector y luz piloto	72
Figura 14-4:	Instalación y conexión router	72
Figura 15-4:	Tablero de control máquina briquetadora	73
Figura 16-4:	Software Logo Web Editor	74
Figura 17-4:	Diseño de la programación	75
Figura 18-4:	Diseño de la ventana de presentación	75
Figura 19-4:	Diseño de la ventana de control manual de la máquina briquetadora	76
Figura 20-4:	Diseño de la ventana de control automático de la máquina briquetadora	77
Figura 21-4:	Programación para el control manual de los cilindros neumáticos	78
Figura 22-4:	Programación para el control manual de las resistencias eléctricas	79
Figura 23-4:	Programación para el control automático del sistema	79
Figura 24-4:	Programación para la secuencia de los cilindros neumáticos	80
Figura 1-5:	Briqueta de borra de café a 3 [Bar] y 60 [°C].....	85
Figura 2-5:	Briqueta de borra de café a 8 [Bar] y 120 [°C]	85
Figura 3-5:	Cascarilla de arroz previo a molienda	87
Figura 4-5:	Briqueta de cascarilla de arroz a 4 [Bar] y 50 [°C].....	88
Figura 5-5:	Briqueta de cascarilla de arroz a 6 [Bar] y 80 [°C].....	88
Figura 6-5:	Residuos bagazo de caña de azúcar	90
Figura 7-5:	Briqueta de bagazo caña de azúcar a 3 [Bar] y 60 [°C].....	91
Figura 8-5:	Briqueta de bagazo caña de azúcar a 4 [Bar] y 110 [°C].....	91
Figura 9-5:	Residuos cascarilla de cebada	93

Figura 10-5.	Briqueta de cascarilla de cebada a 3 [Bar] y 80 [°C]	94
Figura 11-5.	Briqueta de cascarilla de cebada a 4 [Bar] y 60 [°C]	94
Figura 12-5.	Calorímetro adiabático	97

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Tipos de Biocombustibles	9
Gráfico 2-2:	Interacción entre las señales de entrada y salida	29
Gráfico 3-2:	Tipos de entradas de los sistemas de control	30
Gráfico 4-2:	Ejemplo de un diagrama de bloques de control automático	30
Gráfico 1-3:	Carga específica máxima de resistencias	58
Gráfico 2-3:	Elementos de un sistema de control automático	63
Gráfico 1-4:	Funcionamiento del controlador LOGO	74
Gráfico 1-5:	Diagrama de temperatura transitoria para la borra de café	86
Gráfico 2-5:	Diagrama de temperatura transitoria para la cascarilla de arroz	89
Gráfico 3-5:	Diagrama de temperatura transitoria para el bagazo caña de azúcar.....	92
Gráfico 4-5:	Diagrama de temperatura transitoria para los residuos de cebada	95
Gráfico 5-5:	Comparativa poderes caloríficos de cada biomasa.....	99
Gráfico 6-5:	Poderes caloríficos briquetas de borra de café.....	100

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. PROPIEDADES TÉRMICAS MATERIALES UTILIZADOS

ANEXO B. DISEÑO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO

ANEXO C. INFORMES DE RESULTADOS PODER CALÓRICO

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo por objeto rediseñar, construir y automatizar una máquina para fabricar briquetas con diferentes tipos de biomasa sin la utilización de aglutinante y determinar su respectivo poder calorífico. Para ello se procedió a realizar un análisis del estado actual de la máquina briquetadora y seguido ejecutar un rediseño del sistema neumático, aumentando dispositivos que permitieron el control de presión de los cilindros, además del diseño y construcción de las resistencias eléctricas de tipo abrazadera que controlaron la temperatura de secado durante el proceso de compactación de las biomásas, para posteriormente automatizar la máquina utilizando un controlador LOGO, añadiendo una interfaz gráfica para monitorear y controlar las variables de entrada y salida de cada proceso. Con todo implementado se realizó pruebas de funcionamiento y la experimentación para hallar los parámetros de presión, temperatura y tiempo de compactación de la borra de café, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de cebada. Con las briquetas fabricadas se realizó el ensayo ASTM D-240 para hallar su poder calorífico, concluyendo que el uso de aglutinantes reduce aproximadamente un 10% esta característica térmica. Finalmente, como la borra de café fue la biomasa con más poder calorífico (19,1396 MJ/kg) se realizó un nuevo ensayo con el mismo producto añadiendo nanopartículas de alofán obteniendo como resultado un incremento del 20% (23,1645 MJ/kg). Para obtener mejores resultados de poder calorífico se recomienda controlar el porcentaje de humedad de la biomasa y la concentración en peso de las nanopartículas.

Palabras clave: <TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <MÁQUINA BRIQUETADORA>, <BRIQUETAS>, <BIOMASA>, <NANOPARTÍCULAS>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <RESISTENCIAS ELÉCTRICAS>, <SISTEMA NEUMÁTICO>, <PODER CALORÍFICO>

REVISADO

10 MAR 2020

Ing. Jhonatan Parreño Uquillas, MBA
(ANALISTA DE BIBLIOTECA 1)



ABSTRACT

The objective of this degree work was to redesign, build and automate a machine to manufacture briquettes with different types of biomass without the use of a binder and to determine their respective calorific value. For this, an analysis of the current state of the briquetting machine was carried out and afterwards the redesign of the pneumatic system by adding devices that allowed the pressure control of the cylinders; in addition to the design and construction of the clamp-type electrical resistances that controlled the drying temperature during the biomass compaction process, later the machine was automated using a LOGO controller, adding a graphical interface to monitor and control the input and output variables of each process. Once everything was implemented, functional tests and experimentation were carried out to find the parameters of pressure, temperature and compaction time of coffee bean, rice husk, sugarcane-bagasse and barley husk. With the manufactured briquettes, the ASTM D-240 test was carried out to find its calorific value, concluding that the use of binders reduces this thermal characteristic by approximately 10%. Finally, as the coffee bean was the biomass with the highest caloric power (19.1396 MJ/kg), a test was carried out with the same product adding allophane nanoparticles, obtaining as a result an increase of 20% (23.1645 MJ/kg). To obtain better results of caloric power, it is recommended to control the percentage of humidity of the biomass and the concentration by weight of the nanoparticles.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <BRIQUETTING MACHINE>, <BRIQUETTES>, <BIOMASS>, <NANOPARTICLES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <ELECTRICAL RESISTENCES>, <PNEUMATIC SYSTEMS>, <CALORIFIC POWER>.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad la sociedad necesita buscar más fuentes de energías para poder suplir a la generada por los combustibles fósiles, quienes son los responsables de la contaminación ambiental. Aunque ya existen nuevas energías alternativas como la eólica o hidráulica, sus sistemas de igual manera necesitan de algún combustible fósil para sus respectivos procesos. Además, otra de las problemáticas que enfrenta nuestro planeta es la excesiva cantidad de desechos agrícolas y forestales que no son reutilizados para algún fin causando de igual manera contaminación.

Entonces, la fabricación de briquetas ayudará a reducir de alguna manera las problemáticas citadas anteriormente, estos elementos son biomasa (residuos agrícolas o forestales) compactados los cuales en su incineración generan calor debido a sus buenas propiedades térmicas las mismas que pueden ser usados como una alternativa al carbón vegetal.

En el presente trabajo de titulación se rediseñará una máquina para la fabricación de briquetas la cual servirá para utilizarla con diferentes tipos de biomasa, controlando en su proceso parámetros de presión, temperatura y tiempo de compactado. Primero se rediseñará el sistema neumático para que pueda trabajar los cilindros a diferentes presiones. Además, se diseñará e implementará resistencias eléctricas las cuales servirán para el secado de la biomasa a briquetar durante el proceso de compactación.

Posterior a eso se implementará un sistema de control a la máquina quien será capaz de realizar la fabricación de cada briqueta de forma semiautomática monitoreando siempre los parámetros de presión y temperatura para cada biomasa a utilizar.

Con la máquina ya instalada en el laboratorio de Neumática y Oleohidráulica de la Facultad de Mecánica, se procederá a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento de la misma, tanto del sistema neumático como del sistema térmico. Además de comenzar la fase experimental de las briquetas tomando como primer punto la búsqueda de los parámetros de presión, temperatura y tiempo de compactado de cada biomasa, se experimentará hasta conseguir que la briqueta posea forma y tamaño adecuado.

Finalmente, las briquetas fabricadas sin ningún tipo de aglutinante serán ensayadas para hallar su poder calórico con la finalidad de realizar una comparación entre estas briquetas y las fabricadas con aglutinante.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

A través de la historia, el desarrollo industrial ha estado directamente relacionado con la generación de energía sea en forma de electricidad o para aplicaciones térmicas. Sin embargo, también se ha incrementado la emisión de gases nocivos y tóxicos para el medio ambiente, creando contaminación por el uso excesivo de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural (Forero et al. 2012, pp. 21-22).

Obtener energía de recursos renovables es un aspecto muy importante para el desarrollo social y ambiental del planeta, pero muchos países han dependido de combustibles fósiles para los diversos procesos industriales. Últimamente se realizan investigaciones de los recursos renovables, en los que se destaca el uso de productos obtenidos a partir de materia residual orgánica para producir energía, llamado “Biomasa”, que constituyen un amplio grupo de materiales que tienen diversos orígenes y con características diferentes (Rodríguez, 2012, p. 8).

Para (Arévalo et al., 2017, p. 140) la biomasa es un tipo de energía renovable, que se forma a partir de un conglomerado de varios tipos de residuos forestales, agrícolas o industriales, que mediante la fabricación de briquetas se logre reemplazar el uso de combustibles fósiles para la generación de energía calorífica.

En sí las briquetas son un combustible mayormente de origen lignocelulósico, formadas por la compactación de biomasa (Marcos, 1995, p. 57) generalmente tienen forma cilíndrica y para su fabricación necesitan de ciertos parámetros como presión de compactación, temperatura de secado, tiempo de compactación o adición de aglutinantes, para obtener un producto con buenas propiedades físicas y térmicas.

En Ecuador, tenemos una gran variedad de biomasa residual que se puede obtener de la agricultura y ganadería pero que es desechada y no aprovechada como un recurso alternativo para la generación de energía, ya que según las estadísticas del INER se utilizó aproximadamente 74

millones de barriles de petróleo en el 2013 para la generación de energía en el país, mientras, las fuentes de energía derivadas de la biomasa (residuos agrícolas y forestales) fueron de solo 3%.

En los últimos años principalmente en la ciudad de Riobamba como una solución a esta problemática se han realizado investigaciones para la construcción de diferentes tipos de máquinas capaces de fabricar briquetas a partir de distintos tipos de biomasa como el aserrín, residuos de café y arroz, entre otros, con el fin de lograr un biocombustible con alto poder calórico (Gallo, 2017, pp. 1-4).

1.2 Formulación del Problema

Debido a los grandes problemas que enfrenta el país por el incremento de la contaminación debido a la emanación de gases tóxicos al ambiente provocados por la quema de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica y calórica en sector industrial, así como también el desaprovechamiento de los residuos sólidos del sector agrícola y forestal como una fuente alterna en generación de energía, para ello es indispensable la construcción de una máquina capaz de transformar la biomasa en briquetas para utilizarlos como una alternativa al carbón vegetal en la generación de calor, con impacto ambiental menor y a bajo costo.

Pero a pesar de que existen máquinas que realizan este proceso, se ha observado que no logran obtener los resultados esperados, debido a que han sido diseñadas y construidas únicamente a un proceso de compactación simple y un post calentamiento en hornos, requiriendo en las briquetas aglutinantes que pueden alterar las propiedades térmicas de los productos y como solución a esta problemática se ve en la necesidad de implementar resistencias eléctricas para el secado y compactación a diferentes presiones en un solo proceso de la máquina, para así obtener mejores resultados en las propiedades térmicas de las briquetas.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Práctica

La construcción y automatización de una máquina briquetadora permitirá innovar y mejorar el manejo de los desechos sólidos para aprovecharlos de mejor manera mediante la fabricación de briquetas con buenas propiedades térmicas para la generación de energía renovable aprovechando su buen poder calórico.

1.3.2 Justificación Teórica

Con el fin de proporcionar a la ciudadanía una alternativa para el uso de los desechos sólidos (biomasa) como una fuente de energía renovable, se necesita conocer cuáles son las propiedades físico-térmicas de los elementos en estudio, con el fin de hallar los parámetros de rediseño de la máquina para la fabricación de briquetas.

1.3.3 Justificación Metodológica

Con la automatización y repotenciación de la máquina, se desarrollarán briquetas con diferentes tipos de biomasa, los cuales deberán ser caracterizados mediante la experimentación para hallar los parámetros de presión, temperatura y tiempo de compactación a los que se forma las briquetas de las diferentes biomásas, se podrá verificar si los productos obtenidos pueden ser utilizados como biocombustibles.

1.4 Alcance

El proyecto planteado busca generar una máquina capaz de fabricar briquetas de 4 tipos de biomasa para observar si estos productos pueden ser utilizados como biocombustibles. Para ello, se busca definir las características del equipo, rediseñar los sistemas neumáticos, eléctricos y térmicos, además de la construcción de las diferentes componentes del sistema de la máquina y automatizar la briquetadora de biomasa mediante un control de los parámetros de tiempo, presión y temperatura a los cuales cada una de las briquetas son óptimas para su uso, dejando el equipo montado, operando después de pruebas de funcionamiento y generación de un manual de operación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Rediseñar, construir y automatizar una máquina para la fabricación de briquetas de cuatro tipos de biomasa, sin aplicación de aglutinantes y evaluar su poder calorífico.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Recopilar la información bibliográfica acerca de las características y aplicaciones de cada una de las biomásas que se utilizarán para la fabricación de briquetas.

- Rediseñar y seleccionar los elementos para el sistema de control neumático y térmico de la máquina para que pueda trabajar con diferentes biomásas.
- Automatizar y programar la máquina briquetadora, para que pueda trabajar con distintos tipos de biomasa, variando los parámetros de tiempo, presión y temperatura.
- Realizar pruebas de funcionamiento de la máquina briquetadora para los diferentes tipos de biomasa.
- Determinar el poder calorífico de los diferentes productos para buscar las posibles aplicaciones industriales.

CAPÍTULO II

2. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO DE LAS CARACTERÍSTICAS Y PROCESO DE LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA.

El presente capítulo indica las características de los diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como biocombustibles al convertirlos previamente de una briqueta, además de conocer los conceptos básicos de biomasa y briquetas, procesos de fabricación, parámetros de estudio y tipos de maquinaria.

2.1 Características de la Biomasa

2.1.1 Biomasa

Para (Cabezas, 2010) la biomasa es “una abreviatura de masa biológica”, además que define como cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico, Así pues, es considerado como materia prima para la generación de combustible de origen agrícola o forestal y que tiene un impacto de contaminación leve para el ambiente, con un coste de producción inferior con relación a combustibles de origen fósil (Cabezas, 2010, pp. 25-26).

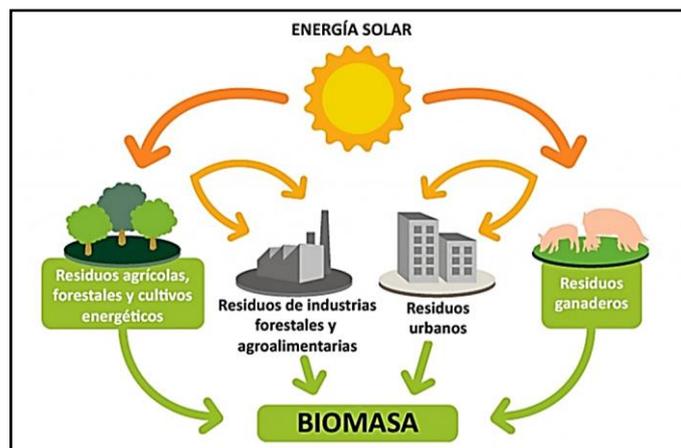


Figura 1-2. Fuentes para la obtención de la biomasa

Fuente: (Bernases, 2014)

Los residuos sólidos agrícolas, forestales e industriales, son considerados según (Venegas, 2017) como ejemplos de biomasa y que pueden ser utilizados como fuente alterna en la generación de energía.

La biomasa en sí se puede clasificar en tres grupos principales:

- **Biomasa Natural:** Es aquella materia que es producida por la misma naturaleza, donde no interviene la participación del hombre, entre las más representativas podemos hallar las hojas o los frutos que se han caído de los árboles.
- **Biomasa Residual:** Es la materia que es desechado por las plantas, animales y el ser humano una vez que haya cumplido un determinado proceso o ciclo biológico.
- **Biomasa Producida:** Es la materia que en los últimos años el hombre lo ha estudiado y fabricado con el propósito de ser utilizado para la generación de biocombustibles capaces de ser una fuente alterna de energía.

2.1.2 Características Físicas de la Biomasa

Cada elemento tiene sus propiedades que son únicas y la biomasa según su estado físico puede clasificarse por el recurso o desecho que proviene, estas pueden ser por residuos forestales, agropecuarios, industriales y urbanos, las mismas que presentan características muy importantes para determinar si los procesos de fabricación de nuevos biocombustibles tendrán un aporte tecnológico, energético y económico para la sociedad. A continuación, se detalla las características físicas de algunos tipos de biomasa.

Tabla 1-2: Características físicas de los diferentes tipos de biomasa.

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrío: corteza serrín, astillas.	Polvo sólido, Humedad relativa (HR) >50%
	Restos de ebanistería: serrín, trozos, astillas	Polvo sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólido, HR >55%
Residuos Agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, alto contenido de humedad
Residuos Agropecuarios	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)	Polvo, HR <25%

	Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad
	Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido, HR >55%
Residuos Industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido, humedad moderada
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido, gaseoso
Residuos Urbanos	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos (cáscaras de vegetales)	Sólido, alto contenido de humedad
	Basura orgánica (madera)	Sólido, alto contenido de humedad

Fuente: (Urbáez et al., 2007)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

2.1.3 Tipos de biocombustibles obtenidos de biomasa

Debemos tener en cuenta que la biomasa fue el primer combustible que utilizó el hombre y el principal hasta el inicio de la revolución industrial, esta se utilizaba para cocinar, calentar e incluso para alimentar a las primeras máquinas de vapor (Secretaría de Energía de Argentina, 2008).

Y como muestra grandes ventajas la biomasa se ha convertido nuevamente como una opción para la generación de biocombustibles para el futuro, porque además es un recurso renovable, no tiene un impacto de contaminación en el medio ambiente y es considerado un elemento potencialmente económico para las industrias que se dedican a la fabricación de briquetas o pellets de biomasa.

Para (Vera, 2014, p. 27) el aprovechamiento de la biomasa para la generación de energía calorífica y en varios tipos de biocombustibles se los puede clasificar como se muestra en la figura 2-2.

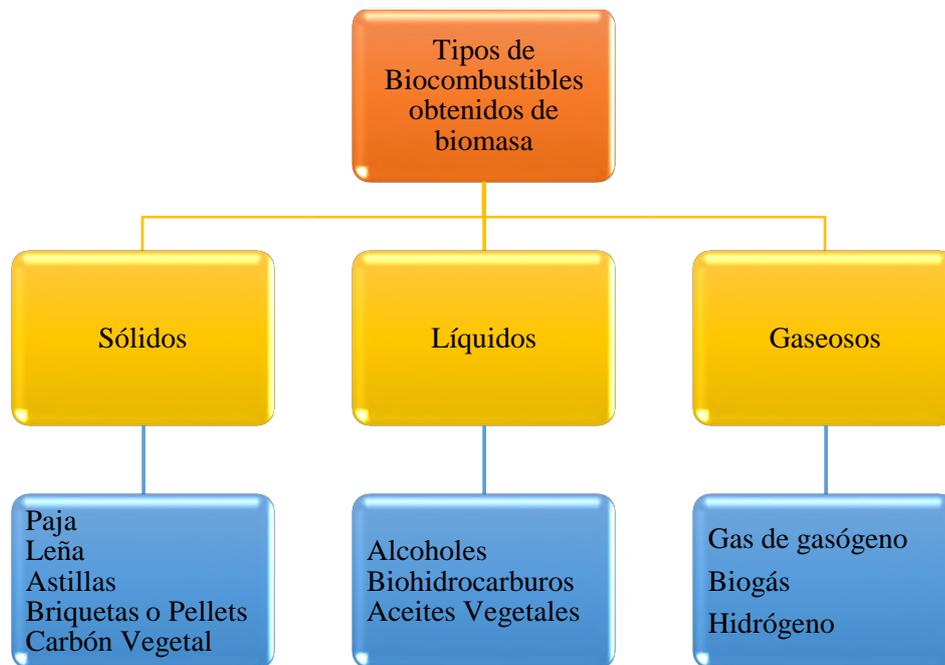


Gráfico 1-2. Tipos de Biocombustibles

Fuente: (Vera, 2014)

2.2 Briquetas, Pellets o Bloques sólidos de combustible

Las briquetas, también conocidas como pellets o bloques sólidos de combustible orgánico, para (Boarini, 2006) las briquetas son consideradas como “cualquier objeto sólido producido a partir de la aglomeración, prensado o pegado de material mineral u orgánico, con el propósito de ser quemado”, todo con la intención de utilizar como un recurso alternativo para la obtención de energía calorífica en usos domésticos e industriales.

Como se mencionó anteriormente la materia prima para las briquetas comúnmente son obtenidos a partir de desechos forestales y agropecuarios, Ecuador considerando un país donde se destaca el sector agrícola y ganadero se puede utilizar en gran medida los residuos procedentes de las industrias forestales (como aserraderos, fábricas de puertas, muebles, tableros), e industrias agrícolas (cáscaras de café, arroz coco, caña de azúcar) (Fonseca & Tierra, 2011, p. 17).



Figura 2-2. Briquetas de diferentes tipos de biomasa.

Fuente: (Mercado, 2015)

2.2.1 Tamaño y forma de las briquetas

Las briquetas pueden tener diferentes formas, tamaños, recursos, tal como se muestra en la Figura 4-2, cada geometría cumple distintas funciones, y de las cuales su proceso de fabricación influye en la representación final del producto, para detallar la briqueta octogonal, según información muestra que ésta permite una combustión mucho más rápida que las demás, a diferencia de la briqueta rectangular con bordes en las esquinas que consigue que el producto final no se destruya con facilidad ante un impacto y por último pero las más utilizadas son aquellas que poseen una estructura cilíndrica sólida o hueca, éstas tienen mayor facilidad de manufactura, pero a la final cada una se diseña dependiendo de las necesidades del cliente (Gallo, 2017, pp. 24-25).

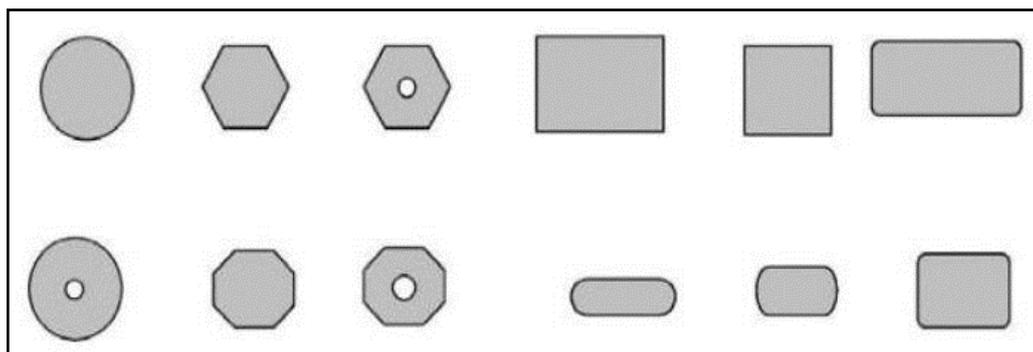


Figura 3-2. Variedad de formas de manufactura de las briquetas

Fuente: (Gallo, 2017)

Para el presente trabajo el tamaño y la forma de las briquetas dependen principalmente de las dimensiones de los moldes que presenta la máquina briquetadora diseñada por (Analuisa & Hernández, 2018).

2.2.2 Principales parámetros para la fabricación de briquetas

Para la obtención de briquetas con una buena estructura y equilibrado poder calórico, se necesita controlar ciertas condiciones o parámetros para asegurar que el producto cumpla las especificaciones del cliente, entre ellas destacan:

- Contenido de humedad
- Tamaño de partículas
- Presión de compactación
- Temperatura de secado

2.2.2.1 Contenido de humedad

La humedad es uno de los parámetros más importantes para tomar en cuenta al momento de elegir qué tipo de residuo o biomasa se va a utilizar, además de conocer su proceso de fabricación de briquetas, en el segundo caso (Fonseca & Tierra, 2011, p. 24) mencionan que si el proceso es artesanal el porcentaje de humedad debe ser mayores al 20%, para procesos semi industriales de 15 – 20 % y para industriales el porcentaje de humedad debe estar en el rango de 5 – 15 %.

Como el proceso a ejecutar es mediante una máquina semi industrial, debemos establecer el rango apropiado de humedad de las biomásas a utilizar, en este caso de 15 a 20 %, otro de los aspectos para tener en cuenta es que el producto no debe adherirse al recipiente que lo contiene porque se puede tener problemas al momento de expulsar la briqueta de la máquina, de igual manera no debe desprenderse o deshacerse cuando se ejecuta una pequeña presión sobre la misma, esto significará que la mezcla está muy seca (Fonseca & Tierra, 2011, p. 24).

2.2.2.2 Tamaño de partículas

Dependiendo de las características de los residuos orgánicos, el tamaño de partículas variará, por lo que se recomienda realizar un proceso de molienda previa, para mejorar el proceso de compactación y acabado de la briqueta, logrando así que las partículas se ubiquen de forma adecuada entre los intersticios de la estructura del producto final (Fonseca & Tierra, 2011, p. 25).

Según (Arévalo et al., 2017), si no llegamos al rango mínimo del tamaño de las partículas, la mezcla para la fabricación de briquetas no permitirá el flujo de oxígeno, lo que dificultará el proceso de combustión del producto final, al contrario si superamos el rango máximo del tamaño de las

partículas, habrá mayor cantidad de oxígeno y la contaminación por emanación de gases aumentará.

2.2.2.3 Presión de Compactación

El parámetro de presión es muy importante para definir las características finales de la briqueta cuando se va a reducir la proporción de aglutinante, para ello en cada biomasa se debe hallar experimentalmente cual es la presión correcta en cada uno de los casos, ya que este parámetro es el encargado de compactar la biomasa para la aglomeración de las partículas presente en el molde de la máquina briquetadora diseñada y de esta manera aumentar la densidad de la biomasa (Zapata, 2016, p. 16).

Para (Fonseca & Tierra, 2011, p. 26), la compactación, densificación o briquetación de biomasa representa a todo un conjunto de tecnologías para la conversión de la materia prima en combustible, esto lograría transformar a una energía renovable teniendo ventajas de manejo, almacenamiento, y disminución en la contaminación por emanación de gases, ésta tecnología ayudara a la sociedad a reutilizar los residuos sólidos orgánicos como una fuente productora de energía.

La briquetación utilizando cualquier máquina mecánica, hidráulica o neumática es una de varias tecnologías para la compactación o aglomeración que existen en la transformación de la materia, cuya finalidad es obtener biocombustibles con mayor densidad que la materia prima original para fines energéticos (Fonseca & Tierra, 2011, p. 26).

Para anteriores investigaciones las presiones de compactación de las briquetas varían en rangos muy amplios y todo dependería de la tecnología y la biomasa que se vaya a utilizar como se describe a continuación:

- Compactación a alta presión (>100 MPa)
- Compactación a mediana presión con dispositivo de calefacción (entre los 5 y 100 MPa)
- Compactación de baja presión con un aglutinante (<5 MPa)

Para el proceso de compactación la mayoría de las máquinas son diseñadas para que este proceso sea ejecutado por dos dados en sus extremos, tal como muestra la Figura 5-2, esta disposición permitirá trabajar con una forma cilíndrica sólida de las briquetas (Zapata, 2016, p. 17).

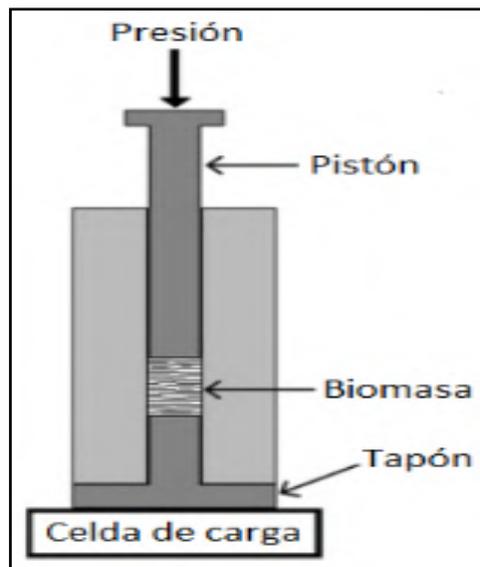


Figura 4-2. Esquema simple de máquina briquetadora.

Fuente: (Zapata, 2016)

Finalmente se debe tomar en cuenta que al momento de finalizar el proceso de briquetado al retirar los pistones de compactación, el producto tiende a expandirse, produciendo un efecto de relajación.

2.2.2.4 Temperatura de Secado

La temperatura de secado en este proceso de igual manera que la presión es muy importante porque esta va a permitir la disminución de la humedad del producto, el secado o curado se puede realizar de diferentes formas, dentro de los cuales se destacan el secado natural, secado forzado que puede ser mediante el uso de resistencias eléctricas, o también un secado mediante un horno después del proceso de compactación, para este proceso de secado se maneja tres variables: tiempo, temperatura y grado de humedad (Miranda et al., 2004, pp. 2-3).

2.2.2.4.1 Secado al aire libre

Este proceso se lo puede realizar una vez finalizada la compactación de la biomasa para (Gladstone et al., 2014, p. 290), el aprovechar las condiciones naturales que tenemos a disposición es la mejor manera de realizar un secado natural de las briquetas, el acción del viento y los rayos solares permitirán que la humedad del producto disminuya pero a mayor tiempo.



Figura 5-2. Secado de briquetas al aire libre.

Fuente: (Balseca et al., 2018)

Es una buena forma de realizar este proceso sin consumir muchos recursos, pero para (Fredes, 2014, p. 54) conseguir un secado óptimo requeriría de al menos un mes, lo que no es práctico, además recomienda que se lo realice en zonas cubiertas y bien ventiladas, realizarlos en un lugar similar a un invernadero, porque en el caso de no tener condiciones ambientales favorables las briquetas adquirirían más humedad y mayor tiempo de secado.

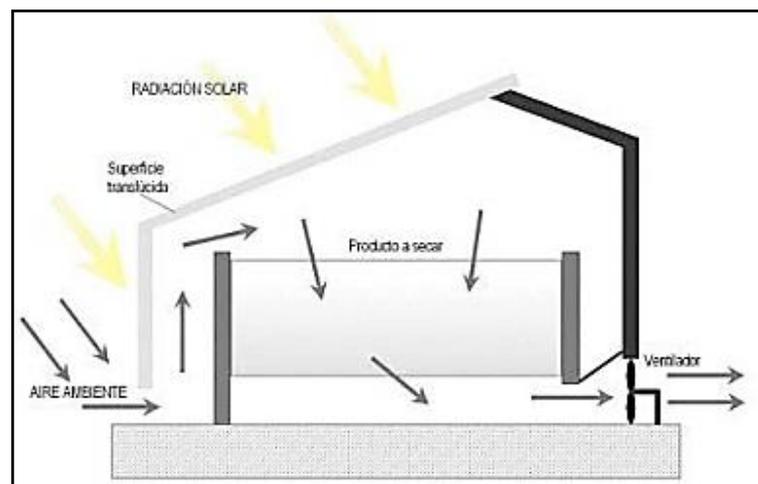


Figura 6-2. Secadero solar tipo invernadero de biomasa.

Fuente: (Montero, 2013)

2.2.2.4.2 Secado forzado

Este proceso se lo realiza con el aporte de energía en forma de calor a través de un flujo térmico y que puede ser dotado mediante un intercambiador de calor o por resistencias eléctricas, lo que permitirá a las briquetas deshidratarse en menor tiempo con relación al anterior secado. A continuación se detalla una clasificación de los tipos de secado forzado (Fredes, 2014, p. 54).

- **Secado forzado directo:** Este método se lo realiza por transferencia de calor tipo convectiva, en donde el material compactado húmedo está en contacto directo con el aire

caliente del elemento calefactor, es de gran importancia la velocidad de flujo de aire. Los sistemas típicos pueden ser secadores de tambor rotatorio, de transporte neumático y de bandejas (Nogués et al., 2010, p. 49).

- **Secado forzado indirecto:** Se lo realiza por transferencia de calor de tipo conductivo o de contacto, en donde el intercambio de calor se lo realiza a través de una pared de retención (Nogués et al., 2010, p. 50).

2.3 Tipos de maquinarias para la fabricación de briquetas

En el mercado existe variedades de máquinas con diferentes especificaciones para realizar el briquetado de la biomasa de entre las cuales para nuestro estudio se los puede clasificar en:

- Máquinas Artesanales
- Máquinas Semi Industriales
- Máquinas Industriales

2.3.1 Máquinas Artesanales

La maquinaria artesanal no necesita de elementos electrónicos y sofisticados para realizar su proceso de briquetación, se caracteriza por producir briquetas en baja cantidad y su fabricación se lo realiza con materiales reciclables como tubos plásticos, latas metálicas y madera. Como en este tipo de dispositivos no se genera mucha presión de compactación la biomasa es mezclada con algún tipo de aglutinante y posterior a eso secarlo para retirar restos de humedad (Fonseca & Tierra, 2011, pp. 18-19).



Figura 7-2. Máquina artesanal para fabricación de briquetas.

Fuente: (Fonseca & Tierra, 2011)

2.3.2 Máquinas semi industriales

Las maquinas semi industriales ya poseen una estructura y composición más compleja con relación a las anteriores, ya que destacan los elementos mecánicos, hidráulicos, neumáticos y electrónicos, dentro del equipo. Otra de las diferencias es el rango presión de trabajo que son mayores a los 5 MPa, pero menores a los 100 MPa, con esto se reduce el uso de aglutinantes porque a mayor presión de compactación la densidad aumenta y estructura final del producto no tendría dislocaciones, además, se reducen costos de producción

Para (Analuisa & Hernández, 2018), las máquinas de media producción o semi industriales son prensas que actúan por acción de sus actuadores, las cuales pueden ser prensas de pistón mecánico, pistón hidráulico o neumático y prensa de rodillos.



Figura 8-2. Prensa de pistón hidráulico y neumático.

Fuentes: (Balseca et al., 2018 ; Fonseca & Tierra, 2011)

2.3.3 Máquinas industriales

Las máquinas industriales tienen como principal características la cantidad de producción del producto final, además se implementa en el proceso la actuación de la temperatura como variable principal para la fabricación de las briquetas, la presión de esta maquinaria oscila entre los 100 y 200 MPa de presión y una temperatura durante el proceso de aproximadamente los 165°C, además que la materia prima ingrese completamente seca (Fonseca & Tierra, 2011, p. 22).

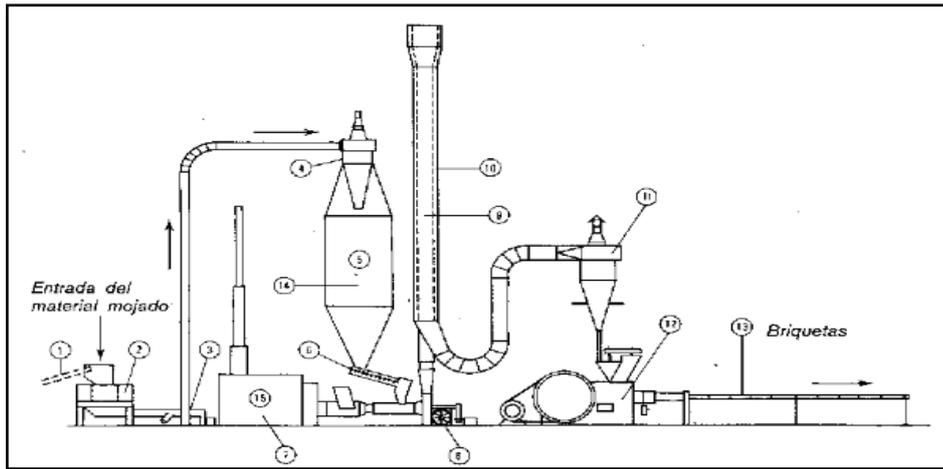


Figura 9-2. Tecnología industrial para la fabricación de briquetas de biomasa.

Fuente: (Janczak, 2017)

2.4 Materia Prima para briquetado

Conocido cuales son los diferentes procesos de fabricación de las briquetas, la maquinaria utilizada, los parámetros para su transformación de biomasa a pellets o bloques sólidos de combustible orgánico, se precede a detallar cada una de las características de las biomásas seleccionadas con el fin de fabricar briquetas de buena calidad y gran poder calórico.

2.4.1 Borra de Café

La borra es el desperdicio o residuo del café después de realizado un proceso de extracción de su pulpa, el grano de café en su forma inicial consta de diferentes capas que junto con la borra representa el desperdicio del producto en la figura 17-2 se indica cada una de las partes del grano de café (Vargas, 2018, p. 23).

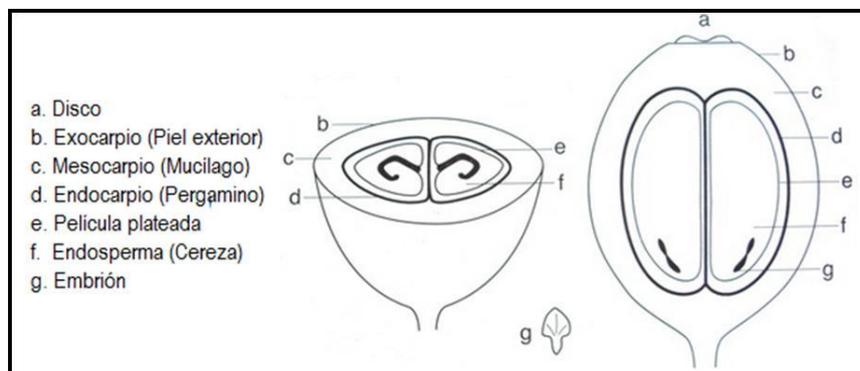


Figura 10-2. Sección transversal y longitudinal de un grano de café.

Fuente: (Vargas, 2018)

Según datos del (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2016) la borra de café representa el 10,4% del peso del fruto seco y aunque la borra de café es un desperdicio orgánico su descomposición es un gran problema ambiental porque ésta requiere una alta demanda de oxígeno para desintegrarlo totalmente (Vargas, 2018, p. 25).

La borra de café presenta varias cantidades de componentes orgánicos que podrían ser aprovechados como un producto de valor agregado, además tiene composiciones variables que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2-2: Composición de la borra de café.

Elemento	Contenido	Descripción
Carbohidratos	Representa el 45,3% de peso seco	La borra es rica en azúcares polimerizados en estructuras de celulosa y hemicelulosa.
Proteínas	Varía entre 8,5% y 13,6%	Los compuestos de nitrógeno son relativamente estables entre las especies de café, incluso durante el tostado.
Compuestos nitrogenados	Contiene 3,7% en peso seco	Son compuestos como aminoácidos libres, péptidos y alcaloides, que contribuyen en el sabor del café
Cafeína	Entre 0,9 y 1,6%	Dependiendo del proceso de extracción y la fuente de la borra de café, existen concentraciones o no de cafeína.
Lípidos	Contiene de 10-15%	Siempre existirán cantidades de lípidos en la borra de café.
Compuestos fenólicos	De 11, 05 a 13,24 mg por gramo	Contiene compuestos relacionados con la salud humana como: antioxidantes, antibacterianos, antivirales.
Minerales	1,6 % en cenizas	El potasio es el mineral más abundante seguido del fósforo y el magnesio.

Fuente: (Campos et al., 2015)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

2.4.1.1 Usos de la borra de café

El café es un producto que es consumido en gran medida por la población de nuestro país, y por lo tanto sus desechos también son altos, pero aquí la borra de café no es reutilizado como

combustible, únicamente es desechado sin darle ningún aprovechamiento, en el caso de Colombia las fábricas de café soluble una vez obtenida y procesada la borra de café la transforman en briquetas para utilizarlos como combustibles en calderas o únicamente para hacer carbón activado (Vargas, 2018). Existen otros usos en este caso domésticos para la borra de café, algunos campesinos la transforman en fertilizantes para sus cultivos, o únicamente como alimento para el ganado.



Figura 11-2. Briquetas de borra de café.

Fuente: (Paredes, 2019)

Para (Paredes, 2019a, p. 24), existen más usos para la borra de café, de los cuales destaca la producción de papel, esto es debido a la alta cantidad de celulosa en su contenido, además de otros usos que pueden ser más en el ámbito industrial como por ejemplo la producción de biogás y bioetanol, el primero se lo transforma a partir de la biodegradación de los residuos de café mediante microorganismos acidófilos y el segundo únicamente mediante la fermentación de la borra de café (Rodríguez & Zambrano, 2013).

2.4.1.2 Poder calórico de la borra de café

Se entiende como poder calórico como la energía liberada de un material una vez realizado el proceso de combustión, siempre manteniendo las mismas condiciones de presión y temperatura entre los productos y reactivos, además existen dos tipos de expresión poder calórico superior e inferior (García, 2001, p. 7).

El poder calórico de cualquier combustible se lo puede hallar experimentalmente siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D240-76, allí se realizan los ensayos en una bomba calorímetro y a partir de correlaciones matemáticas que relacionan la composición de los productos (Paredes, 2019a, p. 27).

A continuación, en la Tabla 3-2 se muestra el poder calorífico superior e inferior de algunos tipos de biomasa comparándolos con la borra de café.

Tabla 3-2: Tabla comparativa de las biomasas con su respectivo poder calorífico.

Biomasa	Poder Calorífico (MJ/Kg)	
	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior
Cuesco de palma	22,30	21,10
Cascarilla de Café	18,70	17,50
Bagazo de caña	17,90	16,90
Madera de Haya	18,30	17,10
Borra de café	26,96	24,910

Fuente: (Thrän et al., 2017)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

2.4.2 Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es el residuo y desperdicio que se genera en la industria encargada de la cosecha y producción de arroz, principalmente está constituida por celulosa y sílice y su función es proteger al grano del medio externo, además posee propiedades fisicoquímicas que permite ser utilizado como biocombustible (Valiente, 2017, p. 11).

En el caso de los desperdicios de arroz los datos del MAGAP detalla que la cascarilla de arroz es aprovechado solo en un 35% y entre las actividades más usadas esta como producto para granjas avícolas, cultivo de flores y criadero de animales, el resto es arrojado a vertederos (Solórzano & Silva, 2015, p. 7).



Figura 12-2. Cascarilla de arroz.

Fuente: (Fonseca & Tierra, 2011)

La cascarilla de arroz está compuesta de varios elementos característicos de las plantas, como se mencionó anteriormente contiene altas cantidades de celulosa pero también posee hemicelulosa y lignina (Valiente, 2017, p. 12). La lignina es muy importante para la fabricación de briquetas porque este componente actúa como aglutinante siempre y cuando sea sometida a altas temperaturas (Vargas & Alvarado, 2013, p. 90).

Tabla 4-2: Principales componentes de la cascarilla de arroz.

Componente	Valor (%)
Cenizas Crudas	13,2 - 21,0
Sílice	18,8 - 22,3
Calcio	0,6 - 1,3
Fósforo	0,3 - 0,7
Lignina	9,0 - 20,0
Celulosa	28,0 - 36,0
Pentosa	21,0 - 22,0
Hemicelulosa	12,0

Fuente: (Vargas & Alvarado, 2013)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

A continuación, se presenta un resumen de las principales características de la cascarilla de arroz porque conocer sus características y condiciones energéticas es importante para el uso como briqueta.

Tabla 5-2: Características y condiciones energéticas de la cascarilla de arroz.

Parámetro	Características
Forma	Ovalada similar al grano de arroz.
Tamaño	Variado debido a los diferentes tipos de arroz, dimensiones entre 4 y 14 mm de longitud y espesores promedio de 50 µm.
Aspecto	La superficie exterior tiende a ser rugosa con crestas, en cambio la superficie interior es lisa.
Densidad Aparente	130 kg/m ³
Composición Química	Carbono: 34,61% Hidrógeno: 3,79% Oxígeno: 31,63% Nitrógeno: 0,44% Azufre: 0,06%

Parámetro	Características
Propiedades	Humedad: 9,95% Ceniza: 19,52% Materias Volátiles: 55,54% Carbono fijo: 14,99%
Poder calorífico	PCS _{BS} : 14,796 MJ/kg PCI _{BS} : 13,497 MJ/kg PCI _{BH} : 12,798 MJ/kg

Fuente: (Fonseca & Tierra, 2011)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

2.4.2.1 Usos de la cascarilla de arroz

Existen una variedad muy amplia de aplicaciones y usos para la cascarilla de arroz entre las que se destaca tres:

- En la Agricultura: los campesinos de la región costa lo utilizan como material de relleno o también como abono para sus siembras (Fonseca & Tierra, 2011, p. 14).
- En la Industria: Muchas industrias utilizan la cascarilla de arroz molida para la fabricación de briquetas, también es utilizado para fabricar carburo de silicio, que ayuda a pulir elementos eléctricos y de calefacción (Fonseca & Tierra, 2011, p. 14).



Figura 13-2. Briquetas de cascarilla de arroz

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia, 2017)

- En la construcción: en los últimos años este producto ha sido utilizado para fabricar acero vegetal, que al ser mezclado con resinas y sometido a tratamientos termo-mecánicos se puede obtener un nuevo material altamente resistente (Fonseca & Tierra, 2011, p. 14).

2.4.3 Bagazo de caña de azúcar

El bagazo de la caña de azúcar es un material leñoso que resulta de la extracción de jugo de la planta por cualquier medio sea molido o en una prensa. Esta constituido mayoritariamente de agua, fibra celulosa y sólidos solubles (Boarini, 2006, p. 19).

- Humedad: 46-52%
- Fibra Celulosa: 43-52%
- Sólidos Solubles: 2-6%

Al igual que la cascarilla de arroz el bagazo de caña de azúcar está compuesto de celulosa que es el constituyente principal de las paredes de las fibras del bagazo, además de su insolubilidad en agua.



Figura 14-2. Bagazo de caña de azúcar

Fuente: (Díaz, 2018)

Las propiedades del bagazo de caña de azúcar como combustible son de gran importancia para conocer la factibilidad en la transformación de briquetas y para ello se detalla la composición química del bagazo de caña de azúcar.

Tabla 6-2: Características químicas del bagazo de caña de azúcar.

Elemento químico	Valor (%)
Cenizas Crudas	2,50
Carbono	47,00
Hidrógeno	6,50
Oxígeno	44,00
Azufre	0,13
Nitrógeno	0,43

Fuente: (Reyes et al., sf)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del residuo serán importantes para la fabricación de bloques sólidos de combustible, para ello se debe tomar en cuenta todos los parámetros que se detallan a continuación:

Tabla 7-2: Propiedades y condiciones energéticas del bagazo de caña de azúcar.

Parámetro	Características
Contenido de humedad	Normalmente su rango oscila entre 44 y 50%
Contenido de cenizas	El bagazo de la caña aporta entre 0,78 y 3,22% de cenizas.
Granulometría	Depende del proceso y preparación de la caña en la extracción de jugo.
Característica energética	Capaz de almacenar 1,7% de la energía existente en la radiación.
Valor Calórico	PC 7,64 MJ/kg
Emisión de gases	La cantidad de CO ₂ emitido durante la combustión es de 0,885 kg con un 50% de humedad.

Fuente: (Reyes et al., sf)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

2.4.3.1 Usos del bagazo de caña de azúcar

Para (Boarini, 2006, p. 29) el bagazo de la caña de azúcar representa un desecho versátil y útil para reutilizarlo de diferentes formas, a continuación se mencionan otras aplicaciones para este tipo de desecho.

- Para la fabricación de briquetas: Por su alto poder calórico las industrias reutilizan esta biomasa para fabricar tableros de fibras prensadas, combinando las fibras de celulosa del bagazo con aglutinantes, esto tiene aplicaciones similares al carbón al utilizarlos como materia de combustión en hornos.
- Para la fabricación de papel: En este caso la pulpa del bagazo es utilizado para fabricar papel en diferentes formas como envolturas, papel higiénico, servilletas toallas y cartón (Boarini, 2006, p. 29).
- Camas para ganado: Al igual que la cascarilla de arroz los agricultores utilizan este desecho como camas para sus animales.
- Fabricación de plásticos: Con la utilización de la lignina presente en la biomasa las industrias elaboran productos plásticos (Boarini, 2006, p. 29).

2.4.4 Residuos de cebada

Para (León, 2011) la cebada es uno de los cultivos más amplios de nuestro país, después del trigo , arroz y el maíz, teniendo aproximadamente 48874 hectáreas de superficie cultivada. Es utilizado principalmente para la industria cervecera del país, allí únicamente ocupan el grano de cebada, por lo que los residuos de cebada son mayormente desechado o utilizados como alimento para el ganado.

La cascarilla de cebada tiene un valor muy bajo de comercialización ya que solo lo usan para alimento de animales por su alto contenido de proteínas no degradables y vitaminas solubles en agua (Rojas, 2019, p. 11).



Figura 15-2. Residuos de cebada.

Fuente: (Pregón Agropecuario, 2017)

La cascarilla de cebada se caracteriza por su alto contenido de proteína aproximadamente de 19 a 30%, además está constituido por celulosa (13 – 21%), hemicelulosa (21 – 30%) y lignina (12 – 16%) (Rojas, 2019, p. 11).

Tabla 8-2: Especificaciones técnicas de briquetas de cascarilla de cebada.

Parámetro	Valor
Contenido de cenizas (%)	5,9
Durabilidad mecánica (%)	97,2
Densidad (kg/m ³)	687,2
Poder calorífico (Kcal/kg)	5389,0
Material Volátil (%)	63,0
Carbón Fijo (%)	31,0

Fuente: (Assureira E. & Assureira M., 2012, p. 10).

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Debido a la gran cantidad de desecho producido la cascarilla de cebada en las últimas investigaciones muestran que puede ser utilizado como un biocombustible sólido por su poder calórico que posee, además de las características físicas que adquiere al transformarse en una briqueta (Assureira E. & Assureira M., 2012, p. 10).

2.4.4.1 Usos de los residuos de cebada

La mayoría de los residuos tiene usos para la agricultura y ganadería y en este caso los residuos de la cebada son utilizados como un suplemento alimenticio para el ganado, según (Ferrari et al., 2016, p. 45) los residuos de cebada pueden utilizarse para alimentar a animales que estén en su último trimestre de gestación debido a que esta biomasa posee un alto contenido nutricional.

Otro uso que se le da a los residuos de cebada es la transformación a fertilizantes orgánicos, esto por el contenido alto de nitrógeno, fósforo y calcio y sobre todo de carbono (Ferrari et al., 2016, p. 46).

2.5 Sistemas de control Neumático y Térmico

2.5.1 Sistema Neumático

Los sistemas neumáticos funcionan por la transmisión de energía del aire comprimido hacia el mecanismo, su fuente de energía se la dota mediante un compresor de aire, y el mecanismo comúnmente son cilindros de desplazamiento lineal con una fuerza y velocidad determinada por el operario. El funcionamiento de este tipo de sistemas se lo realiza mediante la ley de los gases ideales, en la cual la energía que se acumula al comprimirlo en el cilindro es la misma que proporciona al descomprimirlo (Solórzano & Silva, 2015, p. 12).

2.5.1.1 Ventajas de un sistema neumático

- El control de su velocidad de actuación de las prensas neumáticas tiene mayor operabilidad, además que tienen rangos más altos de velocidades en comparación con las prensas hidráulicas.
- Al trabajar con aire comprimido las impurezas son menores que trabajar con fluidos hidráulicos y oleo hidráulicos por lo que tienen menor posibilidad de daños en los componentes del sistema debido al golpe de ariete.
- En cuestión económica es mucho más barato debido a que el aire es comprimido únicamente por el compresor para suministrarlo al sistema de forma fácil y sencilla.

- No tiene riesgos de daño del equipo por sobrecargas del fluido.
- La mantenibilidad de los equipos que trabajan con aire comprimido es mucho más económica que las prensas que trabajan con fluidos hidráulicos.

2.5.1.2 Desventajas de un sistema neumático

- El costo de los elementos neumáticos para el sistema es muy costoso en comparación con prensas que trabajan con fluidos oleo hidráulicos.
- Debido a la limitante de presión que puede alcanzar el aire comprimido en el accionamiento de los actuadores, no se pueden impartir grandes fuerzas de compactación.
- Producen pérdidas de carga debido a los circuitos de control y automatización que presente el equipo, pero no tienen valores muy desviados en comparación a las señales de entrada del sistema.
- El ruido generado por la carga y descarga de aire comprimido al sistema puede afectar la integridad de los operarios o usuarios.

2.5.1.3 Elementos de control de un sistema neumático

Para realizar el diseño de un circuito neumático se debe tener en cuenta que uso se le va a dar al equipo y para ello el mismo debe contener elementos de seguridad, cuya finalidad es proteger al mecanismo de agentes externos, válvulas de control programables para medir y transformar las señales de entradas en señales de salidas, así como los actuadores o cilindros para ejecutar el trabajo a la presión indicada e ingresada por el operario.

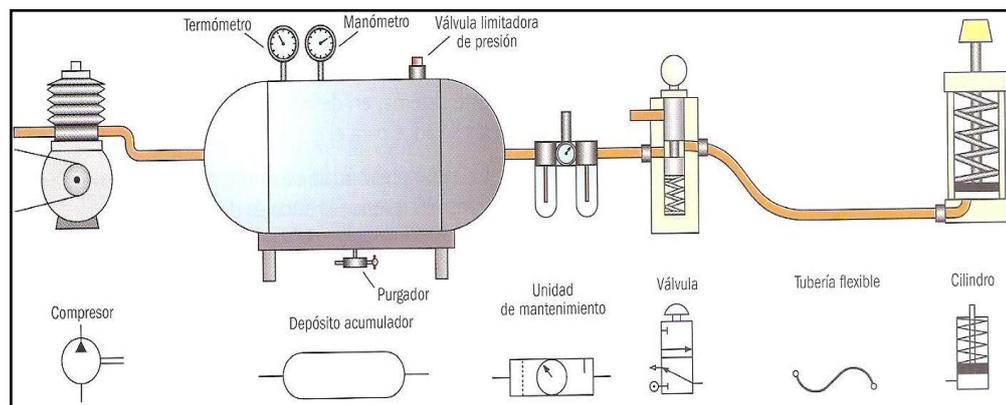


Figura 16-2. Elementos de un circuito neumático sencillo.

Fuente: (Pérez, 2014)

2.5.2 Sistema térmico

Para el sistema de control térmico se debe tener en cuenta que tipo de elemento calefactor vamos a implementar en la maquinaria, para ello se debe analizar la operabilidad del mismo y la adaptabilidad para una prensa neumática, por ello lo más recomendable es aplicar hornos eléctricos de resistencias.

2.5.2.1 Hornos Eléctricos de Resistencias

Los hornos eléctricos de resistencias o también conocidos como hornos industriales son dispositivos en las que se calientan piezas o elementos colocados en su interior a una temperatura mayor a la ambiental, la fuente de energía es la eléctrica que es proporcionada por las resistencias óhmicas y que ceden calor al producto en su interior por las diferentes formas de transmisión de calor (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 5).

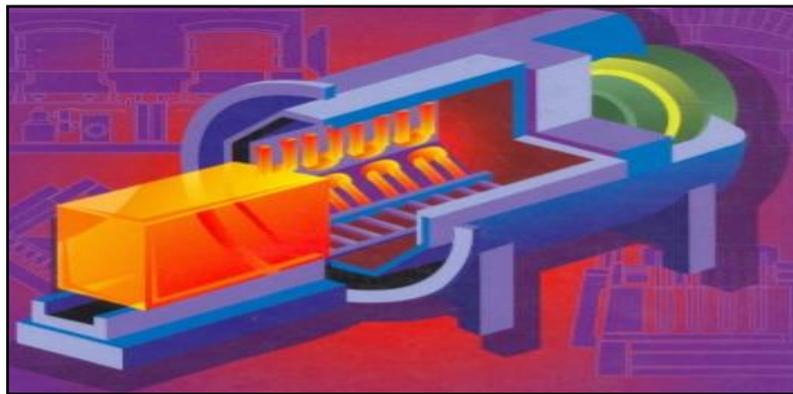


Figura 17-2. Representación de un horno eléctrico de resistencias.

Fuente: (Astigarraga, 1994)

2.5.2.1.1 Aplicaciones de los hornos de resistencias

Para (Aguirre & Sánchez, 2014) las aplicaciones de los hornos de resistencias se pueden bosquejar en relación con los procedimientos o procesos utilizados entre los más importantes encontramos:

- Sinterizado y calcinación
- Fusión de metales
- Calentamiento de los metales
- Tratamientos térmicos de metales
- Recubrimientos de piezas metálicas y no metálicas
- Secado, en general, reducción del contenido de humedad.

2.6 Automatización

En los últimos años las industrias se han propuesto mejorar la productividad y los tiempos de producción, facilitando las labores de sus empleadores para ser más competitivo ante los demás. Por ello según (Cornejo, 2009), se debe crear o idealizar nuevas formas avanzadas para solucionar la problemática en los procesos de trabajo y mejorar las actividades hechas por el hombre con la finalidad de evitar al máximo los trabajos pesados, y por ello se empleará la automatización a la máquina briquetadora, para poder controlar, medir y ejecutar los parámetros que desea el usuario en la producción de briquetas.

2.6.1 Elementos para un proceso automático

Como principal elemento es las diferentes fuentes de energía, las mismas que suministrarán a todo el equipo de electricidad para su funcionamiento. Además, es de vital importancia también la infraestructura del equipo, el cual ejecutará los diferentes procesos para obtener el producto deseado por el usuario. Finalmente, para la ejecución de cada uno de los procesos de forma automática se necesita un programa que siga las instrucciones del operario.

Para (Hernández, 2010, p. 2) un sistema de control automático es la interconexión de diferentes elementos que forman un sistema, capaz de controlar a si mismo el sistema diseñado. Las características del mismo deben recibir una señal de entrada $r(t)$ la misma que debe recibir una señal de respuesta o salida $y(t)$, todo esta arquitectura se la puede representar mediante bloques (Hernández, 2010, p. 2).

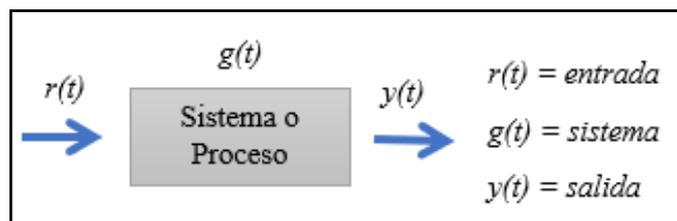


Gráfico 2-2. Interacción entre señales de entrada y salida.

Fuente: (Hernández, 2010)

La relación entre estas dos señales es una correspondencia de causa y efecto con el sistema a la que corresponden, por lo tanto, el proceso que se desea controlar relaciona directamente a estas dos variables. En la siguiente figura se muestra las entradas típicas que se aplican a los sistemas de control (Hernández, 2010, p. 2).

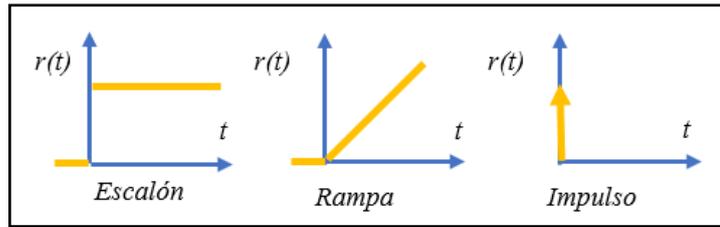


Gráfico 3-2. Tipos de entradas de los sistemas de control

Fuente: (Hernández, 2010)

Las entradas son señales que indican cual es el comportamiento del sistema, y para ello las más utilizadas son tres, la primera es la entrada escalón que se caracteriza por tener un comportamiento constante a través del tiempo, la segunda es la entrada rampa la señal varía de forma proporcional al tiempo y finalmente la entrada impulso que tiene una gran magnitud en muy corto tiempo, es considerada una señal de prueba (Hernández, 2010, p. 2).

2.6.2 Control Automático de un sistema

El control automático tiene como finalidad disminuir o reducir las desviaciones que existen en las señales del sistema, además de comparar los valores de salida con las señales de entrada, para (Ogata, 2010, p. 21) la señal de control se denomina acción de control.

Para representar de mejor manera un sistema de control automático se tomará como ejemplo un sistema de control industrial representado mediante diagramas de bloques, en el cual los principales componentes son el actuador, una planta y el sensor que es el encargado de medir la variable de entrada (Ogata, 2010, p. 21).

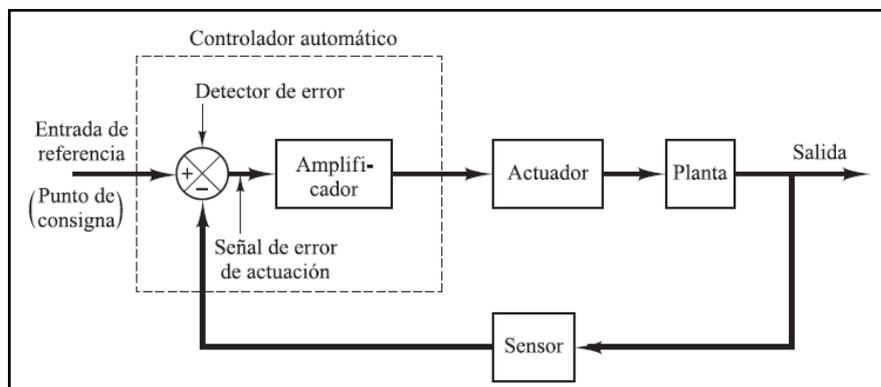


Gráfico 4-2. Ejemplo de un diagrama de bloques de control automático.

Fuente: (Ogata, 2010)

Para (Ogata, 2010) los controladores industriales se los puede clasificar de acuerdo a las acciones de control como los siguiente:

- De dos posiciones, controladores ON/OFF
- Controladores proporcionales o integrales
- Controladores PI, PD y PID

CAPÍTULO III

3. REDISEÑO SISTEMA NEUMÁTICO DE LA MÁQUINA BRIQUETADORA Y DISEÑO DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

3.1 Estado Actual de la Máquina Briquetadora

La máquina briquetadora actualmente se encuentra en el Laboratorio de Neumática y Oleo hidráulica de la Facultad de Mecánica, el mismo que está constituido por un conjunto de varios elementos mecánicos, neumáticos y electrónicos, los cuales se encuentran acoplados e instalados para realizar un proceso simple de compactación de la materia en el interior de los moldes, además la máquina presenta un control automático simple para el funcionamiento de los dos cilindros, el cual debido a su uso han presentado inconvenientes en el funcionamiento de todo el conjunto. Identificados todos los componentes de los sistemas descritos anteriormente y realizado un análisis y experimentación del banco, se logró detectar los siguientes problemas:



Figura 1-3. Condición inicial de la máquina briquetadora.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Según las necesidades del cliente final se necesitaba tener un sistema de secado, la misma que debía estar incluido dentro de la máquina, pero a la final los diseñadores de la briquetadora

omitieron esta característica y el secado de los productos se los realizaba post proceso de compactación, en un horno se eliminaba restos de humedad para obtener un aspecto físico acorde a las briquetas o pellets.



Figura 2-3. Moldes de la briquetadora sin sistema de calefacción.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

El proceso de compactado de la briqueta se lo realizaba mediante la pulsación de los botones que controlan el movimiento de los cilindros neumáticos, el cual se lo realizaba en dos tiempos de compactado para agregar más material dentro de los moldes, en definitiva, no era un proceso automático, más bien un proceso semi automático en la cual durante todo el lapso de compactación esta debía estar supervisada por una persona para controlar los tiempos de compactación y expulsión de las briquetas.



Figura 3-3. Cajetín con botonera para control de los cilindros neumáticos.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

El sistema de control de los cilindros neumáticos que se tiene actualmente tenía desviaciones en las señales de entrada como de salida, debido a que no poseía un sistema de medición y control,

con la implementación del transmisor y regulador de presión se puede manipular este parámetro. Además, la máquina briquetadora únicamente tenía implementado Arduino y relés simples para el proceso de compactación, por lo que la recopilación y transformación de datos del sistema de control era muy inestable, por ello se sustituirá con un controlador LOGO.

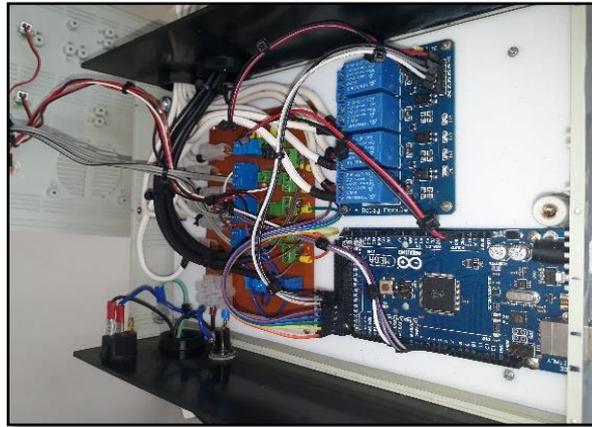


Figura 4-3. Componentes de control actual de la máquina briquetadora.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Finalmente, los elementos neumáticos se encontraban sujetos a la estructura metálica únicamente con cintas plásticas y no fijados con elementos emperrado. Igualmente, el cableado entre los elementos neumáticos no era el adecuado, muy grueso considerando que las bobinas de las válvulas no tenían una elevada potencia para su control.



Figura 5-3. Cableado entre los elementos neumáticos de la máquina.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

A continuación, se describen más factores y elementos que son determinantes en el correcto y eficiente funcionamiento de la máquina briquetadora:

3.1.1 Tiempo en el proceso de compactado

La máquina briquetadora al tener un proceso semi automático el operario tenía que controlar el tiempo de compactado de la biomasa mediante un cronómetro, además el proceso duraba entre 5 y 10 segundos que se considera actualmente muy poco debido a que la composición de la briqueta carecerá de algún tipo de aglutinante.

Para ello mediante temporizadores se necesita programar el tiempo de trabajo de los cilindros neumáticos, así como el tiempo para la extracción de los productos terminados.

3.1.2 Control de presión del aire comprimido

Una parte muy importante y que carece la máquina actual, este parámetro se debe controlar y medir para los distintos tipos de biomasa que se van a utilizar, de esto va a depender la lectura de la presión de trabajo de los cilindros.

Actualmente el sistema de control de presión de la máquina únicamente está constituido por las válvulas direccionales y la unidad de mantenimiento neumático.

Con un transmisor de presión y una válvula proporcional se logrará medir y controlar la presión de trabajo con la que va a actuar ambos cilindros neumáticos, de igual manera estos elementos son los adecuados para una automatización eficiente de la briquetadora

3.1.3 Control de temperatura del sistema térmico

Al igual que el sistema de presión la máquina carece de un control y sistema de secado, por lo que este proceso se lo realizaba en un horno eléctrico, eliminando los restos de humedad del producto, para posteriores ensayos.

Aunque es recomendable hacer un secado después del proceso de compactación, también se lo puede secar durante el proceso debido a que la temperatura es un parámetro importante en la compactación de la biomasa, por lo que al unir presión y temperatura se pueden obtener mejores resultados, teniendo en cuenta que las actuales briquetas serán fabricadas sin ningún tipo de aglutinante.

Para implementar este sistema de control se necesita diseñar las resistencias eléctricas según los parámetros de las biomásas a utilizar, un medidor de temperatura y un transmisor de temperatura, añadido a los relés de estado sólidos que controlarían el encendido de los elementos calefactores.

3.2 Rediseño del circuito neumático

El circuito neumático tiene la principal función de hacer llegar el aire comprimido necesario de la unidad neumática a los cilindros neumáticos de desplazamiento lineal, para realizar el proceso de compactación de las briquetas.

El rediseño del circuito neumático consistirá fundamentalmente en elegir adecuadamente los elementos para el sistema de control y medición de la presión, con el fin de mantener un flujo de aire ideal para comprimir cada biomasa a utilizar, la adecuada y correcta selección de los elementos es importante para lograr niveles de limpieza y presiones requeridos para la máquina briquetadora.

A continuación, se detalla los parámetros para el rediseño del circuito neumático de la máquina briquetadora, además de la selección de los diferentes elementos constitutivos con los que deberá contar el nuevo sistema neumático tomando en consideración como parámetro fundamental la presión a la que trabajaba el sistema.

3.2.1 Parámetros del sistema neumático de la máquina briquetadora

Los parámetros se han tomado en base al modelo actual de la máquina ya construida, los cuales se detallan a continuación.

- Presión de compactación 6 BAR (Constante)
- Sin control de presión
- Funcionamiento de actuadores neumáticos mediante pulsadores

3.2.1.1 Elementos equipados en la máquina briquetadora

Según el trabajo realizado por (Analuís & Hernández, 2018) ya se seleccionaron los actuadores neumáticos junto con las electro válvulas y demás elementos que se detallan a continuación, mismos que fueron escogidos con un rango máximo de presión de 8 BAR, este dato es importante para la elección de los demás componentes neumáticos.

Tabla 1-3: Elementos neumáticos presentes en la máquina briquetadora.

Accesorios	Gráfico	Descripción
Cilindros Neumáticos		Se seleccionó un actuador neumático CHELIC PNEUMATIC SI 100 x 100 con una fuerza de 549.5 [Kgf].
Electroválvulas		Son las encargadas controlar el movimiento del sistema de compactación, se seleccionó 2 Válvulas 5/2 monoestable (con muelle) de la marca CHELIC.
Unidad de Mantenimiento Neumático		Es la encargada de mantener el aire limpio de impurezas en todo el sistema, Se instaló de la marca CHELIC NFC-400-04-S
Sensores Magnéticos		El sensor inductivo o de proximidad detecta el campo magnético del vástago y se utiliza para detectar la posición los finales de carrera de los cilindros neumáticos, se seleccionaron 5 sensores.
Mangueras Neumáticas		Se utilizan para acoplar los distintos dispositivos neumáticos, son fabricados de diferentes materiales y tamaños dependiendo de su uso.
Acoples		Nos permite aumentar la distancia o adaptar otro elemento, están presente en todas las conexiones entre los elementos neumáticos.

Fuente: (Analuisa & Hernández, 2018)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.2.2 Selección de la Unidad Neumática

Se tomó en consideración el trabajo de titulación realizado por (Analuisa & Hernández, 2018) el cual nos indica las características de la máquina briquetadora diseñada, en donde se indica el valor

máximo de presión que ejerce los cilindros neumáticos, misma que traducida a presión que ejercerá da aproximadamente 6 BAR.

Como existen cambios en el rango de manejo de la presión para la compactación en cada una de las biomásas, se asume un factor de servicio de 1,5 en la selección de la unidad neumática con el fin de asegurar la funcionalidad y operatividad de la misma.

Entonces la presión máxima de trabajo será:

$$P_{\max} = 1,5(6 \text{ BAR})$$

$$P_{\max} \cong 9 \text{ [BAR]}$$

Con este dato se puede seleccionar un compresor de aire para la capacidad de 9 BAR, la misma que se utilizará en los ensayos para la fabricación de briquetas de los diferentes tipos de biomasa.

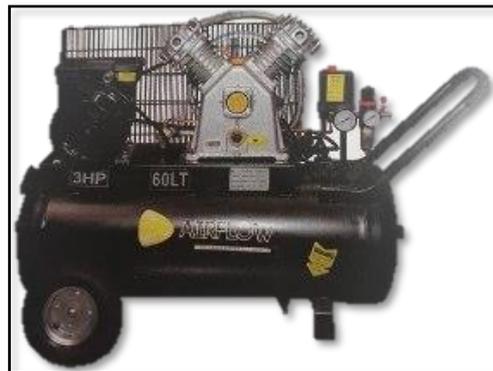


Figura 6-3. Compresor de banda AirFlow

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Las características más importantes de la unidad neumática seleccionada son:

Tabla 2-3: Características de la unidad neumática
AirFlow.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
•	Desplazamiento de aire: $335 \left[\frac{L}{min} \right]$
•	Presión máxima: 10 [Bar]
•	Velocidad: 3450 [RPM]
•	Potencia: 3 [HP]
•	Voltaje: 110v/60 [Hz]
•	Capacidad del tanque: 60 [L]

Fuente: ALMACHE, Cristhian, 2020

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.2.3 Selección del transmisor de presión

El transmisor de presión neumático a utilizar será uno que cumpla con los parámetros de presión requerido para el sistema, que en este caso son una presión máxima de 8 BAR, por ende, seleccionamos de la marca Danfoss MBS 1700 el cual permite medir la presión del aire que será dirigido a la válvula proporcional. Este elemento es adecuado para cualquier tipo de aplicaciones en la industria neumática, y sobre todo para los sistemas de control de la maquinaria.



Figura 7-3. Transmisor de presión de la marca Danfoss

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Se seleccionó este transmisor con el dato de la presión de trabajo como se mencionó anteriormente, además del mercado era el más económico.

Las especificaciones técnicas de nuestro transmisor de presión neumático son:

- Señal de salida 4-20 [mA]
- Rango de medición de 0-10 [bar]
- Conexión de presión G ¼ A, EN 837
- Compensación de temperatura y calibración laser
- Excelente estabilidad frente a vibraciones
- Fácil instalación

3.2.4 Selección de la válvula reguladora de presión

Este tipo de válvulas tiene como objeto enviar y recibir las señales para el control automático de la presión de trabajo en la máquina briquetadora. Además, la válvula controlará y regulará el paso de flujo de aire hacia cada una de las electroválvulas monoestables para de allí mandar el aire comprimido a cada uno de los actuadores neumáticos.

Para la selección de esta válvula proporcional de presión neumática debemos tener en cuenta la presión máxima a la que va a trabajar el sistema, en este caso los 8 BAR, ya con este dato se eligió una válvula de la marca SMC, modelo VY1100.



Figura 8-3. Válvula reguladora de presión
marca SMC

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Dentro de las características más importantes que presenta esta válvula son:

- Presión máxima de trabajo: 8,8 [BAR].
- Temperatura de trabajo: 0 a 50 [°C]
- Rango de señal de trabajo: 0 – 5 [V]
- Conexión de la presión: ¼
- Fácil instalación
- No requiere de lubricación

3.2.5 Selección de los accesorios de conexión

Es importante mencionar y detallar cada uno de los elementos de conexión del circuito neumático, para su selección tendremos en cuenta el tamaño de conexión de cada uno de los elementos elegidos anteriormente, para este caso el diámetro será ¼ de pulgada y la aplicación que deben tener es alta presión con el fin de evitar daños en el sistema.

Tabla 3-3: Accesorios de conexión para el circuito neumático.

Accesorios	Gráfico	Descripción
Tee		Este elemento se debe instalar cuando existen tres elementos de conexión con el objeto de permitir la distribución del fluido a cada una de las partes.
Racor recto		Permite la conexión y desconexión de forma más fácil e instantánea entre los elementos neumático y las mangueras,
Silenciadores		Reduce el nivel de ruido provocado por los elementos neumáticos, se los instala directamente en la vía de escape de cada válvula.
Mangueras neumáticas		Las mangueras es el medio por donde se transporta el aire comprimido en la unidad neumática a cada uno de los elementos o dispositivos neumáticos del sistema.
Prensa Estopa		Protege a los cables de conexión de los elementos neumáticos contra arrastres accidentales y vibraciones.
Cinta espiral		Esta cinta nos ayuda a organizar u ordenar los cables de conexión de los elementos neumáticos conectados al sistema de control.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.2.6 Armado e instalación del sistema neumático

Una vez seleccionado los elementos neumáticos que permitirán controlar el flujo de presión de trabajo de los actuadores, primero se realiza la conexión del compresor de aire disponible a la manguera neumática principal del sistema con todos los acoples, tomando en cuenta la presión máxima a la que va a trabajar la máquina.

Además, tanto el transmisor de presión como la válvula reguladora de presión fueron instalados de tal manera que todo el sistema quede ergonómico, aprovechando la estructura metálica de la briquetadora. En una de las columnas se colocó todas las válvulas instalando de forma fija con pernos de sujeción, con el fin de evitar caídas o desajustes, eliminando así las cintas que poseía actualmente la máquina.



Figura 9-3. Instalación y conexión de los elementos neumáticos.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.2.6.1 Medición y control de la presión en los actuadores neumáticos

La máquina briquetadora contiene dos cilindros neumáticos, en el cual la presión con la que va a trabajar el sistema es controlada por la válvula proporcional y el transmisor de presión.

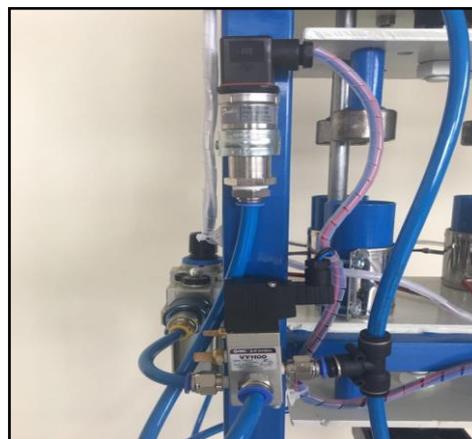


Figura 10-3. Instalación de las dos nuevas componentes neumáticas.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Lo que se logra con estos dispositivos es principalmente controlar la cantidad de aire y la presión con la que va a trabajar cada cilindro neumático. A continuación, se procede a explicar el funcionamiento de los elementos ya instalados.

1. El compresor proporciona el aire que primero debe pasar por la unidad de mantenimiento neumático, para limpiar y filtrar de suciedades al fluido de trabajo.
2. Después el aire se dirige a la válvula proporcional de presión, la cual controla el paso de flujo, dependiendo de la presión requerida por el operario.
3. La presión que desea el operario es recibida por el transmisor de presión, el cual transforma los datos de presión a señales estándar en este caso de 4-20 [mA], y se las envía a la válvula proporcional.
4. Una vez establecidos estos valores, la reguladora de presión deja pasar el flujo de aire seleccionado hacia las electroválvulas que controlan a los cilindros neumáticos, los cuales van a compactar el producto según la presión recibida por la válvula proporcional de presión.

3.2.6.2 Diagrama de control del circuito neumático

Este diagrama se lo realiza para comprender de mejor manera como se encuentra la conexión de los elementos neumáticos además de representar gráficamente el funcionamiento de los elementos que se instalaron a la máquina briquetadora.

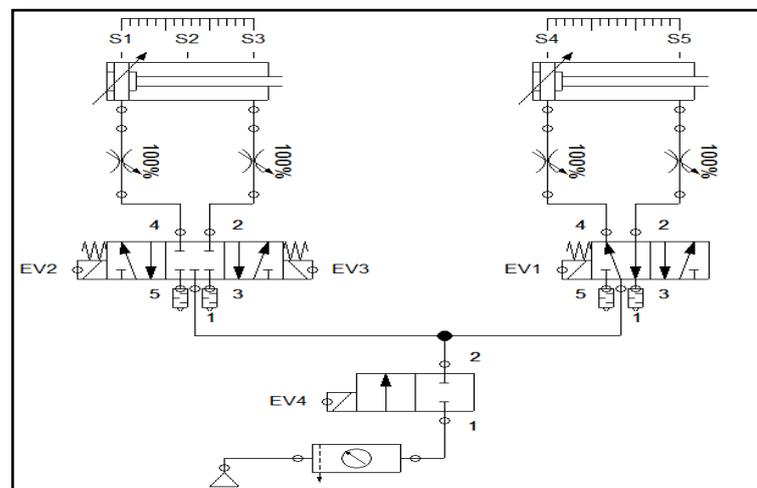


Figura 11-3. Diagrama de todo el circuito neumático.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3 Diseño del sistema térmico

El objetivo es diseñar y construir los elementos para el sistema térmico que se implementará en la máquina briquetadora, con el fin de primero calentar a las biomásas que se coloquen dentro de los moldes disminuyendo humedad de las mismas y controlar la temperatura de trabajo a la que cada biomasa necesita para obtener briquetas con buenas características físicas y térmicas.

3.3.1 Consideraciones iniciales

1. En el capítulo 2 se analizó el sistema térmico y se concluyó que para la máquina briquetadora se recomienda utilizar los calefactores de resistencias eléctricas.
2. La temperatura de trabajo máximo para el horno a diseñar se obtuvo de la bibliografía en la cual las experimentaciones mostraban valores dentro de un rango de 50 a 120 [°C] que necesitaban para el secado de los cuatro tipos de biomásas, entonces para un mayor margen se tomará como temperatura máxima los 200 [°C].
3. Para el consumo de energía se debe tomar a consideración que el laboratorio de Neumática y Oleohidráulica de la Facultad de Mecánica lugar donde se ubica la máquina briquetadora poseen únicamente conexión a 120 [V], por lo que el potencial del horno a diseñar debe ser 120 [V].
4. El tiempo de briquetado para las biomásas es aproximadamente de 5 [min], debido a que las biomásas a utilizar deben pasar por un proceso de secado antes de la compactación.
5. El dimensionamiento de las resistencias eléctricas debe ser de acuerdo a las medidas de cada recipiente contenedor de biomasa, que según el diseño de (Analuisa & Hernández, 2018) es diámetro 50 [mm] y una altura de aproximadamente 200 [mm], dato que permitirá obtener mayor eficiencia de las resistencias eléctricas.
6. Se debe tener en cuenta que el material a calentar son residuos sólidos agrícolas (borra de café, cascarilla de arroz, residuos de cebada y bagazo de caña de azúcar), cada uno de ellos presenta distintos porcentajes de humedad, por lo que el calefactor debe acoplarse a estos requerimientos.

3.3.2 Selección del tipo de horno de resistencias eléctricas

Para (Astigarraga, 1994, p. 11) el calentamiento de piezas por resistencia eléctrica puede ser de forma directa o indirecta, la diferencia radica que cuando es directo la corriente eléctrica pasa por la pieza en cambio la indirecta la pieza se calienta por radiación o convección.

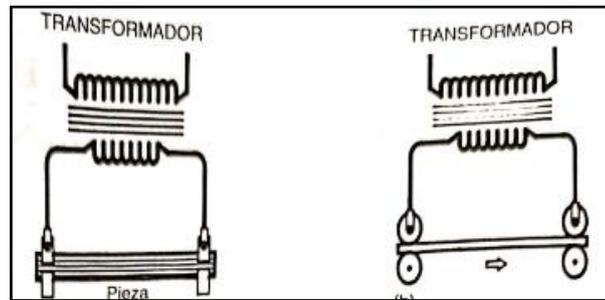


Figura 12-3. Equipos de calentamiento directo.

Fuente: (Astigarraga,1994)

Pero como el producto a calentar no tiene gran longitud, se procede a diseñar un horno con calentamiento indirecto, este tipo es el más usado en las industrias y la disposición típica de las resistencias es como se muestra a continuación.

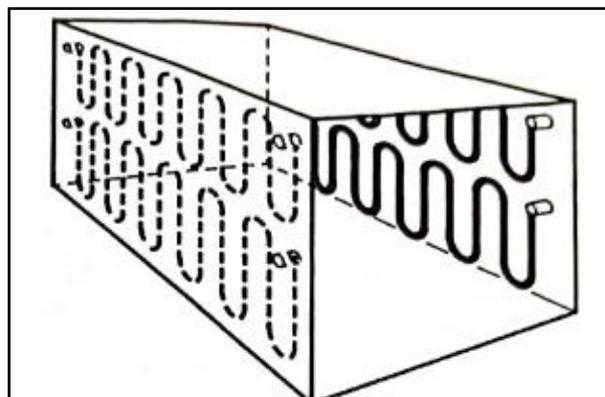


Figura 13-3. Disposición típica de resistencias de calentamiento indirecto.

Fuente: (Astigarraga,1994)

Además el horno va a trabajar a temperaturas bajas, por lo cual según (Astigarraga, 1994, p. 13) se elige utilizar resistencias blindadas para la máquina briquetadora. Incluido a ello se diseñará resistencias de tipo abrazaderas debido a que el molde tiene forma cilíndrica y el material a calentar es sólido, por lo que esta es la mejor opción para la instalación en la máquina briquetadora.



Figura 14-3. Resistencias eléctricas tipo abrazadera.

Fuente: (Electricfor S.A, 2019)

3.3.2.1 Forma y dimensiones de las resistencias tipo abrazadera

Para el diseño de las resistencias se toman en cuenta las dimensiones de las briquetas establecidas por el usuario, que son diámetro 47 [mm] y una altura de 50 [mm], las cuales corresponden a las dimensiones del molde de la máquina briquetadora. Entonces la forma de la resistencia va a ser cilíndrica y con dimensiones un poco mayor a las del producto debido a que se necesita tener un margen para cubrir más área de trabajo.

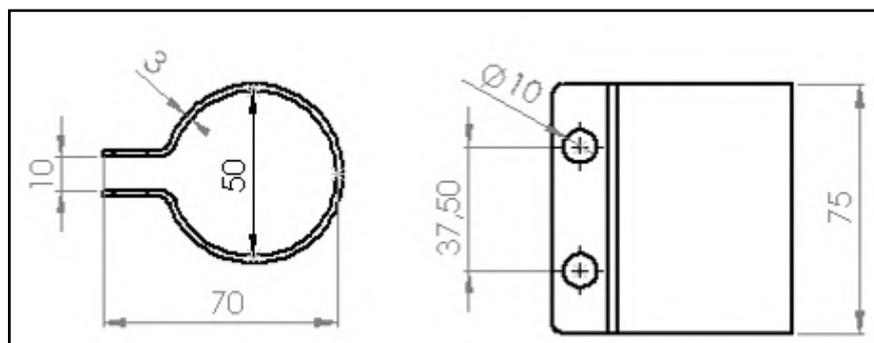


Figura 15-3. Dimensiones para las resistencias eléctrica tipo abrazadera

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.3 Consideraciones físicas y ambientales para el diseño

Para realizar el diseño termodinámico se debe conocer las condiciones ambientales de la ciudad de Riobamba y del Laboratorio de Neumática y Oleohidráulica de la Facultad de Mecánica, a continuación, se detallan dichos parámetros:

Tabla 4-3: Datos meteorológicos de la ciudad de Riobamba.

Sector	Provincia Chimborazo / Cantón Riobamba
Altitud	2850 [m]
Temperatura media	15 [°C]
Temperatura mínima	9 [°C]
Humedad relativa (Φ)	48 %
Presión Atmosférica (P)	499.6 [HPa]

Fuente: (INAMHI, 2020)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.4 Análisis térmico del sistema

Como consideración inicial se debe tener en cuenta que, en los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción, en este caso si calentamos el molde metálico de la máquina este transmite calor a la materia orgánica hasta el extremo más frío por conducción. Aunque puede existir también transferencia de calor por convección y radiación, la primera va a predominar.

El análisis se lo realizó considerando que tanto la temperatura interior y exterior de la resistencia va a mantenerse constante, por lo que la transferencia de calor será en estado estacionario y el flujo de calor será unidireccional en sentido radial.

La temperatura interna será de máximo 200 [°C], ésta variará dependiendo de la biomasa que se vaya a secar y compactar en la máquina briquetadora.

Para las ecuaciones de resistencias térmicas consideramos la forma cilíndrica de la resistencia eléctrica para la máquina briquetadora.

3.3.4.1 Determinación de la mica térmica

Aunque en el mercado existen variedad de micas térmicas, para esta resistencia de tipo abrazadera se escogerá una mica rígida térmica, que posee gran resistencia térmica y eléctrica además de tener un bajo costo.

En la siguiente tabla se muestra las propiedades térmicas de la mica rígida a utilizarse en la construcción de nuestra resistencia. Además de las propiedades de las placas internas y externas de las resistencias y del aire a temperatura atmosférica.

Tabla 5-3: Propiedades térmicas de los materiales de las paredes de las resistencias

Material	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$	Calor específico $\left[\frac{kJ}{kg^{\circ}K}\right]$
Láminas de acero blindado	7833	54	0,465
Mica Térmica	2200	0,3	-
Aire a 15 [°C]	1,234	0,025	1,005
Aire a 200 [°C]	0,747	0,039	1,027

Fuente: (Holman, 1998)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.4.2 Analogía Eléctrica

El análisis de las temperaturas en las paredes de las resistencias eléctricas tipo abrazadera se muestra como una analogía eléctrica en la figura 16-3, desde el interior de las resistencias hasta la pared exterior de la misma, para el cálculo de las mismas se realizará iteraciones de los valores hasta hallar los adecuados para el diseño.

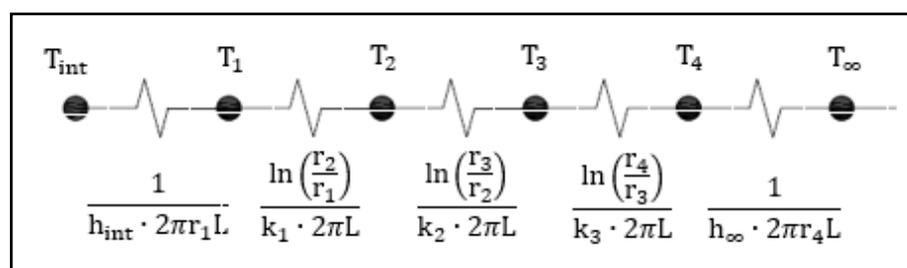


Figura 16-3. Analogía eléctrica de las resistencias eléctricas tipo abrazadera

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Donde:

$$T_{int} = 200 \text{ [}^{\circ}\text{C]} = 473 \text{ [}^{\circ}\text{K]} \text{ (Temperatura de diseño de las resistencias)}$$

$$h_{int} = h_{\infty} = 25 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \text{ (Coeficiente convectivo del aire)}$$

$$T_{\infty} = 15 \text{ [}^{\circ}\text{C]} = 288 \text{ [}^{\circ}\text{K]} \text{ (Temperatura del medio ambiente)}$$

$r_1 = 0,025 \text{ [m]}$ (Distancia desde el centro de la resistencia, hasta la superficie interna de la placa metálica interna)

$r_2 = 0,026 \text{ [m]}$ (Distancia desde el centro de la resistencia, hasta la superficie inicial de la lana de vidrio)

$r_3 = 0,027$ [m] (Distancia desde el centro de la resistencia, hasta la superficie inicial de la placa metálica externa)

$r_4 = 0,028$ [m] (Distancia desde el centro de la resistencia, hasta la superficie final de la placa metálica externa)

$k_1 = k_3 = 54$ $\left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$ (Conductividad térmica de las placas metálicas)

$k_2 = 0,3$ $\left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$ (Conductividad térmica de la mica térmica)

$L = 0,075$ [m] (Altura de la resistencia tipo abrazadera)

Entonces se forman las ecuaciones de las resistencias térmicas del circuito de la figura 16-3, para hallar el flujo de calor hacia el exterior de la resistencia por unidad de área.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1)$$

$$R_T = \frac{1}{h_{int} \cdot 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1 \cdot 2\pi L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_2 \cdot 2\pi L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_3 \cdot 2\pi L} + \frac{1}{h_{\infty} \cdot 2\pi r_4 L}$$

$$R_T = 0,4397 \left[\frac{^{\circ}K}{W}\right]$$

3.3.4.3 Determinación del flujo de calor acumulado en las paredes de las resistencias

Como el régimen es estacionario y la densidad de flujo calorífico es constante en todas las capas el cálculo de calor acumulado en las paredes de las resistencias es determinada mediante la siguiente ecuación (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 40).

$$Q = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{int} - T_{\infty}}{R_T} \quad (2)$$

$$Q = 420,747$$
 [W]

3.3.4.4 Cálculo de las pérdidas de calor.

Para poder hallar las pérdidas de calor por conducción y convección en el sistema, se debe calcular primero todas las temperaturas del circuito térmico, y después hallar las temperaturas medias y las deltas de temperatura con respecto a la temperatura del ambiente expresada en la tabla 4-3.

Primero se hallará las temperaturas en cada nodo del circuito térmico, despejando este valor de la ecuación (2).

$$T_1 = T_{int} - Q \cdot R_1$$

$$T_1 = 437,286 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

Para las demás temperaturas se utilizó la misma ecuación y los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6-3: Temperaturas en cada nodo del circuito térmico

Flujo de calor [W]	T ₁ [°K]	T ₂ [°K]	T ₃ [°K]	T ₄ [°K]
420.747	437,286	436.637	324.315	323.714

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Con todos estos resultados se procede a calcular las temperaturas medias y los deltas de temperatura.

$$T_{m1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3)$$

Temperaturas medias:

$$T_{m1} = 436,961 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$T_{m2} = 380,476 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$T_{m3} = 324,015 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

Deltas de temperatura:

$$\Delta T = T_m - T_\infty \quad (4)$$

$$\Delta T_1 = T_{m1} - T_\infty = 148,961 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$\Delta T_2 = T_{m2} - T_\infty = 92,476 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

$$\Delta T_3 = T_{m3} - T_\infty = 36,015 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

3.3.4.4.1 Pérdidas de calor por conducción.

Las pérdidas de calor por conducción se las debe calcular en las placas metálicas interna y externa, como en el aislante térmico con la ecuación (5).

$$Q_k = \frac{\Delta T \cdot (k_1 \cdot 2\pi L)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (5)$$

Placa metálica interna: $Qk_1 = 96,648 \text{ [kJ]}$

Aislante térmico: $Qk_2 = 0,346 \text{ [kJ]}$

Placa metálica externa: $Qk_3 = 25,200 \text{ [kJ]}$

Para hallar el calor total para un ciclo de funcionamiento tomaremos en cuenta los 10 minutos del tiempo de proceso de la máquina briquetadora, que corresponde a un ciclo de trabajo.

$$Q_k = \frac{Qk_1 + Qk_2 + Qk_3}{t} \quad (6)$$

$$Q_k = 203,658 \text{ [W]}$$

3.3.4.4.2 Pérdidas de calor por convección

Para (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 64) en la convección libre o natural la velocidad del fluido en puntos alejados de la superficie del cuerpo es prácticamente nula. En cambio en las proximidades del mismo cuerpo, existe un flujo de aire debido a la diferencia de densidades del mismo, lo que producirá una fuerza mínima de empuje sobre el fluido que se encuentre en los alrededores de la superficie, obteniendo transmisión de calor por convección (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 65).

Temperatura media entre la placa externa y el medio:

$$T_m = \frac{T_4 + T_\infty}{2}$$

$$T_m = 305,857 \text{ [°K]}$$

En la siguiente tabla se presenta las propiedades del aire a presión atmosférica, y a una temperatura media de 305,857 [°K].

Tabla 7-3: Propiedades del aire para T_m

Propiedad	Valor
Número de Prandtl	0,708
Densidad	$1,177 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
Viscosidad cinemática	$15,69 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$
Calor específico	$1,006 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right]$
Conductividad térmica	$0,026 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}} \right]$
Gravedad	$9,810 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

Fuente: (Holman, 1998)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Para hallar la longitud característica, en el cálculo del número de Grashof, para un cilindro vertical L_c es igual a la altura del cilindro en este caso 0,075 [m] (Çengel, 2007, p. 527).

Otra variable indispensable para la convección natural es el coeficiente de expansión volumétrica (β), que viene expresado así para todos los gases ideales.

$$\beta = \frac{1}{T_{\infty}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{288 \text{ [}^{\circ}\text{K]}}$$

Con los datos hallados se procede a calcular el número de Grashof.

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_4 - T_{\infty}) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (8)$$

$$\text{Gr} = 1,785 \times 10^7$$

Entonces para saber si el flujo de aire es laminar o turbulento, tenemos que hallar el número de Rayleigh y se lo hace multiplicando el número de Grashof y el número de Prandtl.

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (9)$$

$$\text{Ra} = 1,264 \times 10^7$$

Como el número de Rayleigh se encuentra dentro del rango de $10^4 - 10^9$, el flujo es considerado laminar, con estos datos podemos hallar el número de Nusselt, pero primero debemos realizar una comparación para considerar al cilindro vertical como simplemente una placa vertical, para ello debemos demostrarla con la ecuación (10) (Çengel, 2007, p. 528).

$$D \geq \frac{35L}{\text{Gr}^{1/4}} \quad (10)$$

$$0,050 \text{ [m]} \geq 0,0403 \text{ [m]}$$

Como la relación si cumple podemos ocupar la ecuación de Nusselt para placas verticales y flujo laminar.

$$\text{Nu} = 0,59\text{Ra}^{1/4} \quad (11)$$

$$\text{Nu} = 35,179$$

Se procede a calcular el coeficiente de película convectiva, para lo cual aplicamos la siguiente ecuación.

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_a}{L_c} \quad (12)$$

$$h_c = 12,195 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$$

A continuación, hallamos la pérdida de calor por convección en la pared de placa metálica externa de la resistencia tipo abrazadera.

$$Q_c = h_c \cdot 2\pi r_4 L_c \cdot (T_4 - T_\infty) \quad (13)$$

$$Q_c = 5,747 [W]$$

3.3.4.4.3 Pérdidas de calor por radiación

Las pérdidas por radiación se las realiza en base a que la mayoría de los cuerpos son opacos, y que todas las superficies emiten como reciben energía de otras de manera radiante y dependiendo de la temperatura de trabajo a la que se encuentren, por lo tanto las pérdidas por esta transferencia de calor se calcula por medio de la siguiente expresión (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 43).

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (14)$$

Donde:

Q_r : Calor transmitido por radiación $\left[\frac{Kcal}{h} \right]$

ε : Emisividad de la superficie externa de la resistencia que según (Holman, 1998) es 0,066

σ : Constante universal de Stefan Boltzmann $5,670 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ (Çengel, 2007)

T_s : Temperatura de la placa externa de la resistencia 323,714 [$^\circ K$]

T_∞ : Temperatura del medio 288 [$^\circ K$]

A: Superficie de emisión de calor 0,012 [m^2]

Entonces reemplazando los datos planteados tenemos:

$$Q_r = 0,184 [W]$$

A continuación, se procede a calcular el valor de las pérdidas totales por transferencia de calor de la resistencia tipo abrazadera.

$$Q_P = Q_k + Q_c + Q_r \quad (15)$$

$$Q_P = 209,588 \text{ [W]}$$

Como se asumió el primer valor del coeficiente convectivo del aire, se realizó iteraciones de todo el proceso mencionado anteriormente hasta obtener el valor final y dichos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8-3: Valores de las pérdidas de calor en cada iteración

Iteraciones	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Quinta
H convectivo $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°K}}\right]$	25	12,196	12,350	12,355	12,355
T1 [°K]	437,286	426,095	425,923	425,917	425,917
T2 [°K]	436,637	425,616	425,442	425,436	425,436
T3 [°K]	324,315	342,571	342,094	342,079	342,079
T4 [°K]	323,714	342,127	341,647	341,632	341,632
Qconducción [W]	203,657	213,052	212,304	212,281	212,281
Qconvección [W]	5,747	8,820	8,745	8,743	8,743
Qradiación [W]	0,184	0,306	0,303	0,302	0,302
Qpérdidas [W]	209,589	222,179	221,352	221,327	221,327

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.4.5 Cálculo de la cantidad de calor útil de trabajo

3.3.4.5.1 Calor necesario para calentar el molde cilíndrico de las briquetas

El molde de acero que sirve de alojamiento para las biomásas a compactar recibe en primera instancia el calor de las resistencias eléctricas, y por ello es indispensable calcular el calor que necesita para calentarse a la temperatura de trabajo máxima, utilizando la siguiente ecuación.

$$Q_{\text{molde}} = m_{\text{molde}} \cdot Cp_{\text{molde}} \cdot \Delta T$$

Para hallar la masa del molde metálico, primero se halla el volumen del mismo, con la ecuación (16) que representa el volumen de un cilindro hueco y la reemplazamos en la ecuación (17).

$$V_{\text{molde}} = \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) \quad (16)$$

$$m_{\text{molde}} = V_{\text{molde}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad (17)$$

$$m_{\text{molde}} = 0,134 \text{ [kg]}$$

El calor específico del acero es $C_p = 0,465 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ estos valores se reemplazan en la ecuación (5).

$$Q_{\text{molde}} = 11,839 \text{ [kJ]}$$

3.3.4.5.2 Calor necesario para calentar las biomásas dentro del molde cilíndrico.

El calor útil es la energía que recibe cada una de las biomásas en el interior de los moldes metálicos de la máquina briquetadora y se calcula con la siguiente ecuación.

$$Q_{\text{biomasa}} = m_{\text{biomasa}} \cdot C_{p_{\text{biomasa}}} \cdot \Delta T$$

Al igual que lo realizamos con el molde metálico, primero se debe hallar la masa de la biomasa a compactar en este caso la borra de café, tomaremos como referencia los datos de la densidad del trabajo de (Analuís & Hernández, 2018, p. 75).

$$m_{\text{biomasa}} = 0,040 \text{ [kg]}$$

El calor específico del café es $C_p = 1,966 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ según los datos de (Riaño, 2017), y de igual manera se reemplaza en la ecuación (5).

$$Q_{\text{biomasa}} = 14,942 \text{ [kJ]}$$

Entonces el calor total necesario para calentar todo el sistema donde está ubicada las biomásas en el interior de las resistencias para un tiempo de 10 [min] que es el ciclo de trabajo es:

$$Q_{\text{CT}} = \frac{Q_{\text{molde}} + Q_{\text{biomasa}}}{t} \quad (18)$$

$$Q_{\text{CT}} = 44,634 \text{ [W]}$$

3.3.4.6 Cálculo calor total suministrado por el sistema

Calculado los calores que absorbe el sistema molde y biomasa, además del calor por las pérdidas, se determina el calor total a suministrarse en todo el sistema de calefacción.

$$Q_S = Q_{CT} + Q_P \quad (19)$$

$$Q_S = 265,961 [W]$$

Por lo tanto, la potencia de cada resistencia tipo abrazadera va a ser igual a 265,961 [W].

3.3.5 Cálculo de los elementos de la resistencia eléctrica.

Las resistencias que se van a instalar al sistema de calefacción se comportan como una carga netamente resistiva, por lo cual la tensión, la intensidad de corriente y la potencia se las calcula mediante la ley de Ohm, en ella se relacionan estas variables como se muestra en la siguiente figura (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 100).

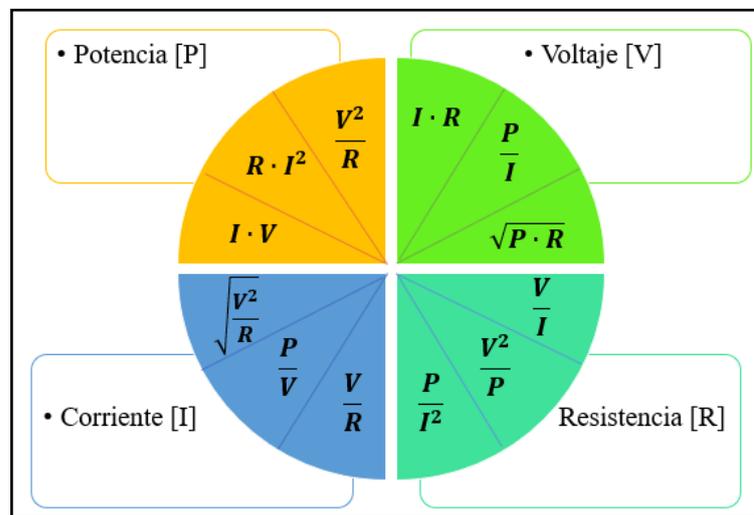


Figura 17-3. Relación entre magnitudes eléctricas.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.5.1 Calentamiento de la resistencia por efecto Joule

En una resistencia cuando pasa una corriente eléctrica elevada, esta produce un aumento considerable de temperatura, y por ende desprendimiento de calor provocado por la circulación de la corriente eléctrica. A ésta transformación de energía se lo conoce como Efecto Joule, para nuestro caso se considera como energía útil, debido a que el calor emanado se lo utilizará para calentar nuestras briquetas (Durán et al., 2012, p. 26).

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (20)$$

Con esta ecuación podemos hallar el valor de la resistencia eléctrica.

3.3.5.2 Variables necesarias para el cálculo de la resistencia

1. **Potencia del elemento calefactor:** Este valor se lo calcula con la suma de calores necesarios para calentar la biomasa y las pérdidas de calor por las diferentes formas de transferencia de calor existentes en el sistema. En este caso son los 265,961 [W], pero para los fabricantes de estos elementos se recomienda utilizar resistencias de mínimo 300 [W], con el fin de alargar la vida útil del elemento calefactor.
2. **Tensión disponible:** Como se mencionó anteriormente la máquina briquetadora será instalada en el Laboratorio de Neumática y Oleohidráulica de la Facultad de Mecánica, y en el lugar únicamente poseen conexiones a 110 [V] monofásica.
3. **Temperatura de trabajo:** Este parámetro es muy importante debido a que de ellos dependerá la selección del elemento calefactor. En nuestro caso se seleccionó una temperatura máxima de 200°C. Para este caso utilizaremos una resistencia de aleación Ni-Cr, de composición 80 Ni y 20Cr, la cual trabaja a temperatura máxima de 1200 [°C]. Este material es la más utilizada en elementos calefactores, y la que se encuentra disponible en el mercado local. A continuación, se detallan las propiedades de la aleación seleccionada.

Tabla 9-3: Propiedades de las aleaciones Ni-Cr

Ni – Cr		80 - 20	70 - 30	60 - 15	40 - 20	30 - 20	20 - 25
Composición	Ni [%]	80	70	60	37	30	20
	Cr [%]	20	30	15	18	20	25
	Fe [%]	<1	<1	20	40	45	50
Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$		8300	8100	8200	7900	7900	7800
Temperatura máx. de trabajo [°C]		1200	1250	1150	1100	1100	1050
Calor específico $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$		0,45	0,45	0,45	0,46	0,50	0,50
Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$		15	14	13	13	13	13

Fuente: (Astigarraga, 1994)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4. **Carga específica ($p = \left[\frac{W}{cm^2}\right]$):** En una resistencia eléctrica con forma y tamaño establecido, la temperatura variará con los watts absorbidos, ya que el área de la superficie permanece constante (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 102). En nuestro diseño la carga específica se obtiene del siguiente gráfico.

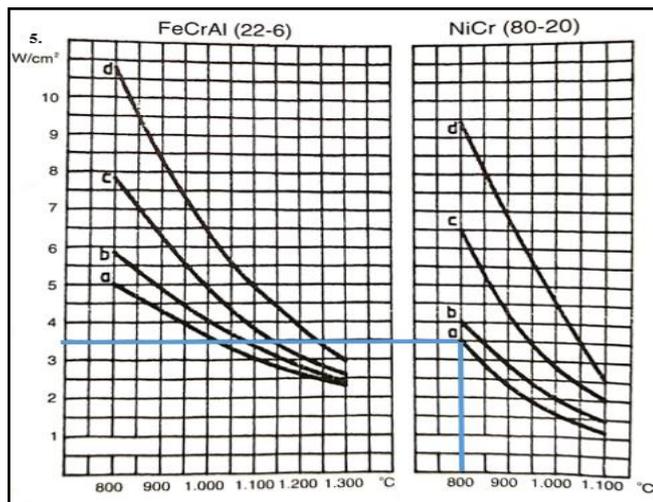


Gráfico 1-3. Carga específica máxima de resistencias

Fuente: (Astigarraga, 1994)

Se escoge la curva (a), porque la configuración de la resistencia es arrollada en espiral, por lo

tanto, la carga específica es $3,5 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$

5. **Coefficiente de resistividad (Ct):** Este parámetro determina la variación de la resistencia (Ohmios) en función de la temperatura, y para 200 [°C] el coeficiente es 1,009.
6. **Elementos y dimensiones de la resistencia:** Como se explicó anteriormente esta resistencia estará arrollado en espiral y para un mejor detalle de las dimensiones de la misma se muestra una representación gráfica de la forma final del alambre.

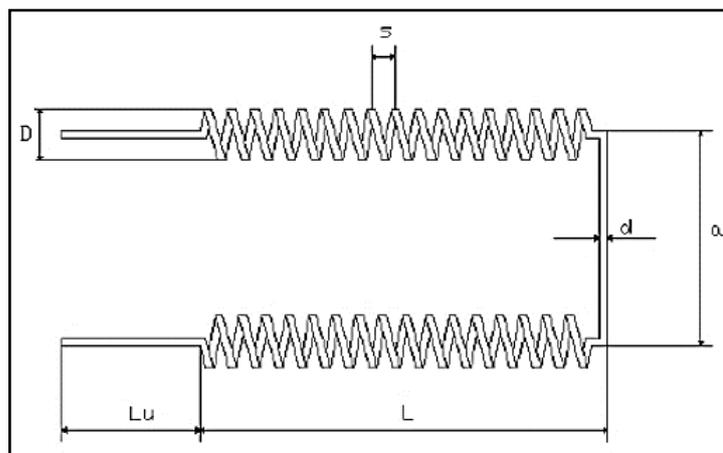


Figura 18-3. Forma del alambre de la resistencia

Fuente: (Aguirre & Sánchez, 2014)

3.3.5.3 Cálculo de las dimensiones del alambre de la resistencia

Se procede a calcular los datos para la selección del alambre para la resistencia eléctrica, tomando en cuenta todas las variables citadas anteriormente. Pero primero hallamos el valor de la resistencia eléctrica con la ecuación (20) y del amperaje del sistema.

$$R = \frac{V^2}{P}$$
$$R = 40,3 [\Omega]$$

3.3.5.3.1 Diámetro del alambre (d)

El diámetro del alambre de la resistencia eléctrica se calcula por medio de la ecuación citada en (Astigarraga, 1994, p. 37). Donde, ρ es la resistividad en [Ω cm], y su valor es $1,13 \times 10^{-4}$.

$$d = 0,74 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{P}{V}\right)^2 \cdot \frac{\rho \cdot C_t}{p}} \quad [cm] \quad (21)$$
$$d = 0,047 [cm]$$

Con este valor, comparamos con los diámetros existentes en el catálogo del fabricante KANTHAL y hallamos los demás parámetros.

Diámetro d : 0,50 [mm]

Resistencia por metro: 7,08 $\left[\frac{\Omega}{m}\right]$

Superficie óhmica a 20 [°C]: 2,22 $\left[\frac{cm^2}{\Omega}\right]$

Peso: 1,40 $\left[\frac{g}{m}\right]$

Superficie por metro: 15,7 $\left[\frac{cm^2}{m}\right]$

Sección transversal: 0,196 [mm²]

3.3.5.3.2 Longitud radiante del alambre (L)

La longitud de la resistencia viene representada por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot p} \quad (22)$$
$$L \cong 5,4 [m]$$

3.3.5.3.3 Diámetro de la hélice (D)

El diámetro de la espiral se puede hallar dependiendo de la temperatura de trabajo a la que va a estar sometido el elemento calefactor según la siguiente tabla.

Tabla 10-3: Diámetro de la espiral según el material y temperatura

	Aleación Ni - Cr		Aleación Fe - Cr - Al	
	En ranuras	En tubos	En ranuras	En tubos
D/d para temperaturas ≤ 1000 [°C]	6 - 9	12 - 14	6 - 8	12 - 14
D/d para temperaturas > 1000 [°C]	5 - 8	12 - 14	5 - 6	12 - 14
Paso S/d	2 - 3	3 - 6	2 - 3	3 - 6

Fuente: (Astigarraga, 1994)

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

La temperatura de trabajo es 200 [°C] y la aleación del alambre es de Ni - Cr, por ende, el cálculo del diámetro de la espiral es:

$$\frac{D}{d} = 6$$
$$D = 3 \text{ [mm]}$$

Además, se puede calcular el paso, utilizando los datos de la misma tabla:

$$\frac{S}{d} = 2$$
$$S = 1 \text{ [mm]}$$

3.3.5.3.4 Número de espiras (n)

El número de espiras que tendrá la resistencia será igual a:

$$n = \frac{L}{\pi \cdot (D - d)} \quad (23)$$
$$n = 688 \text{ espiras}$$

Además, se puede hallar la longitud del alambre cuando las espiras están comprimidas, utilizando la ecuación (24).

$$Lw = n \cdot d \quad (24)$$
$$Lw = 344 \text{ [mm]}$$

Incluso para la longitud de la espira extendida se usa la ecuación (25):

$$Le = n \cdot S \quad (25)$$
$$Le = 688 [mm]$$

Finalmente, con todos estos datos se procede a la construcción de la resistencia tipo abrazadera, en la cual la resistencia seleccionada será enrollada en el aislante térmico y luego cubierta por las placas metálicas internas y externas de acero inoxidable, para finalmente darle la forma cilíndrica con los respectivos pernos para el ajuste y desajuste de la abrazadera.

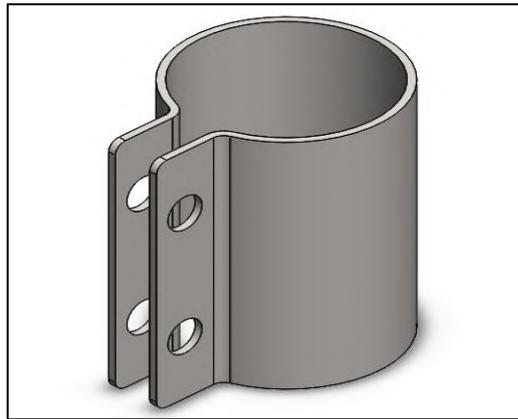


Figura 19-3. Representación 3D resistencias eléctrica tipo abrazadera

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.3.6 Selección de los dispositivos de medición y control

La selección de estos elementos nos servirá para medir y controlar la temperatura de trabajo de las resistencias eléctricas tipo abrazadera para cada biomasa que se vaya a utilizar en la máquina briquetadora. Como nuestro sistema de control general va a ser un LOGO 8, el único medidor de temperatura compatible con los módulos del controlador son las pt 100.



Figura 20-3. Medidor de temperatura pt100

Fuente: (ElectroCrea, 2019)

Incluido al medidor de temperatura también se seleccionó un transmisor de temperatura, el cual nos permitirá realizar la conexión entre la pt100 y el controlador Logo.



Figura 21-3. Transmisor de temperatura

Fuente: (WIKA, 2019)

3.4 Rediseño del sistema de control.

El rediseño del sistema de control electrónico se basará principalmente en la sustitución total del tablero de control de la máquina briquetadora, la que cual estaba constituida por un Arduino Mega quien era el controlador principal de la máquina, además de los relés que accionaban las electroválvulas y finalmente el breadboard que servía de conexión y comunicación entre los elementos neumáticos y el Arduino.

3.4.1 Descripción del sistema de Control

Nuestro sistema debe cumplir con el objetivo principal de medir, controlar y actuar toda la máquina briquetadora, para la fabricación de briquetas de biomasa, y por ello el control del mismo debe ser:

- Estable
- Eficiente
- Entendible
- Operable

Mismo que pueda medir las señales con los sensores de cada sistema, controlar a los elementos neumáticos y térmicos del sistema y enviar las señales de salida a los actuadores para la ejecución del proceso.

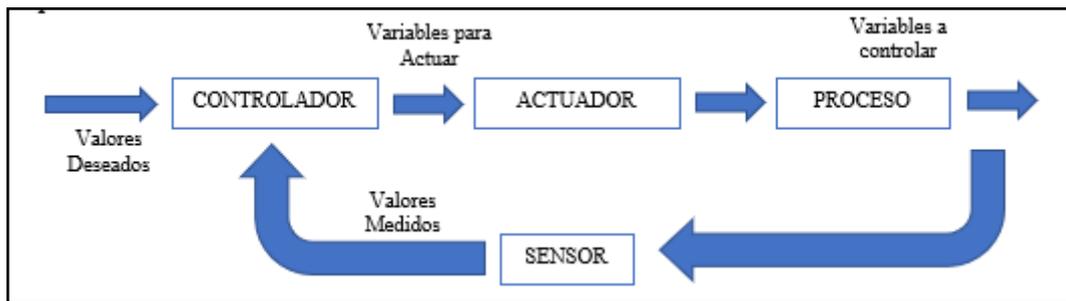


Gráfico 2-3. Elementos de un sistema de control automático

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

3.4.2 Selección de los elementos y dispositivos para el sistema de control

Para la selección de los elementos del sistema de control, se tomará en cuenta las variables a controlar, que en este caso es la presión de compactado y la temperatura de secado, por ello este sistema será el encargado de enviar y recibir las señales de los sensores y actuadores para su ejecución.

El sistema de control electrónico controlará de forma automática a cada uno de los actuadores de la máquina briquetadora y mostrará de forma visual en una computadora o celular el ingreso y la salida de datos del cilindro neumático y las resistencias eléctricas.

- **PLC Logo 8 12/24 RC:** Este controlador permitirá controlar y almacenar todos los datos y la programación diseñada para el funcionamiento del sistema térmico y neumático, este dispositivo consta de 8 entradas digitales de las cuales 4 pueden ser usadas como entradas analógicas y 4 salidas digitales.
- **Módulo de expansión:** El módulo de expansión de salidas analógicas, nos ayudará para la conexión del sistema de control de temperatura, esta tiene 2 entradas y salidas analógicas.
- **Fuente de poder Logo:** Este dispositivo es el encargado de transformar el voltaje de alterna a continua para el funcionamiento del logo, entrando 110 [V] AC y generando 24 [V] DC y 2,5 [A].

- **Router Inalámbrico:** El Router nos permitirá establecer la conexión remota del Logo con un computador o celular, para ingresar y recibir los datos del proceso de la máquina briquetadora.
- **Relés de estado sólido:** Será el encargado de encender o apagar las resistencias de tipo abrazadera mediante la señal de salida enviada por el controlador Logo. La ventaja de este tipo de relé es que el deterioro de las partes internas es mínimo comparado a los electromecánicos.
- **Fusible:** El fusible se utilizará para proteger al Logo de sobrecargas y cortocircuitos. Se selecciona de 1 [A] debido a que es el recomendado por el fabricante del controlador.
- **Breaker:** Este elemento nos ayudará a proteger al sistema de calefacción específicamente a las resistencias de tipo abrazadera, tenemos que considerar que se usará 4 resistencias y por ende la corriente a considerar en la selección es la siguiente

$$I = \frac{P \times 4 \text{ resistencias}}{V} \quad (26)$$

$$I = 10,9 [A]$$

Una vez hallada la corriente, se puede seleccionar el breaker adecuado y para ello se toma una sobredimensión del 25% según (Aguirre & Sánchez, 2014, p. 130).

$$I_{breaker} = 10,9 [A] \times 1,25$$

$$I_{breaker} = 13,625 [A]$$

Con este valor se selecciona un breaker de 16 [A] y 1 polo para el sistema.

3.4.3 Diseño del circuito electrónico

Este sistema electrónico rediseñado nos ayudará a ingresar los parámetros de presión y temperatura para trabajar con diferentes tipos de biomasa, y controlar el sistema de una manera más fácil. El diseño del circuito electrónico para nuestra máquina briquetadora se muestra en el Anexo B.

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y COSTOS DE LA MÁQUINA BRIQUETADORA

4.1 Construcción de las resistencias tipo abrazadera

Para la construcción de las resistencias de tipo abrazadera tomaremos los valores calculados en el capítulo anterior. Las dimensiones de cada resistencia están en la figura 15-3 y la selección del material se la realizó en base a la utilidad del mismo, además que la estructura de cada resistencia tenga buena tenacidad, sea ligero, bajo costo y que sean fáciles de conseguir en el mercado nacional. Cabe mencionar que todo el proceso de fabricación de las resistencias se las realizó en las instalaciones de Electro Silvania.

4.1.1 Trazado y Corte de las placas externas de la resistencia

Con las dimensiones especificadas se realiza el corte de las chapas metálicas de acero inoxidable de 1mm mediante una guillotina, éstas servirán de protección para el alambre de Ni – Cu y el aislante térmico de las resistencias. Se cortaron dos planchas de 75 x 340 [mm].



Figura 1-4. Corte de las chapas metálicas

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.1.2 Conformación de las resistencias eléctricas

Para la conformación de la resistencia primero se ocupa el alambre de resistencia de la marca KANTHAL, y se le realiza el bobinado con un aparato simple el cual mueve un eje de diferentes diámetros, esto según las especificaciones del cliente, en nuestro caso va a ser 3 [mm], el eje se mueve por medio de una manivela y el alambre es arrollado en esta estructura.



Figura 2-4. Bobinado del alambre de resistencia

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Una vez realizado el bobinado el alambre este es enrollado sobre una lámina del aislante térmico, para posterior cubrir con las láminas de acero inoxidable cortadas anteriormente.

Finalmente, con todas las placas colocadas se procede a dar la forma de abrazadera, primero se realiza el corte para los pernos de sujeción que tendrá la abrazadera, este proceso se lo realiza con la ayuda de una prensa hidráulica, la cual realiza el punzonado y doblado de las láminas hasta conseguir la forma deseada.

4.2 Montaje del sistema de calefacción.

4.2.1 Implementación resistencias eléctricas

Para el montaje del sistema de calefacción se tiene en cuenta el lugar donde van a ser instalados las resistencias de tipo abrazadera, en este caso se ubicarán en los moldes donde se aloja la biomasa a compactar.



Figura 3-4. Disposición de las resistencias en la máquina

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Para evitar confusiones en el momento de realizar el armado de tablero cada elemento tendrá un color específico para realizar las conexiones eléctricas.

4.2.2 Implementación relés de estado sólido

Como se mencionó anteriormente los relés de estado sólidos serán los encargados de prender o apagar las resistencias, monitoreado por el controlador Logo. Los relés no estuvieron instalados dentro del gabinete metálico, debido a que se calentaban lo suficiente para dañar la estructura del mismo.



Figura 4-4. Conexión de los relés de estado sólido

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.2.3 Implementación del transmisor de temperatura

El transmisor es el encargado de recibir las señales del sensor de temperatura y enviárselos al sistema de control. Este dispositivo se lo instaló dentro del gabinete metálico.



Figura 5-4. Instalación del transmisor de temperatura

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.3 Montaje del sistema neumático.

El montaje del sistema neumático se basará únicamente en la implementación del transmisor de presión y la válvula reguladora proporcional de presión.

4.3.1 Implementación del transmisor de presión

El transmisor de presión se lo colocó en una de las columnas de la estructura de la máquina, y para evitar caídas se le fijo con una abrazadera.



Figura 6-4. Instalación del transmisor de presión

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

En la conexión neumática únicamente se le colocó la manguera plástica que recibirá el paso de flujo de aire procedente de la válvula reguladora de presión, para posterior transformar esta medida de presión a señal eléctrica y enviarla al controlador.

4.3.2 Implementación de la válvula reguladora proporcional de presión

De igual manera este dispositivo fue fijado a la máquina mediante pernos, además se instalaron silenciadores en las salidas de aire para evitar ruidos fuertes durante el proceso de accionamiento de esta válvula.



Figura 7-4. Instalación de silenciadores a la válvula neumática

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Para las demás conexiones de la válvula se colocaron racores rectos los cuales permitían el fácil acople y desacople de las mangueras neumáticas, la entrada de aire se conectará a la unidad de mantenimiento neumática y de allí primero enviará flujo de aire al transmisor para mediante el controlador recibir las señales de salida y con un conector en tee alimentar de aire comprimido a las dos válvulas electro neumáticos del sistema para que ellas accionen a los cilindros en el proceso de compactación, la conexión completa se presenta en la siguiente figura.

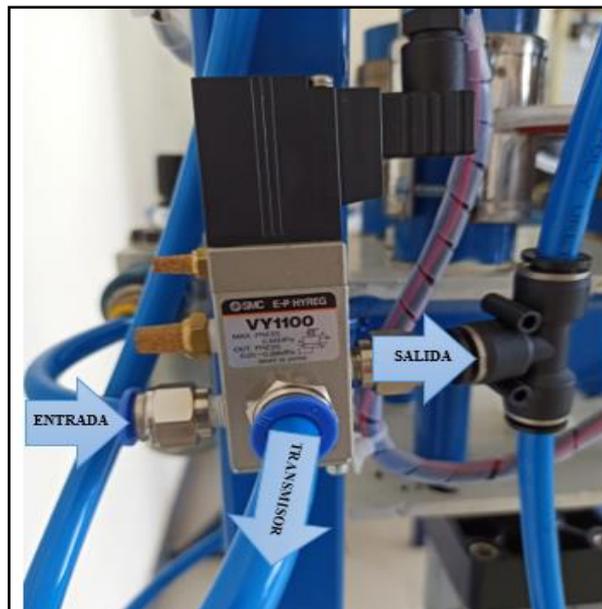


Figura 8-4. Conexión de la válvula proporcional neumática

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4 Armado del tablero de control

Para el tablero de control de nuestra máquina briquetadora se emplearon los elementos que se numeran a continuación:

4.4.1 Gabinete metálico

El gabinete metálico es la cámara en donde se colocará cada uno de los elementos de nuestro sistema de control, para el armado del tablero se consideró cada uno de los dispositivos que iban a ser conectados en su interior y se eligió uno con las siguientes dimensiones 600x400x200 mm.



Figura 9-4. Gabinete metálico

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4.2 Rieles Din

Los rieles din fueron instaladas en el interior del gabinete metálico con el objetivo de que en ellas se coloque todos los elementos electrónicos del sistema de control de la máquina briquetadora, en la siguiente imagen se muestra su disposición.

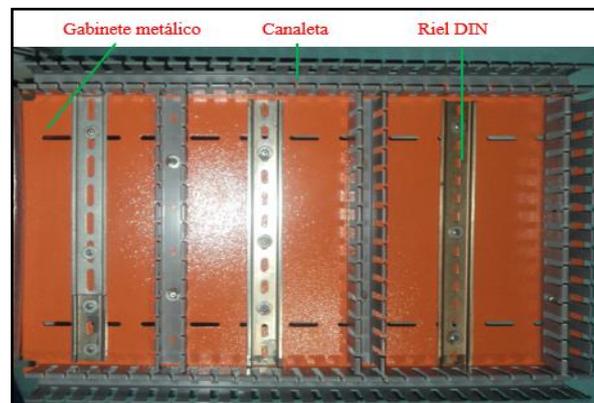


Figura 10-4. Disposición interior gabinete metálico

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4.3 Controlador y elementos de protección

En el capítulo anterior se detalló la elección del controlador y cada uno de sus elementos de protección, de esta manera estos dispositivos fueron instalados en el riel superior, y su disposición se muestra en la siguiente imagen.



Figura 11-4. Instalación y conexión del sistema de control automático.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4.4 Borneras

Las borneras son utilizadas como un conector del sistema eléctrico, aquí los cables son apretados mediante tornillos para asegurar sus conexiones dentro del sistema de control. Las borneras se ubicaron en el riel inferior del gabinete metálico.

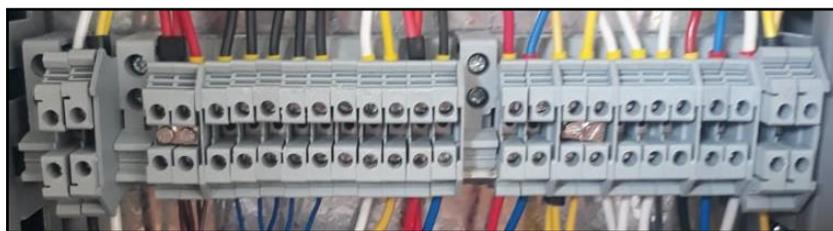


Figura 12-4. Instalación y conexión de borneras

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4.5 Selector eléctrico y luz piloto

El selector eléctrico permite activar o deshabilitar al sistema general de la máquina briquetadora, es un método de seguridad manual en caso de algún fallo de los componentes neumáticos y

térmicos del sistema, además la luz piloto nos muestra si las resistencias eléctricas están encendidas o apagadas.



Figura 13-4. Instalación de selector y luz piloto

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.4.6 Router

El router realizará la conexión inalámbrica entre la máquina briquetadora y cualquier dispositivo móvil (Computador o Celular), se instaló en la puerta del gabinete metálico.



Figura 14-4. Instalación y conexión router

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

En la siguiente imagen se muestra la disposición del tablero de control armado y conectado con todos sus dispositivos electrónicos, listo para el funcionamiento en cada proceso del sistema.



Figura 15-4. Tablero de control máquina briquetadora

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.5 Programación del sistema de control

Con la instalación y conexión de cada sistema de la máquina briquetadora, se procede a la realización de la programación para la ejecución de los procesos neumáticos y térmicos de forma automática y manual.

4.5.1 Componentes para la programación del proceso

Para la ejecución de nuestra programación necesitamos conocer a cada uno de los componentes que forman parte de la estructura lógica visual de nuestro programa.

- Controlador LOGO 8
- Software Logo Soft Comfort V8.0
- Software Logo Web Editor

4.5.1.1 Controlador PLC LOGO 8

Este dispositivo nos ayudará a realizar todas las acciones necesarias para el cumplimiento del proceso para la fabricación de briquetas de una forma automática. La programación es un aspecto importante ya que en su funcionamiento el dispositivo recibe las señales de entrada de los sensores y los transforma a variables que pueda entender el operario, cumpliendo satisfactoria el proceso para el cual fue diseñada e implementada.

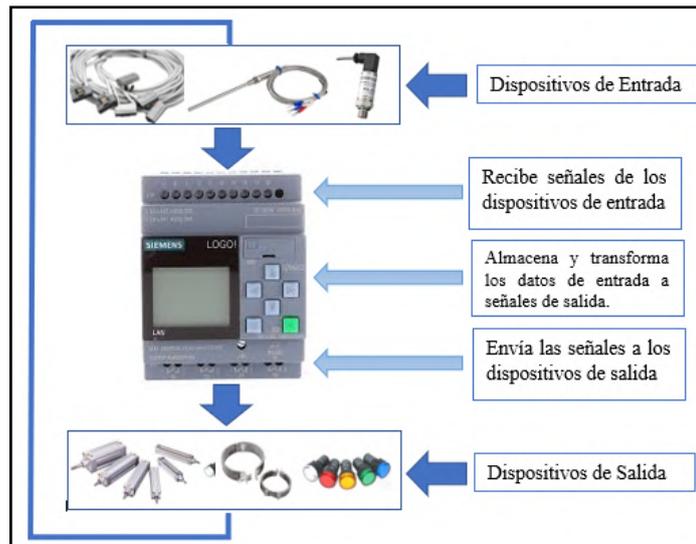


Gráfico 1-4. Funcionamiento del controlador LOGO

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.5.1.2 Software Logo Web Editor

El software nos permitirá crear una página web para que el usuario pueda visualizar de forma amigable el estado del sistema de control de la máquina briquetadora, brindando la opción de monitorear y controlar dichos parámetros para su ejecución. Además, estas variables pueden ser manejadas a través de cualquier dispositivo con acceso a internet.



Figura 16-4. Software Logo Web Editor

Fuente: (García, 2018)

4.5.1.2.1 Diseño del programa Logo Web Editor

Para la realización de nuestra página web, primero se define el proceso de las señales analógicas que recibirá el controlador, desde los sensores electromagnéticos, transductores de presión y la pt100, que serán la base para el control de la presión y la temperatura del sistema.

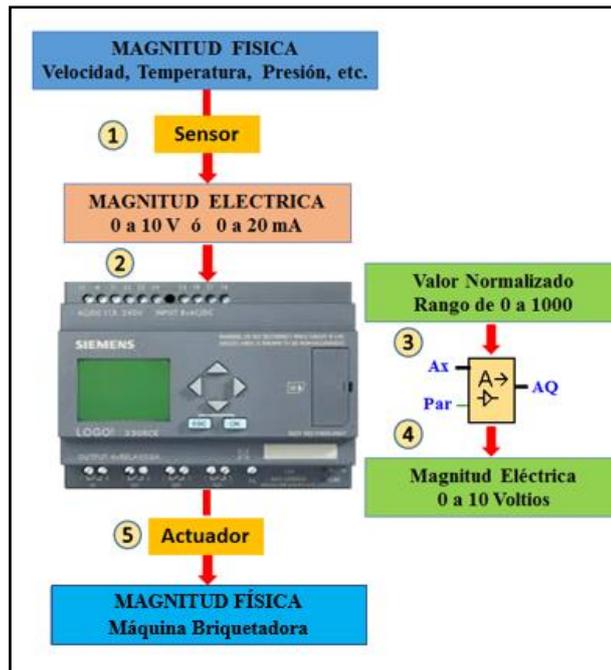


Figura 17-4. Diseño de la programación

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Entonces para conocer cada una de las variables físicas que intervendrán en la programación, primero se realizará la interfaz gráfica de nuestra página web, con el objetivo de conocer todas las señales de entrada y salida que necesita la programación de la máquina briquetadora. En este caso se realizó 3 pestañas, en las cuales una representaba la carátula del sitio web, con datos generales del proyecto.



Figura 18-4. Diseño de la ventana de presentación

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Adicional se diseñaron dos ventanas, las cuales muestran los tipos de control que va a poseer la máquina briquetadora.

La primera representa el control manual de los actuadores tanto cilindros neumáticos como resistencias eléctricas, para una mejor representación de las mismas, se colocó imágenes de estos elementos máquina. En ella se colocaron botoneras que representan a las señales de entrada para el accionamiento manual de cada cilindro y las resistencias, a cada una se las etiquetó con el nombre de la función que realizan.

También se colocaron bloques indicadores de presión y temperatura, los cuales nos muestra las señales de salida de cada actuador. Adicional se colocaron indicadores de los sensores electromagnéticos, estos nos muestran la posición del vástago de cada cilindro neumático.

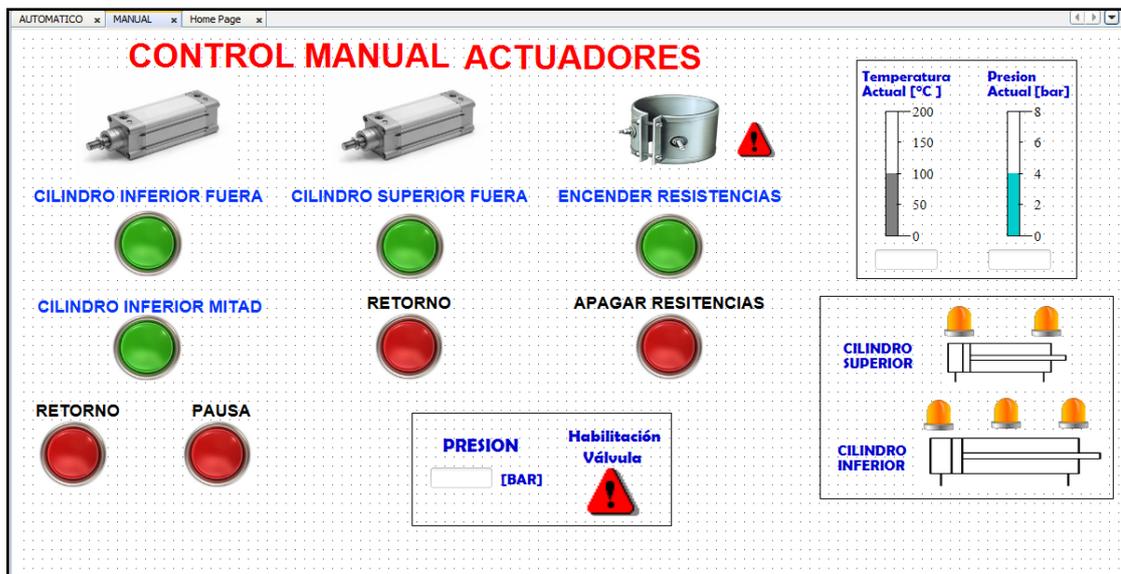


Figura 19-4. Diseño de la ventana de control manual de la máquina briquetadora

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

La tercera ventana representa el control automático de la máquina, a diferencia de la anterior pestaña, aquí el usuario únicamente puede ingresar datos numéricos sea de presión, temperatura y tiempo de compactación para el respectivo proceso de briquetado.

Adicional se agregaron una botonera de Inicio y Paro, los cuales servirán para comenzar el proceso y para detenerlo si existiera algún tipo de problema.

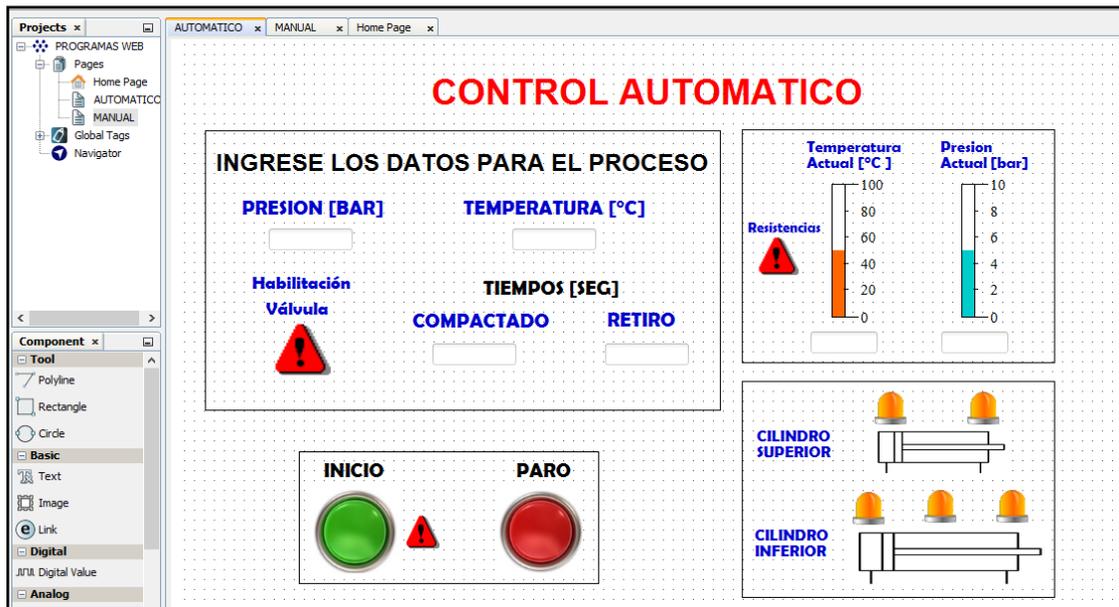


Figura 20-4. Diseño de la ventana de control automático de la máquina briquetadora

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.5.1.2.2 Variables almacenadas para la programación

Una vez realizado la interfaz gráfica de nuestra programación se procede a definir las variables de entrada y salida creadas anteriormente, éstas poseen una nomenclatura única que permitirá realizar el lenguaje de programación en el Logo Soft Comfort V8.2.

Tabla 1-4: Definición de variables a utilizar

Variable	Descripción
I1	Sensor Magnético Inferior - Cilindro Inferior
I2	Sensor Magnético Medio - Cilindro Inferior
I3	Sensor Magnético Superior - Cilindro Inferior
I4	Sensor Magnético Inferior - Cilindro Superior
I5	Sensor Magnético Superior - Cilindro Superior
I6	Selector ON / OFF
I7	Transmisor de Presión
I8	Transmisor de Temperatura
Q1	Electroválvula Cilindro Superior
Q2	Electroválvula 1 Cilindro Inferior
Q3	Electroválvula 2 Cilindro Inferior
Q4	Relés de Estado Sólido

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.5.1.3 Software Logo Soft Comfort V8.2

El software nos permitirá programar los procesos a realizar por la máquina briquetadora, los datos iniciales se tomarán de la Tabla 2-4, y serán la base para su ejecución.

4.5.1.3.1 Diseño del programa

Para el diseño de nuestro programa lo estructuraremos en tres ventanas los cuales van a representar el control manual, control automático y la secuencia de los actuadores neumáticos.

- Control Manual de los cilindros neumáticos.

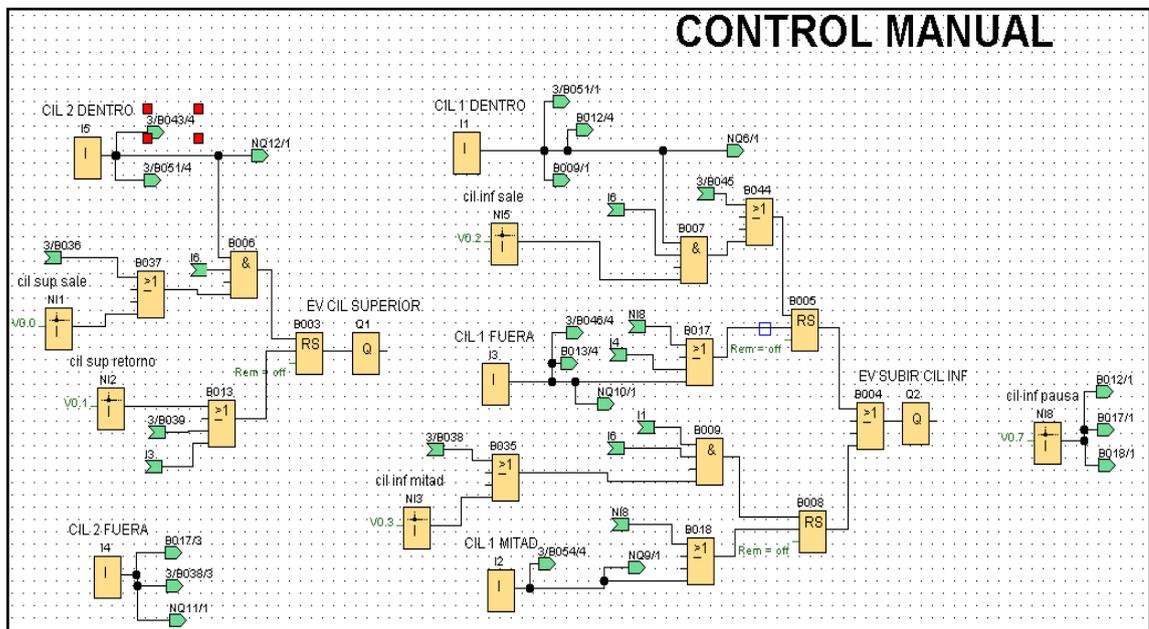


Figura 21-4. Programación para el control manual de los cilindros neumáticos

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

- Control manual de las resistencias eléctricas

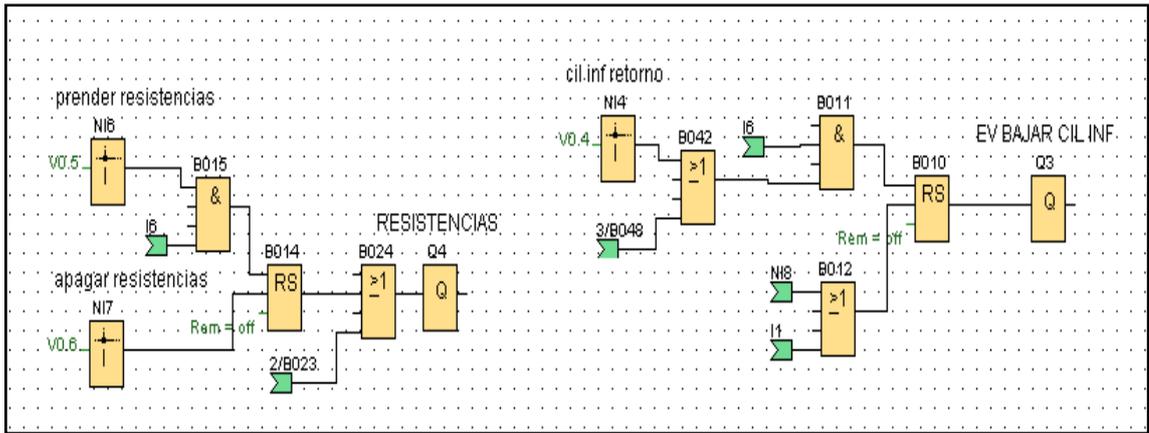


Figura 22-4. Programación para el control manual de las resistencias eléctricas

Realizado por: ALMACHE, Crishtian, 2020

- Control Automático de todo el sistema.

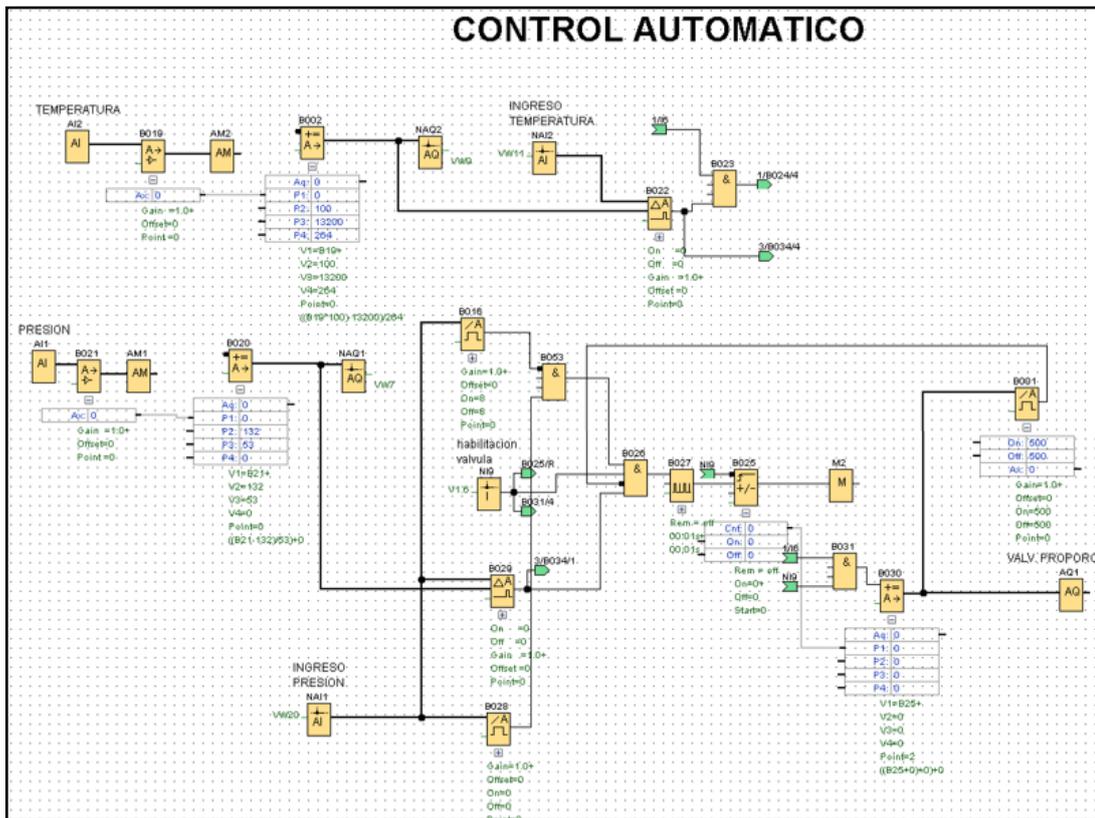


Figura 23-4. Programación para el control automático del sistema

Realizado por: ALMACHE, Crishtian, 2020

- Secuencia de los cilindros neumáticos

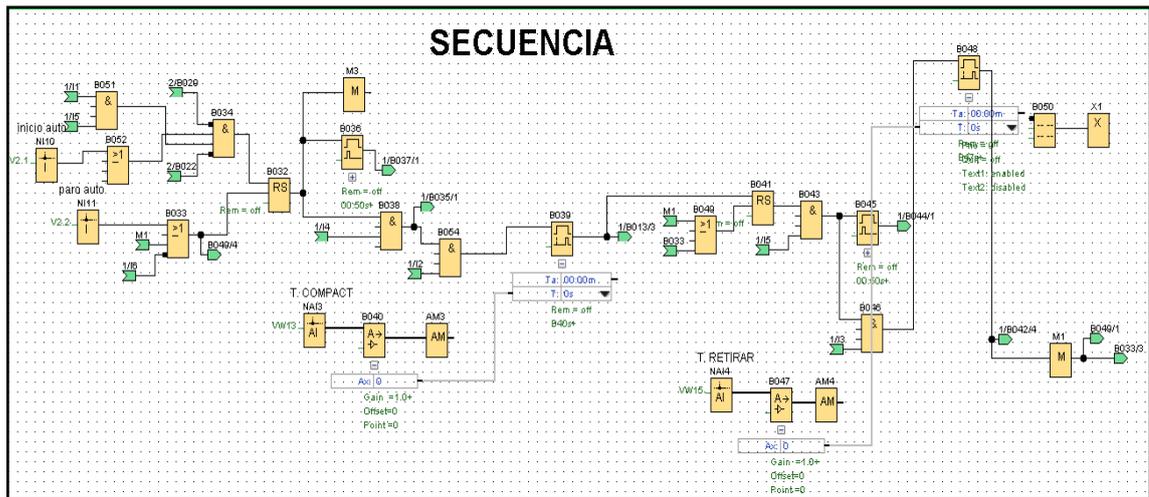


Figura 24-4. Programación para la secuencia de los cilindros neumáticos

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

La secuencia de los cilindros neumáticos se la realizó dependiendo de nuestro proceso de compactación que en este caso primero baja el cilindro superior hasta la posición del sensor, seguido a ello sube el cilindro inferior hasta la detección del sensor central, una vez realizado la compactación, el cilindro superior regresa a la posición inicial y el cilindro inferior sube completamente para retirar la briqueta una vez retirada el cilindro inferior regresa a la posición inicial.

4.5.1.3.2 Carga y transferencia del programa

Una vez verificada que el programa no presenta errores se procede a realizar la carga y transferencia del mismo hacia el controlador, la interfaz se guardará en una memoria SD que se encuentra en el interior del LOGO.

Finalmente, para protección del sistema se generó una clave para el ingreso de la página web, los datos son los siguientes:

- Nombre punto de acceso: RED_LOGOV8
- URL: 192.168.0.7
- Nombre de usuario: Web User
- Clave: LOGO

4.6 Costos directos, indirectos y totales de la máquina briquetadora

Los costos que se detallan a continuación son los que se necesitaron para el rediseño construcción y la automatización de la máquina briquetadora.

4.6.1 Costos directos

A continuación, se presenta todos los elementos y materiales que se ocuparon para la construcción de las resistencias eléctricas, implementación de dispositivos neumáticos y la automatización de la máquina briquetadora.

Tabla 2-4: Costos de materiales en rediseño y automatización de máquina briquetadora

Descripción	Cantidad	Precio unitario [\$]	Subtotal [\$]
Resistencias eléctricas	4	23,00	92,00
Módulo Lógico LOGO 8	1	214,00	214,00
Unidad Ampliación Salidas Analógicas LOGO	1	180,00	180,00
Fuente de Poder Logo	1	120,00	120,00
Base Fusible 10x38 CSC 32 [A]	1	1,80	1,80
Fusible 10x38 CSC 1 [A]	1	0,43	0,43
Breaker riel EBAS 1P 16 [A]	1	2,40	2,40
Canaleta Ranurada CSC 25x40 [mm]	1	5,20	5,20
Gabinete metálico 400x300x200 [mm]	1	29,50	29,50
Riel Din 35 [mm] CSC	1	2,15	2,15
Borne para riel 2,5 [mm] #12	21	0,27	5,67
Borne para riel 4 [mm] #10	4	0,35	1,40
Tapa para borne 2,5 [mm]	5	0,15	0,75
Tapa para borne 4 [mm]	2	0,18	0,36
Tope de borne	3	0,18	0,54
Router	1	26,50	26,50
Cable de red Router a LOGO	1	1,00	1,00
Racor recto ½ x 10 [mm]	1	2,90	2,90
Racor recto 1/8 x 10 [mm]	3	1,75	5,25
Silenciador bronce sinterizado	1	1,50	1,50
Silenciador bronce 1/8	1	0,85	0,85
Selector 22 [mm] led CSC	1	1,65	1,65
Luz 22 [mm] CSC verde 24 [V] DC	1	1,50	1,50
Neplo ½	1	3,00	3,00
Enchufe blindado 2 patas	1	0,45	0,45
Cable concéntrico 2x16	3	0,50	1,50
Prensa estopa PG16	1	0,50	0,50
Prensa estopa PG29	1	1,00	1,00

Descripción	Cantidad	Precio unitario [\$]	Subtotal [\$]
Válvula proporcional de presión	1	430,00	430,00
Transmisor de presión Danfoss	1	170,00	170,00
Relé de estado sólido 1p	1	12,25	12,25
Relé de estado sólido 3p	1	30,00	30,00
Transmisor de temperatura 4-20 mA	1	32,00	32,00
PT100/resorte 200°C	1	50,00	50,00
SUBTOTAL			1428,05

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.6.1.1 Costo de mano de obra, equipos y herramientas

Para el cálculo del costo de la mano de obra, se considera el salario para empleadores del sector metal mecánica, además del costo de los diferentes equipos y herramientas utilizados para la construcción de las resistencias y la implementación del sistema de control automático.

Tabla 3-4: Costos de equipos y herramientas

Descripción	Costo/hora	Horas de equipo [h]	Subtotal [\$]
Cortadora guillotina	2,00	1	2,00
Prensa dobladora	5,50	2	11,00
Soldadora de arco	2,50	1	2,50
Compresor de aire	3,00	10	30,00
Molino de mano	0,75	12	9,00
Tamiz	0,50	12	6,00
Cierra	0,60	5	3,00
Flexómetro	0,75	8	6,00
Calibrador	1,00	8	8,00
Herramientas menores	1,00	18	18,00
SUBTOTAL			95,50

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.6.1.2 Costos por transporte

El transporte de la máquina para la utilización fuera del laboratorio, adicional al transporte para adquisición de los dispositivos electrónicos y materia prima para la fabricación de las briquetas fue aproximadamente 80 dólares

4.6.1.3 Total, de costos directos

La sumatoria de los costos directos de los elementos y dispositivos adquiridos, más la mano de obra y costos de equipos, herramientas y transporte es:

Tabla 4-4: Total de costos directos

Descripción	Costo/hora
Costo de materiales	1428,05
Costos mano de obra	50,00
Costos de equipos y herramientas	95,00
Costo de transporte	80,00
SUBTOTAL	1653,05

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.6.2 Costos Indirectos

Se considera como costos indirectos a los costos de ingeniería y supervisión del rediseño y automatización de la máquina briquetadora.

Tabla 5-4: Total de costos indirectos

Descripción	Costo/hora	Horas [h]	Subtotal [\$]
Costo por diseño resistencias	3,00	20	60,00
Costos por implementación sistema neumático	3,00	15	45,00
Costo por Automatización	3,00	10	30,00
Costo por supervisión	5,00	15	75,00
SUBTOTAL			210,00

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

4.6.3 Costos totales

Representa la sumatoria de los costos directos y costos indirectos de la máquina briquetadora.

Tabla 6-4: Total de costos máquina briquetadora

Descripción	Subtotal
Costos directos	1653,05
Costos indirectos	210,00
SUBTOTAL	1863,05

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

CAPÍTULO V

5. FABRICACIÓN DE BRIQUETAS Y DETERMINACIÓN DE PODER CALÓRICO

En el presente capítulo se detalla cómo se fabricaron nuestras briquetas, específicamente que valores de presión, temperatura y tiempo de compactado se usaron para obtener buenas características físico-térmicas de las briquetas, para posterior realizar un análisis de poder calorífico de cada biomasa.

5.1 Elaboración de briquetas

5.1.1 *Borra de café*

5.1.1.1 *Obtención de la borra de café*

La materia prima de la borra de café se la pudo conseguir en cafeterías de la ciudad de Riobamba, puesto que en ellas utilizan el café molido para la elaboración de sus productos, y los residuos en su totalidad son arrojados a contenedores de basura orgánica. Entonces se procedió a visitar cada establecimiento para pedir donado los residuos de café para nuestras experimentaciones. Cabe recalcar que la mayoría de las personas accedieron a regalar esta biomasa.

La borra de café no fue sometido a ningún tipo de molienda y tamizaje, puesto que su tamaño de partículas era muy pequeño y en las cafeterías ya se realizan molienda del producto para la extracción del café.

5.1.1.2 *Parámetros para la obtención de briquetas de borra de café*

Una vez realizada la mezcla se procede a hallar los parámetros de presión, temperatura y tiempo de compactado de la borra de café.

La primera iteración del tiempo para este proceso se lo fijó a 10 minutos, y la experimentación se la realizó con una presión mínima de 3 [BAR] y 60 [°C] de temperatura. Una vez finalizada la compactación la briqueta salió completamente destruida y demasiada húmeda, tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 1-5. Briqueta de borra de café a 3 [Bar] y 60 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Como se observa en la figura la briqueta se destruyó debido a la humedad que presentaba, y por ello se decidió realizar la compactación a su máxima capacidad 8 [Bar] y 120 [°C] y 15 min.



Figura 2-5. Briqueta de borra de café a 8 [Bar] y 120 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Como era de esperarse la briqueta con estos parámetros presentó los mejores resultados, utilizando la máxima capacidad de presión, se puede notar mínimas grietas en su estructura, pero su contextura era rígida y sin humedad que pueda disgregar a la briqueta. Se observa también que el aglutinante jugaba un papel importante para las características físicas de la briqueta de borra de café.

Tabla 1-5: Parámetros de fabricación briquetas de borra de café

Biomasa	Presión	Temperatura	Tiempo
Borra de Café	8 [bar]	120 [°C]	900 [s]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Se comprueba la temperatura en el centro de la briqueta para el tiempo de 900 [s]. El procedimiento se lo realiza con ayuda de los diagramas de temperatura transitoria o diagramas de Heisler. A continuación, se muestra algunas de las propiedades necesarias para el cálculo.

Tabla 2-5: Propiedades físico térmicas de la borra de café

Biomasa	Conductividad Térmica	Densidad	Calor Específico
Borra de Café	0,171 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	461,36 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1,540 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}\right]$

Fuente: (Riaño, 2017)

Con estos valores se halla la difusividad térmica junto con los valores adimensionales de Biot y Fourier.

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{hr_o} = 0,517$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} = 2,406 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2} = 0,392$$

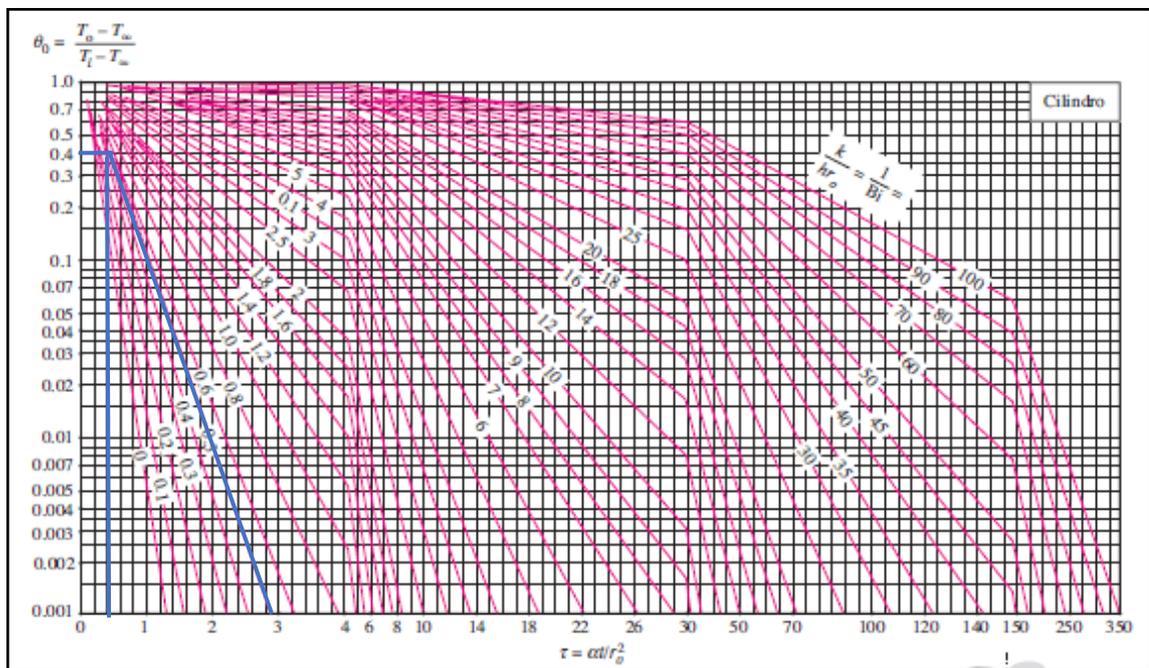


Gráfico 1-5. Diagrama de temperatura transitoria para la borra de café

Fuente: (Çengel, 2007)

$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$0,4 = \frac{T_o - 120^{\circ}C}{10^{\circ}C - 120^{\circ}C}$$

$$T_o = 76^{\circ}C$$

Para la briqueta de borra de café la temperatura en el centro del producto es 76°C, en 15 minutos de secado.

5.1.2 Cascarilla de arroz

5.1.2.1 Obtención de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es la corteza del arroz la cual en las grandes industrias arroceras son desechados o donado a los campesinos para utilizarlos con su ganado y cultivos. La ciudad de Riobamba no se caracteriza por presentar cultivos de arroz en su territorio y por ello esta biomasa se la pudo conseguir en la ciudad de Machala donde las industrias arroceras generan grandes cantidades de cascarilla de arroz, se visitó una de estas industrias, pero a diferencia de la borra de café conseguir este producto fue más difícil, debido a que presenta otras aplicaciones como alimento para los animales, abono para cultivos y para utilizarlos como camas para las vacas.



Figura 3-5. Cascarilla de arroz previo a molienda.

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Una vez obtenida la materia prima por su estructura se prefirió realizar un proceso de molienda para disminuir el tamaño de sus partículas esto se lo realizó con ayuda de un molino de mano.

5.1.2.2 Parámetros para la obtención de briquetas de cascarilla de arroz

Inicialmente al igual que la borra de café el tiempo de compactado se la dejó en 5 minutos y la experimentación se la realizó con 4 [Bar] y 50 [°C].



Figura 4-5. Briqueta de cascarilla de arroz a 4 [Bar] y 50 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Con estos parámetros la briqueta al realizarle una pequeña fuerza de aplastamiento se destruyó, existía humedad en los extremos de la briqueta, por lo tanto, se aumentó la presión únicamente a 6 [Bar] y aumentando la temperatura a 80 [°C] debido a que la humedad de la misma había desaparecido casi en su totalidad a esa temperatura.



Figura 5-5. Briqueta de cascarilla de arroz a 6 [Bar] y 80 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Con los parámetros expuestos la briqueta de cascarilla de arroz presento una estructura sólida sin grietas en ninguna de sus secciones.

Tabla 3-5: Parámetros de fabricación briquetas de cascarilla de arroz

Biomasa	Presión	Temperatura	Tiempo
Cascarilla de arroz	6 [bar]	80 [°C]	300 [s]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Se comprueba la temperatura en el centro de la briqueta para el tiempo de 300 [s]. El procedimiento se lo realiza igual que la borra de café. A continuación se muestra algunas de las propiedades necesarias para el cálculo.

Tabla 4-5: Propiedades físico térmicas de la cascarilla de arroz

Biomasa	Conductividad Térmica	Densidad	Calor Específico
Cascarilla de arroz	0,036 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	130 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	0.265 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$

Fuente: (Kazarian, 1995)

Con estos valores se halla la difusividad térmica junto con los valores adimensionales de Biot y Fourier.

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{hr_o} = 0,109$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} = 1,044 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2} = 0,568$$

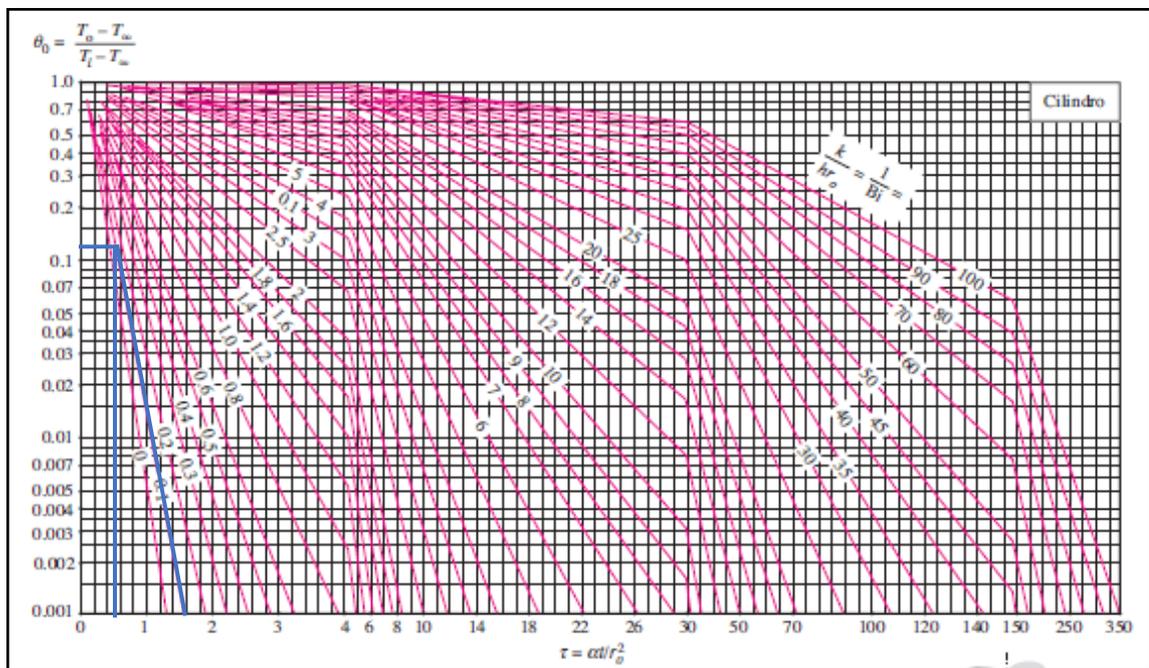


Gráfico 2-5: Diagrama de temperatura transitoria para la cascarilla de arroz

Fuente: (Çengel, 2007)

$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$0,12 = \frac{T_o - 80^{\circ}C}{10^{\circ}C - 80^{\circ}C}$$

$$T_o = 71,6^{\circ}C$$

Para la briqueta de cascarilla de arroz la temperatura en el centro del producto es 71,6°C en 5 minutos de secado.

5.1.3 Bagazo de caña de azúcar

5.1.3.1 Obtención del bagazo de la caña de azúcar

La caña de azúcar comúnmente es vendida en nuestra ciudad como jugo natural o su bagazo cortado en piezas más pequeñas, por ello para obtener esta biomasa se visitó los lugares donde poseían un trapiche que es la maquinaria para extirpar el jugo de la caña de azúcar, una vez realizado este proceso de extracción, la parte seca es desechado a contenedores de basura, sin darle ningún otro uso.



Figura 6-5. Residuos bagazo de caña de azúcar

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Con la obtención de este producto se procedió a cortar en piezas más pequeñas y posterior realizar el proceso de molienda con la ayuda de un molino de mano, debido a que al momento de realizar el proceso de compactación iba a existir grietas por la presencia de espacios entre las partículas de la briqueta.

5.1.3.2 Parámetros para la obtención de briquetas de bagazo caña de azúcar

El proceso de compactación y secado se inició con 3 [Bar] de presión y 60 [°C] de temperatura, además se tomó como referencia a las anteriores biomásas y se determinó el tiempo de compactado en 10 minutos.



Figura 7-5. Briqueta de bagazo caña de azúcar a 3 [Bar] y 60 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

El producto, aunque presenta pequeñas grietas fueron aceptables, debido a que no se necesitó de mucha presión comparando con las anteriores biomásas, incluso el desprendimiento de la parte superior fue debido a la temperatura de secado, por lo que se decidió aumentar a 4 [Bar], 110 [°C] y 15 minutos por su alto grado de humedad.



Figura 8-5. Briqueta de bagazo caña de azúcar a 4 [Bar] y 110 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Los resultados fueron acertados para este tipo de biomasa, tenía buenas propiedades físicas y solo se necesitó de mínimo 4 [Bar] de presión para su compactación.

Tabla 5-5: Parámetros de fabricación briquetas bagazo caña de azúcar

Biomasa	Presión	Temperatura	Tiempo
Bagazo caña de azúcar	4 [bar]	110 [°C]	900 [s]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Se comprueba la temperatura en el centro de la briqueta para el tiempo de 900 [s]. El procedimiento se lo realiza igual que las anteriores biomásas. A continuación se muestra algunas de las propiedades necesarias para el cálculo.

Tabla 6-5: Propiedades físico térmicas del bagazo de caña de azúcar.

Biomasa	Conductividad Térmica	Densidad	Calor Específico
Bagazo caña de azúcar	0,042 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	150 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	2.46 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$

Fuente: (Reyes et al., 2006)

Con estos valores se halla la difusividad térmica junto con los valores adimensionales de Biot y Fourier.

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{hr_o} = 0,127$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} = 1,138 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2} = 0,185$$

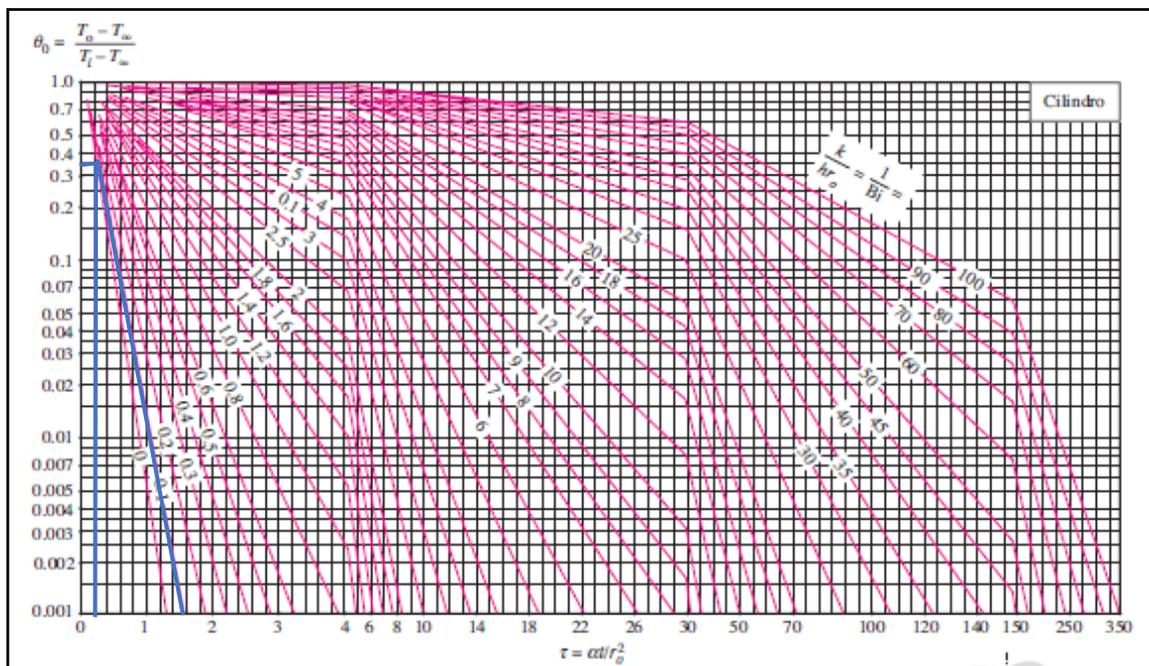


Gráfico 3-5. Diagrama de temperatura transitoria para el bagazo de caña de azúcar

Fuente: (Çengel, 2007)

$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$0,35 = \frac{T_o - 110^{\circ}C}{10^{\circ}C - 110^{\circ}C}$$
$$T_o = 75^{\circ}C$$

Para la briqueta de bagazo de caña de azúcar la temperatura en el centro del producto es $75^{\circ}C$ en 15 minutos de secado.

5.1.4 Residuos de cebada

5.1.4.1 Obtención residuos de cebada

Los residuos o cascarilla de cebada son los desechos post proceso de trituración del grano para convertirla en harina. Como en las anteriores biomásas esta cascarilla en la mayoría de los casos es desechada, pero otros optan por llevar como alimento para el ganado o abono en sus cultivos.



Figura 9-5. Residuos cascarilla de cebada

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

De igual manera se procedió a moler la cascarilla hasta tener residuos de cebada en polvo.

5.1.4.2 Parámetros para la obtención de briquetas de cascarilla de cebada

Con la mezcla preparada se procedió a encontrar los parámetros de presión y temperatura para la fabricación de las briquetas, por lo tanto, en la primera experimentación se utilizó 3 [Bar] de presión y $80 [^{\circ}C]$ para un tiempo de 5 minutos.



Figura 10-5. Briqueta de cascarilla de cebada a 3 [Bar] y 80 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Aunque no se observaron demasiadas grietas en su estructura, al someterla a una fuerza de aplastamiento una capa de la briqueta se destruyó, por lo tanto, se decidió trabajar a una menor temperatura de 60 [°C] y aumentar a 4 [BAR] la presión y el tiempo a 10 minutos.



Figura 11-5. Briqueta de cascarilla de cebada a 4 [Bar] y 60 [°C]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Los resultados de esta briqueta fueron los mejores, aunque existen pequeñas rupturas de su capa exterior la misma presentaba buenas características físicas en dureza y resistencia, además que en la sección transversal y longitudinal no existía ningún tipo de grieta.

Tabla 7-5: Parámetros de fabricación briquetas de cascarilla de cebada

Biomasa	Presión	Temperatura	Tiempo
Cascarilla de cebada	4 [bar]	60 [°C]	600 [s]

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Se comprueba la temperatura en el centro de la briqueta para el tiempo de 600 [s]. El procedimiento se lo realiza igual que la borra de café. A continuación se muestra algunas de las propiedades necesarias para el cálculo.

Tabla 8-5: Propiedades físico térmicas de la cascarilla de cebada

Biomasa	Conductividad Térmica	Densidad	Calor Específico
Cebada	0,258 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	387.2 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	0,548 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$

Fuente: ((Pregon Agropecuario, 2017))

Con estos valores se halla la difusividad térmica junto con los valores adimensionales de Biot y Fourier.

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{hr_o} = 0,78$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} = 1,216 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_o^2} = 1,321$$

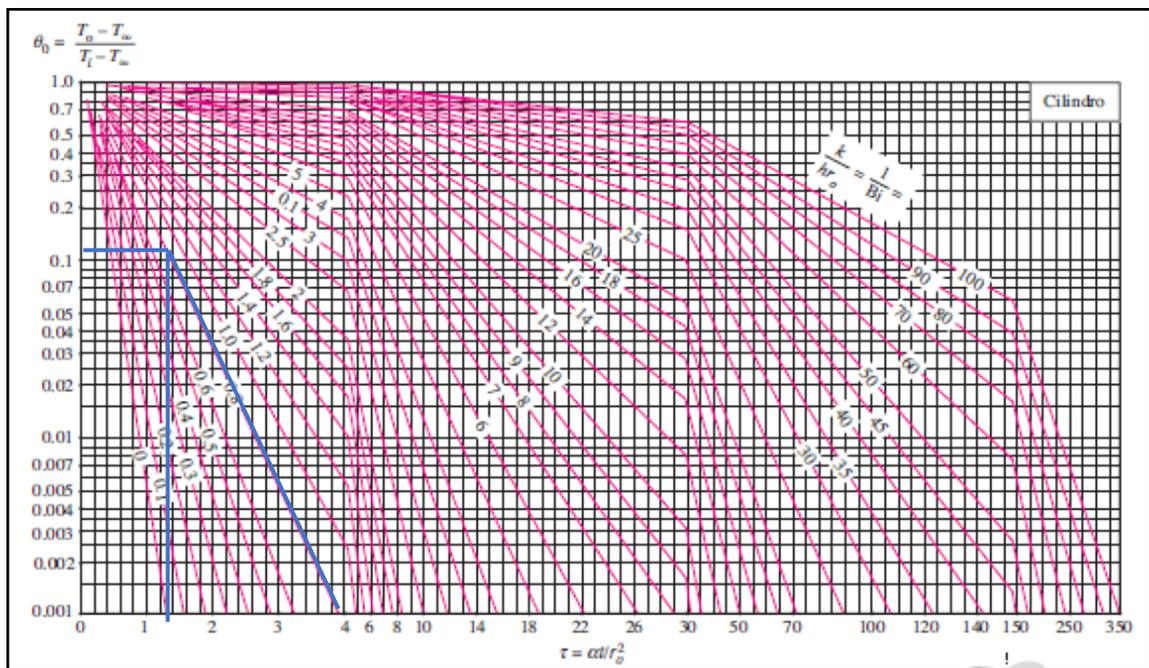


Gráfico 4-5: Diagrama de temperatura transitoria para los residuos de cebada

Fuente: (Çengel, 2007)

$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$0,11 = \frac{T_o - 60^{\circ}\text{C}}{10^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}}$$

$$T_o = 54,5^{\circ}\text{C}$$

Para la briqueta de cebada la temperatura en el centro del producto es 54,5°C en 5 minutos de secado.

5.2 Análisis de Resultados

5.2.1 Determinación poder calorífico de las briquetas de biomasa

Para la determinación del poder calorífico de las briquetas se la puede calcular mediante tres formas diferentes:

- Método Experimental (Bomba Calorimétrica)
- Análisis Bromatológico
- Análisis de su composición química (Análisis último)

En nuestro caso se utilizará el método experimental en base a la norma ASTM D-240 la cual utiliza una bomba calorimétrica para determinar el poder calorífico de un combustible sólido.

5.2.1.1 Poder calorífico superior (Bruto)

El poder calorífico superior se lo halló con un calorímetro adiabático realizado en el Laboratorio de Petróleos de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, bajo el procedimiento de la norma ASTM D-240, a volumen constante y en condiciones atmosféricas de presión 541, 6 a 543,8 [mmHg] y temperatura 20,3 a 22,3 [°C].

5.2.1.1.1 Procedimiento para cálculo de poder calorífico.

Como se mencionó anteriormente este proceso es realizado con ayuda de un calorímetro adiabático el cual es utilizado para medir la cantidad de calor de contiene un combustible sólido. En este caso la maquinaria funciona por transferencia de calor entre una bomba de oxígeno y el agua contenido en un recipiente metálico (Arroyo, 2016, p. 23).

El calorímetro utilizado es de la marca Parr modelo 1241.



Figura 12-5. Calorímetro adiabático

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Según la norma ASTM D-240 se recomienda realizar tres repeticiones en cada biomasa para comparar sus resultados y para ello se utiliza la siguiente ecuación para hallar el poder calórico superior.

$$PCS = \frac{\Delta T * C_1 - \Delta l_{alambre} * C_2}{\Delta m} \quad (27)$$

Donde:

PCS = Poder calórico superior de la muestra $\left[\frac{J}{g} \right]$

ΔT = Diferencia del gradiente de temperatura $(T_f - T_i)$ $[\text{°C}]$

C_1 = Constante del calorímetro, en base a su calibración por medio de pastillas de benzoico de 1 gramo. $7654,7 \left[\frac{J}{\text{°C}} \right]$

$\Delta l_{alambre}$ = Diferencial de la longitud del alambre de ignición Ni – Cr, antes y después de la combustión $(l_i - l_f)$ $[cm]$

C_2 = Constante del alambre de ignición No. 45C10 marca Parr. $9,6296 \left[\frac{J}{cm} \right]$

Δm = Diferencia del peso de las cenizas de la muestra $[g]$

Con estos parámetros se procede a hallar el poder calórico de las briquetas de los diferentes tipos de biomasa, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9-5: Resultados poder calorífico briquetas sin aglutinante.

Biomasa	Poder Calorífico Superior $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$
Borra de café	19,1396
Cascarilla de arroz	14,6765
Bagazo caña de azúcar	17,1199
Cascarilla de cebada	15,6766

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Fuente: (Departamento de Petróleos, 2020)

Como se observa los resultados la biomasa con mayor poder calorífico es la briketa con borra de café, y por ello se procede a realizar un ensayo adicional añadiendo al producto nanopartículas de alofán para observar la variación de esta propiedad térmica.

5.2.2 Briketas con nanopartículas de alofán

Para la fabricación de briketas de borra de café con nanopartículas de alofán, se consultó la concentración en peso de las nanopartículas y según (Martínez & Vargas, 2019), la adición de 0,05 a 5% aumenta el calor específico del producto y por tal razón a los 40 [g] de borra de café se le adicionó 2 [g] de nanopartículas de alofán equivalente al 5% de concentración, obteniendo los siguiente resultados:

Tabla 10-5: Poder calorífico borra de café con nanopartículas de alofán

Biomasa	Poder Calorífico Superior $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$
Borra de café con nanopartículas de alofán (50 PPB 5%)	23,1645

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Fuente: (Departamento de Petróleos, 2020)

Los resultados obtenidos muestran un aumento del 21% de poder calorífico entre las briketas de borra de café.

5.2.3 Comparativa del poder calorífico entre briketas con y sin aglutinante

Para realizar la comparativa correspondiente se observará los resultados de experimentaciones realizadas por otros autores.

Tabla 11-5: Resultados poder calorífico briquetas con aglutinante

Biomasa	Poder Calorífico Superior $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$
Borra de café	17,210
Cascarilla de arroz	13,800
Bagazo caña de azúcar	17,140
Cascarilla de cebada	13,400

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

Fuente: (Analuisa, 2018), (Valiente, 2017), (Maradiaga et al., 2017)

Como se logra observar en la comparativa de las tablas, si existe una diferencia entre resultados del poder calorífico de las briquetas de borra de café con y sin aglutinante, la diferencia es de aproximadamente 2 [MJ], lo que se entiende que el almidón de yuca si afecta al producto en cuestión de características térmicas.

El bagazo de caña de azúcar es comparado únicamente sin la utilización de algún tipo de aglutinante debido a la falta de información en este tipo de experimentaciones, pero se puede detallar que los resultados están dentro del rango, y en el caso de la cascarilla de arroz y residuos de cebada el poder calorífico fue superior en los resultados obtenidos con nuestras briquetas, a continuación, se muestra una gráfica comparativa de los poderes caloríficos de casa biomasa.

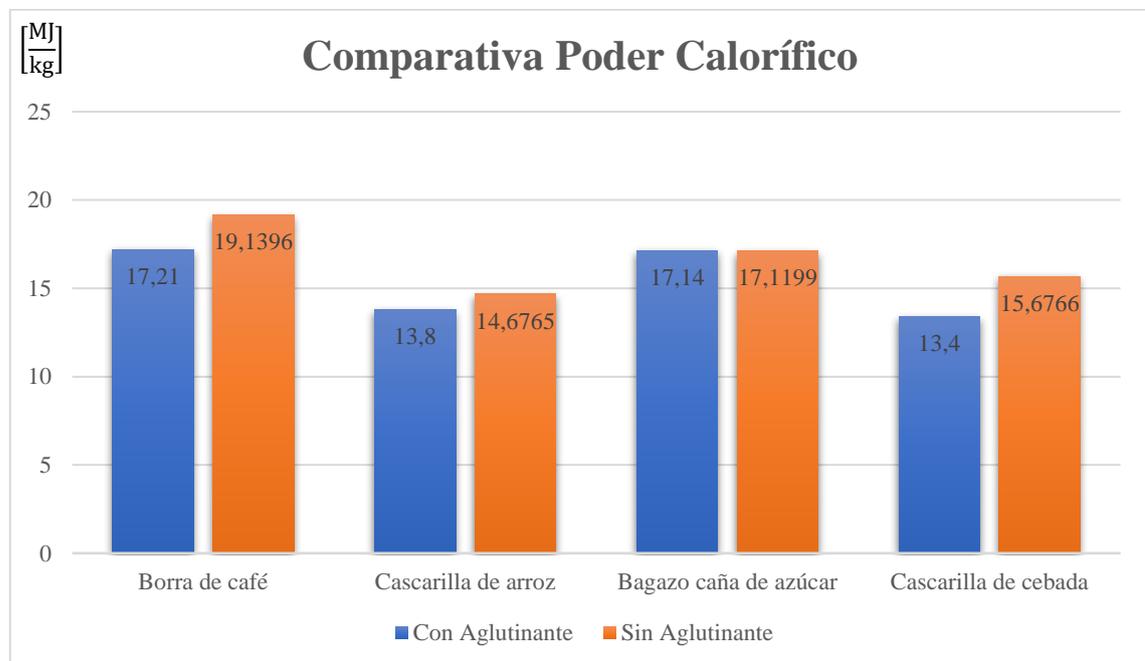


Gráfico 5-5: Comparativa poderes caloríficos de cada biomasa

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

En estas experimentaciones se confirma que el uso de algún tipo de aglutinante reduce en aproximadamente un 10% su poder calorífico.

5.2.4 Comparativa del poder calorífico briqueta de borra de café

La siguiente gráfica muestra la comparativa de los valores de poder calorífico de las briquetas de borra de café con diferentes aditivos.

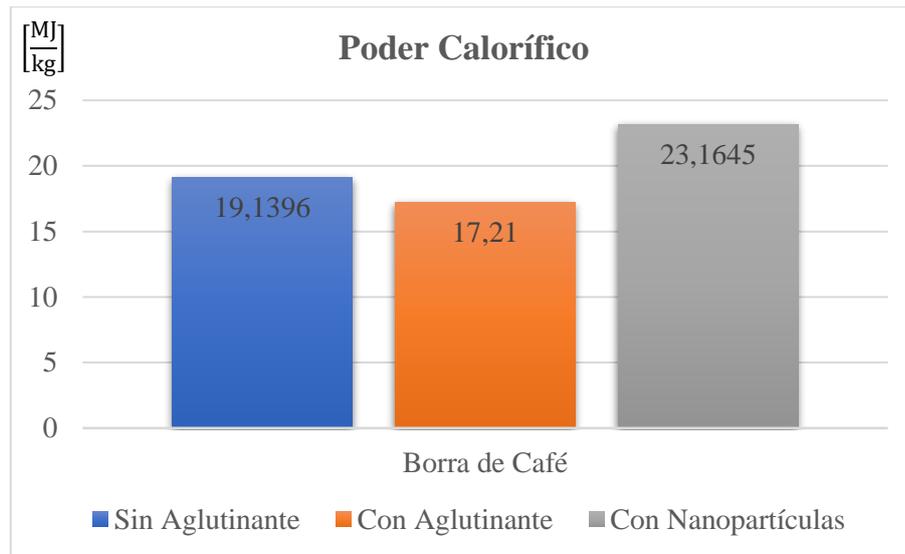


Gráfico 6-5. Poderes caloríficos briquetas de borra de café

Realizado por: ALMACHE, Cristhian, 2020

CONCLUSIONES

- Con la implementación de la válvula proporcional y el transmisor de presión la máquina briquetadora puede controlar la presión de trabajo de los cilindros neumáticos para el proceso de compactación en un rango de 1 a 8 Bar.
- La construcción e implementación de las resistencias de tipo abrazadera, permitió realizar proceso de secado durante el proceso de compactación que necesita cada biomasa para la obtención de las briquetas, logrando un rango de funcionamiento máximo de 200 [°C]
- Con el rediseño del circuito electrónico y la creación de una interfaz gráfica, se podrá controlar y visualizar los parámetros de presión, y temperatura del proceso de compactación desde cualquier dispositivo electrónico con conexión a la red del controlador Logo.
- Con todos los sistemas implementados la máquina briquetadora funciona correctamente para la fabricación de briquetas de diferentes tipos de biomasa, además mediante las pruebas de funcionamiento se definió las secuencias de trabajo de los cilindros y los tiempos máximos de trabajo de la máquina.
- En la fabricación de briquetas de biomasa se hallaron los parámetros de presión y temperatura mínimos para obtener características físicas aceptables, para posteriores aplicaciones como alimentación en quemadores de calderas, o simplemente para uso doméstico.
- Se comprobó que omitir la utilización de aglutinantes en la fabricación de briquetas aumenta el poder calorífico de las mismas en aproximadamente 10%, estos resultados se obtuvieron hallando los parámetros adecuados de presión de compactación y tiempo de secado en la máquina briquetadora.
- Finalmente, la borra de café es la biomasa con más poder calorífico (19,1396 MJ/kg), y con la adición de nanopartículas de alofán este valor se incrementó en aproximadamente un 21% (23,1645 MJ/kg)

RECOMENDACIONES

- Al iniciar el proceso de fabricación de briquetas de cualquier tipo de biomasa verificar que los moldes que alberga la materia prima se encuentren libre de suciedad o residuos de otras biomasa.
- Se debería aumentar un sistema de alimentación de la materia prima a la maquina briquetadora debido a que el proceso se lo realiza de forma manual y existen muchas pérdidas de la materia a utilizarse.
- Se recomienda utilizar la máquina para fabricar briquetas con más tipos de biomasa, para poder hallar sus parámetros de compactación y secado.
- Se debe controlar que el porcentaje de humedad de las briquetas se mantenga en un rango de 5 - 10%, mediante ensayos de laboratorio, con el fin de mejorar los resultados de poder calorífico de cada producto.
- Realizar pruebas de control de velocidad de los cilindros neumáticos previo al proceso de fabricación de briquetas, para evitar destrucción del producto al expulsarlo del molde de la máquina briquetadora.
- Se recomienda además realizar briquetas sin aglutinante y con diferentes concentraciones de nanopartículas de alofán para observar el comportamiento del poder calorífico ante la variación de este nuevo componente.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE GONZAGA, P.G. & SÁNCHEZ ANDRADE, B.A. Diseño, construcción y automatización de un horno eléctrico para el calentamiento de prepolymer y polyol en la elaboración de calzado para la empresa Calzado CASS. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Latacunga - Ecuador. 2014. [Consulta: 2 enero 2020]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/8300>.

ANALUISA LÓPEZ, D.S. & HERNÁNDEZ GAVILANES, E.V. Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba - Ecuador. 2018. [Consulta: 26 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/9206>.

ARÉVALO, J., QUISPE, G. & RAYMUNDO, C. "Sustainable Energy Model for the production of biomass briquettes based on rice husk in low-income agricultural areas in Peru". *Energy Procedia* [en línea], 2017, vol. 141, pp. 138-145. [Consulta: 26 noviembre 2019]. ISSN 1876-6102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.11.026. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217354322>. 2017.

ARROYO VINUEZA, J.S. Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Católica Salesiana. Quito-Ecuador. 2016. [Consulta: 16 enero 2020]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11994>.

ASSUREIRA ESPINOZA, E. & ASSUREIRA ESPINOZA, M. *Transformación de biomásas residuales en bio-combustibles sólidos* [en línea]. Lima - Perú: Guzlop Editoras, 2012. Disponible en: https://guzlop-editoras.com/web_des/ener01/biomasa/pld0464.pdf.

ASTIGARRAGA URQUIZA, J. *Hornos Industriales de Resistencias: Teoría, Cálculo y Aplicaciones*. Primera. Madrid - España: McGraw-Hill, 1994. ISBN 84-481-1937-1.

BALSECA SAMPEDRO, O.F., LÓPEZ ORTIZ, S.A., VITERI NÚÑEZ, E.F., ANALUISA LÓPEZ, D.S. & HERNÁNDEZ GAVILANES, E.V. "Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido". *Polo del Conocimiento* [en línea], 2018, vol. 3, no. 7, pp. 420-452. [Consulta: 28 noviembre 2019]. ISSN 2550-682X. DOI 10.23857/pc.v3i7.565. Disponible en: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/565>.

BERNASES LÓPEZ, C. *Biomasa un Mundo lleno de Energía* [en línea]. 2014. Disponible en: <https://es.slideshare.net/CrisBerLop/biomasa-34915153>.

BOARINI SORG, J.M. Utilización del bagazo de caña de azúcar para la elaboración de briquetas de combustible sólido para usos domésticos en la ciudad de Guatemala. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Rafael Landívar. Guatemala. 2006. Disponible en: biblio3.url.edu.gt/Tesis/2006/03/06/boarini-jonathan/boarini-jonathan.pdf. URL 03 T1173

CABEZAS ARÉVALO, R.I. Diseño de un Sistema de Compactación de Biomasa de Cascarilla de Arroz y Aserrín, en la Producción de Bloques Sólidos Combustibles (BSC). (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2010. [Consulta: 20 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/242>.

CAMPOS-VEGA, R., LOARCA-PIÑA, G., VERGARA-CASTAÑEDA, H.A. & OOMAH, B.D. "Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects". *Trends in Food Science & Technology* [en línea], 2015, vol. 45, no. 1, pp. 24-36. [Consulta: 30 noviembre 2019]. ISSN 0924-2244. DOI 10.1016/j.tifs.2015.04.012. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224415001193>. 2015

ÇENGEL, Y.A. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* [en línea]. (3a. ed.). México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. [Consulta: 8 enero 2020]. ISBN 978-1-4562-5252-6. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=4721702>.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. *Cultivemos Café, Manejo de Subproductos.* [blog]. [Consulta: 30 noviembre 2019]. Disponible en: https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/p1.

CORNEJO, M.Á. *Excelencia directiva para lograr la productividad* [en línea]. Santiago de Chile, CHILE: Editorial ebooks Patagonia, 2009. [Consulta: 30 diciembre 2019]. ISBN 978-956-8992-26-2. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=3196476>.

DÍAZ, G. *Del bagazo de caña se hace de 'to* [blog]. 2018. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.trabajadores.cu/20180914/del-bagazo-de-cana-se-hace-de-to/>.

DURÁN, J., GÁMIZ, J., BARGALLÓ, R., DOMINGO, J., MARTÍNEZ, H. & MORÓN, J. *Electrotecnia.* Barcelona-España: Altamar, S.A, 2012. ISBN 978-84-267-1567-8.

ELECTRICFOR S.A. *Resistencias tipo abrazadera y lapas - Electricfor - Resistencias electricas* [blog]. 2019. [Consulta: 6 enero 2020]. Disponible en: <https://www.electricfor.es/es/333187/Resistencias-tipo-abrazadera-lapas.htm>.

ELECTROCREA. *PT100 RTD -200 a 450C Sensor de temperatura* [blog]. 2019. [Consulta: 9 enero 2020]. Disponible en: <https://electrocrea.com/products/sensor-de-temperatura-pt100-rtd-200-a-450c>.

FERRARI, J., VILLAGRA, E., CLAPS, L. & TITTONEL, P. "Reutilización de bagazo de cebada cervecera por secado y pelletización como suplemento forrajero". Researchgate [en línea]. 2016. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332332753_REUTILIZACION_DE_BAGAZO_DE_CEBADA_CERVECERA_POR_SECADO_y_PELLETIZACION_COMO_SUPLEMENTO_FORRAJERO.

FONSECA CUENCA, E.G. & TIERRA TINGO, L.F. Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2011. [Consulta: 26 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/1883>.

FORERO NUÑEZ, C.A., GUERRERO FAJARDO, C.A. & SIERRA VARGAS, F.E. "Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación". *ITECKNE* [en línea], 2012, vol. 9, no. 1. [Consulta: 15 julio 2019]. ISSN 2339-3483, 1692-1798. DOI 10.15332/iteckne.v9i1.57. Disponible en: <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/57>.

FREDES NÚÑEZ, N.A. Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la Región de Los Lagos. (Trabajo de titulación).

(Pregrado). [en línea]. Universidad de Chile. Santiago-Chile. 2014. [Consulta: 28 noviembre 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116613>.

GALLO CAIZA, V.M. Aplicación del diseño concurrente de una máquina briquetadora. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2017. [Consulta: 6 noviembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/7205>.

GARCÍA, D. *Logo! Web Editor para visualizar páginas web en Smartphone, Tablet y PC - infoPLC* [blog]. 2018. [Consulta: 13 enero 2020]. Disponible en: <https://www.infoplc.net/noticias/item/105120-siemens-logo-web-editor-paginas-web-smartphone-tabletas>.

GARCÍA, R. *Combustión y Combustibles* [blog]. 2001. S.l.: s.n. Disponible en: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32606588/Combustion_y_combustibles.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DStructure_and_Technofunctional_Propertie.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191219%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20191219T184024Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=f4c0e97de4d535eb44ae90449689da6655d1d36b460f25e08c18bf79e3bc6059.

GLADSTONE, S., TERSIGNI, V., KENNEDY, J. & HALDEMAN, J.A. "Targeting Briquetting as an Alternative Fuel Source in Tanzania". *Procedia Engineering* [en línea], 2014, vol. 78, pp. 287-291. [Consulta: 28 noviembre 2019]. ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/j.proeng.2014.07.069. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581401056X>.

HERNÁNDEZ GAVIÑO, R. *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. México: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-607-442-842-1.

HOLMAN, J. *Transferencia de Calor*. Octava. Madrid - España: McGraw-Hill, 1998. ISBN 84-481-2040-X.

INAMHI. *Red de estaciones automáticas Hidrometeorológicas* [blog]. 2020. [Consulta: 7 enero 2020]. Disponible en: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>.

JANCZAK, J. *Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos* [blog]. 2017. [Consulta: 29 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/p2070s/p2070s06.htm>.

LEÓN, D. Evaluación del rendimiento de dos variedades mejoradas y una tradicional, de Cebada (*Hordeum vulgare* L.) en Tunshi, parroquia Licto, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2011. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/668>.

MARADIAGA RODRIGUEZ, W.D., WAGNER EVANGELISTA, A., SETTE JR, C.R., ALVES JÚNIOR, J. & FERNANDES DA SILVA, M. "Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar". *Bosque (Valdivia)* [en línea], 2017, vol. 38, no. 3, pp. 527-533. [Consulta: 16 enero 2020]. ISSN 0717-9200. DOI 10.4067/S0717-92002017000300010. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-92002017000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

MARCOS MARTÍN, F. "Pélets y Briquetas". *AITIM* [en línea], 1995, vol. 171, pp. 54-62. Disponible en: https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf.

MARTÍNEZ QUISHPI, A.F. & VARGAS ROBAYO, E.A. Evaluación de la capacidad calorífica del propilenglicol mediante la adición de nanopartículas de alofán [en línea]. 2019. S.l.: s.n. [Consulta: 10 febrero 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13244>.

MERCADO, A. *¿Que son las briquetas?* [en línea]. 2015. Disponible en: <https://mercadoarg.blogspot.com/2015/05/que-son-las-briquetas.html>.

MIRANDA IBÁÑEZ, J.L., MOLINER ÁLVAREZ, R. & Blesa MORENO, M.J. *Procedimiento de preparación de briquetas combustibles sin humo con carbón y biomasa* [blog]. 2014. Madrid. [Consulta: 28 noviembre 2019]. 2 183 706. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/5060.200100403>

MONTERO PUERTAS, I. *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Badajoz: Universidad de Extremadura, 2013. ISBN 978-84-7723-711-2.

NOGUÉS, F.S., GARCÍA-GALINDO, D. & REZEAU, A. *Energía de la biomasa. Vol. I* [en línea]. Zaragoza-España: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. [Consulta: 28 noviembre 2019]. ISBN 978-84-16935-56-7. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/esPOCHsp/detail.action?docID=5214090>.

OGATA, K. *Ingeniería de control moderna*. Quinta. Madrid: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-84-8322-660-5.

PAREDES CEDEÑO, G.N. Aprovechamiento de los residuos del café molido y pasado para elaborar un biocombustible de segunda generación. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador. 2019. [Consulta: 19 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19242>.

PÉREZ, J. *Iniciación a la neumática* [blog]. 2014. [Consulta: 3 enero 2020]. Disponible en: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursosdigitales/2014/11/21/iniciacion-a-la-neumatica/>.

PREGON AGROPECUARIO. *Bagazo de cebada, una alternativa para alimentar al ganado* [blog]. 2017. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.pregonagropecuario.com/cat.php?txt=10284>.

REYES, J., PÉREZ, R. & BETANCOURT, J. *Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de contaminación ambiental* [en línea]. S.l.: Universidad Central de Las Villas. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/31185944/Uso_de_la_biomasa_ca%C3%B1era_como_alternativa_para_el_incremento.

RIAÑO, C.E. *Tecnología del café* [blog]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/02/213956_2-9-1-13.pdf.

RODRÍGUEZ, P. Dimensionado y Simulación de plantas de generación de energía eléctrica a partir de Biomasa. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad de Sevilla. Sevilla-España. 2012. [Consulta: 5 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5098/>.

RODRIGUEZ VALENCIA, N. & ZAMBRANO FRANCO, D.A. *Los subproductos del café : Fuente de energía renovable* [blog], 2013, vol. 393. [Consulta: 19 diciembre 2019]. ISSN 0120-0178. Disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/351>.

ROJAS PÉREZ, L.C. Valorización de la cascarilla de cebada del proceso cervecero para la producción de xilitol. (Trabajo de titulación). (Doctorado). [en línea]. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 2019. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68774>.

SECRETARÍA DE ENERGÍA DE ARGENTINA. *Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa* [blog]. 2008. Argentina: Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera. Disponible en: http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf.

SOLÓRZANO CASTILLO, B.A. & SILVA CUEVA, C.A. Diseño y cálculo de una máquina para producir briquetas a partir de cascarilla de arroz. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador. 2015. [Consulta: 26 diciembre 2019]. Disponible en: <http://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/11838>.

THRÄN, D., PEETZ, D., SCHAUBACH, K., MAI-MOULIN, T., JUNGINGER, H.M., LAMERS, P. & VISSER, L. *Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017*. S.l.: IEA Bioenergy Task 40. ISBN 978-1-910154-32-8.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. *Briquetas de cascarilla de arroz y aserrín de pino, opción ecológica* Agencia de Noticias UN [blog]. 2017. Disponible en: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/briquetas-de-cascarilla-de-arroz-y-aserrin-de-pino-opcion-ecologica.html>.

URBÁEZ, C., CARBALLO, L., ARTEAGA, Y. & MÁRQUEZ, F. *Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás* [blog]. 2007. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml>.

VALIENTE MACK, A.C. Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del municipio de El Progreso, Jutiapa. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Rafael Landívar. Guatemala. 2017. Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2017/02/02/Valiente-Astrid.pdf>.

VARGAS, L. & ALVARADO, P. "Caracterización del subproducto cascarilla de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos". *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia* [en línea], 2013, vol. 23, no. 1, pp. 86-101. [Consulta: 26 diciembre 2019]. ISSN 2224-5545. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5069938>.

VARGAS LAZO, A.M. Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café. (Trabajo de titulación). (Maestría). [en línea]. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. 2018. [Consulta: 30 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/70087/>.

VENEGAS MARTINES, I. Diseño y selección de componentes de una máquina briquetadora de mediana capacidad. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. 2017. [Consulta: 20 noviembre 2019]. Disponible en: <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23023>.

VERA VELÁSQUEZ, A. Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de Nabusimake, municipio de Pueblo Bello-Cesar. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia

– UNAD. Valledupar-Colombia. 2014. [Consulta: 30 noviembre 2019]. Disponible en: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/6111>.

WIKI. *Transmisor de temperatura digital* [blog]. 2019. [Consulta: 9 enero 2020]. Disponible en: https://www.wika.es/t15_es_es.WIKA.

ZAPATA SAAD, A.J. Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirólisis. (Trabajo de titulación). (Maestría). [en línea]. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. 2016. [Consulta: 27 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/55986/>.