

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
MOLIENDA, DOSIFICACIÓN Y COMBUSTIÓN DE CARBÓN
PARA MODIFICAR LA GENERACIÓN DE CALOR EN LA
CALDERA DE LA EMPRESA LÁCTEOS EL RANCHO**

**EDIXSON ARBEY JIMÉNEZ SUÁREZ
WILLIAM BERNAL TORRES**



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

2009

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
MOLIENDA, DOSIFICACIÓN Y COMBUSTIÓN DE CARBÓN
PARA MODIFICAR LA GENERACIÓN DE CALOR EN LA
CALDERA DE LA EMPRESA LÁCTEOS EL RANCHO**

**EDIXSON ARBEY JIMÉNEZ SUÁREZ
WILLIAM BERNAL TORRES**

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

**Director:
OMAR A. GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

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

2009

*A mi esposa y a mis hijos,
por su paciencia y el
apoyo que me dieron en
todo momento, para
poder alcanzar este
logro, que más que mío,
es de ellos.*

EDIXSON ARBEY

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. FORMULACION DEL PROBLEMA	2
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	3
1.3.1 Objetivos Generales	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
2. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS	5
2.1 CLASIFICACION DE LAS CALDERAS	6
2.1.1 Por la disposición de los fluidos:	6
2.1.2 Por su Configuración:	7
2.1.3 Por el Mecanismo de transmisión de calor dominante:	7
2.1.4 Por el Combustible Empleado	7
2.1.5 Por el Tiro:	7
2.1.6 Por el Modo de Gobernar la Operación:	8
2.2 ELEMENTOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR	8
2.2.1 Hogar	9
2.2.2 Cámara de agua:	9
2.2.2.1 Calderas de gran volumen:	9
2.2.2.2 Calderas de mediano Volumen:	9
2.2.2.3 Calderas de pequeño Volumen:	10
2.2.3 Cámara de Vapor:	10
2.2.4 Cámara de humo	10
3. GENERALIDADES DEL CARBÓN MINERAL	11
3.1 FORMACIÓN	11
3.2 CLASIFICACIÓN	11

3.2.1	Clasificación de acuerdo a la edad	12
3.2.2	Clasificación según el poder calorífico	13
3.3	DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE CARBÓN	14
3.3.1	Antracita	14
3.3.2	Bituminoso	14
3.3.3	Sub-bituminoso	15
3.3.4	Lignitos	16
3.3.5	Turba	16
3.4	ANALISIS	17
3.4.1	Análisis Próximo	18
3.4.1.1	Humedad:	18
3.4.1.2	Cenizas:	19
3.4.1.3	Material volátil:	19
3.4.1.4	Carbón fijo:	19
3.4.1.5	Poder calorífico:	20
3.4.1.6	Azufre:	21
3.4.2	Análisis Último	21
3.4.2.1	Carbono	21
3.4.2.2	Hidrógeno	22
3.4.2.3	Nitrógeno	22
3.4.2.4	Oxigeno	22
3.5	PROPIEDADES PARA LA COMBUSTION	22
3.5.1	Índice de hinchamiento	23
3.5.2	Efecto de las cenizas	23
3.5.3	Tamaño de las partículas y temperaturas.	24
3.5.4	Capacidad de aglomeración	24
3.6	PROPIEDADES DEL CARBÓN PARA PULVERIZARLO	25
3.6.1	Índice de molienda Hardgrove	25
3.6.2	Humedad	25
3.6.3	Grado de finura	26

3.6.4	Abrasividad	26
3.7	COMBUSTION DE CARBONES	26
3.7.1	Proceso de combustión del carbón	27
3.7.2	Comportamiento del carbón durante el calentamiento	30
3.8	QUEMADORES DE CARBÓN	31
3.8.1	Quemadores sobre parrilla alimentados manualmente	32
3.8.2	Quemadores sobre parilla alimentados automáticamente	32
3.8.3	Quemadores de carbón pulverizado	32
4.	ANALISIS PRÓXIMO A UNA MUESTRA DE CARBÓN DE LANDAZURI SANTANDER	35
4.1	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD	36
4.2	DETERMINACIÓN DE LAS CENIZAS	37
4.3	DETERMINACIÓN DEL MATERIAL VOLÁTIL	38
4.4	DETERMINACIÓN DEL CARBÓN FIJO	40
4.5	DETERMINACIÓN DEL PODER CALORIFICO	41
5.	PROCESO DE DISEÑO DEL CARBO INYECCIÓN	44
5.1	DISEÑO TERMICO	44
5.1.1	Procedimiento de cálculo	46
5.1.2	Condiciones termodinámicas iniciales de la caldera	46
5.1.3	Cálculo del calor útil	48
5.1.4	Cálculo del calor perdido desde las paredes de la caldera hacia el ambiente	52
5.1.4.1	Pérdida de calor por convección a través de las paredes del hogar de la caldera	53
5.1.4.2	Pérdida de calor por convección y radiación en las dos placas verticales laterales del hogar	55
5.1.4.3	Pérdida de calor a través de la placa vertical frontal del hogar de la caldera	57
5.1.4.4	Pérdida de calor a través de la placa inferior (alta temperatura)	58
5.1.4.5	Pérdida de calor a través del semicilindro superior del hogar	59

5.1.4.6	Cálculo del calor perdido a través del cuerpo de la caldera	61
5.1.5	Cálculo del calor perdido a través de los gases producidos en la combustión	63
5.1.6	Cálculo de la cantidad de carbón a suministrar	66
5.1.7	RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE	67
5.2	DISEÑO MECANICO	71
5.2.1	SISTEMA DE DOSIFICACION	71
5.2.1.1	Diseño de los ejes	72
5.2.1.2	Placa limitadora	93
5.2.1.3	Embudo Inyector	93
5.2.1.4	Tolva	95
5.2.2	SISTEMA DE INDUCCION DE AIRE	98
5.2.2.1	Diseño de Quemador	99
5.2.2.2	Selección del ventilador	100
5.2.3	SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCION	110
5.2.4	Selección del molino de martillos	114
5.2.5	Selección del quemador a gas	114
6.	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL “CARBO INYECCION”	116
6.1	CONSTRUCCION	118
6.1.1	Construcción de los ejes	118
6.1.2	Construcción de la carcasa soporte de los ejes	119
6.1.3	Construcción del soporte del “Carbo Inyección”	121
6.1.4	Construcción del sistema de inyección de aire	121
6.1.5	Pintado del Carbo Inyección	122
7.	PRUEBAS DE CAMPO	123
7.1	PRUEBA DE INYECCION DE AIRE	123
7.2	PRUEBAS DE DOSIFICACION	124
7.3	PRUEBAS DE QUEMADO DE CARBÓN	127
7.3.1	Pruebas de quemado en Ladrillo y Tubos	127

7.3.2	Pruebas de quemado en la empresa Lácteos el Rancho	129
7.3.2.1	Proceso de pulverización	129
7.3.2.2	Proceso de secado	129
7.3.2.3	Proceso de Calentamiento y quemado	129
8.	CONCLUSIONES	135
9.	RECOMENDACIONES	136
10.	BIBLIOGRAFIA	137
	ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Poder calorífico superior promedio de algunos carbones colombianos	21
Tabla 2. Relaciones de aire combustible para diferentes carbones colombianos	28
Tabla 3. Análisis próximo carbón de Landázuri	43
Tabla 4. Gasto energético de la caldera leña vs. carbón	48
Tabla 5. Cálculo del área frontal con agua en la caldera	50
Tabla 6. Cálculo del flujo de vapor	51
Tabla 7. Cálculo del h para superficies con $T_s = 140^\circ\text{C}$	55
Tabla 8. Calor perdido por las placas laterales	57
Tabla 9. Cálculo del calor perdido por la parilla	59
Tabla 10. Cálculo del calor del semicilindro del hogar	61
Tabla 11. Calor perdido por el cuerpo y la chimenea de la caldera	62
Tabla 12. Cálculo del número de moles	64
Tabla 13. Cálculo del volumen de los gases	65
Tabla 14. Análisis próximo y último al carbón de Landázuri Santander	67
Tabla 15. Reacciones globales en la combustión de carbón	68
Tabla 16. Factores de Confiabilidad C_R	82
Tabla 17. Comparación de los tipos de rodamientos	85
Tabla 18. Rodamientos rígidos de bolas SKF	86
Tabla 19. Coeficientes de pérdida para diferentes ángulos	104
Tabla 20. Iteración del valor de f	108
Tabla 21. Especificaciones de los materiales usados	117
Tabla 22. CFM de aire entregado según el ángulo de la perilla	124
Tabla 23. Flujo de carbón entregado de acuerdo con la velocidad de los ejes	126

Tabla 24. Costos adicionales al combustible por día	130
Tabla 25. Comparación de costos madera vs. Carbón diario	131
Tabla 26. Costo Mantenimiento	132
Tabla 27. Comparación de uso de combustible	134

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Caldera de Lácteos el Rancho	5
Figura 2. Partes de una caldera Pirotubular	8
Figura 3. Clasificación del carbón de acuerdo a la edad	12
Figura 4. Clasificación según el rango	13
Figura 5. Carbón antracita	14
Figura 6. Carbón Bituminoso	15
Figura 7. Carbón Sub-bituminoso	15
Figura 8. Carbón Lignito	16
Figura 9. Turba	17
Figura 10. Representación de la composición del carbón y la denominación de sus componentes	18
Figura 11. Esquema ilustrativo del proceso de la combustión	27
Figura 12. Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbones	29
Figura 13. Esquema ilustrativo de la combustión de carbón pulverizado	31
Figura 14. Tipos de Quemadores de carbón pulverizado	33
Figura 15. Distribucion de planta de Lácteos el Rancho	44
Figura 16. Diagrama de la caldera de Lácteos el Rancho	45
Figura 17. Diagrama de Diseño Térmico	47
Figura 18. Diagrama de Procedimiento del cálculo del calo útil	49
Figura 19. Esquema del cambio de volumen de agua en la caldera	49
Figura 20. Mecanismos de transferencia de calor en las paredes de la caldera	52
Figura 21. Medición de temperatura del las paredes del hogar	53
Figura 22. Dimensiones laterales del hogar	56
Figura 23. Dimensiones frontales del hogar	57

Figura 24. Esquema de la parrilla del hogar	58
Figura 25. Esquema del semicilindro superior de hogar	60
Figura 26. Diagrama del diseño mecánico	71
Figura 27. Partes del sistema dosificador	72
Figura 28. Diagrama preliminar de los ejes	73
Figura 29. Motorreductor	73
Figura 30. Engranaje recto	74
Figura 31. DCL engranajes	76
Figura 32. Perspectiva de fuerzas sobre el engranaje A	77
Figura 33. Diagrama de fuerzas en el plano X – Y	78
Figura 34. Diagrama de cortante y flexión para el eje, plano X - Y	79
Figura 35. Diagramas de carga cortante y flexión, plano X - Z	79
Figura 36. Resistencia a la fatiga (S_n) en función de la resistencia a la tensión, para acero forjado con varias condiciones de superficies	81
Figura 37. Factor por tamaño	81
Figura 38. Rodamiento SKF 61805-2RZ	87
Figura 39. Dimensiones del eje conductor	88
Figura 40. Dimensiones del eje conducido	88
Figura 41. Vista en corte y detalle lateral del eje ranurado	89
Figura 42. Lados de un paralelepípedo trapezoidal	90
Figura 43. Eje conducido grafilado	92
Figura 44. Placa limitadora de los ejes dosificadores	93
Figura 45. Inyección de carbón al ducto de aire	94
Figura 46. Flujo alrededor de un cilindro	94
Figura 47. Embudo inyector	95
Figura 48. Dimensiones laterales de la tolva	97
Figura 49. Agitador de la tolva	98
Figura 50. Partes del sistema de inducción de aire	98
Figura 51. Esquema del quemador de carbón	100
Figura 52. Ventilador centrífugo y especificaciones	101

Figura 53. Sección transversal del cambio de sección	102
Figura 54. Sistema de inducción de aire	102
Figura 55. Contracción gradual	103
Figura 56. Diagrama de la velocidad del aire en el quemador	106
Figura 57. Diagrama de Moody	108
Figura 58. Subsistema de regulación de aire	110
Figura 59. Tabla de selección del Variador WEG CFW10	112
Figura 60. Tablero de control	113
Figura 61. Diagrama eléctrico del tablero de control	113
Figura 62. Molino de Martillos	114
Figura 63. Quemador de gas propano	115
Figura 64. Diagrama del proceso de construcción del "Carbo Inyección"	116
Figura 65. Construcción de los ejes	118
Figura 66. Ranurado de los ejes	119
Figura 67. Punzonado de la carcasa	120
Figura 68. Soldado y pulido de las bridas	120
Figura 69. Construcción del soporte del sistema	121
Figura 70. Ensamble del cambio de sección y quemador	121
Figura 71. Construcción de la válvula de regulación de aire	122
Figura 72. Pintado del Carbo Inyección	122
Figura 73. Anemómetro Erasmus EA-200	123
Figura 74. Posiciones de regulación de perilla	124
Figura 75. Malla de la tolva	125
Figura 76. Tendencia del flujo de carbón de acuerdo a las rpm	126
Figura 77. Planta de la empresa Ladrillos y Tubos	128
Figura 78. Quemado de carbón a 660°C	128
Figura 79. Pre calentamiento y acople del sistema al hogar	130
Figura 80. Costo energético mensual de la caldera de acuerdo al tipo de combustible usado	133

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Manual de mantenimiento y operación	139
Anexo 2: Planos del Carbo Inyección	147

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MOLIENDA, DOSIFICACIÓN Y COMBUSTIÓN DE CARBÓN PARA MODIFICAR LA GENERACIÓN DE CALOR EN LA CALDERA DE LA EMPRESA LÁCTEOS EL RANCHO *

AUTORES:

BERNAL TORRES, WILLIAM; JIMÉNEZ SUÁREZ, EDIXSON ARBEY **

PALABRAS CLAVES:

Caldera pirotubular, carbón pulverizado, análisis próximo y ultimo, generación de vapor, diseño térmico, diseño mecánico, perdidas en tubería, calor suministrado.

DESCRIPCION

Este documento tiene como objetivo establecer un conjunto de parámetros asociados a la selección, diseño y construcción del sistema de molienda, dosificación y combustión de carbón, sistema que se utilizara como fuente de energía para generar vapor en la caldera de la empresa "Lácteos El Rancho", ayudando así con la una reducción notable en los costos energéticos de la empresa y mejorando su competitividad en el mercado regional y nacional.

Los quemadores de carbón pulverizado son ampliamente utilizados en la generación de vapor a nivel industrial, es por esto que el diseño y construcción del sistema de dosificación y combustión de carbón pulverizado se hizo pensando en el beneficio económico de la empresa, teniendo también una gran importancia en la parte de afianzamiento de los conocimientos adquiridos durante los diferentes cursos de diseño mecánico y térmico.

El sistema de dosificación del "carbo inyección" fue construido con dos ejes de acero 1045 y con lámina metálica cold rolled calibre 18 y 16, también se utilizo perfil en L de acero estructural A36, el control de la dosificación de carbón se hace mediante un variador de frecuencia y la entrada de aire se regula con una válvula mariposa ubicada en la entrada del ducto de alimentación del ventilador centrifugo.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Omar Armando Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SYSTEM OF MILLING, DOSAGE AND COMBUSTION OF COAL TO MODIFY THE HEAT GENERATION IN THE BOILER AT LÁCTEOS EL RANCHO*

AUTHORS:

BERNAL TORRES, WILLIAM; JIMÉNEZ SUÁREZ EDIXON ARBEY**

KEY WORDS:

Pirotubular boiler, pulverized coal, proximate and ultimate analysis, steam generation, thermal design, mechanical design, piping losses, liberated heat.

DESCRIPTION:

This document aims at establishing a set of parameters associated to the selection, design and construction of the system of milling, dosage and combustion of coal, to be used as an energy source to generate steam in the boiler at “Lácteos El Rancho”, so contributing to a significant decrease in the company’s energy costs and enhancing its competitiveness in the local and national market.

Powdered coal burners are widely used in industrial steam generation, which is why the design and construction of a system of dosage and combustion of powdered coal was made aiming at the financial profit for the company, as well as playing an important role with regards to the consolidation of the knowledge acquired throughout all the mechanical-design and thermal-design-related courses.

The “coal-injection” dosage system was built with two steel-1045 axles and with 18-and-16 caliber, cold-rolled sheet metal; structural A36 steel angles were also used. The coal-dosage control is performed through a frequency variator, and the air intake is regulated with a butterfly valve installed at the entrance of the feeding pipe of the centrifugal fan.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Omar Armando Gelvez Arocha.

INTRODUCCION

El diseño y construcción de máquinas es la más clara expresión de todos y cada uno de los conocimientos que se adquirieron durante la carrera de ingeniería mecánica. El poder plasmar y palpar una idea es un logro que en este momento se hace indescriptible, más aún si esa idea contribuye con suplir las necesidades de un grupo social, y lo mejor, poder de alguna manera colocar un granito de arena con la preservación del medio ambiente.

El propósito de este trabajo de grado es diseñar y construir una máquina que dosifique y queme carbón pulverizado en la caldera de la empresa Lácteos el Rancho del municipio de Landázuri Santander, la cual está viéndose obligada a utilizar la madera como combustible para dicha caldera. Pero afortunadamente, se depositó la confianza en dos estudiantes de la Universidad Industrial de Santander por parte de los socios de la empresa de lácteos, para modificar el tipo de combustible utilizado en la generación de vapor, con el fin de ayudar de algún modo al medio ambiente y a su vez reducir costos.

El vapor es un recurso utilizado en gran parte de la industria, pero su generación se hace generalmente con combustibles derivados del petróleo. El carbón es utilizado en la producción de vapor generalmente en las grandes termoeléctricas y su uso en la pequeña y mediana industria es muy poco. Es por eso que el reto se hizo mejor aún al poner al servicio el combustible con más reservas en el mundo y uno de los más económicos de su clase, a la industria mediana y pequeña, con el fin de aumentar su competitividad reduciendo los costos de producción.

1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La empresa LACTEOS EL RANCHO ubicada en el municipio de Landázuri Departamento de Santander, dedicada a la producción y venta de queso doble crema, cuenta con una caldera que usa madera como combustible; pero la adquisición de este tipo de combustible se hace cada día mas difícil y oneroso, por esta razón los costos de producción se han elevado considerablemente, retrasando a Lácteos el Rancho competitivamente frente a empresas del mismo ramo presentes en la región, así mismo el uso de madera estimula la deforestación, causando un daño adicional al medio ambiente.

1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Lácteos El Rancho en la búsqueda de una reducción en los costos de producción y la contribución con el medio ambiente, ha decidido cambiar el tipo de combustible de la caldera, de madera a carbón mineral, ya que este es un recurso natural abundante en la región y se adquiere a un muy bajo costo; con este ahorro la empresa podrá sostenerse en el mercado y así seguir generando 8 empleos directos y 60 indirectos contribuyendo con el desarrollo económico en la provincia.

En este momento la caldera es alimentada con 331 Kg de leña para operar durante 10 horas diarias, el costo aproximado por tonelada de leña es de 80.000 pesos, contra 70.000 pesos la tonelada de carbón¹, esto sin tener en cuenta que el poder calorífico del carbón² con el cual vamos a trabajar es aproximadamente 2

¹ Valor del carbón en las minas que se encuentran actualmente en el municipio de la Landázuri Santander.

² El poder calorífico fue determinado mediante análisis próximo realizado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander

veces mayor al de la leña; además con el uso del carbón en la caldera se contribuye con la disminución de los niveles de deforestación en la provincia.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivos Generales

- ✓ Continuar con la misión de la universidad de atender y dar solución a diferentes necesidades de todas las comunidades, especialmente las familias que directa o indirectamente se están beneficiando de la empresa Lácteos El Rancho como los trabajadores, los proveedores y los consumidores.
- ✓ Contribuir con el desarrollo económico de la región generando empleo.
- ✓ Disminuir el impacto ambiental ocasionado con el uso de la madera como combustible.

1.3.2 Objetivos específicos

Diseñar y Construir un sistema para sustituir el uso de leña como combustible por carbón mineral para una caldera con capacidad de 5 BHP y una presión de operación de 60 psi, el cual comprende el diseño y selección de los siguientes subsistemas.

➤ Subsistema de Molienda

- ✓ Seleccionar un molino de martillos capacidad de 6 kg/min, para reducir el tamaño de grano del carbón de 5 cm hasta 1 mm aproximadamente.

- ✓ Seleccionar un motor eléctrico de acuerdo a los parámetros del fabricante del molino.

➤ **Subsistema de combustión**

- ✓ Diseñar y construir un sistema de dosificación del carbón hacia el quemador.
- ✓ Seleccionar un ventilador para la inyección de carbón de la salida del dosificador hacia el quemador.
- ✓ Diseñar y construir un quemador para carbón pulverizado con capacidad de 20 kg de carbón / hr.
- ✓ Seleccionar un quemador a gas para el precalentamiento del hogar de la caldera y el quemador de carbón

➤ **Manual de operación y mantenimiento**

Elaborar un manual de operación y mantenimiento que comprenda cada uno de los componentes que integran los subsistemas mencionados anteriormente.

2. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS

En el presente trabajo de grado se realizó el diseño y construcción de un sistema de molienda, dosificación y combustión de carbón, el cual se denominó “*CARBO INYECCIÓN*”, para sustituir el combustible de la caldera utilizada en la empresa Lácteos el Rancho (figura 1), como se mencionó en el capítulo anterior.

Figura 1. Caldera de Lácteos el Rancho



Una caldera es una máquina diseñada y construida para producir vapor de agua a elevada presión y temperatura. En esencia una caldera es un recipiente cerrado, lleno parcialmente de agua a la que se le aplica calor procedente de alguna fuente, tal como un combustible, rayos solares concentrados, electricidad etc. para hacerla hervir y producir vapores. Como estos vapores están confinados a un espacio cerrado, se incrementará la presión interior y con ello la temperatura de ebullición del agua según muestra el diagrama de fases, pudiéndose alcanzar finalmente muy elevados valores de presión y temperatura. Estos vapores se concentran en la parte superior del recipiente inicialmente vacío, conocido como domo, de donde se extrae vía conductos para ser utilizado en el proceso en cuestión.

El vapor es el fluido más utilizado para el calentamiento en la industria. Así la generación de vapor forma una parte importante de los procesos. Existen dos tipos principales de calderas o generadores de vapor:

- **Calderas de combustible fósil:** funcionan con fuelóleo, gasóleo, carbón, gas natural, residuos sólidos industriales.
- **Calderas de recuperación:** utilización de exceso de calor para precalentamiento de corrientes o alternativamente para generar vapor.

En la cámara de combustión se quema el combustible. La temperatura que se puede alcanzar depende de diversos parámetros, principalmente de la relación aire-combustible. La transferencia de calor desde llamas y humos se hace por radiación y convección.

A la caja de humos también se puede denominar colector de humos. Es la parte de la caldera donde confluyen los gases de combustión en su recorrido final: de aquí mediante un tramo de conexión se conduce a la chimenea.

2.1 CLASIFICACION DE LAS CALDERAS

2.1.1 Por la disposición de los fluidos:

- **Calderas Acuotubulares:** Son aquellas en las que el fluido de trabajo se desplaza a través de tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, y gran capacidad de generación.
- **Calderas Piro-tubulares:** En este tipo el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente, y es atravesado por tubos por los cuales circula fuego y gases producto de un proceso de combustión.

2.1.2 Por su Configuración:

- Horizontales
- Verticales

2.1.3 Por el Mecanismo de transmisión de calor dominante:

- Convección
- Radiación
- Radiación y convección.

2.1.4 Por el Combustible Empleado

- Combustibles sólidos
- Combustibles líquidos
- Combustibles gaseosos
- Combustibles especiales (Bagazo)
- De recuperación de calor de gases
- Mixtas.
- Nucleares

2.1.5 Por el Tiro:

- De tiro natural
- De hogar presurizado
- De hogar equilibrado

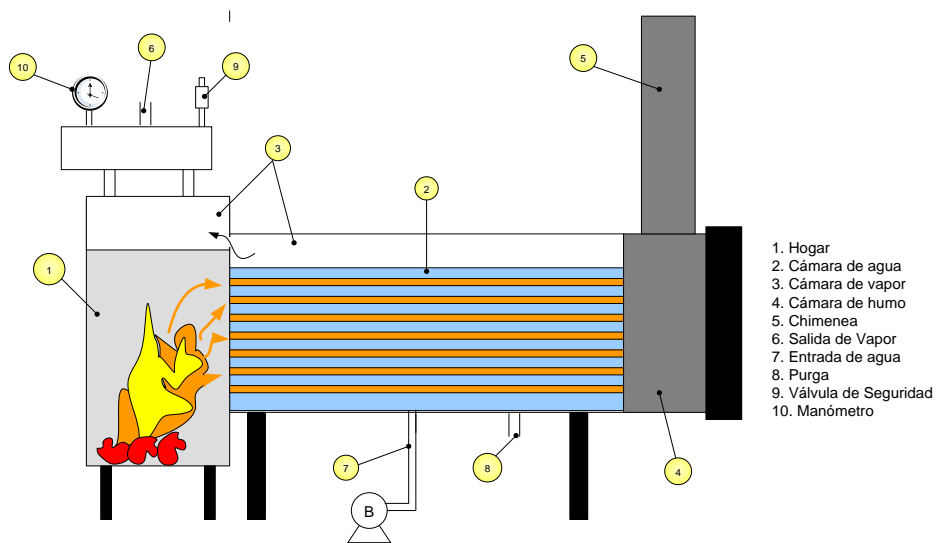
2.1.6 Por el Modo de Gobernar la Operación:

- De operación manual
- Semiautomáticos
- Automáticos

2.2 ELEMENTOS DE UNA CALDERA PIROTUBULAR

Para este caso, se explicará más detalladamente las calderas de tipo Piro tubular, ya que el sistema de dosificación y quemado que se diseñará en este proyecto de grado, trabajara en una caldera de este tipo.

Figura 2. Partes de una caldera Piro tubular



En la figura 2 se muestran las partes fundamentales de una caldera Piro tubular, a continuación se describirán las más importantes.

2.2.1 Hogar

El hogar es el lugar donde se produce la combustión del combustible empleado el cual puede ser solido (carbón, leña), liquido (ACPM, fuel oil, etc.) o gas. En este caso la caldera emplea leña como combustible.

2.2.2 Cámara de agua:

Recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera (figura 2), el nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 cm por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua. Según la razón que existe entre la capacidad de la cámara de agua y la superficie de calefacción, se distinguen calderas de gran volumen, mediano y pequeño volumen de agua.

2.2.2.1 Calderas de gran volumen:

Son las más sencillas y de construcción antigua, se componen de uno a dos cilindros unidos entre sí y tienen una capacidad superior a 150 HLt de agua por cada m² de superficie de calefacción.

2.2.2.2 Calderas de mediano Volumen:

Las calderas de mediano volumen de agua están provistas de varios tubos de humo y también de algunos tubos de agua, con lo cual aumenta la superficie de calefacción, sin aumentar el volumen total del agua.

2.2.2.3 Calderas de pequeño Volumen:

Las calderas de pequeño volumen de agua están formadas por numerosos tubos de agua de pequeño diámetro, con los cuales se aumenta considerablemente la superficie de transferencia de calor.

2.2.3 Cámara de Vapor:

El vapor es un recurso energético secundario, apto para transportar energía y transferirla en varios procesos simultáneamente, de una manera eficiente. El sistema de vapor, el cual consta de tres partes principales, generación, distribución y consumo.

El objetivo final en los sistemas de generación de vapor es el aprovechamiento óptimo de un recurso primario como los combustibles en procesos industriales y en la generación de energía eléctrica.

2.2.4 Cámara de humo

Dependiendo los números de pasos que tenga la caldera, esta puede tener una o varias cámaras de humo. Es este caso como la caldera es de un solo paso, la caldera tiene una sola cámara de humo.

3. GENERALIDADES DEL CARBÓN MINERAL

El carbón es un combustible orgánico no homogéneo, el cual se originó a partir de los restos en descomposición de materia vegetal. Es el combustible fósil más utilizado en la generación de vapor, por su amplia disponibilidad y bajo costo. Provee más de un cuarto de las necesidades energéticas del mundo, y sus reservas exceden a las reservas disponibles de gas y petróleo.

El carbón varía ampliamente su composición. Estas diferencias en el rango se deben a los diferentes agentes que intervienen en el proceso de formación o carbonificación. (ECOCARBON, 1998).

3.1 FORMACIÓN

De todos los combustibles sólidos, el más utilizado es el carbón. El término carbón se aplica a un amplio rango de materiales que los geólogos llaman rocas de tipo orgánico. Estas rocas son el producto final de un proceso natural de descomposición de capas de material vegetal enterrado en pantanos y que ha permanecido sin contacto con oxígeno desde el período carbonífero, principalmente, hacia finales de la era paleozoica, hace aproximadamente 300 millones de años. En esa época el clima terrestre era cálido, húmedo y la vegetación experimentó un crecimiento espectacular. Desde entonces esas capas de vegetación han sido sometidas a acción bacterial, calor, presión y humedad, haciendo que la celulosa, la lignina y otros componentes de las células vegetales se convirtieran en carbono e hidrocarburos.

3.2 CLASIFICACIÓN

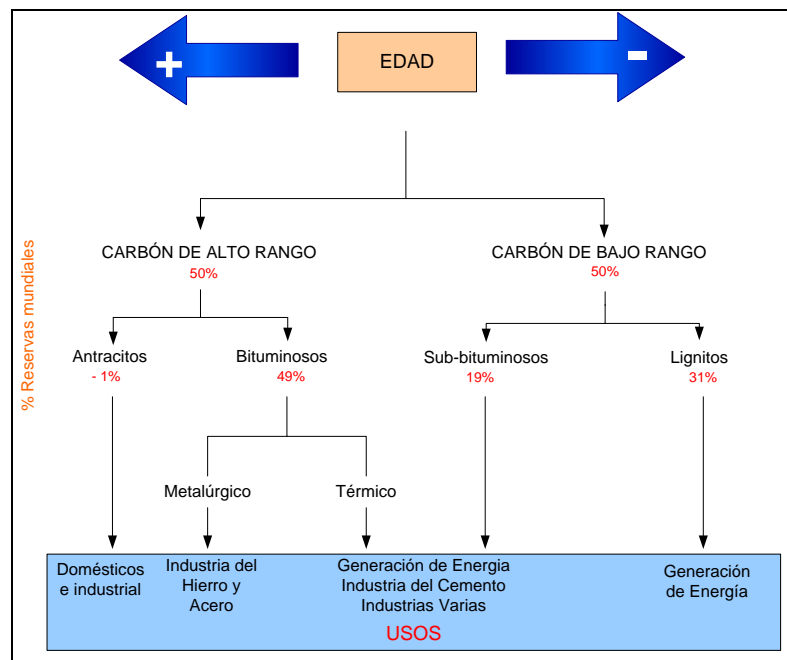
Algunas propiedades de los carbones han sido propuestas como base para realizar su clasificación. Entre ellas se incluyen la composición, la capacidad

calorífica, la estructura, criterios físicos tales como el tamaño o la apariencia y la reacción durante su uso o cuando se expone a condiciones específicas (ECOCARBON, 1998).

3.2.1 Clasificación de acuerdo a la edad

Las variaciones en la edad y en la historia geológica del carbón ocasionan variaciones en el rango. La clasificación general y básica del carbón es por rango o categoría, desde turba y lignitos en el extremo inferior de la escala, pasando por los carbones bituminosos hasta llegar a la antracita en el extremo superior. Por lo general, cuanto más alto sea el rango del carbón, mayor será su edad (figura 3), contenido de carbono y poder calorífico, de igual modo, más bajo será su contenido de hidrógeno y materias volátiles.

Figura 3. Clasificación del carbón de acuerdo a la edad

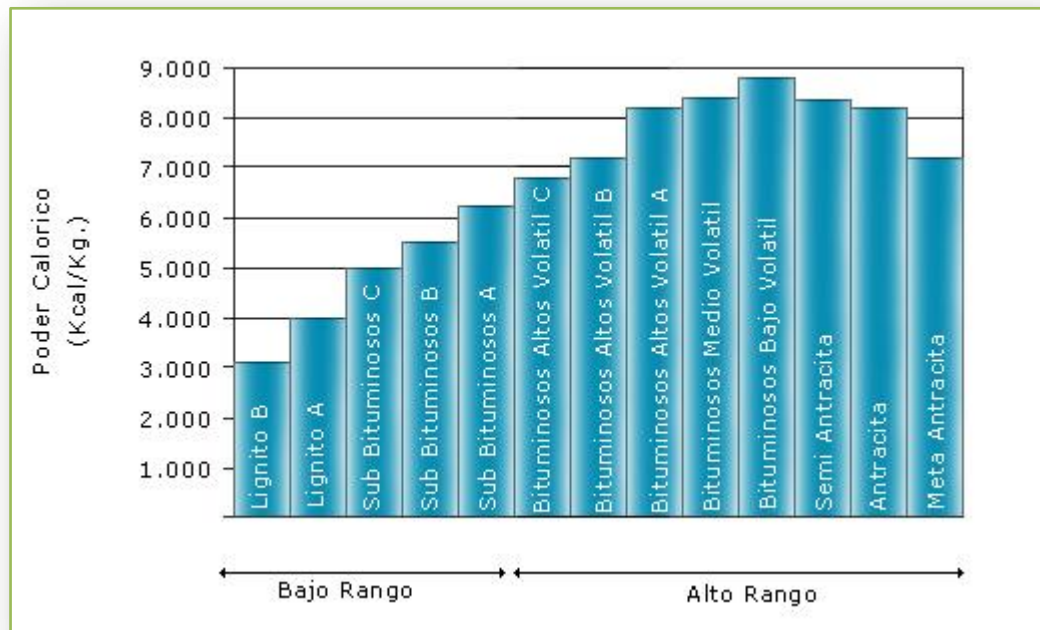


Fuente: Compañía Carbonífero San Pedro de Catamutún

3.2.2 Clasificación según el poder calorífico

Las normas ASTM fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg., en este rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg., se incluyen los carbones bituminosos y antracitos.

Figura 4. Clasificación según el rango



Fuente: Compañía Carbonífero San Pedro de Catamutún

3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE CARBÓN

3.3.1 Antracita

También llamado carbón de piedra, es muy denso, de aspecto vidrioso y de color negro intenso, contiene muy poco material volátil y por lo tanto es difícil de encender, pero cuando lo hace arde lentamente con una llama pequeña de color azul, crepitando y sin producción apreciable de humo.

- Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calórico.
- Procede de la transformación de la hulla.

Figura 5. Carbón antracita



Fuente: www.oviedo.es

3.3.2 Bituminoso

Bituminoso o hulla, es más blando, de color negro lustroso, tiene más material volátil y por lo tanto se enciende más fácilmente, arde con una llama amarilla mediana y con producción de humo, este tipo de carbón se quema preferentemente en forma pulverizada.

- Es muy usada por su alto poder calorífico en las plantas de producción de energía.

Figura 6. Carbón Bituminoso



Fuente: www.oviedo.es

3.3.3 Sub-bituminoso

Estos carbones presentan propiedades intermedias entre las del lignito y los carbones bituminosos. Normalmente se utilizan en centrales térmicas para la producción de energía.

Figura 7. Carbón Sub-bituminoso



Fuente: www.oviedo.es

3.3.4 Lignitos

Son altamente higroscópicos, de color variable entre negro y marrón pálido, tienen un alto contenido de material volátil, incluyendo un alto porcentaje de bióxido de carbono, se encienden fácilmente, incluso espontáneamente, y arden con una llama grande anaranjada y con gran producción de humo. Se forma cuando se comprime la turba.

Figura 8. Carbón Lignito



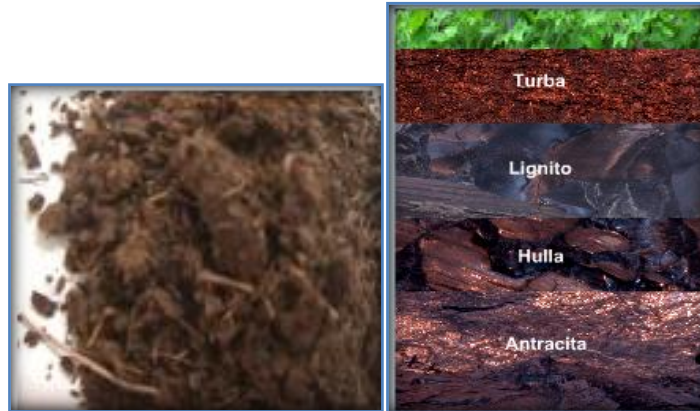
Fuente: www.oviedo.es

3.3.5 Turba

La turba es un material orgánico compacto, de color pardo oscuro y rico en carbono. La formación de turba constituye la primera etapa del proceso por el que la vegetación se transforma en carbón mineral. Se forma como resultado de la putrefacción y carbonización parciales de la vegetación en el agua ácida de las turberas. La formación de una turbera es relativamente lenta como consecuencia de una escasa actividad microbiana, debida a la acidez del agua o la baja concentración de oxígeno. El paso de los años va produciendo una acumulación de turba que puede alcanzar varios metros de espesor, a un ritmo de crecimiento que se calcula de entre medio y diez centímetros cada cien años. En estado fresco alcanza hasta un 98% de humedad, pero una vez desecada puede usarse

como combustible. La turba también se usa en jardinería para mejorar suelos por su capacidad de retención de agua.

Figura 9. Turba



Fuente: www.oviedo.es

3.4 ANALISIS

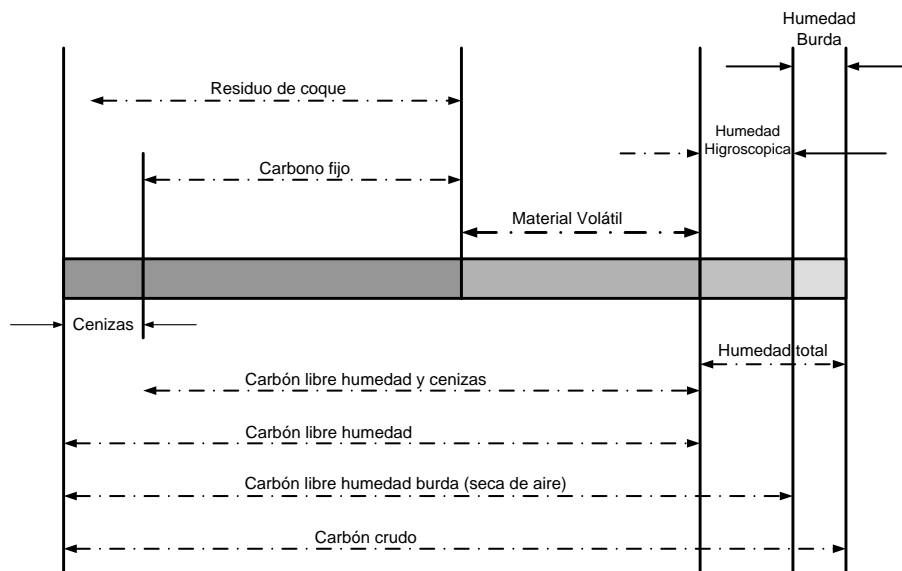
Con el análisis se evalúan las características físicas, químicas y petrográficas del carbón. Es necesario, para evitar problemas en su manejo y tratamiento, reducir los posibles daños en los equipos, disminuir el impacto ambiental, planear y controlar la exploración y determinar los tipos de carbones que se adapten mejor a las necesidades de usos industriales y tecnológicos.

Generalmente se utilizan dos tipos de análisis para el carbón (figura 10), el análisis próximo y el análisis último, ambos expresados en porcentaje en peso. Para el manejo, interpretación y utilización de los carbones es necesario relacionar el análisis de un carbón a un estado o base determinada, libre de sustancias incombustibles, tales como agua y material mineral.

3.4.1 Análisis Próximo

El análisis próximo identifica el grado de carbonificación.. Da información del comportamiento durante el calentamiento, es decir, cuanto del carbón permanece fijo y cuanto se transforma en material volátil. Además se reportan datos de humedad, contenido de cenizas y poder calorífico.

Figura 10. Representación de la composición del carbón y la denominación de sus componentes



Fuente: (ECOCARBON, 1998)

3.4.1.1 Humedad:

El carbón es un material higroscópico y siempre contiene algo de humedad. Esta humedad es llamada *humedad inherente* y es la humedad de equilibrio de una muestra de carbón expuesta al aire libre. Esta humedad, aunque no está unida químicamente al carbón, no se nota exteriormente. Se determina manteniendo una muestra de carbón molido a una temperatura de aproximadamente 105 °C durante una hora. La diferencia de pesos entre la muestra inicial y la final se considera

igual al de la humedad inherente al carbón. El carbón también contiene cantidades variables de *humedad libre*, la cual no debe confundirse con la cifra dada en el análisis próximo. Esta humedad, que puede determinarse rápidamente, es en exceso de la humedad de equilibrio; se le agrega mecánicamente al carbón debido a las inclemencias atmosféricas y se elimina del mismo por secado a la temperatura ambiente. A la humedad total, es decir, inherente más libre, se le llama *humedad bruta*.

3.4.1.2 Cenizas:

Si la muestra, llamada ahora coque, se quema completamente, el residuo no combustible es ceniza. Esta consiste de óxidos de silicio, aluminio, hierro, potasio, etc.

3.4.1.3 Material volátil:

Es el gas que se desprende cuando la muestra, sin humedad, se mantiene a 950 °C por 7 minutos. La diferencia en peso da el porcentaje de materias volátiles. Estas consisten de una variedad de gases orgánicos combustibles (hidrógeno, monóxido de carbono, metano, acetileno, etc.), gases incombustibles (el agua de *hidrolización*, o químicamente combinada, diferente de la humedad bruta y bióxido de carbono, principalmente) y otras sustancias que se volatilizan: aceites pesados, alquitrán, brea, etc. Los volátiles son importantes porque de ellos depende la rapidez de encendido de un carbón.

3.4.1.4 Carbón fijo:

Es la diferencia entre la masa de la muestra original y la suma de las masas de agua, cenizas y materias volátiles. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que esta diferencia no representa todo el carbono que había en el carbón, ya que parte

de este se desprendió con los hidrocarburos del material volátil. Además, no todo es carbono sólido, sino que incluye al azufre y otros compuestos combustibles sólidos y también algo de hidrogeno y oxígeno.

Junto con el análisis próximo, a menudo se hace un análisis separado para determinar el poder calorífico y el contenido de azufre del carbón.

3.4.1.5 Poder calorífico:

El parámetro que se va a determinar según el procedimiento es *el poder calorífico bruto a volumen constante*, “bruto” porque, en las condiciones de la determinación, el agua producida por la combustión, se encuentra al final en forma líquida y, por lo tanto, contribuye al poder calorífico de la muestra también el calor latente de condensación del agua; “a volumen constante” porque, los gases no pueden expandirse, ocurriendo la combustión dentro de la bomba calorimétrica.

La determinación se puede llevar a cabo de tres maneras:

- **Isotérmica:** cuando la temperatura de la camisa de agua alrededor del recipiente calorimétrico se mantiene constante con un termostato.
- **Adiabática:** cuando las temperaturas de la camisa de agua y del recipiente calorimétrico se mantienen iguales siempre, y por lo tanto, no hay intercambio de calor entre los dos.
- **Estática:** cuando la camisa de agua tiene una capacidad térmica tan grande que su temperatura no cambia al absorber calor del recipiente calorimétrico y, por lo tanto, es prácticamente isotérmica. Esta condición se asegura cuando la camisa de agua tiene una capacidad de al menos 12,5 litros de agua; el calorímetro del laboratorio de carbones cumple con este requisito y entonces el método estático (el más sencillo) será el adoptado.

Tabla 1. Poder calorífico superior promedio de algunos carbones colombianos

REGION	PODER CALORIFICO SUPERIOR Btu/lb
Antioquia y Antiguo Caldas	10.910
Valle de Cauca, sector Yumbo – Suarez	9.663
Boyacá, área Sogamoso - Jericó	12.401
Cundinamarca, proyecto Termoyumbo IV	13.194
Cesár, área la Jagua	12.566
Cerrejón, Zona Central	12.200
Córdoba, La Escondida – San Jorge	8.180
Norte de Santander, Fm, Carbonera	11.963

Fuente: ECOCARBÓN

3.4.1.6 Azufre:

En la determinación del poder calorífico, el azufre (orgánico y pirítico) se oxida a sulfato; por lo tanto después de la determinación del poder calorífico, la muestra se puede utilizar para la determinación gravimétrica del azufre por precipitación de $BaCl_2$.

3.4.2 Análisis Último

El análisis ultimo proporciona información acerca del contenido de cada elemento que compone el carbón, tales como carbono, hidrogeno, oxigeno, azufre y nitrógeno; se utiliza para calcular los requerimientos de aire para combustión. El carbono, hidrogeno y oxigeno de un carbón depende del grado de carbonificación..

3.4.2.1 Carbono

Forma compuestos orgánicos aromáticos y alifáticos. Su valor se utiliza para el cálculo de balances térmicos. El análisis de carbono incluye el carbono fijo y el

contenido de carbono en los volátiles. En la combustión completa, todo el carbono se transforma en CO₂.

3.4.2.2 Hidrógeno

Se encuentra presente en el carbón formado compuestos orgánicos aromáticos y alifáticos, en los hidratos y los silicatos; y en la humedad disminuye con el grado de carbonificación.. Todo el hidrógeno presente en el carbón se oxida a H₂O, y se presenta como vapor en los gases de combustión.

3.4.2.3 Nitrógeno

Se presenta en el carbón formando compuestos orgánicos estables. Se debe conocer su porcentaje para evaluar el impacto ambiental generado por cada tipo de carbón.

3.4.2.4 Oxígeno

Se le encuentra combinado orgánicamente y en compuestos inorgánicos, tales como el agua, silicatos, carbonatos, óxidos y sulfatos. Se calcula por diferencia. El contenido de oxígeno sirve como una medida del rango del carbón. Carbones de bajo rango contienen mayor proporción de oxígeno que carbones de alto rango.

3.5 PROPIEDADES PARA LA COMBUSTION

Las propiedades de los carbones que se deben tener en cuenta para la combustión son el índice de hinchamiento, las cenizas, el tamaño de las partículas, la temperatura y la capacidad de aglomeración.

3.5.1 Índice de hinchamiento

Proporciona un índice de las características de coquización de un carbón. Indica la tendencia del carbón a inflarse cuando se oxida o se gasifica en un lecho fluidizado. El hinchamiento lo causa la resistencia ofrecida a la liberación del gas a través de los macro poros y fisuras de las partículas de carbón y los intersticios entre partículas. La obstrucción de estos pasajes es causada por la plasticidad adquirida por el carbón. Carbones con un índice de hinchamiento superior a 4 no son deseables para procesos de combustión.

3.5.2 Efecto de las cenizas

La presencia de cenizas puede tener varios efectos sobre la combustión de carbón. En primer lugar, las cenizas proporcionan un medio para la transferencia de calor por radiación cuando es consumido el carbono. Además, algunos minerales en el carbón tienen efectos catalíticos aumentando su reactividad de char³, particularmente a bajas temperaturas. La materia mineral forma una barrera al paso del reactante, esencialmente hacia el final de la quema es posible que grandes cantidades de material mineral impidan la combustión del carbono remanente.

Carbones con una baja temperatura de fusión de las cenizas pueden presentar problemas para la utilización porque se ve favorecida la formación de escorias y el depósito de estas en las superficies de la transferencia de calor disminuye la eficiencia de los equipos. Una fusión completa de las cenizas acelera el desgaste por abrasión de las parillas y afecta la distribución homogénea del aire.

³ También llamado coque

Un ligero ablandamiento de las cenizas puede ser favorable para la combustión porque quedan pocos inquemados sólidos; sin embargo, pueden entorpecer el paso de aire hacia las partículas incrementando el porcentaje de inquemados en las escorias. La formación de escorias relativamente solidas presente al final de las parrillas da lugar a dificultades en la evacuación de las mismas.

3.5.3 Tamaño de las partículas y temperaturas.

El tamaño de las partículas es la característica que distingue los diferentes procesos de combustión de carbón. Para combustores de lecho fijo o móvil se usan tamaño entre 5 – 50 mm; para lecho fluidizado, entre 1 – 5 mm y para carbón pulverizado, diámetros menores a 1 mm.

El tamaño de las partículas determina que fenómeno controla la combustión. Para partículas grandes o temperaturas altas, el fenómeno que predomina es la difusión del oxígeno hacia el char³. Debido a que los carbones de bajo rango son más reactivos que los de alto rango, estos últimos se muelen más finos para lograr 100% de conversión en el mismo tiempo de residencia en la caldera o el horno. Para partículas más pequeñas o temperaturas bajas, la difusión en los poros y la reacción química son los fenómenos más importantes, particularmente cuando las temperaturas son bajas.

El punto de ignición es la temperatura a la cual el carbón comienza a oxidarse sin llama; depende del rango del carbón aumentando con el mismo, y de la granulometría.

3.5.4 Capacidad de aglomeración

La capacidad de aglomeración de algunos carbones y su opuesto, la capacidad de permanecer libres durante la combustión es importante para seleccionar el carbón

con el cual se debe operar un equipo o viceversa. Los carbones con capacidad de aglomerarse, cuando se calientan pasan a un estado plástico, se funden y forman grandes masas de semicoque difíciles de romper que limitan el flujo de aire en el interior del lecho, denominados carbones coquizables. Los carbones que permanecen libres no se fusionan o si se fusionan se rompen fácilmente, lo que facilita la homogeneidad del flujo de aire en el lecho denominados carbones térmicos.

3.6 PROPIEDADES DEL CARBÓN PARA PULVERIZARLO

Calderas con una capacidad, mayor de 100.000 libras de vapor por hora, utilizan carbón pulverizado. A continuación se enuncian algunas propiedades importantes que se deben tener en cuenta para pulverizar un carbón.

3.6.1 Índice de molienda Hardgrove

Este índice caracteriza el trabajo que se necesita para llevar una muestra de un carbón a una granulometría fina, indica la facilidad con la cual el carbón puede ser pulverizado. Este índice es un parámetro de comparación y es mayor para carbones de bajo rango, como el lignito, y menor para carbones de alto rango, como la antracita. Este índice no se debe confundir con la dureza del carbón y varía con otros constituyentes, tales como la humedad.

3.6.2 Humedad

La humedad de equilibrio y la humedad superficial afectan el proceso de pulverización, ya que favorece la aglomeración de finos y reduce la capacidad de secado generada al pulverizar un carbón.

3.6.3 Grado de finura

El grado de finura requerido para la combustión de carbón pulverizado depende del contenido de material volátil. Carbones con bajo contenido de volátiles, alto rango, se deben pulverizar con un grado de finura superior a los carbones de bajo rango, puesto que menos combustible se destila y se pierde como gas y mayor cantidad se debe quemar como carbono fijo.

3.6.4 Abrasividad

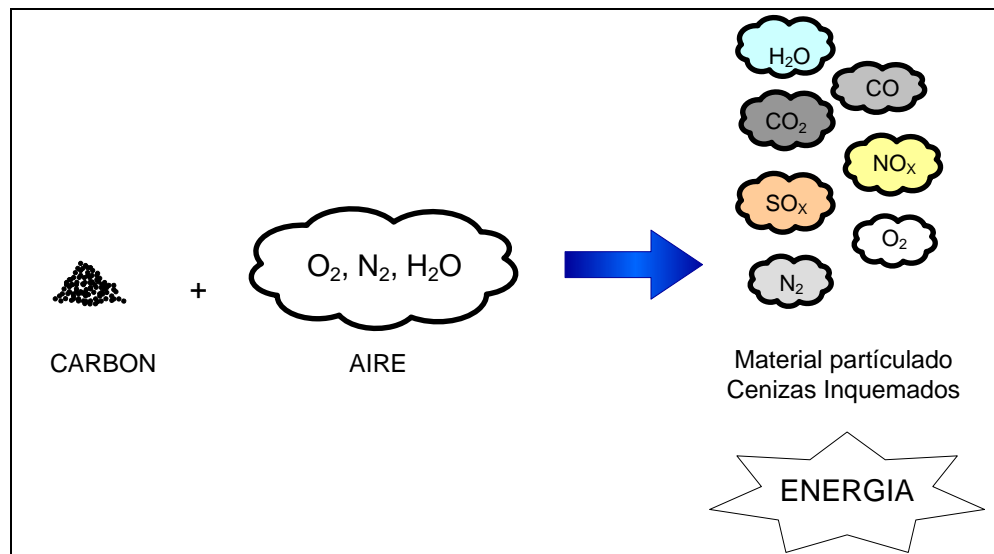
La Abrasividad indica el grado de abrasión del carbón. Los materiales inorgánicos presentes en el carbón son altamente abrasivos, característica que se debe tener en cuenta en el proceso de pulverización.

3.7 COMBUSTION DE CARBONES

La combustión es el cambio químico de ciertos elementos de un combustible con el oxígeno del aire, controlada de tal manera que se genera energía térmica útil. Los principales elementos constituyentes del combustible son carbono elemental (C), hidrógeno (H), agua (H₂O), cenizas (C_Z) y otros compuestos.

En el proceso de la combustión, los elementos y compuestos se transforman en dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y en otros compuestos no deseables debido a su impacto nocivo sobre el medio ambiente y los materiales de los equipos. Estos compuestos son monóxidos de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas de combustible no oxidados y cenizas (ECOCARBON, 1998).

Figura 11. Esquema ilustrativo del proceso de la combustión



Fuente: Ecocarbón

En condiciones ideales, el proceso de la combustión ocurre con proporciones exactas de aire y combustible, la cual se denomina cantidades estequiométricas o cantidades teóricas de aire. Sin embargo, en la práctica como no es posible esta condición, se utilizan cantidades superiores a las estequiométricas, utilizándose aire en exceso⁴ para aproximarse más a una combustión completa. De lo contrario, se forman productos intermedios, como el CO, inquemados sólidos e hidrocarburos (C_xH_y), los cuales aun son combustibles y nocivos para la salud de los seres vivos y el ambiente.

3.7.1 Proceso de combustión del carbón

El proceso de combustión de sólidos como el carbón es complejo y lleva consigo una serie de etapas (Figura 12) que se deben realizar en forma correcta para

⁴ La cantidad de exceso de aire depende del combustible

liberar energía química almacenada sin perjudicar el medio ambiente. Estas etapas son:

1. Secado (extracción del agua del carbón)
2. Pirólisis o destilación (liberación de compuestos volátiles presentes en el carbón en forma de CO_2 , CO , CH_4 , C_2H_6 , NH_3 , H_2S y otros).
3. Combustión del char o coque.
4. Combustión de compuestos volátiles que aún son combustibles (CO , CH_4 , C_2H_6).
5. Extracción de cenizas o compuestos inertes del carbón

Tres condiciones son indispensables para una buena combustión:

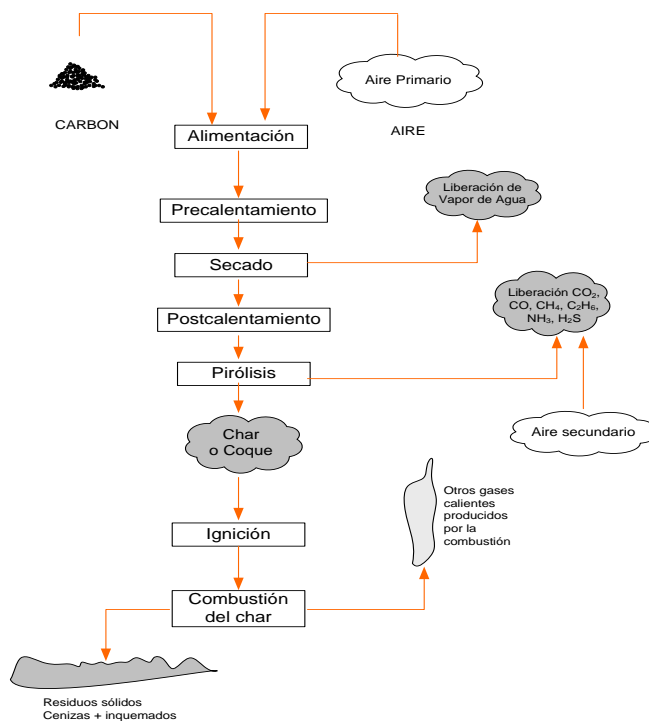
1. Aire suficiente para la mezcla.
2. Mezcla rica aire-combustible. La relación está en proporción directa (ver Tabla 2)
3. Alta temperatura en el horno u hogar.

Tabla 2. Relaciones de aire combustible para diferentes carbones colombianos

REGION	RELACION AIRE COMBUSTIBLE EN Kg AIRE / Kg DE CARBÓN
Antioquia y Antiguo Caldas	8.73
Valle del Cauca, sector Yumbo – Suárez	8.48
Boyacá, área Sogamoso y Jericó	8.95
Cundinamarca, proyecto Termoyumbo IV	10.64
Cesar, área La Jagua	9.86
Cerrejón Zona Central	8.53
Córdoba, La escondida – San Jorge	6.74
Norte de Santander, Fm. Carbonera	10.78

Fuente: Grupo de Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana

Figura 12. Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbones



Fuente: Calderas a Carbón, Ecocarbón

Debido a la separación del material volátil de la estructura sólida, se requieren dos tipos de aire. Uno denominado aire primario, el cual atraviesa y acompaña la partícula del carbón unido a éste para facilitar la transferencia de oxígeno al interior de las partículas y producirse la combustión de char o coque. El otro, denominado aire secundario, se requiere para la combustión de los volátiles en una zona que normalmente se ubica en la parte superior del hogar de la caldera.

En el proceso de combustión de carbón se presentan fenómenos adicionales, como:

1. La transferencia de oxígeno a la superficie de carbón, difusión o transporte en el interior de la partícula y la reacción propiamente dicha. Estos

procesos retardan el proceso y depende directamente del tamaño del tamaño de la partícula. Por lo anterior, las partículas de carbón pequeñas reaccionan con mayor facilidad que las de mayor tamaño.

2. La ignición de char o coque se origina a partir de la energía recibida de la combustión de los volátiles. Por lo tanto un carbón con alto contenido de volátiles es de fácil ignición y viceversa.

3.7.2 Comportamiento del carbón durante el calentamiento

Un aumento de temperatura genera transformaciones químicas y físicas del carbón:

1. Las químicas producen gases, vapores condensables y un residuo sólido compuesta casi únicamente por carbono.
2. Las físicas producen efectos en su grado de plasticidad; las partículas forma una masa esférica y compacta, la cual se hincha y luego se resolidifica formando un cuerpo sólido coherente con estructura porosa, llamado coque o char según el grado de plasticidad alcanzado (ECOCARBON, 1998).

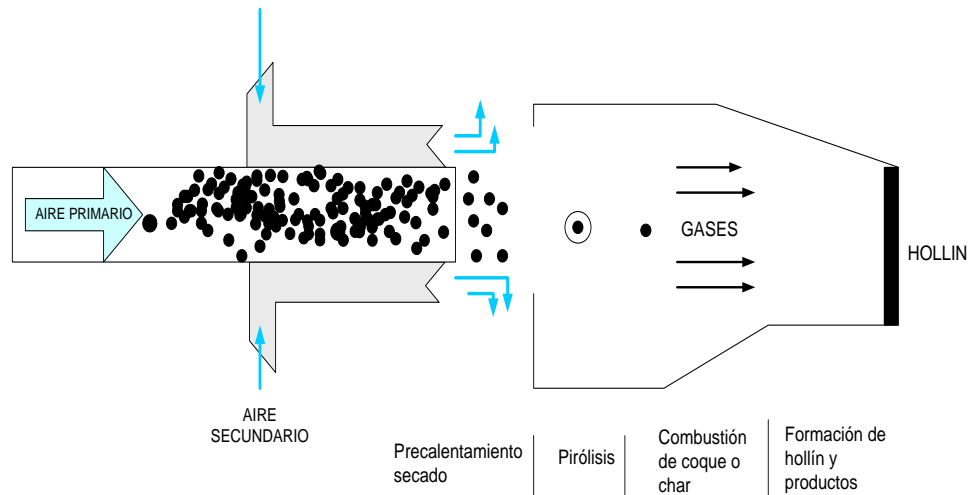
A temperaturas menores de 200 °C y a presiones bajas se libera el agua y existe una desvolatización menor posteriormente existe la ignición, la cual se presenta cuando la rata de perdida de calor es igual a la rata de generación de calor.

Alrededor de los 300°C se inicia la desvolatización y se producen alquitranes e hidrocarburos gaseosos. CO₂, CO, H₂, H₂O, HCN. Estos productos reaccionan con el oxígeno en los alrededores de las partículas incrementando la temperatura.

En la figura 13 se presenta un esquema de la combustión de carbón pulverizado, indicándose en ellas las zonas donde se realizan las diferentes etapas del

proceso. También se ilustra el suministro de aire primario y secundario, normalmente el aire primario es con el que se transporta el material para la combustión del coque o char, y el secundario para la combustión de los gases durante la pirolisis.

Figura 13. Esquema ilustrativo de la combustión de carbón pulverizado



Fuente: Calderas a Carbón, Ecocarbón

3.8 QUEMADORES DE CARBÓN

Las calderas que utilizan carbón como combustible, éste se puede quemar de tres formas:

1. Parrilla con alimentación manual.
2. Parrilla con alimentación automática.
3. En forma pulverizada.

3.8.1 Quemadores sobre parrilla alimentados manualmente

En el caso de este tipo de quemadores, la eficiencia de este tipo de quemadores depende, en gran parte de la experiencia encargada del funcionamiento. Para esto el operario debe alimentar regularmente el carbón en el tamaño adecuado evitando los finos, controlar las compuertas para evitar las entradas de grandes excesos de aire y mantener la llama abundante sobre toda el área.

3.8.2 Quemadores sobre parilla alimentados automáticamente

En los quemadores de sobre parrilla, alimentados automáticamente, es posible consumir menos cantidad de carbón que lo alimentados manualmente, siempre y cuando el sistema se ajuste frecuentemente con base en la calidad⁵ del carbón que se utiliza.

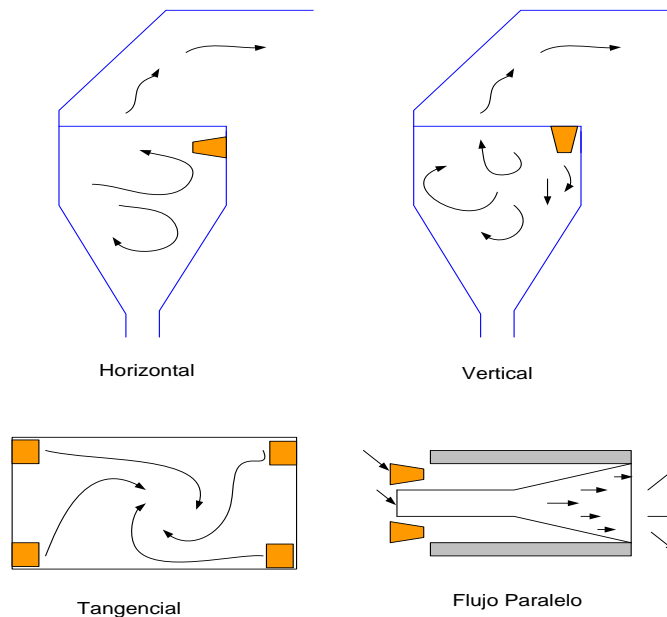
3.8.3 Quemadores de carbón pulverizado

Estos quemadores se utilizan principalmente en centrales de generación eléctrica. El carbón se reduce a partículas muy finas (polvo), porque en general, cuanto más pulverizado queda el carbón, mejor es su combustión, debido a que el área expuesta al aire es máxima. El carbón es transportado mediante una corriente de aire primario hacia el hogar de la caldera. El carbón se enciende a medida que la mezcla aire-carbón entra al hogar, donde se une al aire de combustión secundario, el cual se calienta hasta temperaturas entre 260 y 425°C.

En la figura 14 se presentan los diferentes tipos de quemadores de carbón pulverizado.

⁵ Se habla específicamente del contenido de cenizas

Figura 14. Tipos de Quemadores de carbón pulverizado



Fuente: Calderas a Carbón, Ecocarbón

La velocidad de inyección del carbón es el factor limitante en el uso de estos quemadores. Si la velocidad es demasiado alta, el carbón puede inyectar demasiado lejos en el interior del hogar antes de que ocurra la ignición. Si por el contrario, la velocidad es muy baja, existe la posibilidad que la llama retroceda al quemador o que el carbón se deposite en este y en los ductos de suministro.

Para que los procesos de combustión e ignición sean exitosos, debe existir buena turbulencia para asegurar una buena mezcla aire-carbón. La llama debe formarse en el hogar evitando tocar directamente las partes metálicas de este para no degradarlas.

El aire primario generalmente es el que transporta al carbón dentro del hogar, pero se debe tener en cuenta que: una proporción alta de aire primario tiende a disminuirla temperatura de la mezcla y por lo tanto perjudicar la combustión; así

mismo el aire secundario tiende a retrasar el encendido. Por lo anterior se deduce que un buen dispositivo de combustión debe reunir las siguientes condiciones:

1. Mantener una proporción carbón-aire primario mínimo.
2. Retrasar el aire secundario hasta que se establezca el encendido
3. Aumentar al máximo la recirculación de los gases.

En cuanto a la granulometría, se recomienda (ECOCARBON, 1998):

1. 80% menor que la malla 200 (0.075 mm)
2. 96,5% menor que la malla 100 (0.15 mm)
3. 99.5% menor que la malla 50 (0.30 mm)

4. ANALISIS PRÓXIMO A UNA MUESTRA DE CARBÓN DE LANDAZURI SANTANDER

La minería del carbón ha sido una actividad económica destacada en Landázuri. Su explotación fue artesanal hasta 1968, momento a partir del cual se comienza una extracción tecnificada, con la participación de capital extranjero, en la Empresa Carbones del Carare, la cual atrajo una onda migratoria de gentes de Cundinamarca, Boyacá, Valle y Antioquia. Este auge carbonífero duró relativamente poco; Carbones del Carare se liquida hacia 1975. En la actualidad, la explotación de carbón, es la fuente de ingresos de muchas familias no sólo del municipio, sino de la región, las cuales lo hacen de manera artesanal y autónoma, a excepción de la empresa Carboland LTDA, la cual extrae el mineral y lo exporta a Japón y Polonia.

El carbón de la mina de Carboland LTDA, fue sometido un análisis próximo en el laboratorio de carbones de la Universidad Industrial de Santander, según norma ASTM D3172, la cual se define como la determinación de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo. En nuestro medio y con fines comerciales e industriales se incluye la determinación del poder calorífico y el azufre, esto equivale a los análisis próximos completos.

Para el propósito de este trabajo de grado, la determinación de las propiedades antes mencionadas, es de gran importancia, para caracterizar el tipo de carbón que se utilizará, y con esto definir las condiciones más óptimas para la combustión del mismo.

4.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

Según la norma ASTM D 3173 – 87

➤ EQUIPO

- Mufla (a 110 °C).
- Crisol de porcelana con tapa (h= 22 mm; Ø = 44 mm).
- Balanza de precisión con 5 cifras significativas.
- Pinzas (Para alzar el crisol y evitar alteraciones en la toma de datos).
- Desecador (En el fondo contiene sílica gel).

➤ PROCEDIMIENTO

- Se peso el crisol en la balanza (Previamente secado a 110°C y enfriado en el desecador), sin tapa.
- Se coloco en el crisol aproximadamente 1,00194 g de carbón y luego se peso.
- Posteriormente se llevo el crisol con la muestra a la mufla la cual se encontraba a 110°C, allí se dejo durante 1 hora para evaporar el agua.
- Luego se saco de la mufla y se coloco en el desecador para enfriar el carbón.
- Y después de cierto tiempo se volvió a pesar.

➤ CÁLCULOS

Para el cálculo del porcentaje de humedad de la muestra F (% H_{MF}) se utilizo la siguiente ecuación:

$$\% H_{MF} = \frac{(Peso2 - Peso3)}{(Peso2 - Peso1)} * 100 \quad (4.1)$$

Donde:

- Peso1: peso del crisol, sin tapa y vacío (13.73171 g).
- Peso2: peso del crisol con carbón, sin tapa y antes del secado (14.76453 g).
- Peso3: peso del crisol con carbón, sin tapa y después del secado (14.73072 g).

Reemplazando en la ecuación 4.1 se obtuvo:

$$\% H_{MF} = 3.27 \%$$

4.2 DETERMINACIÓN DE LAS CENIZAS

Según la norma ASTM D 3174 – 89

➤ EQUIPO

- Mufla (a 750 °C).
- Crisol de porcelana con tapa (h= 22 mm; Ø = 44 mm).
- Balanza de precisión con 5 cifras significativas.
- Pinzas
- Desecador

➤ PROCEDIMIENTO

- Se pesó el crisol en la balanza, sin tapa.
- Se colocó en el crisol aproximadamente 1,00124 g de carbón y luego se pesó.

- Posteriormente se llevo el crisol con la muestra a la mufla la cual se encontraba a 750 °C, allí se dejo durante 1 hora para la calcinación.
- Luego se saco de la mufla y se coloco en el desecador.
- Y después de cierto tiempo se volvió a pesar.

➤ CÁLCULOS

Para el cálculo del porcentaje de cenizas de la muestra F (% C_{MF}) se utilizo la siguiente ecuación:

$$\% C_{MF} = \frac{(Peso3 - Peso1)}{(Peso2 - Peso1)} * 100 \quad (4.2)$$

Donde:

- Peso1: peso del crisol, sin tapa y vacio (14.86932 g).
- Peso2: peso del crisol con carbón, sin tapa y antes de calcinarlo (15.86752 g).
- Peso3: peso del crisol con cenizas, sin tapa y después de producirse la calcinación (14.95976 g).

Reemplazando en la ecuación 4.2 se obtuvo:

$$\% C_{MF} = 9.06 \%$$

4.3 DETERMINACIÓN DEL MATERIAL VOLÁTIL

Según la norma ASTM D 3175 - 89^a

➤ *EQUIPO*

- Mufla (a 935 °C).
- Crisol de porcelana con tapa (h= 22 mm; Ø = 44 mm).
- Balanza de precisión con 5 cifras significativas.
- Pinzas
- Desecador

➤ *PROCEDIMIENTO*

- Se peso el crisol en la balanza, con tapa.
- Se coloco en el crisol aproximadamente 0,98012 g de carbón y luego se peso.
- Posteriormente se llevo el crisol con la muestra a la mufla la cual se encontraba a 935 °C, allí se dejo durante 7 minutos donde se sacaron todas las sustancias volátiles.
- Luego se saco de la mufla y se coloco en el desecador.
- Y después de cierto tiempo se volvió a pesar.

➤ *CÁLCULOS*

Para el cálculo del porcentaje de material volátil de la muestra F (% V_{MF}) se utilizo la siguiente ecuación:

$$\% V_{MF} = \frac{(Peso2 - Peso3)}{(Peso2 - Peso1)} * 100 - \% H_{MF} \quad (4.3)$$

Donde:

- Peso1: peso del crisol, con tapa y vacio (18,53138 g).

- Peso2: peso del crisol con carbón, con tapa y antes de sacarle todas las sustancias volátiles (19,5115 g).
- Peso3: peso del crisol con la muestra, con tapa y después de sacarle todas las sustancias volátiles (19,41317 g).
- %H_{MF}: porcentaje de humedad de la muestra F calculado anteriormente (3,27 %).

Reemplazando en la ecuación 4.3, se obtuvo:

$$\% V_{MF} = 10,72 \%$$

4.4 DETERMINACIÓN DEL CARBÓN FIJO

Según la norma ASTM D 3172 – 89. El porcentaje de carbón fijo en la muestra F (% CF_{MF}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% CF_{MF} = 100 \% - (\% H_{MF} + \% C_{MF} + \% V_{MF}) \quad (4.4)$$

Donde:

- % H_{MF}: porcentaje de humedad en la muestra F (3,27%).
- % C_{MF}: porcentaje de cenizas en la muestra F (9,06 %).
- % V_{MF}: porcentaje de material volátil en la muestra F (10,72%).

Todos estos valores fueron calculados anteriormente.

Reemplazando en la ecuación 4.4, se obtuvo:

$$\% CF_{MF} = 76.95 \%$$

4.5 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORIFICO

Con el método de la bomba calorimétrica, y Según la norma ASTM D 3286 – 91.

➤ EQUIPO

- Bomba calorimétrica a volumen constante tipo estática.
- Recipiente calorimétrico.
- Camisa de agua.
- Agitador del agua del recipiente calorimétrico.
- Termómetros de Mercurio de alta precisión (Mide en centésimas de °C).
- Circuito de ignición: se conectan sus terminales a los dos electrodos sobre la bomba calorimétrica.
- Crisoles abiertos de cuarzo, sílice, platino o Ni - Cr.
- Equipos auxiliares de presión (Regulador de presión, manómetro).
- Temporizador.

➤ REACTIVOS

- Para la ignición de la muestra: alambre fusible calibre de Ni - Cr ($\varnothing = 0.16 - 0.20$ mm), con calor de combustión por unidad de longitud conocido.
- Oxígeno, exento de materia combustible, de pureza superior al 99,5%.

➤ PROCEDIMIENTO

- Se peso el crisol de cuarzo en la balanza.
- Se coloco en el crisol aproximadamente 1,00422 g de carbón y luego se peso.

- Posteriormente se llevo el crisol con la muestra y se coloco en el soporte destinado para el crisol dentro del depósito de la bomba.
- Se conecto aproximadamente 10 cm de alambre fusible a los electrodos internos de la bomba y se coloco en contacto con la muestra de carbón.
- Se cerro la bomba y se cargo con 30 atm de oxigeno industrial.
- Luego en el recipiente calorimétrico se pusieron 2,25 litros de agua; esto funciona bajo el método del baño maría.
- Se coloco el recipiente calorimétrico dentro de la bomba, donde se conecto las terminales del circuito de ignición a los electrodos. Además se coloco el agitador y el bulbo del termómetro en el recipiente calorimétrico, luego de esto se cerró todo.
- Posteriormente se prendió el agitador y se espero unos 5 minutos para que se alcanzara el equilibrio y se tomo el respectivo dato de la temperatura inicial ($T_i = 24.87 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Y finalmente se provoco la ignición de la muestra, donde se tomo el dato de la temperatura final ($T_f = 27.56 \text{ }^\circ\text{C}$).

➤ CÁLCULOS

Para el cálculo del poder calorífico de la muestra F (PC_{MF}) se utilizo la siguiente ecuación:

$$PC_{MF} = \frac{(K * \Delta T)}{(Peso2 - Peso1)} \quad (4.5)$$

Donde:

- K: constante calorimétrica ($5088 \frac{Btu}{lb} * \frac{g}{^\circ\text{C}}$).
- ΔT : delta de temperaturas ($T_f - T_i$).
- Peso1: peso del crisol de cuarzo y vacio (5.87594 g).

- Peso2: peso del crisol con carbón (6.88016 g).

Reemplazando en la ecuación 4.5, se obtuvo:

$$PC_{MF} = 13.655,6 \frac{Btu}{lb} = 31,66 M \frac{J}{Kg}$$

Los datos arrojados en el análisis se pueden ver más claramente en la siguiente tabla.

Tabla 3. Análisis próximo carbón de Landázuri

PRUEBA	PORCENTAJE
Humedad	3,27%
Cenizas	9.06%
Material Volátil	10.72%
Carbón Fijo	76,95%
Poder Calorífico	$13.656 \frac{Btu}{lb} = 31.660 \frac{KJ}{Kg}$

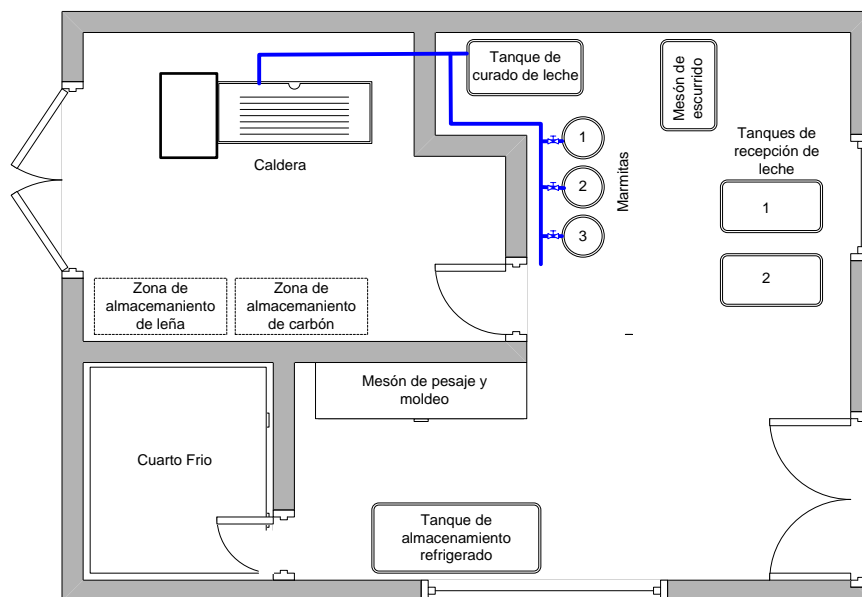
5. PROCESO DE DISEÑO DEL CARBO INYECCIÓN

El proceso de diseño del “carbo inyección” está compuesto por un Diseño Térmico y un Diseño Mecánico.

5.1 DISEÑO TERMICO

La empresa Lácteos El Rancho, es una empresa del sector alimenticio dedicada a la producción de queso doble crema, está ubicada en el municipio de Landázuri departamento de Santander. La empresa cuenta con una caldera pirotubular, la cual genera vapor para alimentar tres marmitas (de doble fondo), un tanque de calentamiento de leche (también de doble fondo), como se observa en la figura 15. El tiempo de trabajo oscila entre las 8 y 12 horas diarias, donde se procesan entre 2000 y 3000 litros de leche. Como se sabe del capítulo 1, la caldera de la empresa genera vapor usando leña como combustible, lo cual está prohibido por normas ambientales debido a la deforestación que esto causa.

Figura 15. Distribucion de planta de Lácteos el Rancho



En la figura 16 se muestra un diagrama de la caldera de la empresa identificando los diferentes tipos de flujo de calor que actúan en ella, los cuales se explican a continuación:

- Q_{sum} = es el calor suministrado al hogar de la caldera, representado por los 331 Kg de leña que se gastan diariamente.
- $Q_{paredes}$ = calor que se pierde desde las paredes de la caldera hacia el ambiente
- $Q_{útil}$ = es el calor que sirve para evaporar el agua
- Q_{gases} = es el calor que llevan los gases calientes que salen por la chimenea

Figura 16. Diagrama de la caldera de Lácteos el Rancho



Como se mencionó en el capítulo 4, el municipio de Landázuri cuenta con una mina de carbón térmico, la cual está siendo explotada actualmente, es por esta razón que la empresa apoyó este proyecto de grado basándose en el costo económico y de disponibilidad de combustible.

5.1.1 Procedimiento de cálculo

El diseño térmico se efectuó siguiendo los siguientes pasos:

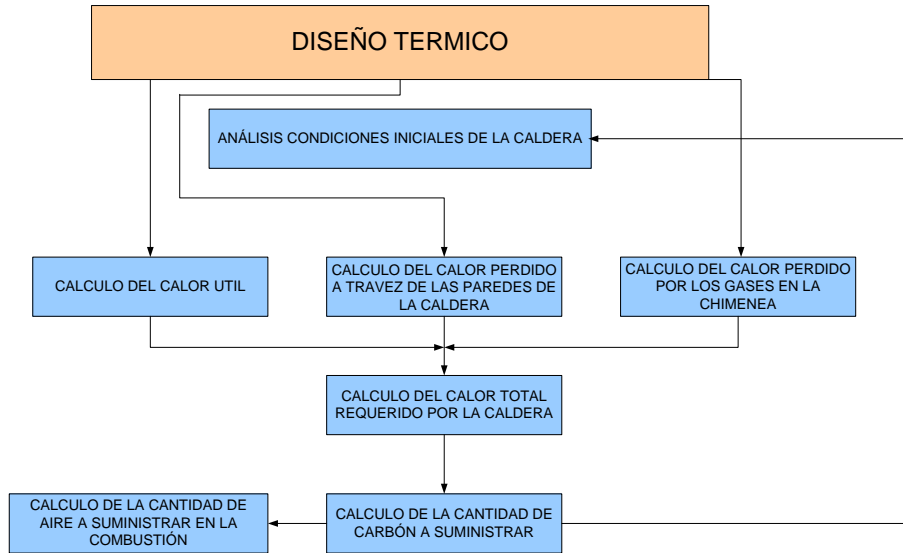
1. Primero se realizara el cálculo del gasto de agua ó cambio de volumen de agua que presento la caldera en un determinado periodo de tiempo Δt .
2. Teniendo el cambio de volumen presentado por la caldera se cálculo la rata de vapor que está generando la caldera y con este valor y el de la entalpia de vapor saturado se halló el calor latente de vaporización, que en éste caso es igual al $Q_{\text{útil}}$.
3. Luego se calcularon las pérdidas de calor en cada una de las paredes de la caldera y con esto se halló el total del calor perdido Q_{paredes} .
4. Después se cálculo el calor perdido por los gases de la chimenea o Q_{gases} .
5. La suma de los calores $Q_{\text{útil}}$, Q_{paredes} y Q_{gases} equivale al calor que se debe suministrar a la caldera, con el valor de Q_{sum} y con el poder calorífico del carbón se halla la cantidad de carbón requerido por la caldera.
6. Por último se calculó la cantidad de aire a suministrar para la cantidad de carbón requerido.

En la figura 17 se muestra gráficamente el procedimiento del diseño térmico.

5.1.2 Condiciones termodinámicas iniciales de la caldera

Para iniciar el análisis termodinámico de esta caldera se peso la cantidad promedio de leña utilizada por día, la cual fue de 331 Kg, con este dato y el poder calorífico de la madera (Vignote & Martinez, 2005) se obtuvo la cantidad de calor suministrado diariamente, lo que se quiere hacer es mantener estas condiciones pero suministrando carbón pulverizado.

Figura 17. Diagrama de Diseño Térmico



El calentamiento de la caldera se está iniciando aproximadamente a las 11 de la mañana y tarda una hora, en esta fase de calentamiento se aplica ACPM a la leña y de esta manera el encendido es más rápido, después de una hora la presión empieza a subir hasta llegar a 60-70 *psi* (presión de trabajo), de ahí en adelante se aplica madera hasta terminar el proceso, un problema que se ha presentado a diario es el de la caída de la presión cuando se abren las llaves de paso de vapor hacia las marmitas, la cual después de unos minutos cae a 40- 45 *psi*, por lo que se tiene que hacer el proceso de cocción del queso por partes, cuando cae la presión a 40 *psi*, hay que cerrar nuevamente las llaves de paso de vapor hacia las marmitas y esperar a que la presión suba nuevamente a 60-70 *psi*, el tiempo de caída de la presión es de 20 a 25 minutos.

El promedio diario de gasto de madera es de 331 Kg⁶, por lo tanto la cantidad de calor gastado diariamente (en 10 horas de trabajo) se muestra en la siguiente tabla.

⁶ De acuerdo a medición hecha por los autores

Tabla 4. Gasto energético de la caldera leña vs. carbón

Tipo de combustible	Cantidad/día	Cantidad/hr	Poder Calorífico	Calor día
Madera	331 Kg	33,1 Kg	19000 KJ/Kg	6289 MJ
Carbón Landázuri	X= 198,7 Kg	19,87 Kg	31656 KJ/Kg	6289 MJ

Es importante resaltar que el poder calorífico de la madera fue tomado de tablas⁷, por lo tanto el valor del calor hallado es un valor aproximado y puede variar dependiendo del tipo de madera que se utilice.

Si queremos mantener las mismas condiciones de generación de vapor, en teoría deberíamos quemar 198,7 Kg de carbón por día en un lapso de 10 horas, esto sin considerar los inquemados de la madera los cuales son muchos y difíciles de calcular (debido a la geometría de la partilla de la caldera), en cambio con el carbón pulverizado el porcentaje de inquemados es muy bajo, debido a que la pulverización se hizo hasta 0,5 mm y el secado del carbón se hizo con la temperatura de las paredes externas de la caldera la cual es de 140 °C, condiciones bajo las cuales se asegura una buena combustión del carbón pulverizado.

5.1.3 Cálculo del calor útil

Se ha llamado calor útil al calor que realmente sirve para evaporar el agua de la caldera, por lo tanto se midió la cantidad de agua evaporada en un lapso de tiempo Δt , cuando la caldera estaba ya en régimen; se halló el volumen inicial en el tiempo $t = 0$ y se hizo la medición de cuanto bajo el nivel en 15 minutos, para esto se hicieron varias mediciones sacándose un promedio del cambio de volumen.

⁷ Vignote & Martinez, 2005

Figura 18. Diagrama de Procedimiento del cálculo del calor útil

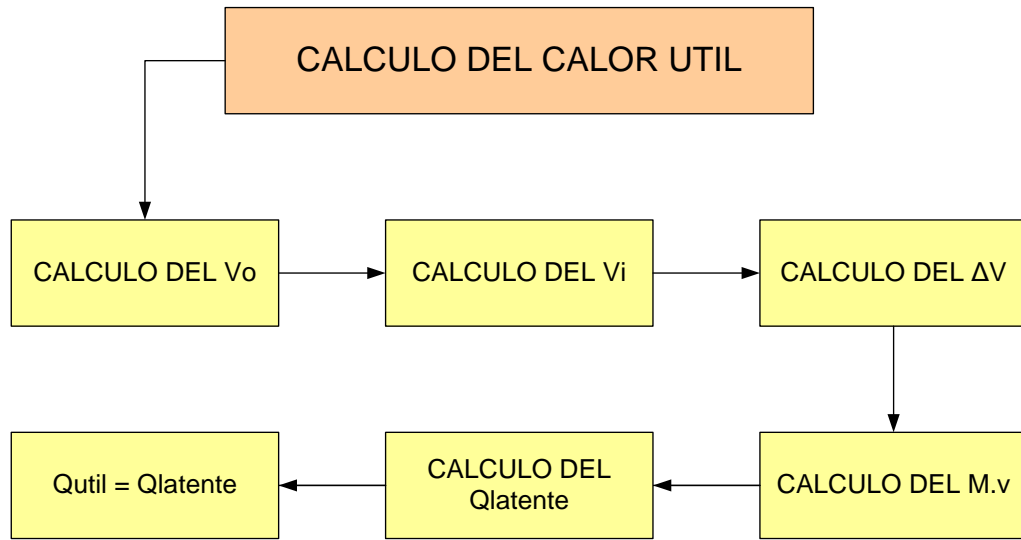
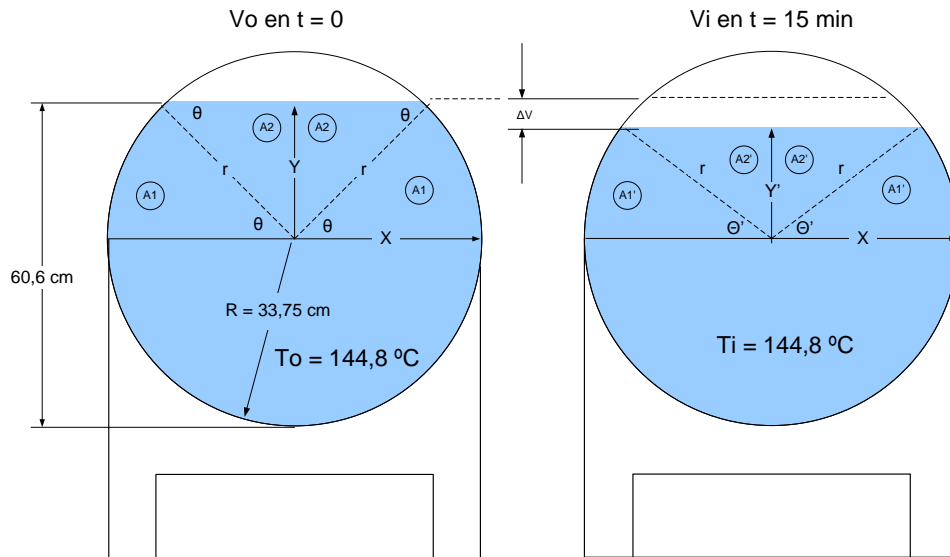


Figura 19. Esquema del cambio de volumen de agua en la caldera



El V_0 se halló sumando las áreas A_1 , A_2 y A_3 y luego multiplicándolas por la longitud de la caldera. En la siguiente tabla se muestran los resultados de las áreas.

Tabla 5. Cálculo del área frontal con agua en la caldera

r_{casco}	$Y = H-r$	$X=(r^2-Y^2)^{1/2}$	$\Theta = \text{sen}^{-1}(Y/r)$	$A1 = \frac{1}{2}(\Theta * r^2)$	$A2 = (X*Y)/2$	$A3 = [(\pi D^2)/4]/2$
33,75 cm	26,85 cm	(+/-)20,45cm	52,7°	523,85 cm ²	274,57 cm ²	1789 cm ²

$$X^2+Y^2=r^2 \text{ (ecuación de un círculo con centro (0,0))} \quad (5.1)$$

$$\text{Sen } \Theta = Y/r;$$

$$V_0 = (A3 + (2 * A1) + (2 * A2)) * (L) \quad (5.2)$$

$$V_0 = \left\{ \left[\frac{\pi * 6,75^2}{4} \right] \text{ cm}^2 + (2 * 523,85 \text{ cm}^2) + (2 * 274,57 \text{ cm}^2) \right\} * \{157 \text{ cm}\}$$

$$V_0 = 531613 \text{ cm}^3$$

De la misma manera se calculó V_i (volumen de agua en un tiempo $(t + \Delta t) = 928,75$ segundos)

$$V_i = (3166 \text{ cm}^2 * 157 \text{ cm}) = 497062 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = V_0 - V_i \quad (5.3)$$

Ahora se calculara el valor de la rata de vapor generado por la madera cuando la caldera está en operación normal; conociendo la presión de trabajo de la caldera, por termodinámica, se puede conocer la temperatura de saturación la densidad a esa presión.

$$P = 60 \text{ psi} = 4,14 \text{ bar}$$

$$T_{\text{sat}} = 144,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} @ 4,14 \text{ bar} = 921,7 \text{ Kg/ m}^3$$

Estos valores fueron tomados de la tabla A.9 del libro “Termodinámica aplicada de Maraday”

$$m = \rho * V \quad (5.4)$$

Cuando se halló la masa del agua que se evaporó, solo se dividió esa masa en el tiempo que se invirtió en dicha evaporación y se obtuvo el flujo másico del agua que se está evaporando, por lo tanto la rata de vapor se muestra en la siguiente tabla junto con los demás cálculos:

$$m.v = m/t \quad (5.5)$$

Tabla 6. Cálculo del flujo de vapor

Vo	Vi	ΔV= Vo – Vi	mv = ρ*ΔV	m.v= mv/t
531.613 cm³	497062 cm ³	34551 cm ³	31, 8456 Kg	0,03428 Kg/s

Como lo que se quiere es calcular la cantidad de carbón que requiere la caldera cuando ya está en régimen, el calor sensible no se tendrá en cuenta porque el calentamiento de la caldera se hizo con madera.

El calor latente es la cantidad de calor que se requirió para producir el cambio de estado de líquido a vapor y su valor resulta de multiplicar el flujo másico de agua por la diferencia entre las entalpías de líquido saturado y vapor saturado a la temperatura de 144.8°C, por lo tanto $Q_{latente}$ es:

$$Q_{latente} = m.v (hfg @144,8^{\circ}C) \quad (5.6)$$

$$Q_{latente} = 0.03428 \text{ Kg/s} (2739.68 - 609.936) \text{ KJ/Kg} = 73 \text{ Kw}$$

El calor útil es la fracción de calor generado en el hogar de la caldera, que logró evaporar el agua, por lo tanto de la ecuación 5.2, se tiene:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{latente}} \quad (5.7)$$

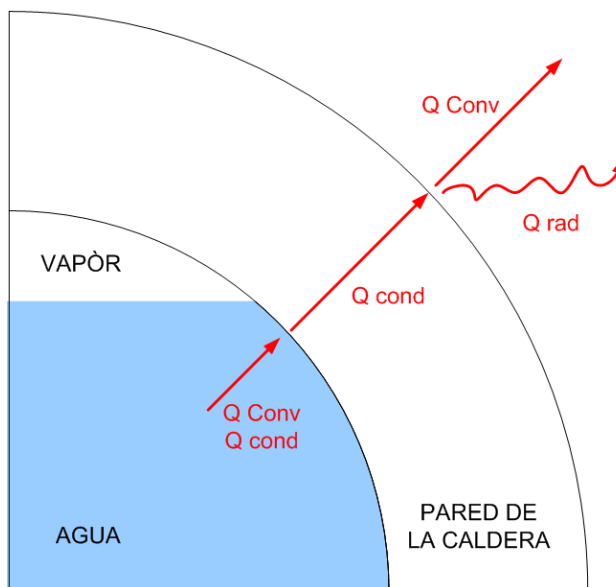
$$Q_{\text{útil}} = 73 \text{ Kw}$$

5.1.4 Cálculo del calor perdido desde las paredes de la caldera hacia el ambiente

La cantidad de calor que un cuerpo caliente pierde hacia el ambiente se lleva a cabo por medio de tres mecanismos de transferencia de calor los cuales son la conducción, convección y radiación de calor; para este caso particular se tomaron temperaturas en las paredes externas de la caldera, por lo tanto de las superficies externas hacia el medio se presentan los fenómenos de convección y radiación.

Las pérdidas de calor por conducción que se puedan presentar a través de los anclajes de la caldera son despreciables, ya que estos tienen poca área de contacto con el piso, por lo tanto nos concentraremos en cuantificar los fenómenos de convección y radiación (Figura 20).

Figura 20. Mecanismos de transferencia de calor en las paredes de la caldera



5.1.4.1 Pérdida de calor por convección a través de las paredes del hogar de la caldera

Para realizar los cálculos de pérdidas de calor por convección se midió con una termocupla, las temperaturas externas de las paredes del hogar (figura 21) y se tomo como temperatura superficial promedio $T_s = 140\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura con la cual se halló la T_f o temperatura fílmica, con esta T_f se hallaron las propiedades del aire y se inicio el proceso de cálculo.

Cabe resaltar que el proceso de convección que se presenta entre las paredes externas de la caldera y el medio es llamado convección libre o natural, en el cual un cuerpo intercambia calor con el medio de manera espontanea, en este caso el cuerpo (las paredes de la caldera), está más caliente que el medio, pero el fenómeno puede darse de manera inversa cuando el cuerpo este mas frio que el medio.

Figura 21. Medición de temperatura del las paredes del hogar



Los cálculos se hicieron tomando como referencia las ecuaciones de flujos externos de convección libre del numeral 9.6 del libro de transferencia de calor de Incropera.

$$T_s = 140 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 413$$

$$T_{\text{amb}} = 18 \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 291 \text{ }^\circ\text{K}$$

Primero se halló la T_f con la cual se tomaron las propiedades del aire.

$$T_f = \frac{T_s + T_{\text{amb}}}{2} \quad (5.8)$$

Tomando propiedades del aire a 350 °K de la tabla A4 del libro de Incropera, se tiene:

$$K = 0.03 \text{ W/m}^\circ\text{K}; \nu = 20.92 \text{ E }^{-6}; \alpha = 29,9 \text{ E }^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \text{Pr}=0.7; \beta = 1/350 = 2,86 \text{ E }^{-3}$$

Con estos valores se puede hallar el número de Rayleigh, el cual representa la magnitud de las fuerzas de empuje y viscosas en la transición de la capa límite de un fluido que está en convección libre; para configuraciones geométricas comunes como placas tenemos la ecuación siguiente (Incropera, 2003).

$$RaL = g \beta \frac{(T_s - T_{\text{amb}})L^3}{(\nu * \alpha)} \quad (5.9)$$

El número de Nusselt en este caso se calcula de acuerdo a la ecuación 9.26, la cual permite cualquier rango de número de Rayleigh:

$$Nul = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * RaL^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (5.10)$$

Esta ecuación es aplicable para una placa vertical isotérmica con T_s constante, como lo es en este caso con $T_s=140$ °C.

Una vez hallado el número de nuselt, fácilmente se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor h para las placas verticales.

$$h = \frac{Nul * K}{L}$$

El valor de h anteriormente hallado servirá para calcular el calor perdido por convección desde las placas que tengan $T_s = 140$ °C hacia el ambiente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos de esta sección.

Tabla 7. Cálculo del h para superficies con $T_s = 140$ °C

$T_f = (T_s + T_{amb})/2$	RaL	Nuselt	h [w/m ² °K]
352 °K	2,043 E9	1,53	6,38

5.1.4.2 Pérdida de calor por convección y radiación en las dos placas verticales laterales del hogar

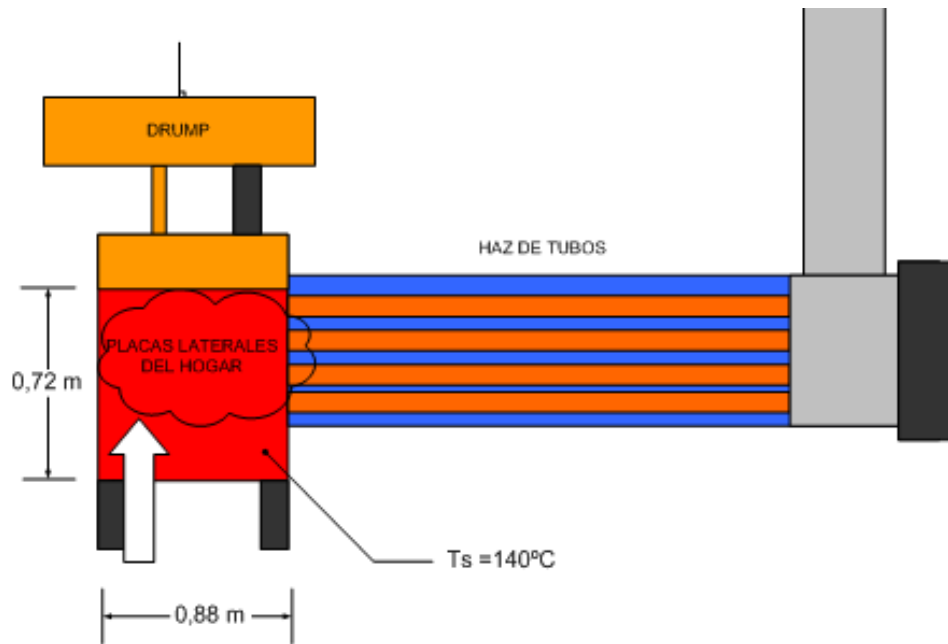
Para calcular la pérdida de calor a través de estas placas, se tienen en cuenta dos mecanismos de transferencia de calor, la convección y la radiación, las cuales se

calculan a partir de las ecuaciones 5.13 y 5.14, la ecuación 5.13 simplemente es la suma de los fenómenos.

$$Q_{\text{total}} = 2 \cdot (Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}) \quad (5.12)$$

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\text{amb}}) \quad (5.13)$$

Figura 22. Dimensiones laterales del hogar



El cálculo de la radiación en este caso es rápido, pues aplicamos la ecuación 1.7 del libro de incropera, se ha tomando una emisividad de 0,8 para todas las paredes de la caldera.

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (5.14)$$

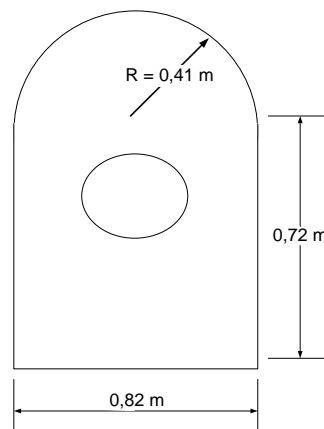
Los resultados se muestran en la siguiente tabla

Tabla 8. Calor perdido por las placas laterales

Q_{conv}	Q_{rad}	$Q_{total}(\text{dos placas})$
493,17 W	630 W	2246,4 W

5.1.4.3 Pérdida de calor a través de la placa vertical frontal del hogar de la caldera

Figura 23. Dimensiones frontales del hogar



Las condiciones de temperatura superficial T_s , temperatura ambiente T_{amb} y emisividad ε de esta placa son las mismas que las del numeral anterior, por lo tanto lo único que cambia es el área:

$$A = (0,72 \text{ m} * 0,82 \text{ m}) + (\pi(0,82 \text{ m})^2/4)/2 = 0,8544 \text{ m}^2$$

$$Q_{conv} = 6,38 \frac{W}{m^2 * ^\circ K} (0,8544 \text{ m}^2)(122^\circ K) = 665 \text{ W}$$

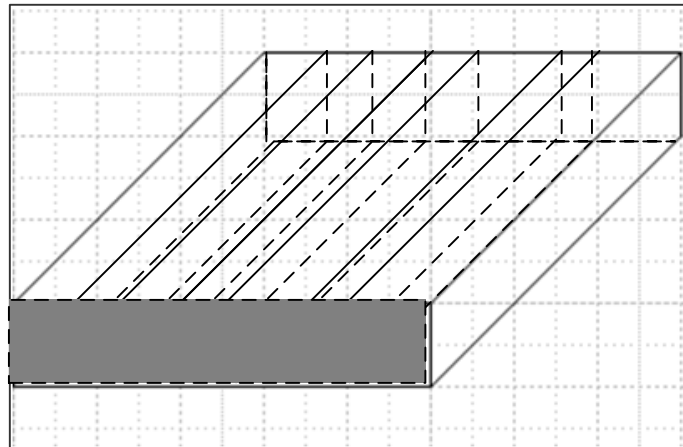
$$Q_{rad} = 0,8 \left(5,67 \exp - 8 \frac{W}{m^2 * ^\circ K^4} \right) (0,8544 \text{ m}^2)(413^4 - 291^4)^\circ K^4 = 849,6 \text{ W}$$

$$Q_{total, pf} = 665 \text{ W} + 849,6 \text{ W} = 1514,6 \text{ W}$$

En este caso como en el anterior el calor total es la suma del calor perdido por convección más el calor perdido por radiación hacia el medio.

5.1.4.4 Pérdida de calor a través de la placa inferior (alta temperatura)

Figura 24. Esquema de la parrilla del hogar



Para calcular cuánto calor transfiere esta placa hacia el ambiente, es necesario hallar una nueva T_f , debido a que la temperatura superficial T_s de esta placa es mucho mayor que la de las demás placas del hogar, porque sobre esta placa inferior está soportada la parrilla de la caldera, superficie en la cual se quema la leña y el carbón en grano grande.

$$T_s = 336 \text{ }^\circ\text{C} = 609 \text{ }^\circ\text{K} ; T_{\text{amb}} = 18 \text{ }^\circ\text{C} = 291 \text{ }^\circ\text{K}$$

La temperatura T_f se cálculo de acuerdo a la ecuación 5.9 y las propiedades del aire a 450 °K (Incropera, 2003) son:

$$\nu = 32,39 \text{ E } -6; K = 0,0373 \text{ W/m}^\circ\text{K}; \alpha = 47,2 \text{ E-6 m}^2\text{/s}; Pr = 0,686;$$

$$\beta = 2,22 \text{ E } -3 \text{ K }^{-1}$$

$$RaL = g \beta \frac{(T_s - T_{amb})L^3}{(\alpha * \beta)}$$

El número de nuselt en este caso se calcula con la ecuación 9.32 del libro de incropera, la cual corresponde a una placa horizontal con superficie inferior caliente y aplica para determinados números de Rayleigh, como las condiciones se cumplen, es aplicable la formula.

$$Nul = 0,27RaL^{1/4} \quad (5.15)$$

$$10^5 \leq RaL \leq 10^{10}$$

Por lo tanto de la ecuación 5.11:

$$h = \frac{Nul * K}{L}$$

Tabla 9. Cálculo del calor perdido por la parilla

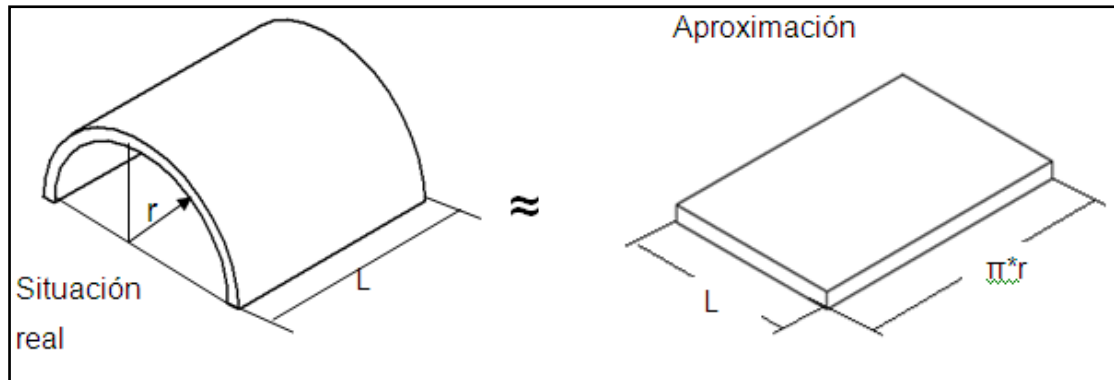
Tf	RaL	Nuselt	h [w/m ² K]	Q _{conv} [W]	Q _{rad} [W]	Q _{total} [W]
450 ° K	2,495 E9	60,344	2,745	630	4267,6	4897,6

Como se puede observar en esta placa la diferencia entre el calor perdido por convección y el calor perdido por radiación creció de una manera mucho mayor que en los cálculos de las anteriores placas, esto se debe a que la radiación es función de T^4 , mientras que la convección es función de T.

5.1.4.5 Pérdida de calor a través del semicilindro superior del hogar

Las condiciones para esta parte del hogar son las mismas que para las placas verticales, $T_s = 140$ °C; $T_{amb} = 18$ °C; $T_f = 350$ °K; por simplicidad se considerara al medio cilindro como una placa plana con pérdida de calor en la parte superior.

Figura 25. Esquema del semicilindro superior de hogar



$$A_{placa} = (\pi * r) L = \pi * 0,41 \text{ m} * 0,88 \text{ m} = 1,133 \text{ m}^2$$

Las propiedades del aire son las mismas de la sección 5.1.4.1

$$RaL = g \beta \frac{(T_s - T_{amb})L^3}{(\alpha * \beta)}$$

En este caso se usa la ecuación 9.31 del libro de incropera, la cual aplica para una placa horizontal con pérdida de calor en la cara superior, por lo tanto el número de nusselt es:

$$Nul = 0,15RaL^{1/3} \text{ Cuando } 10^7 \leq RaL \leq 10^{11} \quad (5.16)$$

$$Nul = 0,15RaL^{1/3} = 0,15(1,168 \text{ E } 10)^{1/3} = 340,344$$

Entonces el valor de h es:

$$h = \frac{Nul * K}{L}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos de calor para este semicilindro:

Tabla 10. Cálculo del calor del semicilindro del hogar

Tf	RaL	Nuselt	h [w/m ² °K]	Q _{conv} [W]	Q _{rad} [W]	Q _{total} [W]
350 °K	1,168 E10	340,33	7,927	1096	1127	2219

5.1.4.6 Cálculo del calor perdido a través del cuerpo de la caldera

Las temperaturas del ambiente y de la pared del cuerpo de la caldera son:

$$T_{amb} = 18 \text{ °C}; T_{cil} = 138 \text{ °C}; T_f = 351$$

En este caso se toma también las propiedades del aire a 350 °K, además se halla la pérdida de calor por metro de longitud de la caldera, que es un cuerpo cilíndrico, como está definido en el libro de Incropera.

$$Q_{total, casco} = Q_{conv} + Q_{rad} = h\pi D(T_s - T_{amb}) + \varepsilon\pi D\sigma(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (5.17)$$

El número de nuselt para este caso se puede calcular a partir de la ecuación 9,34 del libro de Incropera.

$$NuD = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * RaD^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (5.18)$$

$$RaL = g \beta \frac{(T_s - T_{amb})D^3}{(v * \alpha)}$$

$$h = \frac{Nu * K}{L}$$

Entonces la pérdida de calor por metro de acuerdo con la ecuación 5.17 es:

$$Q_{\text{total, cas/m}} = 2146 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

El cálculo que se hizo sirve para hallar las pérdidas del cuerpo de la caldera, pero también sirven para calcular las pérdidas en la chimenea, ya que esta es larga, no está aislada y tiene una temperatura superficial muy similar a la del cuerpo de la caldera, por lo tanto se sumaran los 6 metros de longitud de esta.

$$Q_{\text{total, casco}} = 2146 \frac{\text{W}}{\text{m}} * 2,08 \text{ m} = 4463,68 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total, casco}} = 2146 \frac{\text{W}}{\text{m}} * 6 \text{ m} = 12876 \text{ W}$$

Tabla 11. Calor perdido por al cuerpo y la chimenea de la caldera

T_f	RaL	Nuselt	h [w/m ² K]	Q_{total} [W/m]	Q_{total} [W]
350 ° K	0,115E6	8,05	0,358	2146	17340

El valor anteriormente hallado equivale a la cantidad de calor que pierde el cuerpo de la caldera o parte cilíndrica donde esta ubicado el haz de tubos, entonces el calor total perdido por las paredes de la caldera es la suma de todos los calores hallados.

$$Q_{\text{total, paredes}} = Q_{\text{placas laterales}} + Q_{\text{placa frontal}} + Q_{\text{placa inferior}}$$

$$+ Q_{\text{cilindro superior}} + (Q_{\text{casco}} + Q_{\text{paredes, chimenea}})$$

$$Q_{\text{total, pared}} = 2246,4 \text{ W} + 1514,6 \text{ W} + 4897,6 \text{ W} + 2219 \text{ W} + 17340 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total, pared}} = 28,217 \text{ KW}$$

5.1.5 Cálculo del calor perdido a través de los gases producidos en la combustión

Las pérdidas totales en calderas dependen del combustible y de su alimentación, entre otros factores. En condiciones inadecuadas de operación pueden alcanzar un valor cercano al 30 % del total de la energía aportada por el combustible. En otras condiciones más adecuadas son del orden del 10 % o menos.

Para hacer un cálculo aproximado de las pérdidas en gases por la chimenea se aplica la fórmula:

$$e_g = [(V_{CO_2} \cdot C_{pCO_2}) + (V_{O_2} \cdot C_{pO_2}) + (V_{N_2} \cdot C_{pN_2}) + (V_{SO_2} \cdot C_{pSO_2})] \cdot (T_g - T_a) \quad (5,19)$$

La cual fue tomada de la sección 5.3.1 del libro “Calderas a carbón de la Universidad Pontificia Bolivariana”, en esta fórmula, las unidades de e_g se dan en KJ/Kg de combustible. Si se desea el valor en flujo de energía (E_g) se debe multiplicar el valor de e_g por el flujo de carbón utilizando (mc):

$$E_g = e_g \cdot mc \quad (5.20)$$

En esta fórmula no se ha tenido en cuenta la energía contenida en el CO, la cual es despreciable. En ella, V_i es el flujo volumétrico de cada gas i , en $m^3(n)/Kg$ de combustible, C_{p_i} es el calor específico promedio de cada gas i , en $KJ/m^3(n) \text{ } ^\circ K$. T_g es la temperatura de los gases en la chimenea y T_a es la temperatura ambiente.

A partir de la siguiente tabla se hallan el número de moles de cada componente y luego hallamos los volúmenes con estos números de moles; la composición química del carbón de Landázuri es:

% C = 79,33; % H = 5,03; % N = 1,69; % O = 4,77; % S = 0,84

Tabla 12. Cálculo del número de moles

Composición		Reacción de combustión	Moles (n)	Comburente	Gases de combustión	
Elemento	% Kg	Oxidación		nO ₂	Componente	Moles
C	A=0,793	C + O ₂ → CO ₂	n _C = 0,793/12 = 0,066	A/12 = 0,066	CO ₂	nCO ₂ = n _C
H₂	B=0,0503	H ₂ + ½O ₂ → H ₂ O	n _H = 0,0503/2 = 0,02515	B/4 = 0,012575	H ₂ O	nH ₂ O = n _{H₂}
S	D=0,0084	S + O ₂ → SO ₂	n _S = 0,0084/32 = 2,625E-4	D/32 = 2,625E-4	SO ₂	nSO ₂ = n _S

El volumen de los gases de combustión se calcula según la siguiente ecuación⁸:

$$V_{\text{gas}} = 22,4 \cdot n_{\text{gas}} \quad (5.20)$$

nO₂ teoricas = 0,066 + 0,012575 + 2,625 E -4 = 0,0788 moles (despreciando el O₂ del carbón)

nO₂ exceso 20% = 1,2 * 0,0788 = 0,0946 moles

n aire = (100*0,0946)/21 = 0,4505 moles

nN₂ = 0,4505 * 0,79 = 0,356 moles

Del libro de calderas a carbón tabla 18 pagina 91, se tomó el valor del Cp para los diferentes gases a una temperatura de 200 °C, que fue la aproximada medida en la chimenea de la caldera, en la siguiente tabla se muestran los números de moles, los volúmenes y los Cp de cada uno de los gases presentes en la combustión.

⁸ Tomada de <http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/estudios-cálculos>

Tabla 13. Cálculo del volumen de los gases

Tipo de gas	n _{moles}	V _{gas} [m ³ /Kg _{comb}]	Cp [KJ/Nm ³ °K] @200°C
N ₂	0,356	7,974	0,306
O ₂	0,0946	2,119	0,3084
CO ₂	0,066	1,48	0,4393
H ₂ O	0,02515	0,563	-----
SO ₂	2,625 E-4	0,00588	0,4264

$$Cp_{\text{promedio}} = 0,370 \text{ KJ/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Las pérdidas se calcularon con el volumen total de los gases y con el valor promedio de Cp así:

$$Q_{\text{gases}} = V_{\text{total}} * Cp_{\text{promedio}} (T_g - T_{\text{amb}}) \quad (5.20)$$

$$Q_{\text{gases}} = (12,1426 \text{ m}^3/\text{Kg}_{\text{comb}})(0,370 \text{ KJ/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{K})(200 - 18) = 817,7 \text{ KJ/Kg}_{\text{comb}}$$

Para incluir la energía en el vapor de agua se procede según la ecuación de la sección 5.3.1 página 92 del libro calderas a carbón.

$$Q_{\text{gases}} = (817,7 \text{ KJ/Kg}_{\text{comb}}) + 2400 * X' \quad (5.21)$$

Donde X': fracción másica del contenido de agua en los gases de combustión.

Para calcular la fracción másica de agua en los gases de combustión, tomamos el análisis hecho en la tabla 10 del libro de calderas a carbón, donde:

$$X' = \frac{(V_{\text{H}_2\text{O}})(0,804)}{V_{\text{gases}}} \quad (5.22)$$

$$X' = \frac{(0,56336 \text{ m}^3)(0,804)}{12,1426 \text{ m}^3} = 0,0373$$

Por lo tanto el calor de los gases es:

$$Q_{\text{gases}} = \left(817,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kgcomb}} \right) + (2400 * 0,0373) = 907,22 \frac{\text{KJ}}{\text{Kgcomb}}$$

Considerando que el gasto de combustible medido fue de 0,01149 Kg/s.

$$Q_{\text{gases}} = 907,22 \text{KJ/Kg}_{\text{comb}} * 0.009194 \text{ Kg}_{\text{comb}}/\text{s} = 8,34 \text{ KW}.$$

5.1.6 Cálculo de la cantidad de carbón a suministrar

Para calcular la cantidad de carbón que se debe suministrar al hogar de la caldera, hay que sumar las cantidades de los calores útil, calor de perdida a través de las paredes y el calor de perdida por los gases de la chimenea, la suma de estas cantidades da un calor total requerido, el cual es igual a una masa de carbón, multiplicada por su respectivo poder calorífico superior; de la ecuación descrita se conoce poder calorífico superior (PCS) del carbón, hallado mediante las pruebas realizadas en el laboratorio de la escuela de ingeniería metalúrgica de la UIS y también se conoce la sumatoria de los calores en la caldera, por lo tanto la única incógnita es la masa de carbón la cual es hallada a continuación.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{sum}} &= Q_{\text{util}} + Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{gases}} \\
 Q_{\text{sum}} &= 73 \text{ Kw} + 28,217 \text{ Kw} + 8,34 \text{ Kw} = 109,6 \text{ Kw} \\
 \dot{m}_{\text{carbón}} * \text{PCS} &= Q_{\text{sum}} \tag{5.23} \\
 \dot{m}_{\text{carbón}} &= Q_{\text{sum}}/\text{PCS} \\
 \dot{m}_{\text{carbón}} &= (109,6 \text{ KJ/s}) / (31760 \text{ KJ/Kg}) \\
 \dot{m}_{\text{carbón}} &= 0,00345 \text{ Kg/s} = 0,2071 \text{ Kg/min} \\
 \dot{m}_{\text{carbón}} &= 12,423 \text{ Kg/hr}
 \end{aligned}$$

Asumiendo una eficiencia de caldera del 80 %, tenemos que la masa de carbón a suministrar es:

$$\dot{m}_{\text{carbón}} = (12,423 \text{ Kg/hr}) / (0,80)$$

$$\dot{m}_{\text{carbón}} = 15,53 \text{ Kg/hr}$$

$$\dot{m}_{\text{carbón}} = \mathbf{0,259 \text{ Kg/min}}$$

5.1.7 RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE

Las muestras de carbón que se extrajeron de las minas presentes en el municipio de Landázuri Santander, fueron sometidas a un análisis próximo en el laboratorio de carbones de la Universidad Industrial de Santander como se mostró en el capítulo anterior y los datos del análisis último fueron suministrados por el administrador de la mina Carboland LTDA., los cuales se presentan en la siguiente tabla:

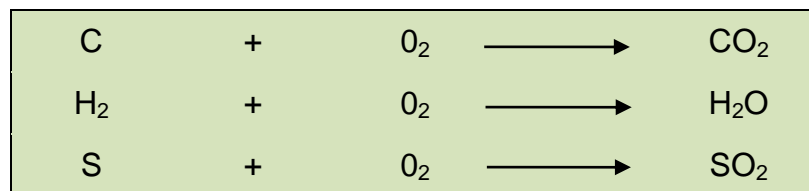
Tabla 14. Análisis próximo y último al carbón de Landázuri Santander

ANÁLISIS PRÓXIMO				ANÁLISIS ÚLTIMO				
% HUMEDAD	% CENIZAS	% MAT. VOLÁTIL	% CARBONO FIJO	% C	% H ₂	% N ₂	% O ₂	% S
3.27	9.06	10.72	76.95	79.33	5.03	1.69	4.77	0,84

Como se puede observar de la tabla 14, el análisis último nos muestra cinco componentes principales del carbón y sus respectivos porcentajes, de los cuales para efectos del fenómeno de combustión de la mezcla aire carbón son agentes reaccionantes: el carbono, el hidrogeno, el azufre y el oxigeno; el nitrógeno no reacciona, por lo tanto ingresa como N₂ y sale de la misma manera al igual que el nitrógeno del aire

El oxígeno mínimo requerido para la reacción del carbono (C), del hidrógeno (H₂) y del azufre (S) para formar completamente CO₂, H₂O y SO₂, de acuerdo con las reacciones de la tabla 2, representa el oxígeno estequiométrico teórico, este se utiliza para calcular la cantidad mínima de aire necesario para que se lleve a cabo la combustión de una manera adecuada.

Tabla 15. Reacciones globales en la combustión de carbón



De acuerdo a los porcentajes de la tabla 14, por cada kilogramo de carbón se tienen 793 gramos de carbono, 50,3 gramos de hidrógeno, 47,7 gramos de oxígeno, 16,9 gramos de nitrógeno y 8,4 gramos de azufre; de la tabla periódica se obtienen los pesos atómicos de cada uno de estos elementos y con estos datos se halla el número de moles presentes de cada componente por kilogramo de carbón, este cálculo se hace de la misma manera que en el libro de Maraday.

$$\text{C: } \frac{793,3 \text{ g}}{12 \text{ g/mol}} = 66,1 \text{ moles}$$

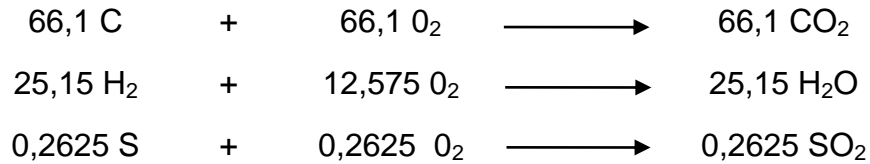
$$\text{O: } \frac{47,7 \text{ g}}{32 \text{ g/mol}} = 1,48 \text{ moles}$$

$$\text{H: } \frac{50,3 \text{ g}}{2 \text{ g/mol}} = 25,15 \text{ moles}$$

$$\text{N: } \frac{16,9 \text{ g}}{28 \text{ g/mol}} = 0,604 \text{ moles}$$

$$\text{S: } \frac{8,4 \text{ g}}{32 \text{ g/mol}} = 0,2625 \text{ moles}$$

Reacción teórica:



De lo anterior se saca el O₂ requerido el cual resulta de la suma:

$$\begin{array}{rcl}
 66,1 + 12,575 + 0,2625 & = & 78,94 \text{ moles} \\
 \text{Menos el O}_2 \text{ del carbón} & = & - 1,48 \text{ moles} \\
 \hline
 & & 77,46 \text{ moles de O}_2
 \end{array}$$

La relación aire-combustible (A^0) teórica se obtiene del libro de "Termodinámica Aplicada De Maraday" en su capítulo de combustión, específicamente la ecuación 4.5, la cual es:

$$A^0 = \frac{138,3 \times \varepsilon}{M_f} \quad (5.24)$$

Donde: ε = Oxígeno teórico a suministrar
 M_f = Masa molar del combustible

$$A^0 = \frac{138,3 \times 77,46}{916,6} = 11,7 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg de Carbón}}$$

Con un exceso de aire del 20% se tiene que:

$$A = \alpha \cdot A^0 = 1,2 \cdot 11,7 = 14,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg de Carbón}} \quad (5.25)$$

Entonces la cantidad de aire por minuto, de acuerdo con el gasto de carbón calculado por minuto es:

$$A = 14,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg de Carbón}} (0,259 \text{ Kg de carbón /min}) = 3,6364 \text{ Kg de aire / min}$$

La densidad del aire a una presión de 1 atmosfera y T = 20 °C es $\rho=1,204 \text{ Kg/m}^3$, por lo tanto:

$$\rho = m / V$$

$$V_{\text{aire}} = m / \rho$$

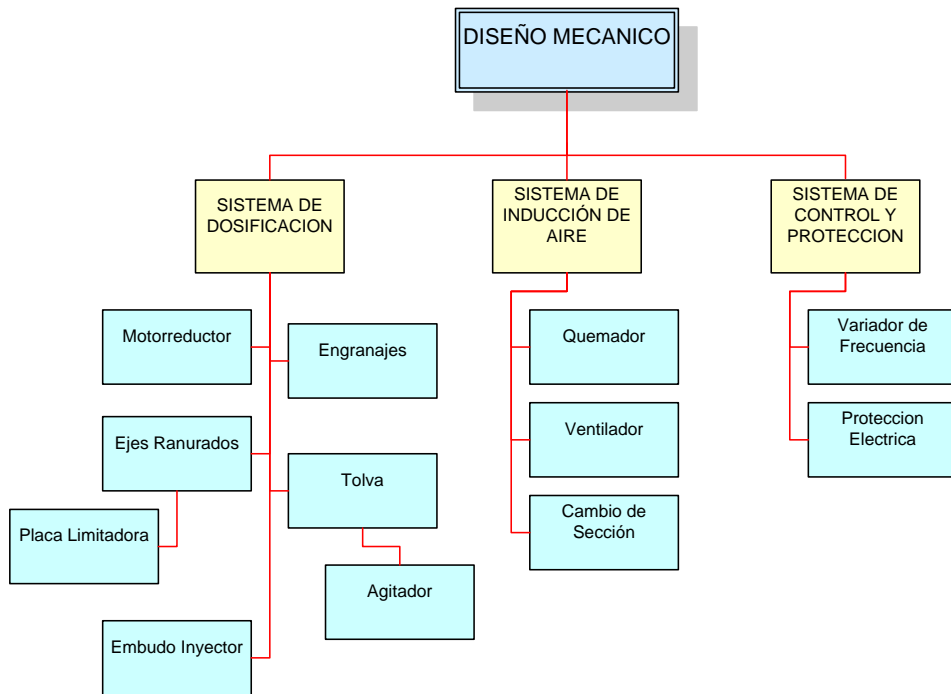
$$V_{\text{aire}} = (3,6364 \text{ Kg de aire / min}) / (1,204 \text{ Kg/m}^3) = 3,0203 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$\mathbf{V_{\text{aire}} = 106,66 \text{ CFM}}$$

5.2 DISEÑO MECANICO

En el diseño del “Carbo Inyección”, el dimensionamiento de todos los componentes que lo integran, juegan un papel muy importante, ya que el suministro de carbón a la caldera se debe realizar con la mayor precisión posible para poder cumplir con los requerimientos de combustible requeridos en el diseño térmico.

Figura 26. Diagrama del diseño mecánico



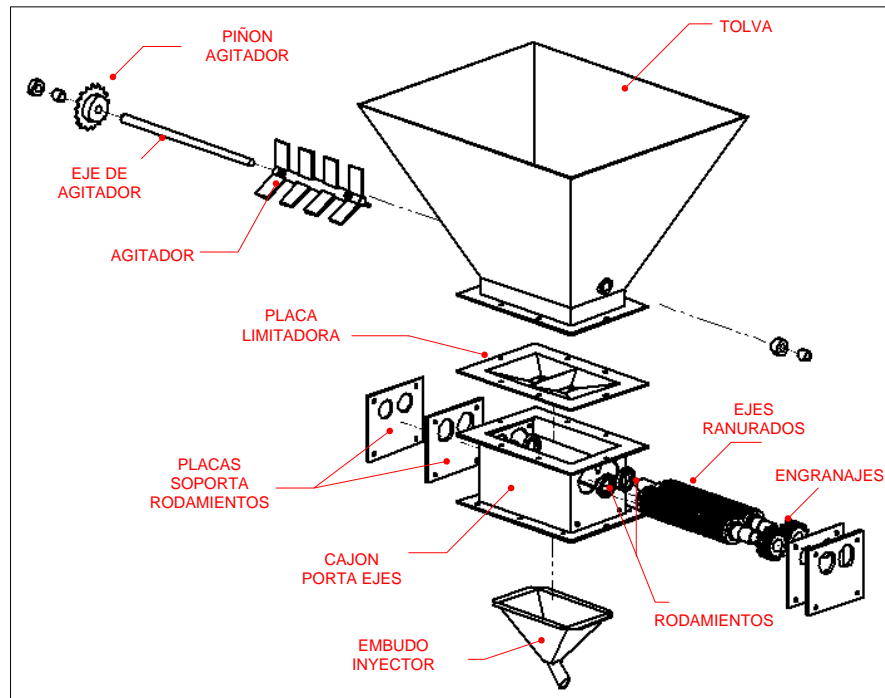
5.2.1 SISTEMA DE DOSIFICACION

El sistema de dosificación del “Carbo Inyección” es el de más importancia, por lo tanto se debe asegurar las más óptimas condiciones de diseño. La dosificación se realizará mediante dos ejes paralelos y separados entre sí 0,2 mm para evitar fuerzas de rozamiento que generen el calentamiento de los mismos y esfuerzos

adicionales. Estos ejes llevarán unas ranuras que buscan empaquetar o crear volúmenes de carbón cuando se encuentren en la parte superior y lo entreguen cuando lleguen en la posición inferior a un embudo que lo inyectará al ducto impulsión de aire y transportarlo así hasta el quemador. El volumen de las ranuras se rige por la cantidad de carbón a suministrar a la caldera y la velocidad de giro de los ejes.

En la siguiente figura se muestra un diagrama del sistema de dosificación, identificando cada una de sus partes, las cuales describiremos a posteriormente.

Figura 27. Partes del sistema dosificador

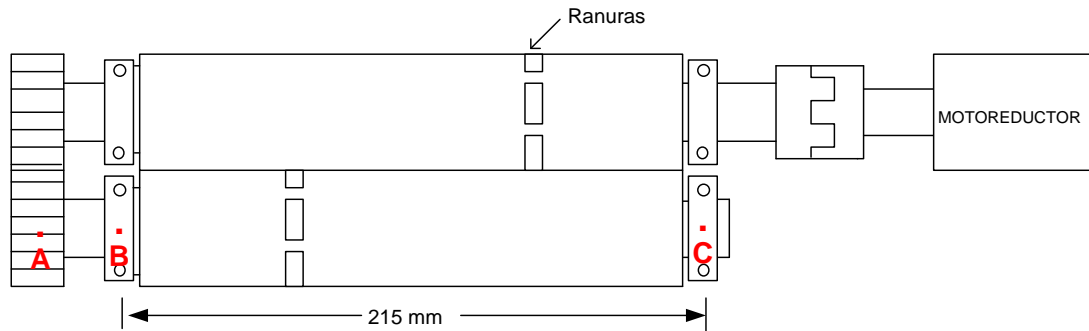


5.2.1.1 Diseño de los ejes

El diseño de los ejes se guiará por el procedimiento recomendado por MOTT (capítulo 12), el cual se rige por la norma ANSI B1 106.IM-1985.

El diagrama preliminar para la ubicación de los ejes se muestra a continuación:

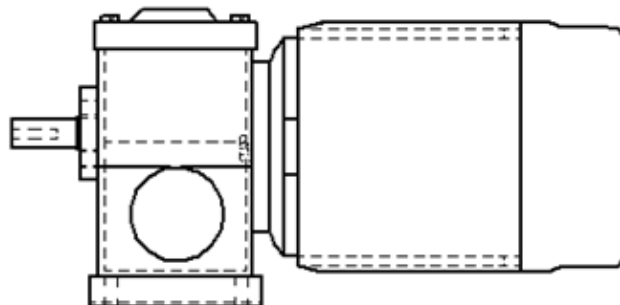
Figura 28. Diagrama preliminar de los ejes



➤ Selección de Motorreductor

Como se puede notar los ejes no van a estar sometidos a grandes cargas, sino solamente transmitirán el movimiento para lograr empaquetar y entregar el carbón a la línea de aire la cual estará ubicada en la parte inferior a estos. Por esta razón el torque que necesita el sistema no es relevante, por lo tanto usaremos uno de baja potencia con el fin de adquirirlo a un costo bajo y también tener un bajo consumo de energía. Bajo estas consideraciones se seleccionó un motorreductor con las siguientes características:

Figura 29. Motorreductor



$N_{\text{Motor}} = 1790 \text{ rpm}$
Reducción = 50:1
 $N_{\text{Salida}} = 35,8 \text{ rpm}$
Potencia = 0.4 Hp

$$T = \frac{Pot * K}{rpm} \quad (5.26)$$

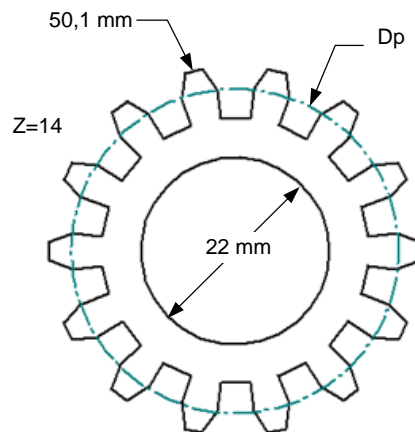
$$T = \frac{(0,4 Hp * 63000 \frac{Lb \cdot in}{Hp} * rpm)}{35,8 rpm}$$

$$T = 704 Lb \cdot in = 8.111 Kgf \cdot mm$$

➤ Selección de engranajes

Los engranajes que necesita el sistema de dosificación girarán a tan solo 35,8 rpm y deberán tener igual número de dientes para que los dos ejes roten a la misma velocidad. Bajo estas condiciones se seleccionó un engranaje recto, por adquirirse a más bajo costo que los helicoidales, y ya que su velocidad de trabajo es baja, el ruido característico de estos engranajes no será un problema.

Figura 30. Engranaje recto



Cuando los engranajes están en funcionamiento, la distancia entre sus centros (d_c), que a su vez será también la distancia entre centros de los ejes, se describe por la siguiente ecuación:

$$dc = \frac{Dp+dp}{2} \quad (5.27)$$

Donde:

Dp = Diámetro primitivo del conducido

dp = Diámetro primitivo del conductor

Para este caso, $Dp = dp$ por ser engranajes idénticos, de esta manera la ecuación anterior queda reducida a:

$$dc = Dp \quad (5.28)$$

De Mott (capitulo 8) tenemos las siguientes relaciones para engranajes rectos:

$$De = Dp + 2M \quad (5.29)$$

$$De = \frac{[Dp*(Z+2)]}{Z} \quad (5.31)$$

$$M = Dp / Z \quad (5.30)$$

$$Dp = \frac{[Z * De]}{(Z + 2)}$$

Reemplazando:

$$Dp = \frac{[14*50,1]}{(14+2)} = 43,84 \text{ mm}$$

$$De = Dp + 2 \left(\frac{Dp}{Z} \right)$$

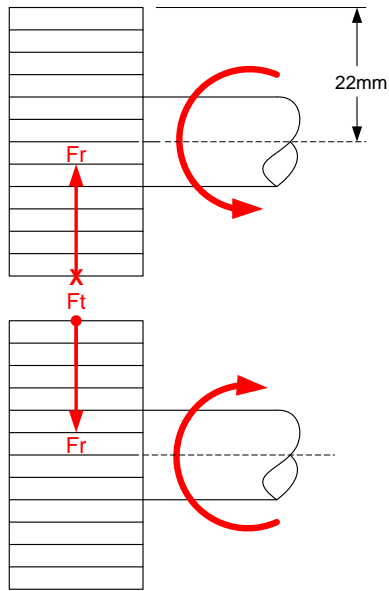
$dc = 43,84 \text{ mm}$

$$De = \frac{[(Z * Dp) + (2 * Dp)]}{Z}$$

Como se había mencionado antes la distancia entre los centros de los ejes será también 43,84 mm.

➤ **Cálculo de los ejes**

Figura 31. DCL engranajes



$$F_t = \frac{2T}{D} = \frac{2 \times 8.111 \text{ kgf} \cdot \text{mm}}{44 \text{ mm}}$$

$$F_t = 368 \text{ kgf}$$

$$\varphi = 20^\circ \text{ (Recomendado)}$$

$$F_r = F_t \cdot \tan \varphi = 368 \times \tan 20$$

$$F_r = 134 \text{ kgf}$$

$$F_{axial} = 0 \text{ (Engranajes rectos)}$$

➤ **Torque sobre los engranajes**

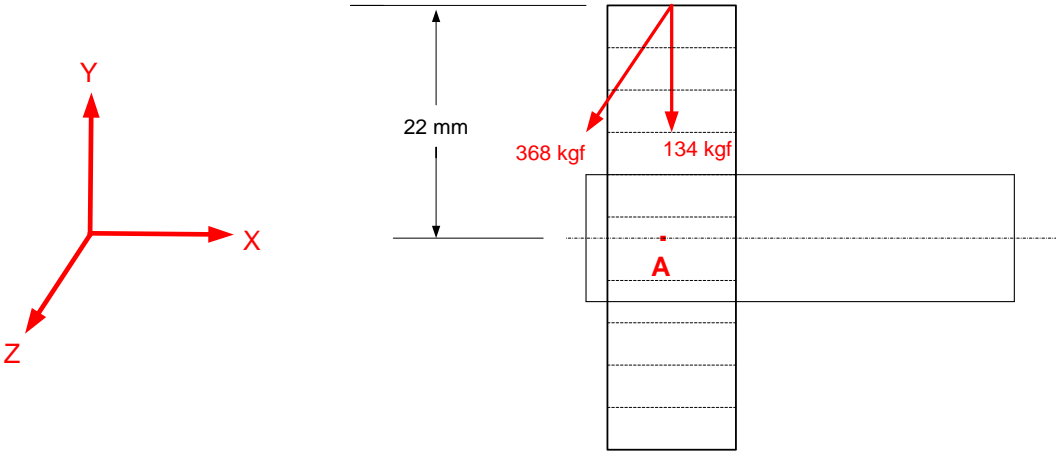
Para el diseño de ejes se debe utilizar el torque de trabajo a que serán sometidos los mismos, para este diseño, queriendo ser conservativos el torque más crítico que sufrirá el sistema, será el máximo entregado por del motorreductor, en el caso hipotético que los ejes sufran un atascamiento. En la figura 32 se muestran las fuerzas que actúan en el punto "A", donde está el engranaje. Obsérvese que el engranaje "A" es impulsado por uno de las mismas dimensiones, encargado de transmitir el torque procedente del motor, entonces calculamos el torque en el punto A:

$$T = F_t \times D_p/2 \tag{5.32}$$

$$T_A = 368 \text{ kgf} \cdot 22 \text{ mm}$$

$$T_A = 8.096 \text{ kgf} \cdot \text{mm} = 703 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Figura 32. Perspectiva de fuerzas sobre el engranaje A



Como los engranajes son rectos, no hay fuerzas en dirección X, en otras palabras la Fuerza axial es igual a cero.

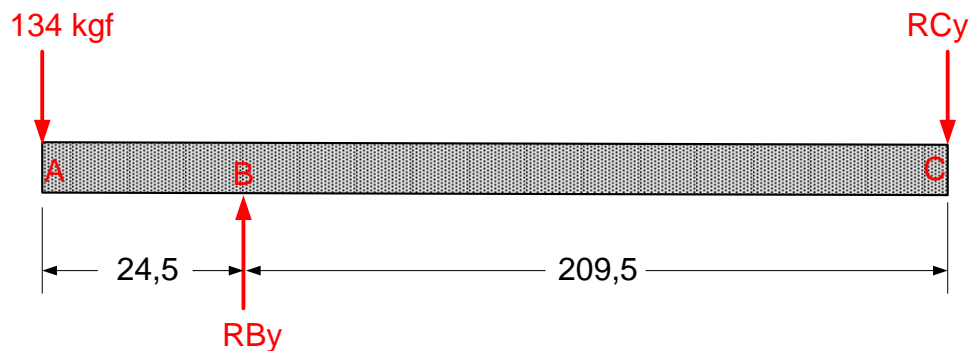
El siguiente paso es indicar las fuerzas que actúan sobre el eje (figura 33), en los planos de acción correctos y en la dirección correcta; después se calcularán las reacciones en los rodamientos, y se prepararán los diagramas de fuerzas cortantes y momento flexionante, como se muestra a en las figura 34.

Se continúa con el diseño mediante el cálculo del diámetro mínimo aceptable del eje, en varios puntos del mismo. En cada punto se observará la magnitud del par torsional y del momento flexionante que existan allí y se estimará el valor de los factores de concentración de esfuerzos. Si en la cercanía del punto de interés existe más de una concentración de esfuerzos, para el diseño se

empleará el valor mayor. Con esto se supone que las discontinuidades geométricas mismas no interactúan lo cual es una buena práctica.

➤ **Flexión plano X – Y**

Figura 33. Diagrama de fuerzas en el plano X – Y



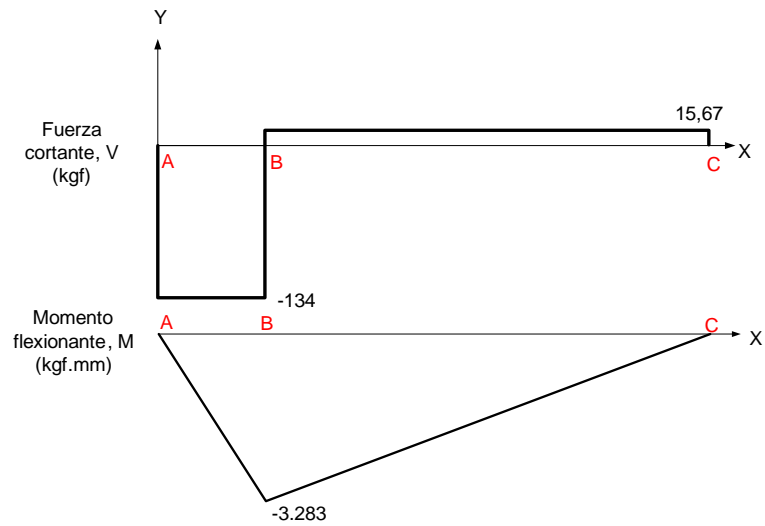
Se calcularon las reacciones en B y C:

$$R_{By} = 150 \text{ kgf}$$

$$R_{Cy} = 15,67 \text{ kgf}$$

Ahora se prepararon los diagramas de fuerzas cortantes y momento flexionante como se muestra a continuación:

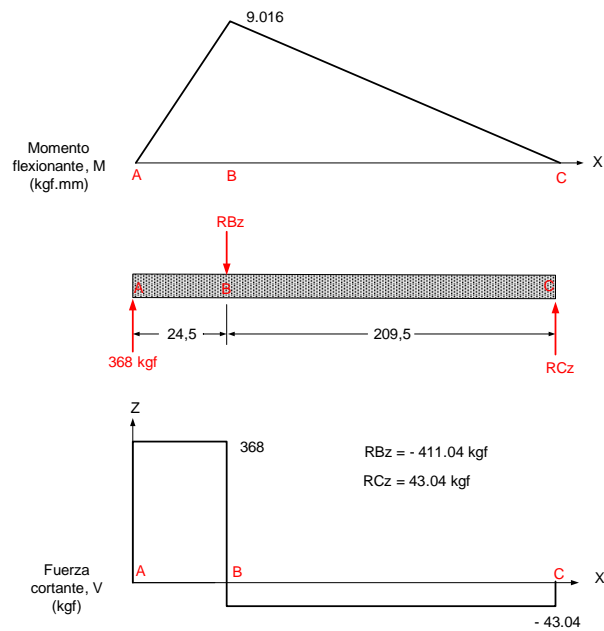
Figura 34. Diagrama de cortante y flexión para el eje, plano X - Y



➤ **Flexión en el plano X - Z**

De la misma manera que en el plano X - Y, se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 35. Diagramas de carga cortante y flexión, plano X - Z



➤ **Material para la construcción de los ejes**

Para el maquinado del eje se escogió acero AISI 1045 OQT 1300, lo cual significa es un acero al carbón, sin otro elemento aleante, y con 45 % de carbono, además OQT 1300, indica que el acero se sometió en inmersión en aceite y se temple a 1300° F. la selección se hizo por tratarse de un material con buenas propiedades mecánicas para el trabajo que se necesitan los ejes, ya que estos no están sometidos a grandes esfuerzos por lo que su propósito es de únicamente servir de dosificador, y también por conseguirse en el mercado muy fácilmente y a un bajo costo con respecto a otros aceros aleados.

Las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 OQT 1300 se describen a continuación:

- Resistencia a la tensión (S_u) = 88.000 *psi*
- Resistencia de fluencia (S_y) = 61.000 *psi*
- Ductilidad 33 %
- Dureza Brinell (HB) = 183

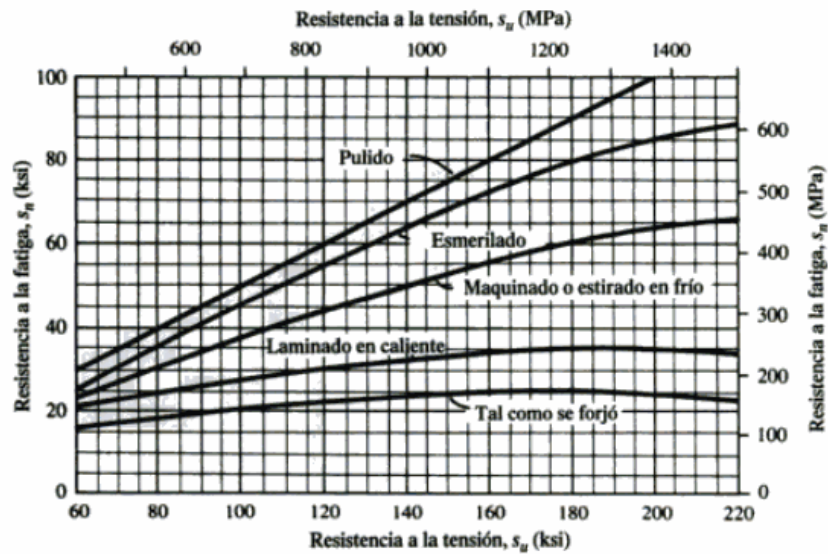
Mediante la figura 36, podemos estimar la resistencia a la fatiga (S_n), es igual a $S_n = 38.000$ *psi*.

Como se conoce la distancia entre centros de los ejes, que a su vez es el mismo diámetro mayor de los ejes el cual se calculó de 44 mm, de acuerdo a los engranajes seleccionados, entonces, de la figura 37 se selecciona el factor por tamaño $C_S = 0.82$.

También se debe especificar el factor de confiabilidad. Es una decisión de diseño, para este caso, se diseñará con una confiabilidad del 99% y se

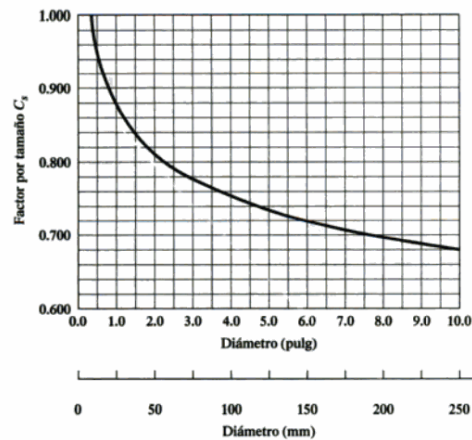
manejará un factor de confiabilidad $C_R = 0.81$ según la tabla 16. Por lo tanto ya se puede calcular la resistencia a la fatiga modificada con la siguiente ecuación.

Figura 36. Resistencia a la fatiga (S_n) en función de la resistencia a la tensión, para acero forjado con varias condiciones de superficies



Fuente: Diseño de elementos de máquinas. MOTT

Figura 37. Factor por tamaño



Fuente: Diseño de elementos de máquinas. MOTT

$$S'_n = S_n C_S C_R \quad (5.33)$$

$$S'_n = (38000)(0,82)(0,81)$$

$$S'_n = 25240 \text{ psi}$$

Se escogerá como factor de diseño $N = 2$, por lo que no se espera que el dosificador tenga choque o impacto inusual.

Tabla 16. Factores de Confiabilidad C_R

Confiabilidad deseada C_R	
0.50	1.0
0.90	0.90
0.99	0.81
0.999	0.75

Fuente: Diseño de elementos de máquinas. MOTT

➤ Cálculo del diámetro de las secciones

Se analizará punto por punto para lograr establecer el diámetro mínimo sugerido de acuerdo con la norma ANSI B1 106.IM-1985 ya anteriormente mencionada.

- Punto A:** El engranaje A produce torsión en el eje, desde A hacia la derecha. A la izquierda de A , no hay fuerzas, ni flexión ni torsión. El momento flexionante en A es cero, porque es un extremo libre del eje. Ahora se empleara la ecuación (5.34) para calcular el diámetro requerido del eje en A , mediante sólo el término de la torsión.

$$D = \left[\frac{32 N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{1/3} \quad (5.34)$$

$$D_A = \left[\frac{32 \cdot 2}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{703}{61000} \right)^2} \right]^{1/3}$$

$$D_A = 0.6 \text{ in} = 15,2 \text{ mm}$$

Como el engranaje tiene un diámetro interior de 22 mm, se dejará ese mismo diámetro para la sección A de eje.

$$D_A = 22 \text{ mm}$$

2. **Punto B:** El punto B es el lugar de un rodamiento, debe tener un hombro tal que permita un correcto giro del rodamiento, además entre el barreno del rodamiento y el asiento del eje se deja un ajuste a presión ligera.

El momento flexionante en B es la resultante del momento en los planos XY y XZ, de acuerdo con las figuras 33 y 34:

$$M_B = \sqrt{M_{By}^2 + M_{Bz}^2} \quad (5.35)$$

$$M_B = \sqrt{3.283^2 + 9.016^2}$$

$$M_B = 9.595 \text{ kgf} \cdot \text{mm} = 832 \text{ lbf} \cdot \text{in}$$

Ahora se debe determinar el valor del factor de concentrador de esfuerzos K_t , el cual según Mott, para un chaflán redondeado es de 1,5. Teniendo las variables plenamente identificadas empleamos la ecuación (5.34), para calcular el diámetro de la sección B.

$$D_B = \left[\frac{32 * 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1,5 * 832}{25.240}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{703}{61.000}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$D_B = 1.009 \text{ in} \approx 1 \text{ in}$$

➤ Selección de rodamientos

Los cojinetes, tienen como propósito soportar cargas y al mismo tiempo permitir el movimiento relativo entre dos elementos de una máquina. El término *cojinete con contacto de rodadura* se refiere a una gran variedad de cojinetes llamados rodamientos. El tipo más común de rodamientos soporta un eje rotatorio, y resiste cargas puramente radiales, o una combinación de cargas radiales y axiales (de empuje). Algunos rodamientos están diseñados para soportar solamente cargas de empuje.

En la tabla 17 se describirán varios tipos de rodamientos y las aplicaciones donde se usa cada uno de ellos, en forma típica y así tener una idea más clara en el criterio de selección de los rodamientos necesarios la máquina.

Como se dijo anteriormente la carga axial es cero, y teniendo en cuenta los costos de adquisición del mercado, se decidió seleccionar un rodamiento de bolas de una hilera del fabricante SKF, los cuales son de excelente calidad y comercialmente de fácil adquisición.

Tabla 17. Comparación de los tipos de rodamientos

TIPO DE RODAMIENTO	CAPACIDAD DE CARGA RADIAL	CAPACIDAD DE CARGA DE EMPUJE	CAP. DE DESALINEA-MIENTO
Una hilera de bolas con ranura profunda	Buena	Regular	Regular
Doble hilera de bolas, ranura profunda	Excelente	Buena	Regular
Contacto angular	Buena	Excelente	Mala
Rodillos cilíndricos	Excelente	Mala	Regular
Agujas	Excelente	Mala	Mala
Rodillos esféricos	Excelente	Regular	Excelente
Rodillos cónicos	Excelente	Excelente	Mala

Fuente: Diseño de elementos de máquinas. MOTT

Para el criterio de selección se aplicara las recomendaciones del fabricante SKF, el cual recomienda primero identificar el diámetro del eje en donde se ajustará el rodamiento, el cual ya sabemos que es de 1 pulgada, y luego calcular la carga dinámica C_{din} , el cual se obtiene con la ecuación (5-36) que se describirá a continuación:

$$C_{din} = \frac{f_h}{f_n} * Fr \quad (5.36)$$

Donde:

$$f_h = \left(\frac{v.Util}{500}\right)^{1/3} \quad \text{Factor de vida útil (horas)}$$

$$f_n = \left(\frac{33,3}{rpm}\right)^{1/3} \quad \text{Factor de velocidad}$$

Fr = Fuerza radial

$$fh = \left(\frac{15.000}{500}\right)^{1/3} = 3,1$$

$$fn = \left(\frac{33,3}{36}\right)^{1/3} = 0,98$$

La fuerza radial, ya se había calculado, la cual es **Fr = 132 kgf**, entonces se procederá a calcular la carga dinámica.

$$C_{din} = \frac{3,1}{0,98} \times 132$$

$$C_{din} = 418 \text{ kgf} = 4,10 \text{ kN}$$

De esta manera, ingresamos al catalogo del fabricante SKF con:

$$d = 25 \text{ mm}$$

$$C_{din} = 4,1 \text{ kN}$$

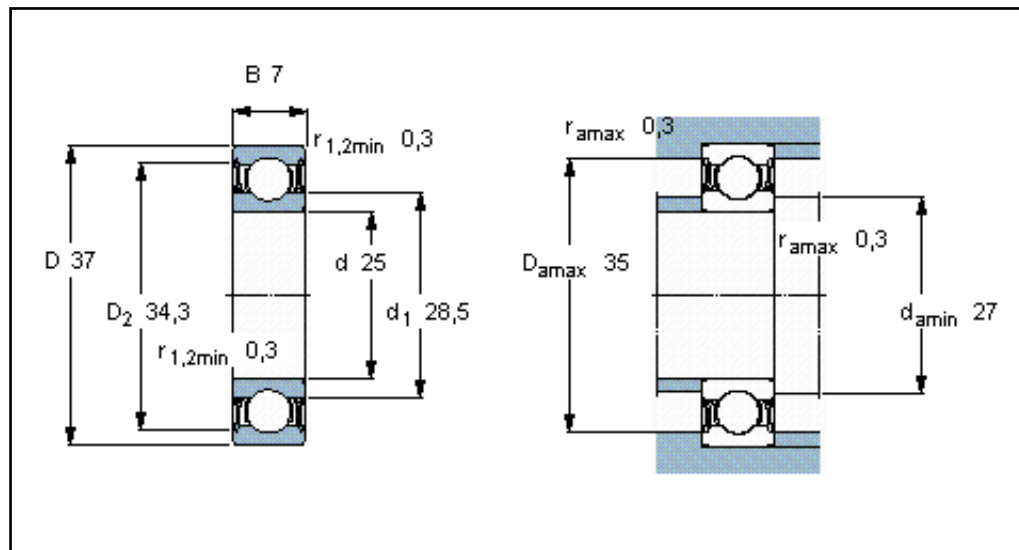
Tabla 18. Rodamientos rígidos de bolas SKF

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidad	Velocidad de referencialímite	kg	* - Rodamiento
mm			kN		kN	rpm			-
20	52	21	15,9	7,8	0,335	-	9500	0,20	62304-2RS1
20	72	19	30,7	15	0,64	24000	15000	0,40	6404
22	50	14	14	7,65	0,325	30000	19000	0,12	62/22
22	50	14	14	7,65	0,325	-	9000	0,12	62/22-2RS1
22	56	16	18,6	9,3	0,39	28000	18000	0,18	63/22
22,225	47,625	9,525	11,7	6,3	0,265	30000	20000	0,073	EE 8 TN9
22,225	50,8	14,287	14	7,65	0,325	26000	19000	0,12	RLS 7
22,225	50,8	14,287	14	7,65	0,325	-	9000	0,12	RLS 7-2RS1
22,225	50,8	14,287	14	7,65	0,325	26000	13000	0,12	RLS 7-2Z
22,225	57,15	17,462	18,6	9,3	0,39	26000	18000	0,18	RMS 7
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38000	24000	0,022	61805
25	37	7	4,36	2,6	0,125	-	11000	0,022	61805-2RS1
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38000	19000	0,022	61805-2RZ
25	42	9	7,02	4,3	0,193	36000	22000	0,045	61905
25	42	9	7,02	4,3	0,193	-	10000	0,045	61905-2RS1
25	42	9	7,02	4,3	0,193	36000	18000	0,045	61905-2RZ
25	47	8	8,06	4,75	0,212	32000	20000	0,06	16005 *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	20000	0,080	6005 *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	-	9500	0,080	6005-2RSH *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	16000	0,080	6005-2RSL *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	16000	0,080	6005-2Z *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	-	9500	0,080	6005-RSH *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	20000	0,080	6005-RSL *
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	20000	0,080	6005-Z *
25	47	16	11,2	6,55	0,275	-	9500	0,10	63005-2RS1

Fuente: www.skf.com

Del catalogo de SKF, se seleccionó el rodamiento 61805-2RZ, por cumplir con el requerimiento de la máquina, además, la designación 2RZ, indica que el rodamiento lleva aros de protección para ambientes corrosivos. En la figura 38 se puede ver más detalladamente, las dimensiones generales del rodamiento seleccionado, y a partir de estas dimensiones, se podrá definir exactamente las dimensiones de nuestro eje, para así proceder a su respectivo maquinado, el cual se hará en los talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

Figura 38. Rodamiento SKF 61805-2RZ



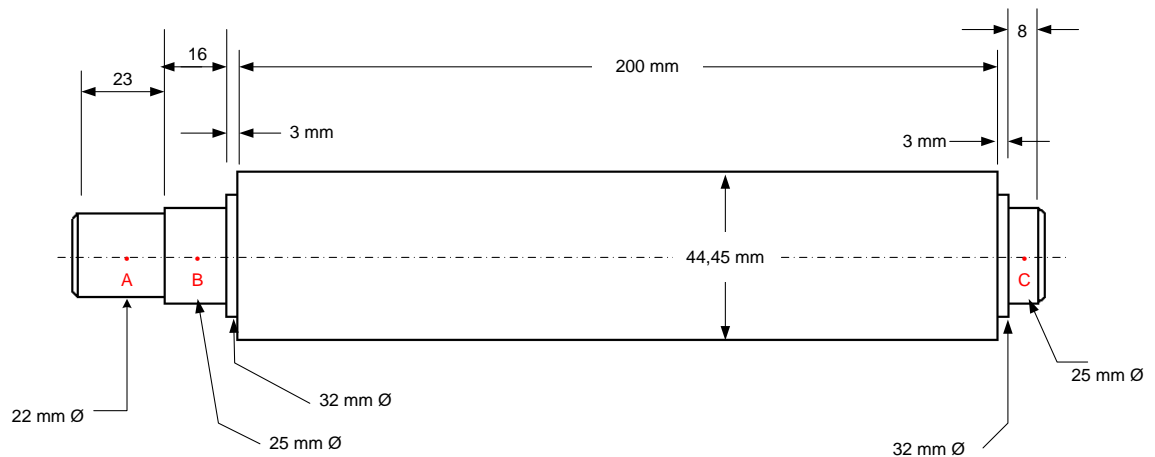
Fuente: www.skf.com

De acuerdo al fabricante SKF, el hombro del rodamiento debe estar en el rango de 27 a 35 mm, por lo que se escogió un valor intermedio:

$$D_{hombro} = 32 \text{ mm}$$

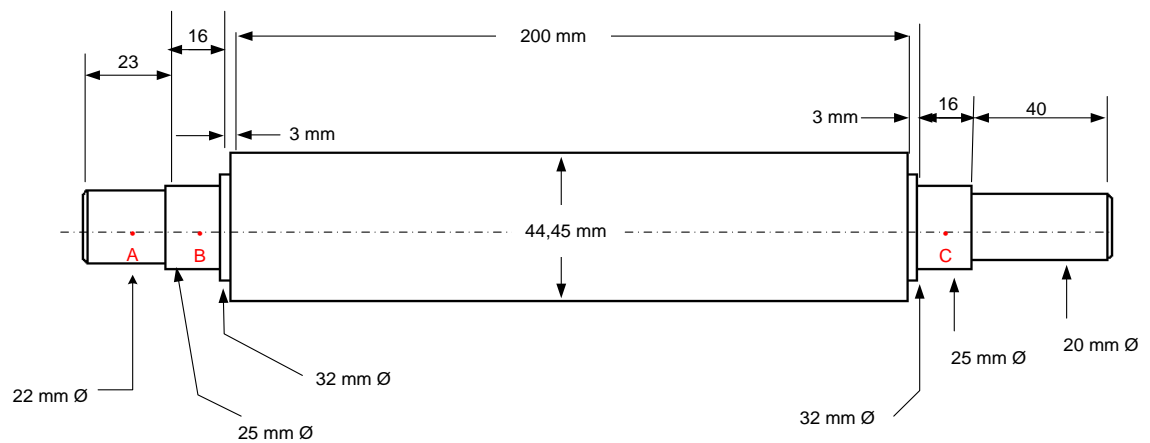
Conociendo cada uno de los diámetros de de las secciones del eje conducido, en la figura 39 se describirá más detalladamente.

Figura 39. Dimensiones del eje conductor



El eje conductor es muy similar al conducido, la única diferencia es un a sección adicional a la derecha de C, con el fin de colocar el acople que lo conectará con el motorreductor, como se puede ver a continuación:

Figura 40. Dimensiones del eje conducido

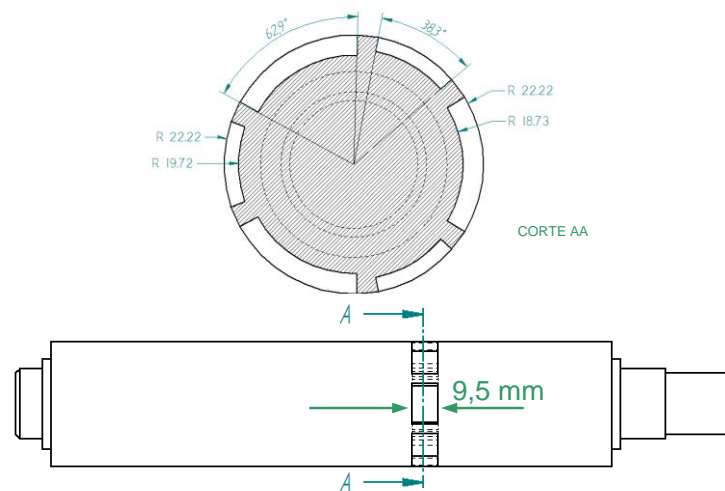


➤ Ranuras Dosificadoras

Los ejes, son la parte fundamentas del “Carbo Inyección”, pues como la se había mencionado, son los encargados de dosificar el carbón suministrado que

alimentará la caldera. Para esto, llevarán unas ranuras (fig. 41) que se llenarán de carbón cuando estas se encuentren en la parte superior y lo entregarán en la parte inferior en cada uno de sus giros. Cabe aclarar que solamente las ranuras transportan los volúmenes de carbón, ya que este se encuentra limitado al área donde se están las ranuras, por la placa limitadora (figura 27), de la cual se hablara mas adelante.

Figura 41. Vista en corte y detalle lateral del eje ranurado



Como se notó en la figura anterior hay dos tipos de ranuras A y B, esto se debió a que inicialmente se había seleccionado un motorreductor que giraba a 71 rpm, el del cual el vendedor aseguró que era trifásico, por consiguiente se maquinaron las ranuras tipo A y al momento de hacerle pruebas al motor se noto inmediatamente que no se trataba de un motor trifásico sino monofásico, entonces se cambió este inmediatamente, pero desafortunadamente no se encontró uno trifásico que entregara las mismas revoluciones sino el que ya se mencionó en la pagina 73, en consecuencia, se tuvo que someter el eje a otro maquinado para construir las ranuras tipo B y así poder, entregar el flujo de carbón ya calculado.

En seguida, se calculará el volumen que entregarán los ejes por cada revolución, y de ahí se podrá obtener cuantas revoluciones por minuto son necesarias para cumplir con los requerimientos de la caldera, el cual es de 259 gr/min, como se cálculo en la sección 5.1.6.

Como se observa en la figura 41, hay 12 ranuras, 6 por cada eje, 3 tipo "A" y tres tipo "B"

El cálculo del perímetro de un sector circular se obtiene con la formula 5.37, con los siguientes datos:

$$\theta_A = 62,3^\circ = 1,087 \text{ rad}$$

$$\theta_B = 38,3^\circ = 0,6685 \text{ rad}$$

$$r_1 = 22,2 \text{ mm}$$

$$r_{2B} = 19,72 \text{ mm}$$

$$r_{2A} = 18,73 \text{ mm}$$

$$r_1 - r_{2B} = 2,5 \text{ mm}$$

$$r_1 - r_{2A} = 3,5 \text{ mm}$$

$$S = \theta \cdot r \tag{5.37}$$

$$S_{1A} = 1,087 \cdot 22,2$$

$$S_{1B} = 0,6685 \cdot 22,2$$

$$S_{1A} = 24,13 \text{ mm}$$

$$S_{1B} = 14,84 \text{ mm}$$

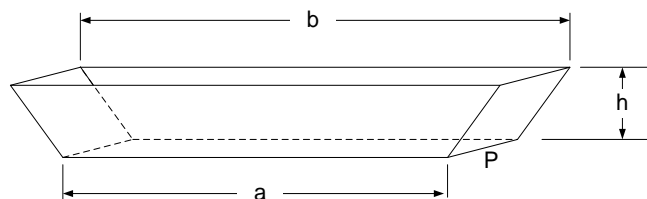
$$S_{2A} = 1,087 \cdot 18,73$$

$$S_{2B} = 0,6685 \cdot 19,72$$

$$S_{2A} = 20,36 \text{ mm}$$

$$S_{2B} = 13,18 \text{ mm}$$

Figura 42. Lados de un paralelepípedo trapezoidal



El volumen de las ranuras está dado por:

$$Vol = \frac{b+a}{2} \cdot h \cdot p \quad (5.38)$$

$$Vol_A = \frac{24,13+20,36}{2} \cdot 3,5 \cdot 9,5$$

$$Vol_A = 0,740 \text{ cm}^3$$

$$Vol_B = \frac{14,84+13,18}{2} \cdot 2,5 \cdot 9,5$$

$$Vol_B = 0,333 \text{ cm}^3$$

De esta manera, se puede calcular el volumen total entregado por los dos ejes por cada revolución.

$$Vol_{TOTAL} = 6 \cdot (Vol_A + Vol_B)$$

$$Vol_{TOTAL} = 6 \cdot (0,740 + 0,333)$$

$$Vol_{TOTAL} = 6,45 \frac{\text{cm}^3}{\text{rev}}$$

Ahora, la densidad del carbón se obtuvo de manera experimental. Primero se tomo un volumen de carbón pulverizado de 250 cm³, se peso, y con esto se obtuvo la densidad del carbón; el peso del carbón fue de 233 gramos.

$$\rho = m/v$$

$$\rho_{\text{carbón}} = 233 \text{ g}/250 \text{ cm}^3 = 0,932 \frac{\text{gr carbón}}{\text{cm}^3}$$

Con esta densidad, y multiplicando por el volumen de las ranuras, se calcula la masa de carbón por cada revolución, dosificado por los ejes.

$$Masa_{total} = 6,45 \frac{\text{cm}^3}{\text{rev}} * 0,932 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$Masa_{total} = 6 \frac{\text{gr}}{\text{rev}}$$

Como los requerimientos de flujo másico de carbón el hogar de la caldera calculado en el numeral 5.1.6, el cual fue de 259 g/min, se sabrá la velocidad teórica de giro de los ejes.

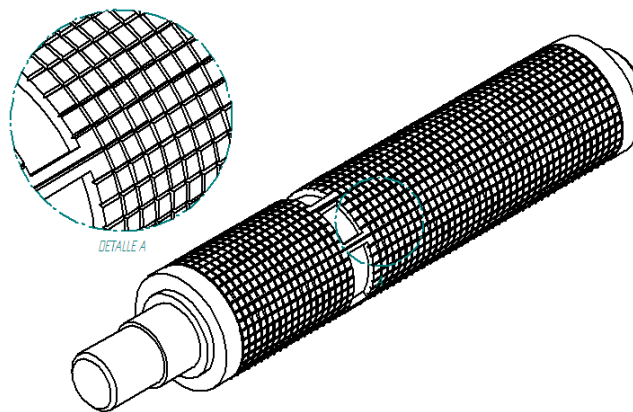
$$Vel_{ejes} = \frac{259 \frac{g}{min}}{6 \frac{g}{rev}}$$
$$Vel_{ejes} = 42.2 \frac{rev}{min}$$

Como el motorreductor, seleccionado anteriormente, tiene una velocidad de 35,8 rpm, se debe hacer girar más rápidamente, mediante el uso de un variador de frecuencia, el cual se especificará posteriormente.

➤ **Grafilado de ejes**

En pruebas preliminares de dosificación de carbón, se presentaron fugas del mismo, en sectores del eje diferente a los que estaban ranurados, las cuales se convertían en láminas de carbón que obstruían el embudo (figura 27), y atascaban la máquina. Por esto se decidió en someter al eje a un proceso de grafilado en torno, con el fin de evitar la creación de las láminas y garantizar el flujo constante de carbón hacia la corriente de aire que alimenta el hogar de la caldera.

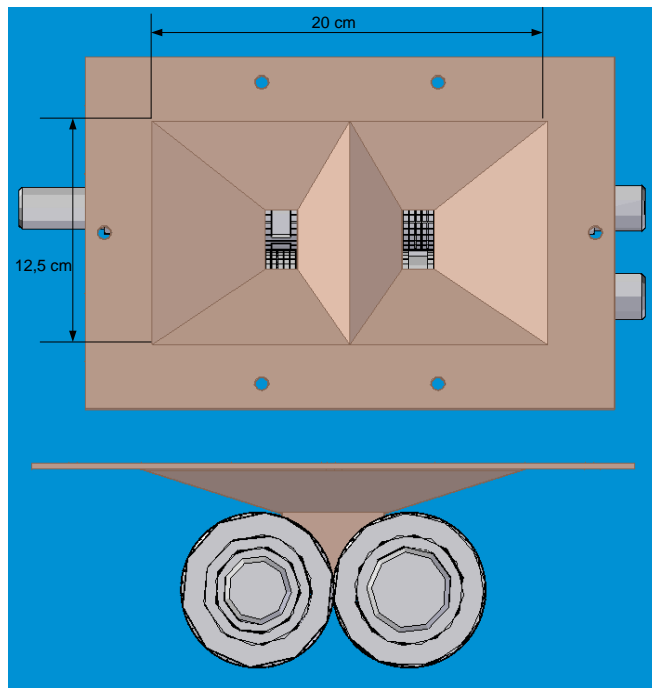
Figura 43. Eje conducido grafilado



5.2.1.2 Placa limitadora

Con el ranurado de los ejes, garantizamos el no atascamiento del sistema de dosificación, no obstante, se presentaron fugas o paso de carbón por el área diferente a la ranurada. Para esto se decidió, colocar una placa limitadora y enrutadora del carbón pulverizado a solamente las ranuras con el fin de garantizar el flujo constante y controlado de carbón.

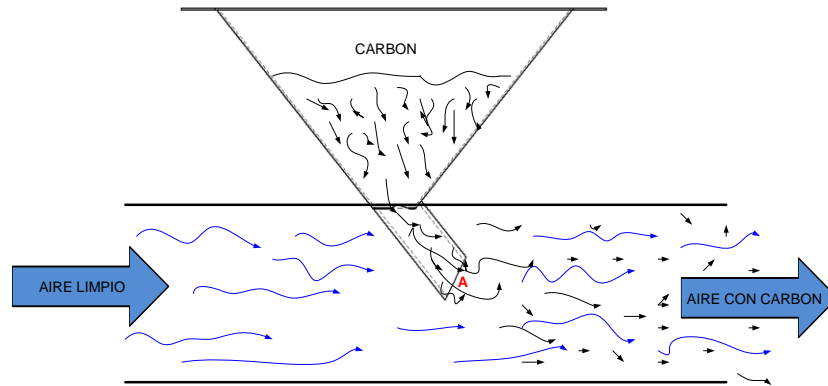
Figura 44. Placa limitadora de los ejes dosificadores



5.2.1.3 Embudo Inyector

Para inyectar el carbón previamente dosificado por los ejes, como se mostró anteriormente, se diseñó un embudo, el cual es el encargado de depositar el carbón pulverizado en la corriente de aire proveniente del ventilador como se observa en la figura 45.

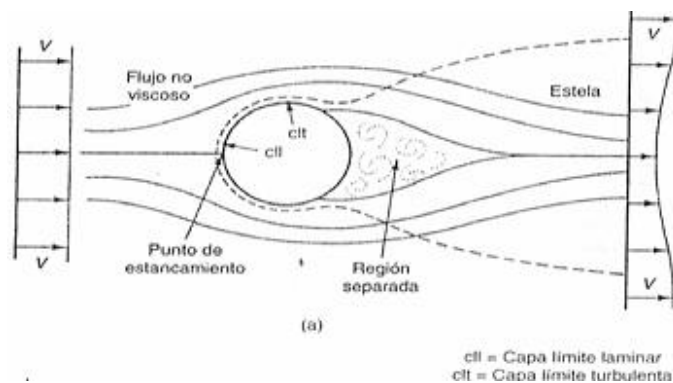
Figura 45. Inyección de carbón al ducto de aire



En la figura anterior, observamos un diseño preliminar del embudo. Si analizamos detenidamente, dentro del ducto de aire, penetra un ducto circular inclinado, con el fin de evitar que el aire se devuelva por el embudo y arroje el carbón hacia arriba, creando para ello una fuerza de arrastre.

El arrastre se define como la componente paralela a la velocidad relativa de aproximación, de la fuerza ejercida sobre un cuerpo por el fluido en movimiento a su alrededor. La acción dinámica del fluido en movimiento es la que desarrolla arrastre (véase figura 46).

Figura 46. Flujo alrededor de un cilindro

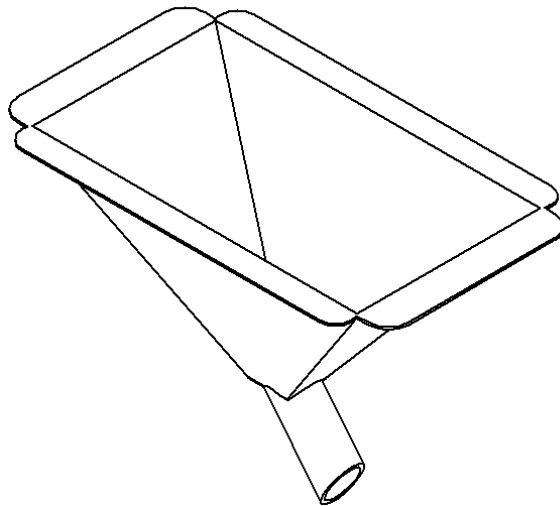


Fuente: Mecánica de fluidos Frank M. White

La terminación del ducto circular del embudo tiene una inclinación casi perpendicular al sentido del flujo de aire, con el fin de crear una presión cero en el punto “A” y obligar al carbón pulverizado ingresar a la corriente de aire.

Por otra parte, se busca que el carbón dentro del embudo no se aglomere sino que fluya hacia el ducto circular, se diseñó con una inclinación de 52° y 68° en sus vistas lateral y frontal respectivamente, como se muestra en la figura 47.

Figura 47. Embudo inyector



5.2.1.4 Tolva

La tolva, la cual es la encargada de alimentar el sistema de dosificación, se diseñó para poder alimentar al sistema por lo menos durante 40 minutos, el cual es el caso extremo, que el operario se encuentre durante este lapso de tiempo sin estar pendiente al funcionamiento de la máquina, ya que cuando se empleaba leña como único combustible, el operario debía estar en continuo control con la alimentación del hogar de la caldera.

Por otra parte, la altura de la tolva debe ser aproximadamente de 30 cm, para que el operario (suponiendo una altura del colombiano promedio de 1,70 m), tenga la facilidad de cargue, de acuerdo con la altura total prediseñada de la máquina.

Partiendo del tiempo de duración del cargue, se calcula la masa de carbón necesaria:

$$m_{tolva} = t_{cargue} * \text{flujo masico en el hogar} \quad (5.39)$$

$$m_{tolva} = 40 \text{ min} * 259 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$m_{tolva} = 10.360 \text{ gr}$$

$$V_{tolva} = \frac{m_{tolva}}{\rho_{carbon}} \quad (5.40)$$

$$V_{tolva} = \frac{10360 \text{ gr}}{0.932 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}$$

$$V_{tolva} = 11.116 \text{ cm}^3$$

El volumen de una pirámide truncada está dado por:

$$V = \frac{h}{3} (A + A' + \sqrt{A * A'}) \quad (5.41)$$

De donde:

A = área de la base mayor

A' = área de la base menor

h = altura de la pirámide (30 cm)

De la figura 44, se obtiene las dimensiones de la base menor, porque la tolva debe ir acoplada a la placa limitadora.

$$A' = 12,5 \text{ cm} * 20 \text{ cm} = 250 \text{ cm}^2$$

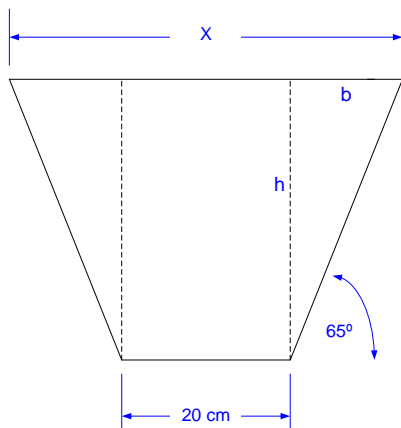
Con estos datos, de la ecuación 5.41 se despeja el área de la base mayor:

$$11.116 \text{ cm}^3 = \frac{30}{3} \left(A + 250 \text{ cm}^2 + \sqrt{A} * \sqrt{250 \text{ cm}^2} \right)$$

$$A = 1940 \text{ cm}^2$$

El ángulo de inclinación de la tolva debe ser tal que permita que el carbón fluya sin inconvenientes hacia la placa limitadora, por lo tanto se decidió que este debería estar entre 45° y 80° , por lo tanto se escogió un valor promedio, el cual es de 65° con respecto a la horizontal.

Figura 48. Dimensiones laterales de la tolva



$$X = 2(\tan 25 * h) + 20 \text{ cm}$$

$$X = 2(\tan 25 * 30) + 20 \text{ cm}$$

$$X = 48,2 \text{ cm}$$

Entonces, el otro lado de la base mayor sería:

$$X' = \frac{1940 \text{ cm}^2}{48,2 \text{ cm}}$$

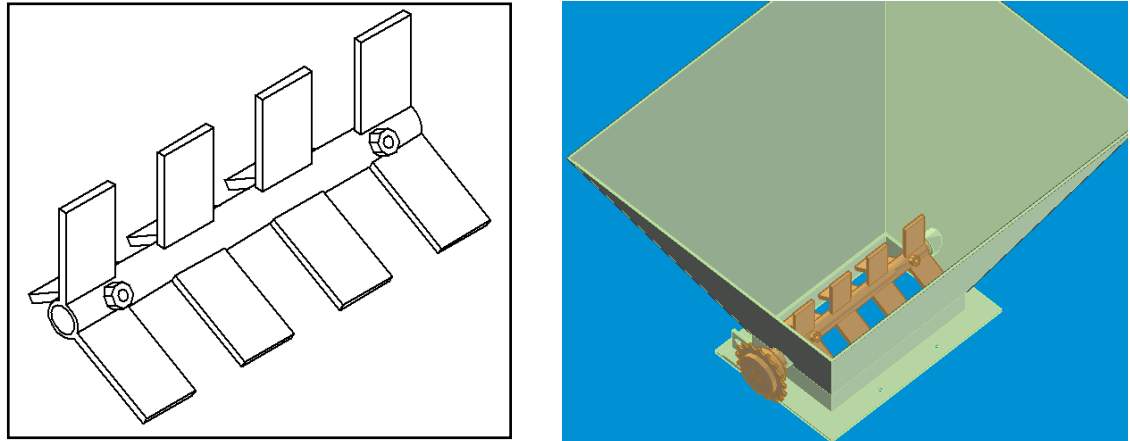
$$X' = 40,2 \text{ cm}$$

Con estos datos se tiene todas las dimensiones principales de la tolva.

Se hicieron pruebas preliminares al sistema de dosificación, y se notó que el carbón pulverizado no fluía con facilidad a los ejes ranurados a través de la placa limitadora, por lo tanto se optó con instalarle un agitador a la tolva para garantizar el perfecto funcionamiento de este sistema.

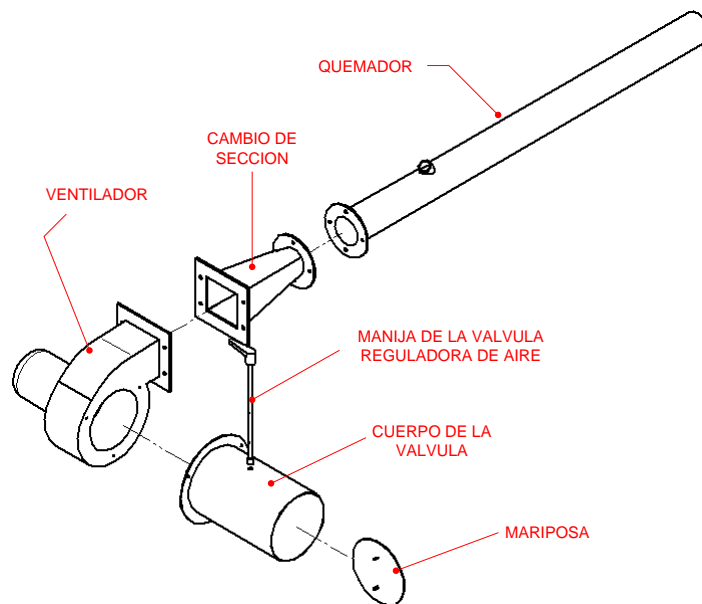
De esta manera, se colocó un agitador (figura 49) de aspas longitudinales, el cual se moverá mediante una transmisión por cadena, aprovechando el motorreductor.

Figura 49. Agitador de la tolva



5.2.2 SISTEMA DE INDUCCION DE AIRE

Figura 50. Partes del sistema de inducción de aire



Después de hacer la dosificación del carbón que sale por el embudo (figura 47), se debe llevar junto con el aire primario, hacia el hogar de la caldera. Para lograr esto el sistema cuenta con dos partes principales:

- ✓ Quemador
- ✓ Ventilador

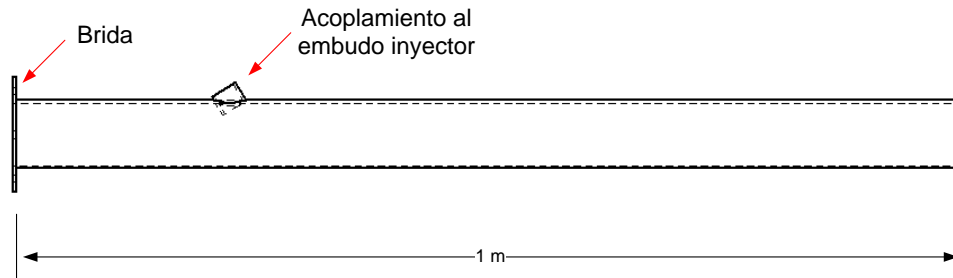
5.2.2.1 Diseño de Quemador

Bajo las consideraciones descritas en el capítulo 3, el quemador más apropiado para este diseño es un quemador tipo cañón, colocado de manera horizontal, como se puede ver en la figura 14, ya que en la caldera de la empresa de lácteos el aire secundario también ingresa por la parte inferior, además por la temperatura de trabajo se considera que debe ser de un material resistente a altas temperaturas, por lo que se decidió que fuera acero con las siguientes especificaciones:

- Material: A 106
- SHC 40
- Diámetro interno: 2"
- Espesor de Pared: 3,02 mm

Además el quemador debe llevar un sistema para poder acoplarlo de manera muy precisa al embudo inyector anteriormente mencionado, como se observa a continuación.

Figura 51. Esquema del quemador de carbón



5.2.2.2 Selección del ventilador

Para la selección del ventilador es necesario conocer la aplicación, el caudal, la presión de trabajo (cabeza estática). Para el propósito buscado, la aplicación específica es el quemado de carbón pulverizado en el hogar de una caldera mediante un quemador tipo cañón, por lo que se decidió utilizar un ventilador centrífugo por economía y fácil adquisición.

Como ya se calculó anteriormente, el caudal de aire requerido para la combustión del carbón es de 106,66 CFM (pies cúbicos por minuto) con un exceso del 20% del aire teórico. Como se desean hacer pruebas hasta con un 200% de exceso de aire, por lo tanto, se necesita un ventilador que entregue como mínimo 200 CFM.

La cabeza estática (SP) es debida a la presión de compresión existente en el fluido y sirve para asegurar que el flujo venza todas las resistencias que tenga a su paso, ya sea por la fricción en el ducto ó por la resistencia de otros elementos involucrados en el sistema de ventilación. La cabeza estática se expresa generalmente en milímetros ó pulgadas columna de agua.

Se preselección un ventilador del fabricante Extractores y Motores Industriales Ltda., de la ciudad de Bogotá el cual presenta las siguientes especificaciones:

Figura 52. Ventilador centrífugo y especificaciones



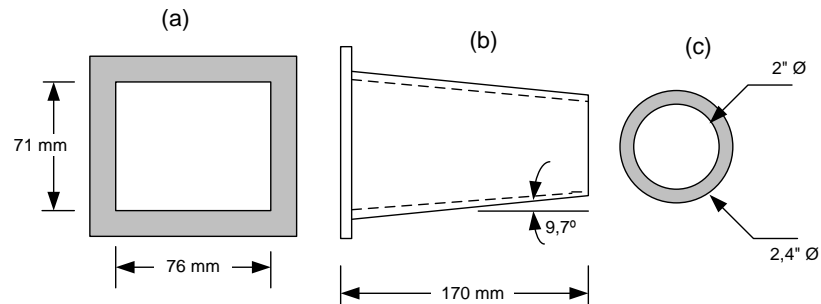
Fuente: Extractores y Motores Industriales Ltda.

El ventilador seleccionado tiene las siguientes características:

- Marca EMI
- Rotor: 5" x 1 3/4
- Potencia nominal: 1/8 Hp, suministrados por El motor eléctrico
- Frecuencia 60 Hz
- Velocidad de giro: 3600 rpm
- Caudal: 0 – 250 CFM
- Cabeza estática (SP): 0 - 7,5 *in.c.a* (pulgadas de columna de agua)

Como la sección transversal del ducto es rectangular, como se aprecia en la figura 53.a, por lo tanto, se debe instalar una transición con cambio de sección, el cual debe tener una longitud de 170 mm aproximadamente y debe acoplar al tubo quemador el cual posee un diámetro interno de 2" (figura 53- b,c).

Figura 53. Sección transversal del cambio de sección

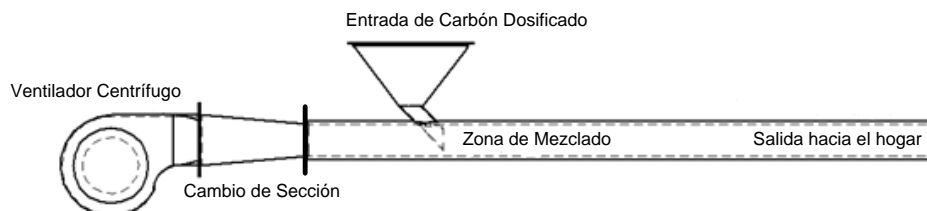


➤ **Cálculo de pérdidas en las secciones**

Las pérdidas en tuberías se dan debido a la fricción que se genera entre el fluido y los materiales de los cuales están hechas las tuberías, ductos y accesorios; para los cambios de sección estas pérdidas se deben al choque brusco que soporta el fluido y, a la turbulencia que estos generan.

Para este caso particular, el sistema de inyección de aire consta de un ventilador centrífugo, un cambio de sección suave entre el ventilador y el tubo quemador y el tubo donde se lleva a cabo el mezclado del carbón ya dosificado con el aire y la inyección de la mezcla al hogar de la caldera; el sistema se muestra en la figura siguiente.

Figura 54. Sistema de inducción de aire



Identificadas las secciones que componen el sistema de inducción de aire, se procederán a calcular las pérdidas. Para el cálculo de la cabeza estática del ventilador hace uso de la siguiente expresión:

$$SP = \sum_{j=1}^n SP_i \quad (5.42)$$

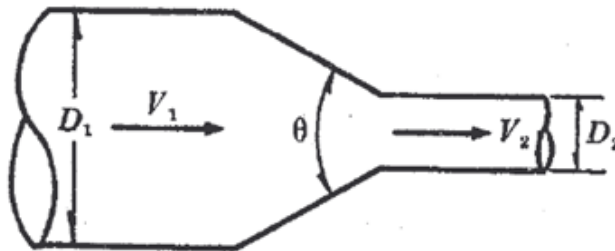
Donde n igual al número de tramos del ducto y SP_i igual a la pérdida i .

Esta expresión tiene en cuenta cada factor, elemento y accesorio donde existirán caídas de presión.

- **Pérdidas en el cambio de sección**

En este caso el cambio de sección es suave y la pérdida se puede calcular como una contracción gradual suave como se muestra a continuación.

Figura 55. Contracción gradual



Fuente: (FAY, 1996)

Los coeficientes de pérdida K para este tipo de contracciones suaves se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 19. Coeficientes de pérdida para diferentes ángulos

θ	4° a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°
K	0.060 0.005	0.16	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35

Fuente: (FAY, 1996)

La geometría del cambio de sección se observa en la figura 53-b, y el procedimiento a seguir es verificar si el fluido es laminar o turbulento, por lo tanto hallamos el diámetro hidráulico para la entrada de la sección, ya que esta es rectangular (figura 53-a).

La pérdida de carga hidráulica en ductos rectos no circulares se calcula partiendo del cálculo del diámetro hidráulico de la siguiente manera (FAY, 1996):

$$D = (4 * Area) / Perimetro \quad (5,43)$$

$$D = (4 * 0,076m * 0,071m) / (2 * (0,076m + 0,071m))$$

$$D = 0,0734 m$$

El caudal del ventilador centrífugo según el fabricante es de 250 CFM, por lo tanto con este dato y el área de la sección se puede hallar la velocidad de entrada al cambio de sección (V_1).

$$Q = \frac{250 \text{ ft}^3}{\text{min}} * \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} * 2,832E - 2 \text{ m}^3/\text{ft}^3 = 0,118 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 0,076m * 0,071m = 0,0054 \text{ m}^2$$

$$V_1 = Q/A = (0,118 \text{ m}^3/\text{s})/0,0054\text{m}^2 = 21,852 \text{ m/s}$$

Tomando de la tabla 1.1 del libro de Fay la viscosidad cinemática del aire, a condiciones ambientales normales ($T=20^{\circ}\text{C}, P=\text{atm}$), se tiene que $\nu = 1.51\text{E}-5 \text{ m}^2/\text{s}$, por lo tanto se puede calcular el número de Reynolds.

$$\text{ReD} = \frac{V_1 * D}{\nu} \quad (5,44)$$

$$\text{ReD} = \frac{(21,852\text{m/s})(0,0734\text{m})}{1,51\text{E} - 5 \text{ m}^2/\text{s}} = 1,06 \text{ E5}$$

Con este resultado se comprueba que el flujo es turbulento, por lo tanto de tabla 10, para un ángulo de 10° en una contracción gradual el valor de K es 0.16, entonces de la ecuación de conservación de la masa (CENGEL, 2006), estaría dada por:

$m_1 = m_2$ (la masa de aire que entra a la reducción es la misma que sale de ella)
Por lo tanto:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \quad (5.45)$$

$$V_1 = \frac{V_2 A_2}{A_1}$$

La velocidad V_2 se midió con un anemómetro del laboratorio de transferencia de calor, la cual fue de 30 m/s, por lo tanto:

$$V_1 = \frac{(30 \text{ m/s})((\pi * (0,0508\text{m})^2)/4))}{0,076 * 0,071}$$

$$V_1 = \frac{(30 \text{ m/s})(0,002027 \text{ m}^2)}{0,0054 \text{ m}^2} = 11,26 \text{ m/s}$$

Este valor de V_1 es bastante diferente al suministrado por el fabricante del ventilador, por lo tanto calcularemos nuevamente el valor del número de Reynolds.

$$\text{ReD} = \frac{V_1 * D}{\nu}$$

$$\text{ReD} = \frac{(11,26\text{m/s})(0,0734\text{m})}{1,51\text{E} - 5 \text{ m}^2/\text{s}} = 5,47 \text{ E}4$$

Resultado que no cambia la condición del fluido, pues este sigue siendo turbulento, como consecuencia la pérdida de carga irreversible en la reducción de sección de se vuelve:

$$h_l = K_l V_s^2 / 2g$$

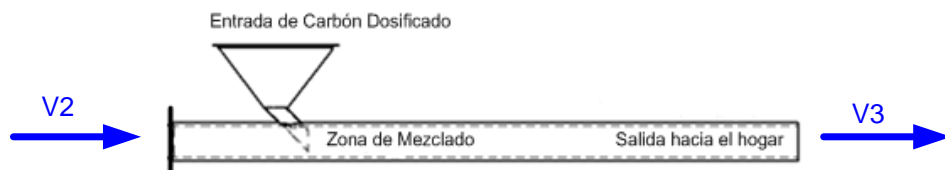
Donde V_s es la velocidad a la salida de la reducción, en este caso V_2

$$h_l = 0,16 * (30\text{m/s})^2 / (2 * 9,81\text{m/s}^2) = 7,34 \text{ m}$$

Esta pérdida es apreciable y seguramente causará un importante cambio entre la presión de salida y la presión de entrada.

- **Perdidas en el tubo quemador**

Figura 56. Diagrama de la velocidad del aire en el quemador



Se tiene la velocidad de entrada (V_2), se quiere hallar la velocidad de salida (V_3) y la pérdida ocasionada por el metro de tubería, entonces, lo primero que se debe calcular es el número de Reynolds

$$ReD = (V_2 * D)/\nu.$$

$$ReD = (30 \text{ m/s} * 0,0508 \text{ m})/1,51E - 5 \text{ m}^2/\text{s} = 100927$$

Lo cual muestra claramente que $Re > 2300$, lo cual indica que es flujo turbulento, por consiguiente se debe calcular el valor del factor de fricción de Darcy (f) de acuerdo con la siguiente ecuación (FAY, 1996):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{ReD \sqrt{f}} \right)$$

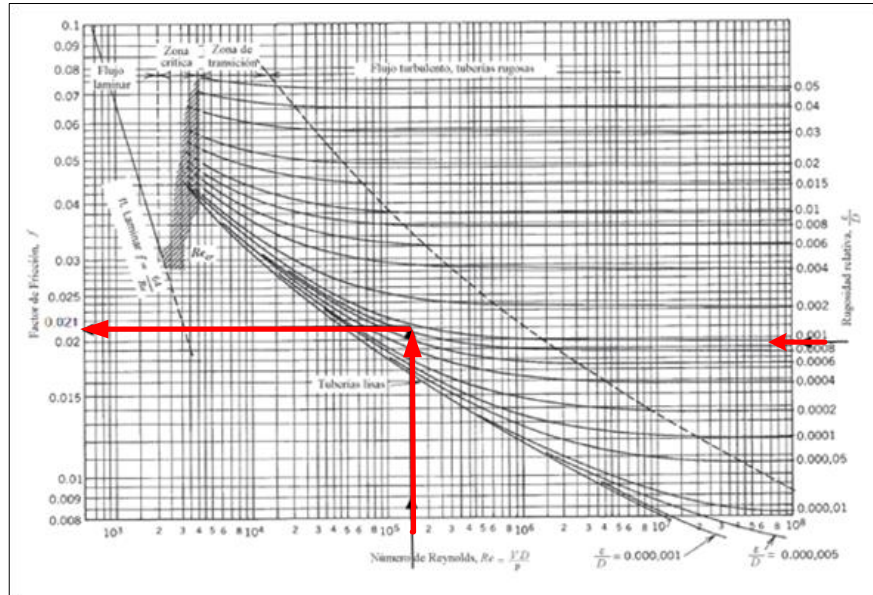
En esta ecuación es importante saber el valor la rugosidad (ε), el cual se toma de la tablas (FAY, 1996) y es igual a $5E-5$ m. el valor de (f) se debe calcular mediante un proceso iterativo, y para este es importante contar con una buena aproximación para no hacer el proceso tan extenso.

Este valor se toma del diagrama de Moody, teniendo en cuenta los siguientes datos:

$$ReD = 100927 = 1E5$$

$$\varepsilon/D = 5E - 5 \text{ m} / 0,0508 \text{ m} = 0,0009842 = 9,84E - 4$$

Figura 57. Diagrama de Moody



Fuente: (FAY, 1996)

De acuerdo con el diagrama de Moody tenemos que f es 0,021

$$\frac{1}{\sqrt{0,021}} = -2\log\left(\frac{9,84E-4}{3,7} + \frac{2,51}{100927\sqrt{0,021}}\right)$$

En la tabla 11 se muestran los resultados al evaluar los valores de f más probables, siendo este valor de $f = 0,022$, el cual es el más aproximado, por lo tanto se puede calcular el coeficiente de perdidas Kf (FAY, 1996).

Tabla 20. Iteración del valor de f

f	Lado derecho	Lado izquierdo	diferencia
0,021	6,9	6,718	0,182
0,022	6,742	6,726	0,016

$$Kf = f \frac{L}{D}$$

$$Kf = 0,022 \frac{1 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} = 0,433$$

Entonces la pérdida de carga hidráulica de acuerdo a la ecuación 9.5 de Fay es:

$$\Delta h = Kf \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

$$\Delta h = 0,433 \frac{(30 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} = 19,86$$

Entonces las pérdidas totales son:

$$ht = hseccion + htubo$$

$$\Delta ht = 7,34 \text{ m} + 19,86 \text{ m} = 27,2 \text{ m}$$

Por lo tanto el aire experimenta un cambio en la presión que se calcula de acuerdo a la ecuación 9.3 de Fay.

$$P_{ent} - P_{sal} = \rho g \Delta ht$$

$$P_{ent} - P_{sal} = (1,204 \text{ Kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(27,2 \text{ m})$$

$$P_{ent} - P_{sal} = 321,26 \text{ Pa}$$

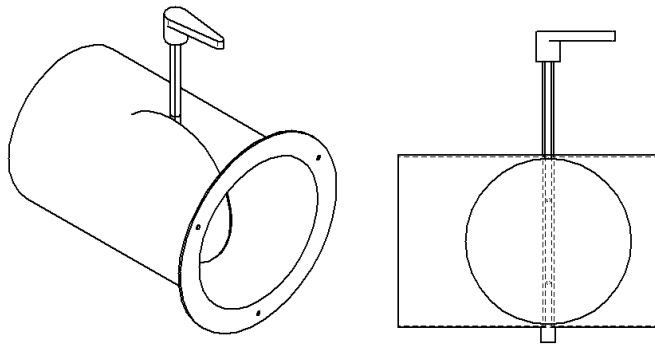
Esta caída de presión es muy baja, como era de suponerse por lo simple del sistema, por lo tanto la selección del ventilador es acertada.

➤ Válvula Reguladora de aire

Para regular la cantidad de aire que entra al proceso de combustión existen dos alternativas: Variar la velocidad de giro del ventilador, situación que también afecta la cabeza estática o construir un dispositivo o válvula que controle este flujo. Se toma la decisión de diseñar y construir una válvula tipo mariposa que se dispone en el interior del tubo o cañón por donde pasa el aire de combustión. Esta válvula se cierra o abre usando un mecanismo sencillo.

En la figura 58 se muestra el sistema de regulación de aire, el cual va acoplado al orificio de succión del ventilador.

Figura 58. Subsistema de regulación de aire



Estando identificadas cada una de las partes que componen el sistema de inyección de aire, este se acoplará como se muestra a continuación:

5.2.3 SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCION

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de dosificación, cuando se necesite variar el suministro de carbón hacia el hogar, se seleccionará un variador

de frecuencia con el fin de controlar la velocidad del motorreductor y con esto optimizar el sistema de dosificación.

Dentro de las variadas posibilidades que ofrece el mercado en variadores de frecuencia, se inclinó por el fabricante brasilero WEG, el cual está posesionado en el mercado colombiano, el costo de adquisición es más bajo que las otras marcas como ABB y Siemens, además, la garantía y el respaldó, está a la altura de las marcas lideres en el mercado ya mencionadas.

Para la selección se debe tener en cuenta las características del motor al cual se le controlará a frecuencia. Recordemos las características del motor:

- Tipo Trifásico
- Marca: Siemens
- Potencia Nominal: 0,4 Hp
- Corriente nominal 1.7 A
- Velocidad: 1790 rpm
- Frecuencia 60 Hz.

La forma correcta para especificar un Convertidor de Frecuencia es seleccionar un equipo que pueda suministrar como mínimo la corriente nominal del motor. Las tablas siguientes indican las potencias de motores correspondientes a cada modelo de Convertidor de Frecuencia.

Además de lo anterior se debe tener en claro que tipo de trabajo adicional de controlar la frecuencia de salida, se requiere que desempeñe el variador, como control de torque, manejo por PLC, control de frecuencia mediante señales de sensores, etc.

En este diseño se requiere que el variador convierta solamente la frecuencia a la deseada mediante operación manual. Por lo tanto separamos el rango de selección al modelo más sencillo del fabricante, el CFW10.

Figura 59. Tabla de selección del Variador WEG CFW10

Alimentación		Modelo	Corriente Salida A	IEC	NEMA
				50Hz 220V 230V	60Hz 230V
				kW	HP
110-127V	1Ø	CFW100016S1112	1.6	0.25	-
		CFW100026S1112	2.6	0.55	0.5
		CFW100040S1112	4	0.75	0.75
220-230V	1Ø / 3Ø	CFW100016S2024	1.6	0.25	-
		CFW100026S2024	2.6	0.55	0.5
		CFW100040S2024	4	0.75	0.75
		CFW100073S2024	7.3	1.5	2
		CFW100100S2024	10	2.2	3
		CFW100016T2024	1.6	0.25	-
	3Ø	CFW100026T2024	2.6	0.55	0.5
		CFW100040T2024	4	0.75	0.75
		CFW100073T2024	7.3	1.5	2
		CFW100100T2024	10	2.2	3
		CFW100152T2024	15.2	4	5



Fuente: Manual de usuario WEG

Se seleccionó el CFW100026T2024, ya que la corriente a la salida es 2.6 A, y el motor requiere con una corriente nominal de 1.7 A; ya que el modelo anterior a este solo ofrece una corriente de 1.6 A solamente.

Para el accionamiento y puesta en funcionamiento del variador y motorreductor se realizaron las respectivas recomendaciones del fabricante WEG, además, se

instaló la debida protección al ventilador, todo esto acoplado en una caja de control con accionamiento externo como lo se ve en la figura.

Figura 60. Tablero de control

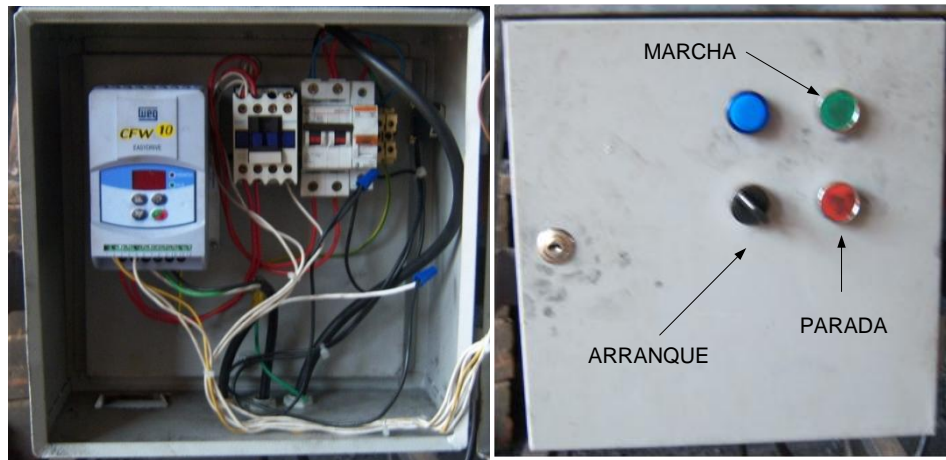
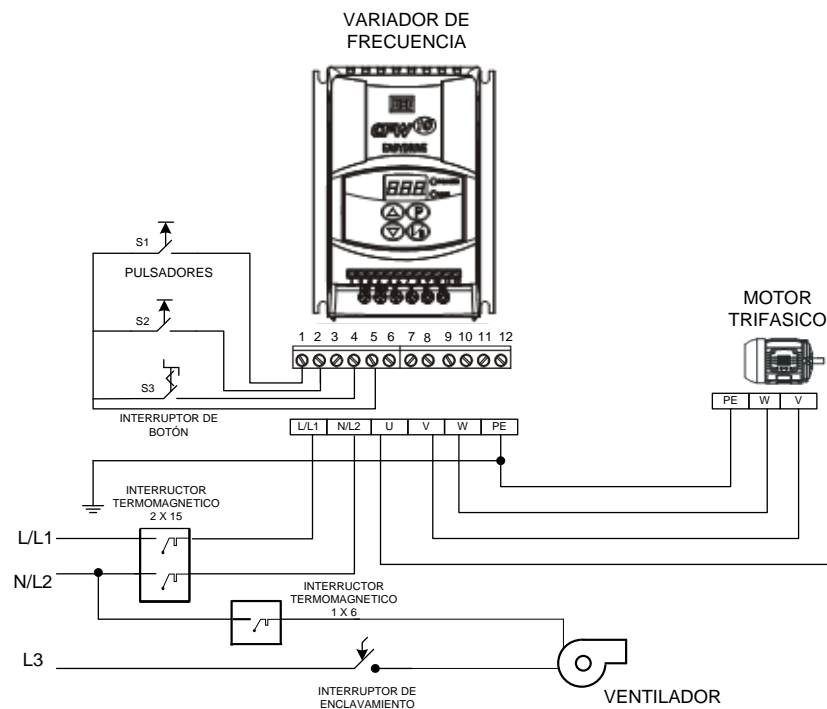


Figura 61. Diagrama eléctrico del tablero de control



5.2.4 Selección del molino de martillos

Para el buen funcionamiento del sistema de dosificación, se debe emplear carbón con un tamaño de grano de aproximadamente de 0.5 mm, por lo tanto, se seleccionó del fabricante Molinos el Martillo, un molino con las siguientes características:

- Marca: Molinos el Martillo
- Motor: WEG, de 2 HP
- Velocidad: 1800 rpm
- Capacidad 10 Kg/min
- Criba: 1/8"

Figura 62. Molino de Martillos



5.2.5 Selección del quemador a gas

Para precalentar el hogar de la caldera se hace necesita un quemador a gas propano, con el fin de usarlo por un periodo de tiempo aproximado de 30 minutos

al día, ya que el hogar debe estar a una temperatura adecuada para cuando inicie el proceso de inyección de carbón pulverizado.

El quemador se adquirió en el almacén Llama Azul de la ciudad de Bucaramanga, y de acuerdo con la información suministrada por el fabricante, cuenta con las siguientes características.

- Marca Llama Azul
- Combustible: Gas propano
- Material, Acero 1020
- Capacidad: 50.000 Btu/hr

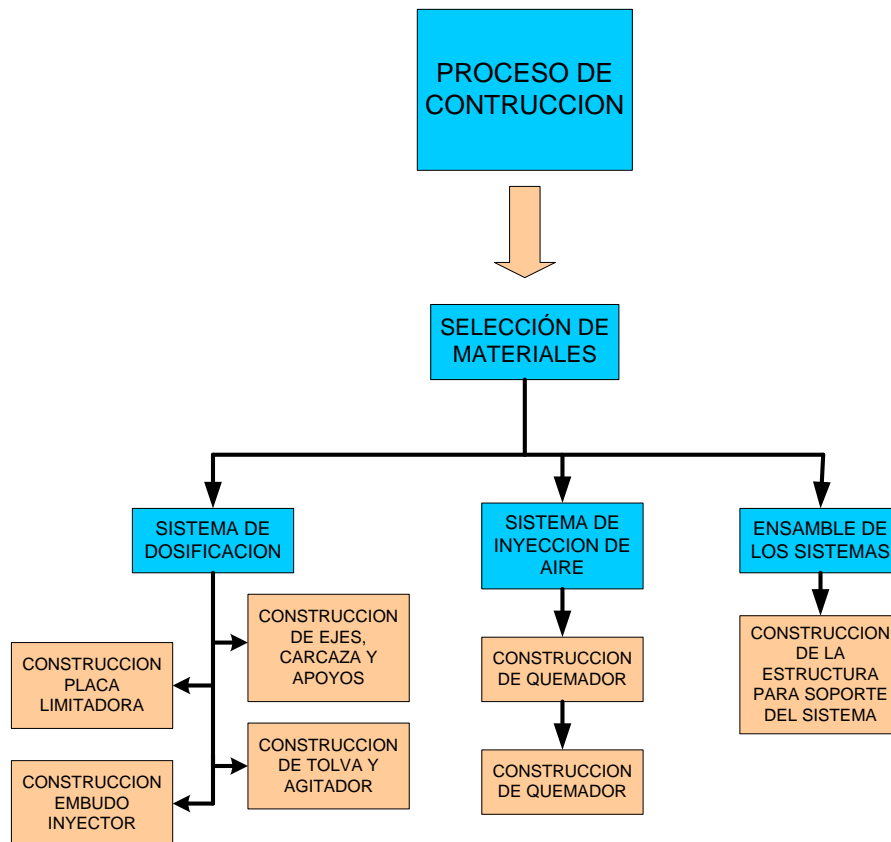
Figura 63. Quemador de gas propano



6. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL “CARBO INYECCION”

En este capítulo se muestra la forma que se fabricó cada una de las partes que constituyen el “carbo inyección”, al igual el proceso de montaje hasta conseguir el producto final.

Figura 64. Diagrama del proceso de construcción del "Carbo Inyección"



Como se muestra en la figura 64, el primer paso para iniciar el proceso de construcción del Carbo Inyección, es la selección de materiales. En la tabla 21 se muestra los distintos materiales que se emplearon en el proceso de construcción

Tabla 21. Especificaciones de los materiales usados

ELEMENTO	MATERIAL	ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL
SISTEMA DE DOSIFICACION		
Ejes	AISI 1045	OQT 1300, 1 ¾" Ø
Carcasa de Ejes	A 36	Espesor de 1/8"
Bridas de Carcasa	Angulo	1 ¼" x 1/8 de espesor
Placa limitadora	Lámina cold rolled	Calibre 16
Placas soporte de rodamientos	AISI 1045	7 mm de espesor
Placas retenedoras de rodamientos	AISI 1045	1/8" de espesor
Tolva	Lámina cold rolled	Calibre 16
Agitador	Platinas A36	1" x 1/8"
	Tubo	Ø 13 mm x 195 mm
	Acero 1020	Barra ½"
Embudo inyector	Lámina cold rolled	Calibre 18
	Tubo A36	Ø ¾"
SISTEMA DE INYECCION DE AIRE		
Quemador	A 106 SHC 40	Ø 2.5" x 1m
Cambio de sección	Lámina cold rolled	Calibre 16
Válvula mariposa	Lámina cold rolled	Calibre 16
SOPORTE DEL SISTEMA		
Estructura para soporte	Perfil cuadrado A 36	1 ½" x 1 ½" x 1/8"

La selección de los componentes se hizo bajo especificación técnica de los elementos seleccionados.

6.1 CONSTRUCCION

La construcción de los elementos se hizo en su gran mayoría en el taller de la escuela de mecánica y una menor parte se hizo en talleres de centro de la ciudad de Bucaramanga.

6.1.1 Construcción de los ejes

Los ejes se fabricaron en los tornos de la escuela de mecánica de la UIS, donde se les dieron las características requeridas.

Figura 65. Construcción de los ejes



Después de darles las dimensiones al eje se procedió a hacerles las ranuras en la fresadora.

Figura 66. Ranurado de los ejes



Los ejes fueron sometidos a un proceso de grafilado por remoción de material en la fresadora con el fin de evitar que los ejes hagan láminas del carbón con el carbón que se fuga en los sectores no ranurados.

6.1.2 Construcción de la carcasa soporte de los ejes

La carcasa donde van alojados los ejes y las placas que soportan los rodamientos, llevan un taladrado especial que se debe hacer con la mayor precisión, con el fin de lograr, eficiencia en el sistema de dosificación, por lo tanto esta operación se hizo con una máquina de punzonado de alta precisión en la empresa Electro acabados Ltda., en la ciudad de Bucaramanga.

Figura 67. Punzonado de la carcasa



Después de esto se procedió a cortar y taladrar las bridas y las placas que retienen los rodamientos.

Figura 68. Soldado y pulido de las bridas



De la misma manera, en el taller de la escuela se construyó cada uno de los elementos que constituyen en sistema de dosificación y se procedió a ensamblarlo para poder realizar las pruebas preliminares.

6.1.3 Construcción del soporte del “Carbo Inyección”

Figura 69. Construcción del soporte del sistema



El soporte de la máquina se realizó cortando y soldando los perfiles cuadrados y además se instalaron ruedas para su fácil movimiento.

6.1.4 Construcción del sistema de inyección de aire

Luego de tener el soporte listo, se construyó el cambio de sección y se acopló al ventilador y a su vez al tubo quemador.

Figura 70. Ensamble del cambio de sección y quemador



Solo restaba construir el sistema de regulación de aire a la entrada del ventilador y acoplarlo también al sistema re inyección de aire.

Figura 71. Construcción del la válvula de regulación de aire



6.1.5 Pintado del Carbo Inyección

El proceso pintura de la máquina se realizó en los talleres “El Mechi” del municipio de Landázuri Santander. Esto con el fin que no se deteriorará en el proceso de transporte desde la ciudad de Bucaramanga.

Figura 72. Pintado del Carbo Inyección



7. PRUEBAS DE CAMPO

Después de terminar la construcción, el “Carbo Inyección” se sometió a pruebas de cada uno de los subsistemas, con el fin de garantizar el funcionamiento al momento de someterlo a la prueba de quemado del carbón, la cual es la finalidad de este proyecto de grado.

7.1 PRUEBA DE INYECCION DE AIRE

Esta prueba se realizó en los talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, y su finalidad es comprobar el correcto funcionamiento del sistema de inyección de aire, para lo cual se utilizó un anemómetro Erasmus EA-200.

Figura 73. Anemómetro Erasmus EA-200



El sistema de inyección de aire cuenta con una válvula mariposa regulada mediante perilla (figura 50), y su finalidad es la de poder controlar la cantidad de aire que sale hacia el hogar de la caldera. Como se mencionó anteriormente, el aire teórico para la combustión es de 89 CFM y 107 CFM con un exceso de 20%.

Con esto, además de comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se determinó la cantidad de aire entregado de acuerdo a la posición de la perilla de regulación como se muestra a continuación:

Figura 74. Posiciones de regulación de perilla

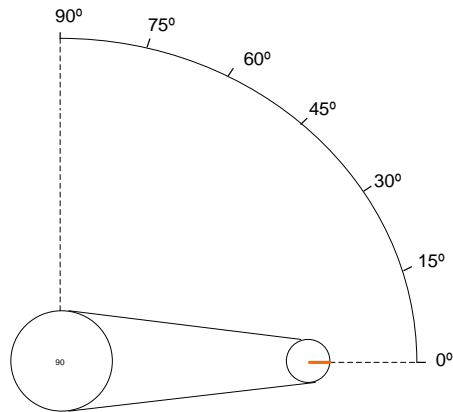


Tabla 22. CFM de aire entregado según el ángulo de la perilla

ANGULO	CFM
0°	46
15°	65
30°	82
45°	105
60°	128
75°	172
90°	190

7.2 PRUEBAS DE DOSIFICACION

La dosificación de carbón pulverizado, es la parte más fundamental del “Carbo Inyección”, por lo tanto se debe garantizar su correcto funcionamiento, con el fin de tener un control preciso del flujo de carbón, de acuerdo con la velocidad de los ejes, que es controlada por el variador de frecuencia.

En pruebas preliminares de dosificación, se presentaron atascamientos en el embudo, porque los ejes producían láminas de carbón por filtraciones de este en áreas diferentes a las ranuradas, además, el carbón en la tolva se compactaba y no descendía hacia las ranuras de los ejes o simplemente pasaban elementos extraños que atascaban el sistema.

Por lo anterior, se tomaron tres decisiones que solucionaron el problema, las cuales fueron:

1. Se instaló un agitador en la tolva para evitar la compactación del carbón (figura 49).
2. Se construyó una placa limitadora, para direccionar el carbón hacia las ranuras y a su vez impedir las fugas fuera de estas (figura 44).
3. Se instaló una malla removible con el fin de permitir el paso de partículas con un tamaño no superior a 2 mm, como se observa a continuación:

Figura 75. Malla de la tolva

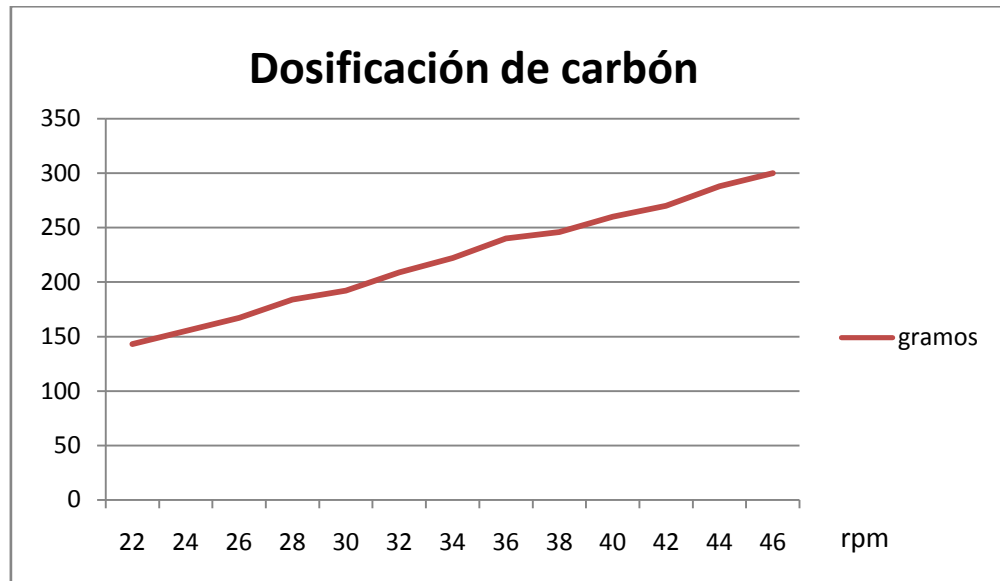


Solucionado el inconveniente, se procedió a realizar la prueba de dosificación, la cual consistió en ir variando la velocidad del motorreductor y efectuar la recolección y pesaje del carbón que salía por el embudo, con el fin de determinar el grado de precisión en este sistema. Estas pruebas se realizaron durante tres días (dos en Bucaramanga y una en Landázuri), haciendo tomas cada uno, tres, cinco y diez minutos. Los datos obtenidos en estas pruebas se promediaron y se organizaron en la siguiente tabla:

Tabla 23. Flujo de carbón entregado de acuerdo con la velocidad de los ejes

rpm	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$\dot{m} \left(\frac{g}{min} \right)$	143	155	167	184	192	209	222	240	246	260	270	288	300

Figura 76. Tendencia del flujo de carbón de acuerdo a las rpm



En la figura 76 se muestra que la tendencia de la masa de carbón entregada con respecto a las revoluciones por minuto es casi una línea recta, entonces se comprueba que las fugas quedaron resueltas, en consecuencia se puede suponer que hay un alto grado de precisión el este sistema.

Ahora se procederá a calcular la pendiente de dicha recta y así encontrar el \dot{m} real y compararlo con el teórico, que es 6 g/rev , con el fin de determinar el porcentaje de precisión del sistema de dosificación.

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{300 - 143}{46 - 22} = 6,5 \frac{g}{rev}$$

El sistema suministra 6,5 g/rev y el flujo teórico es de 6 g/rev, entonces el porcentaje de precisión será:

$$\% \text{ Precisión} = 100\% - \frac{6,5 - 6}{6,5} \times 100$$

$$\text{Precisión} = 92,3 \%$$

Este porcentaje indica que el sistema de dosificación se diseñó y construyó de una muy eficiente.

7.3 PRUEBAS DE QUEMADO DE CARBÓN

Las pruebas de quemado de carbón son las más importantes, porque como ya se había mencionado son el principal objetivo de este trabajo de grado; pero por la distancia que se tiene con el municipio de Landázuri Santander, lugar donde se encuentra la caldera para la cual se diseñó el “carbo inyección”, se efectuaron unas primeras pruebas de quemado en el horno de la empresa Ladrillos y tubos, y posteriormente se hicieron las definitivas en la caldera de Lácteos el Rancho de Landázuri.

7.3.1 Pruebas de quemado en Ladrillo y Tubos

Se realizaron varias pruebas en esta planta, las primeras cuando el hogar del horno se encontraba a 200°C, pero se notó que el carbón se quemaba en una menor parte y su gran mayoría caía sin encenderse. Se continuó de la misma manera a 300°C, 400°C⁹, y se incrementaba el carbón que se quemaba antes de caer, pero la cantidad de inquemados todavía era considerable.

⁹ Esta temperatura la alcanzó el horno hacia la una de la tarde

Figura 77. Planta de la empresa Ladrillos y Tubos



Al día siguiente se reanudaron las pruebas al rededor de las 7:00 de la mañana, en ese momento el hogar del horno se encontraba a 600°C y el carbón que se quemaba en el aire era casi el total. Pero la combustión perfecta se logró a los 660°C y de ahí en adelante

Figura 78. Quemado de carbón a 660°C



7.3.2 Pruebas de quemado en la empresa Lácteos el Rancho

Después de haber realizado las pruebas iniciales en la empresa Ladrillos y Tubos LTDA, se procedió a transportar la máquina “carbo inyección” hacia el municipio de Landázuri, para realizar las pruebas en la caldera de la planta Lácteos el Rancho.

7.3.2.1 Proceso de pulverización

El molino de martillos seleccionado se instaló a cinco metros del hogar de la caldera y pulverizó el carbón sin presentar ningún problema, a una capacidad de 10 Kg/min.

7.3.2.2 Proceso de secado

El carbón proveniente de las minas generalmente está húmedo, por lo tanto se realizó primero el proceso de pulverización y luego se colocó el carbón encima del cuerpo de la caldera, sobre unas láminas de zinc para que se lograra un buen secado, la temperatura alcanzada por el carbón pulverizado fue de 50 °C, factor que favoreció la combustión de la mezcla aire carbón; la duración del secado fue de cuatro horas y se hizo en la noche anterior a la prueba.

7.3.2.3 Proceso de Calentamiento y quemado

Se inició este proceso con el calentamiento del hogar de la caldera, el cual se hizo con leña impregnada de ACPM y se encendió por 15 minutos con el quemador a gas, hasta alcanzar una temperatura promedio de 600°C en el hogar. Inmediatamente después se acopló el sistema “carbo inyección” el cual ya tenía cargada la tolva, y se procedió al encender el ventilador y seguidamente el

sistema de dosificación, como se muestra en la figura 78, después de una hora, la caldera alcanzó una presión de 60 psi.

Figura 79. Precalentamiento y acople del sistema al hogar



La máquina “carbo inyección” trabajo durante 10 horas diarias durante los 4 días que se efectuaron las pruebas sin presentar inconvenientes en ninguno de sus elementos, el sistema de dosificación funcionó bien y el tubo quemador no presentó sobrecalentamiento, el motorreductor se programó a 40 revoluciones por minuto, lo cual corresponde a 260 g/min ó 15,6 Kg por hora de carbón, por lo tanto el ahorro fue evidente; a continuación se muestra dos tablas con los cálculos de los gastos de combustible, energéticos y de mantenimiento.

Tabla 24. Costos adicionales al combustible por día

ELEMENTO	POTENCIA	\$ KW/hora	HORAS DE USO	VALOR
VENTILADOR	0,1 kw	329 ¹⁰	10	\$ 329
MOTORREDUCTOR	0,3 kw		10	\$ 987
MOLINO	1,5 kw		0.5	\$ 245
GAS PROPANO	--	--	0.5	\$1000
MANTENIMIENTO**	--	--	--	\$1000
TOTAL GASTO ADICIONAL DIARIO				\$3.561

¹⁰ Valor obtenido del recibo de servicio eléctrico emitido por la ESSA.

Tabla 25. Comparación de costos madera vs. Carbón diario

	DIA 1	DIA 2		DIA 3		DIA 4	
	MADERA	CARBÓN PULVER.	MADERA	CARBON PIEDRA	CARBON PULVER.	CARBON PIEDRA	CARBON PULVER.
GASTO DIARIO	320 Kg	156 Kg*	98 Kg	62 Kg	156 Kg*	68	156 Kg*
TIEMPO	10 hr	10 hr	10 hr	10 hr	10 hr	10 hr	10 hr
PRECIO Kg	\$100	\$60	\$ 100	\$120	\$60	\$120	\$60
COSTO DIARIO	\$32.000	\$9.360	\$9.800	\$7.440	\$9.360	\$8.160	\$9.360
		\$20.160		\$16.800		\$17.520	
COSTO ADICION	-----	\$3.561		\$3.561		\$3.561	
TOTAL	\$32.000	\$23.721		\$20.361		\$21.081	

	DIA 5		DIA 6	
	CARBON PIEDRA	CARBON PULVER.	CARBON PIEDRA	CARBON PULVER.
GASTO DIARIO	66 Kg	142 Kg	70 Kg	136 Kg
TIEMPO	10 hr	10 hr	10 hr	10 hr
PRECIO Kg	\$120	\$60	\$120	\$60
COSTO DIARIO	\$7.920	\$8.520	\$8.400	\$8.160
	\$16.440		\$16.560	
COSTO ADICION	\$3.561		\$3.561	
TOTAL	\$20.001		\$20.121	

* El valor de 156 kg de carbón pulverizado en 10 horas, se obtuvo mediante pruebas de dosificación realizadas durante tres días (como se mencionó en el numeral 7.2), las cuales arrojaron un promedio de 260 g/min. Esto con el fin de centrarse en la exactitud del segundo combustible con el cual se va a comparar.

**Los valores de mantenimiento y se estimaron de acuerdo al uso de la máquina basándonos en:

Tabla 26. Costo Mantenimiento

ELEMENTO	PRECIO	TIEMPO ESTIMADO DE DURACION (años)
4 Rodamientos SKF 60805 2RZ	35.000 c/u 140.000 (los cuatro)	15.000 horas 1,7 años
Martillos del molino	90.000 (juego)	2 años (según fabricante)
Cadena	10000	1 año
Ejes	200.000	2 años

De la tabla anterior y queriendo ser conservativos se asumen \$1.000 de costo diario de mantenimiento.

En la tabla 25 se ve un comparativo durante los 6 días de pruebas realizadas, notándose la reducción de costos de 25,87% utilizando madera en el precalentamiento del horno y carbón pulverizado, contra un ahorro de 36,28% utilizando carbón en grano grande y gas propano (figura 78^a) precalentando el horno y carbón pulverizado, con respecto a lo que la empresa gastaba utilizando solamente madera como combustible.

Cabe aclarar que el carbón en grano grande que se quemó fue traído desde Lenguezaque Cundinamarca el cual tiene un poder calorífico mucho menor que el carbón de Landázuri y el costo por tonelada es el doble, debido al transporte.

Lo anterior, porque el carbón de Landázuri no se puede quemar en parrilla debido a su poder calorífico, este tiende a deteriorar muy rápidamente las partes metálicas de la caldera. Además la caldera quemando solamente carbón en grano grande como combustible, incurre en costos elevados, por el porcentaje de residuos inquemados que resulta al quemar este carbón en parrilla.

En la figura 79 se puede observar más gráficamente la comparación de los costos mensuales de la empresa Lácteos el Rancho, utilizando diferentes tipos de combustible en su caldera.

Por consiguiente, la empresa recuperará su inversión en poco menos de un año ya que el dinero que dispuso para la construcción fue de \$3.500.000.

Figura 80. Costo energético mensual de la caldera de acuerdo al tipo de combustible usado

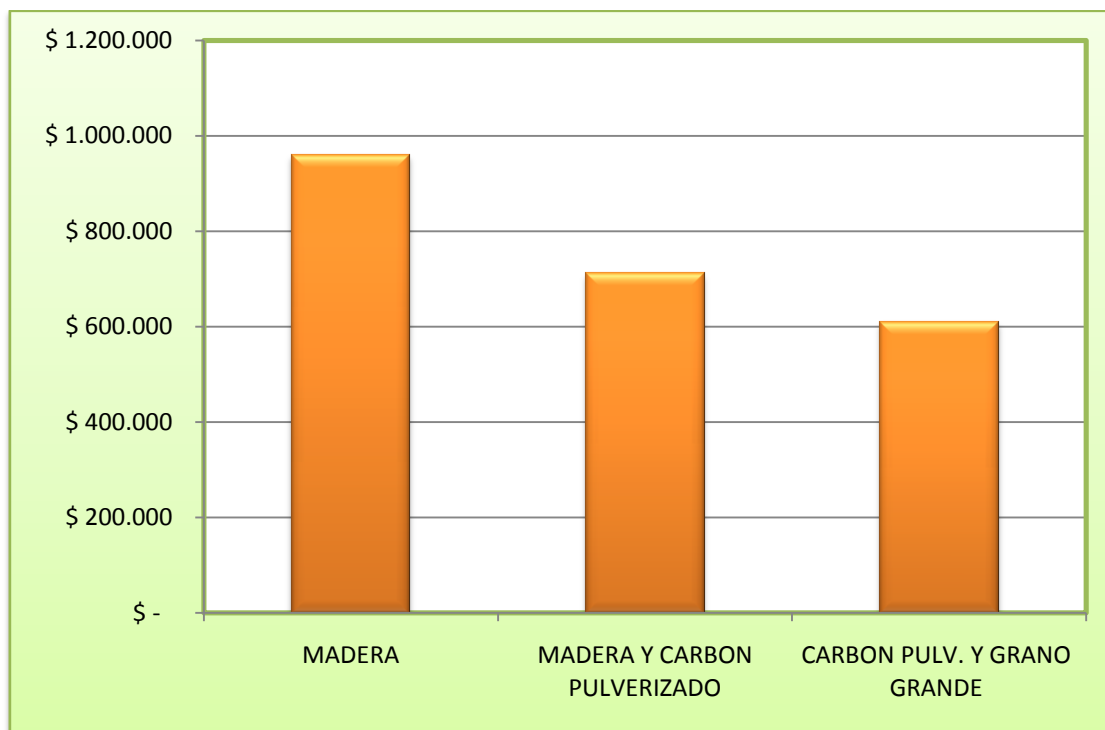
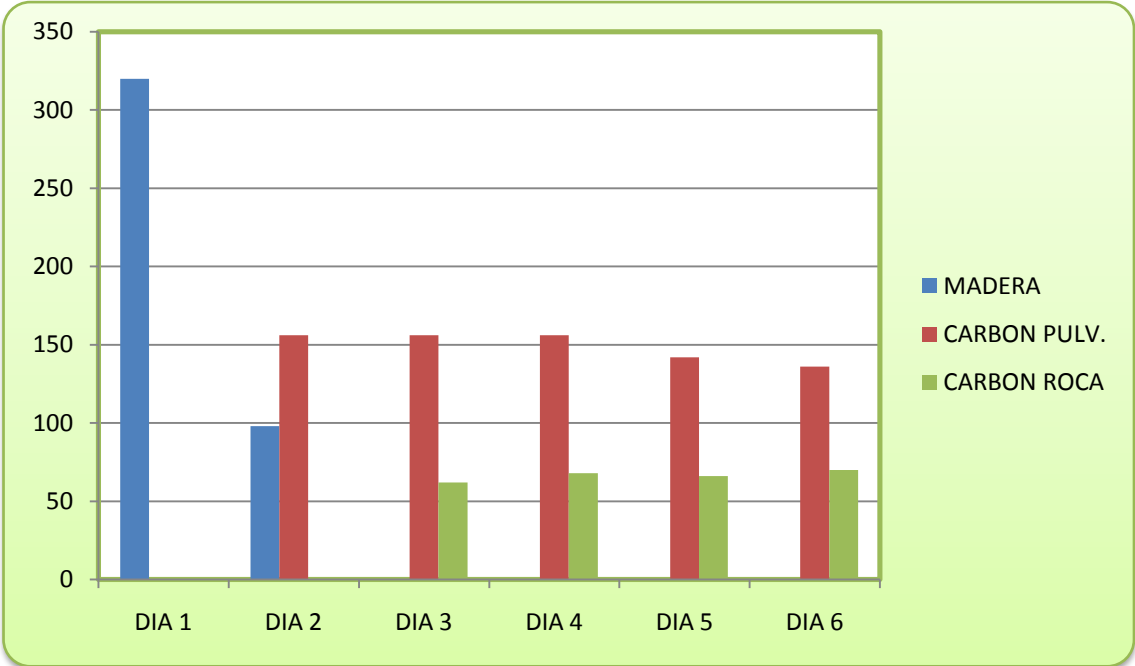


Tabla 27. Comparación de uso de combustible



8. CONCLUSIONES

- ✓ Se cumplieron satisfactoriamente los objetivos trazados en el plan de trabajo de grado, al diseñar y construir un sistema para sustituir el uso de leña como combustible por carbón mineral, para una caldera con capacidad de 5 BHP, de la empresa Lácteos el Rancho.
- ✓ El desarrollo de este trabajo de grado permitió a los autores poner en practica los estudios ingenieriles, adquiridos en el proceso de formación para acceder al titulo de ingenieros mecánicos, además los dotó de destrezas en el diseño de máquinas, en la selección de materiales y en los procesos se mecanizado que llevaron a la construcción de un dosificador y quemador de carbón.
- ✓ Se pudo identificar plenamente los tipos, usos y las características fisicoquímicas de los carbones de la zona, la mejor forma para pulverizarlo, además de las condiciones más óptimas en que se debe tener, para lograr una buena combustión.
- ✓ Se logró sustituir el uso de leña en el proceso de generación de calor en la caldera, y así contribuir a la conservación del medio ambiente.
- ✓ Se obtuvo una reducción del 36,28% en los costos de combustible, por ende, hace que este diseño sea idóneo para empresas que estén quemando leña o algún otro tipo de combustible, ya que el carbón es más económico que los combustibles derivados del petróleo.

9. RECOMENDACIONES

- ✓ Para obtener buenos resultados en la combustión de carbón, se recomienda eliminar la humedad superficial mediante un proceso de secado previo a la pulverización y luego someterlo a un segundo proceso de secado, manteniéndolo a 60°C, antes de inyectarlo al hogar.
- ✓ Para evitar que el aire primario entre frío al hogar de la caldera y le disminuya la temperatura, se puede recomendar a los interesados en construir una segunda versión del “carbo inyección”, instalar un sistema de calentamiento en la toma de aire del ventilador.
- ✓ En vista que el carbón puede ser utilizado como combustible alternativo a los derivados del petróleo, se recomienda a la Escuela de Ingeniería Mecánica promover la creación de un grupo de investigación en combustión de carbones, con el fin de servir como base a proyectos futuros.
- ✓ Una recomendación que surgió con la elaboración de este proyecto de grado, es sugerir a la Escuela de Ingeniería Mecánica, respaldar un proyecto para el diseño y construcción de un horno, para caracterizar el comportamiento de la combustión de carbones a diferente granulometría y temperatura.
- ✓ Se recomienda antes de iniciar el funcionamiento de la máquina, leer el manual de operación y mantenimiento.

10. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BAUKAL, Charles E Jr. Industrial Burners handbook. CRC. United States of America 2003.
- ✓ CENGEL, Yanus A. Transferencia de Calor. McGraw-Hill. México 2004.
- ✓ ECOCARBÓN. Calderas a carbón. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín 1998
- ✓ FAY, A. James. Mecánica de Fluidos. Cecsca. Primera Edición. Mexico 1996.
- ✓ IGUARAN, Omar y MARTÍNEZ, Diana. Diseño y Construcción de una Mini Caldera Pirotubular Para el Laboratorio de Transferencia de Calor. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2008
- ✓ INCROPERA, Frank y DEWITT, David. Fundamentos de transferencia de Calor. Editorial Pearson. México 1996.
- ✓ MARADEY, Juan F. Termodinámica Aplicada. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2002.
- ✓ MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. Editorial Pearson. Cuarta Edición. México 2006.
- ✓ VIGNOTE, S. P., & MARTINEZ, I. R. (2005). Tecnología de la Madera. Madrid: Editorial Mundi-Prensa.
- ✓ WEB www.landazuri-santander.gov.co
- ✓ WHITE, Frank M. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. Quinta Edición. España 2004.

ANEXOS

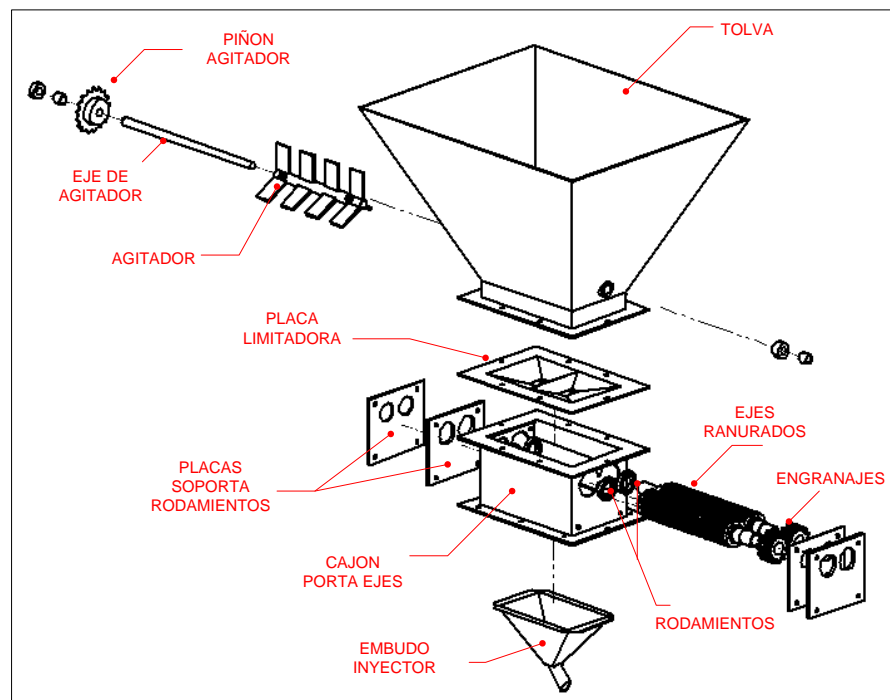
ANEXO 1:

MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Este manual tiene como propósito guiar al operario durante la puesta en marcha y operación del sistema “carbo inyección”.

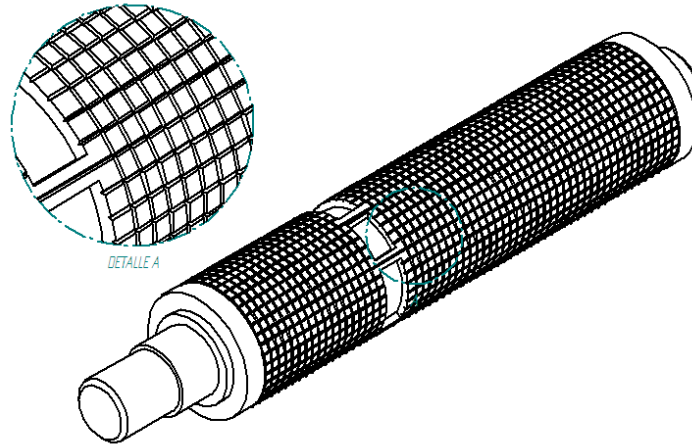
1. Alcances del sistema de dosificación

Esquema 1. Vista explosionada del sistema de dosificación



El sistema de dosificación está diseñado mediante ejes, los cuales tienen un grafilado en todo su cuerpo (esquema 2) y unas ranuras dosificadoras, a través de las cuales se controla la cantidad de carbón que pasa hacia el embudo.

Esquema 2. Ejes ranurados





Estas ranuras están calculadas para enviar la cantidad de 6,5 gramos de carbón por cada revolución de los ejes. En el cuadro 1 se muestra el flujo de carbón entregado por cada revolución, para con el fin que el usuario escoja el flujo adecuado a su caldera.

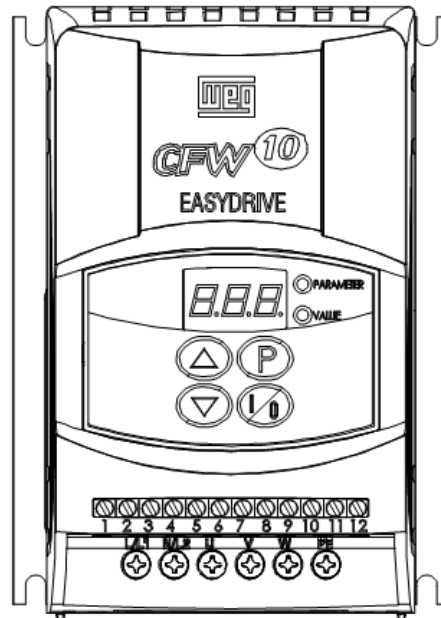
rpm	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$\dot{m} \left(\frac{g}{min} \right)$	143	155	167	184	192	209	222	240	246	260	270	288	300

Con el variador de frecuencia (esquema 3), se puede alcanzar una velocidad de los ejes hasta 54 revoluciones por minuto, lo cual daría un flujo de carbón de 351 g/min, sin embargo llevar al motor a estas revoluciones implicaría un sobrecalentamiento y por ende deterioro de las partes móviles del motor; por lo tanto no se recomienda subir de 44 rpm.

El variador se programó para que muestre en pantalla las revoluciones por minuto de giro de los ejes en 40 rpm ($260 \frac{g \text{ carbón}}{min}$), en el caso que el usuario desee

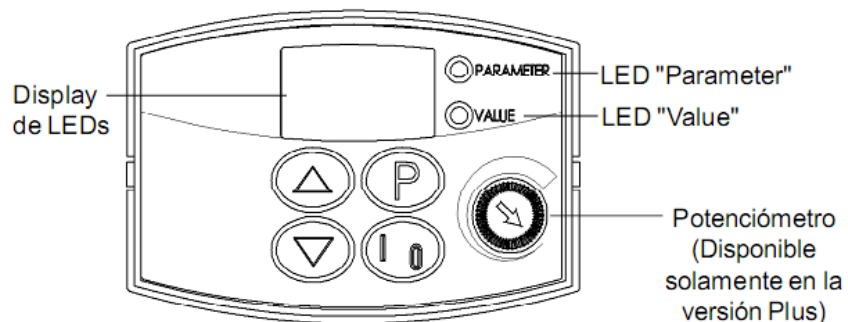
modificar esta velocidad, lo puede hacer presionando las teclas  y  hasta llegar a la velocidad que desee de acuerdo al flujo de carbón requerido.

Esquema 3. Variador de Velocidad






Si por causa de manipulación inadecuada, el variador se encuentra en un parámetro diferente al de la velocidad, el usuario la puede restaurar de la siguiente manera:


Esquema 4. tablero de programación del variador





1. Presione el botón , verifique que se encendió el indicador de

parámetro 

2. Presione las teclas  y , hasta alcanzar el numero 002.
3. Presiones nuevamente el botón  y verifique que se encendió el

indicador de valor. 

4. Programe la velocidad de los ejes deseada usando las teclas  y .
5. Por ultimo cierre con llave la caja de controles para evitar la modificación no deseada de la velocidad seleccionada.
6. Si lo que desea es modificar la frecuencia y que se muestre esta en el display, repitas los pasos anteriores modificando únicamente el parámetro del punto 2, a 005.
7. Para usuarios que deseen hacer una programación mas avanzada, pueden descargar el manual del variador de la siguiente dirección.

<http://www.weg.net/files/products/1-17036.pdf>

2. Información Técnica

Motorreductor siemens	Pot = 0,4 Hp; Vel = 1790 rpm, m = 50:1
Motor del molino	Pot = 2 Hp; Vel = 3600 rpm
Variador de frecuencia WEG	capacidad de 0,25 a 0,5 Hp
Dimensiones de la maquina	alto = 140 cm, ancho = 60 cm, largo = 150 cm
Velocidad de operación nominal	salida en el reductor = 36 rpm
Velocidad de operación mínima	18 rpm
Velocidad de operación máxima	54 rpm
Tº recomendada en el hogar	> 660 ºC
Tº recomendada del carbón	> 60 ºC

Tº recomendada del aire	> 60 °C
Capacidad del molino	10 Kg/min
Tipo de energía eléctrica	Trifásica
Caudal de aire recomendado	106 cfm para 260/min
Ventilador Centrifugo	Pot = 1/8 Hp; Vel = 3600 rpm; monofásico a 220 V

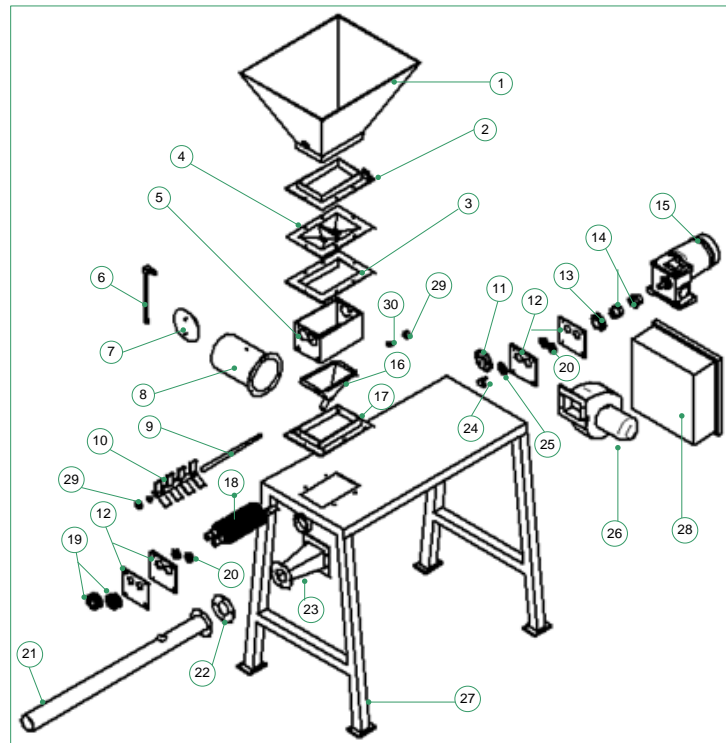
3. Descripción del funcionamiento

El sistema “carbo inyección” consta de un banco metálico que actúa como soporte de todo los componentes de la máquina; sobre este va el cajón porta ejes debidamente apernados, lleva en su parte superior una tolva de alimentación de carbón. Dentro del cajón van los ejes ranurados, los cuales son accionados por un motorreductor de 0,4 Hp.

Cuando el motor arranca empieza a caer hacia el embudo metálico que se encuentra justo debajo de los ejes ranurados, 6,5 gramos de carbón por cada revolución del eje; como la configuración inicial del variador es de 40 rpm, entonces el flujo de carbón para esta velocidad es de $260 \frac{g \text{ carbón}}{min}$. Previamente debe haberse encendido el ventilador centrífugo el cual suministra el aire que arrastra el carbón pulverizado que ha caído desde el embudo hacia quemador, a través del orificio que comunica a estos dos elementos, en este momento se establece el flujo de la mezcla aire carbón pulverizado, esta mezcla entra al hogar que debe estar 600 °C como mínimo, con el fin de obtener una correcta combustión.

4. Componentes y montaje

El sistema “carbo inyección” está compuesto por las siguientes partes:



No.	NOMBRE PIEZA	No.	NOMBRE PIEZA	No	NOMBRE PIEZA
1	Tolva	11	Piñón agitador conducido	21	Quemador
2	Brida tolva	12	Placas sopor. Rodamiento	22	Empaque quemador
3	Brida cajón	13	Piñón agitador conductor	23	Cambio de sección
4	Placa limitadora	14	Acople	24	Tensor cadena
5	Cajón soporta ejes	15	Motorreductor	25	Piñón tensor
6	Perilla válvula reg.	16	Embudo	26	Ventilador
7	Mariposa	17	Brida cajón base	27	Soporte
8	Cuerpo val. Mariposa	18	Ejes	28	Ventilador
9	Eje agitador	19	Engranaje	29	Dado prisionero
10	Agitador	20	Rodamientos	30	Buje fosforado

5. Puesta en marcha

Cuando el hogar de la caldera este a una temperatura de 600 °C ó más entonces:

1. Primero verifique que hay fluido eléctrico.

Esquema 5. Malla de la tolva



2. Cargue la tolva con carbón pulverizado, es importante que el carbón pase por la malla (esquema 5) para evitar que pasen granos grandes o tachuelas, tornillos, arandelas, trozos de madera o algún otro elemento que pueda producir un atascamiento del sistema de dosificación.
3. Si hay fluido eléctrico, gire el botón de arranque y observe que el bombillo azul (esquema 6) este encendido, luego encienda el ventilador centrífugo y enseguida oprima el pulsador de marcha, con esto se ha puesto en funcionamiento el sistema de dosificación de carbón pulverizado y su alimentación de aire.

Esquema 6. Controles de encendido y parada

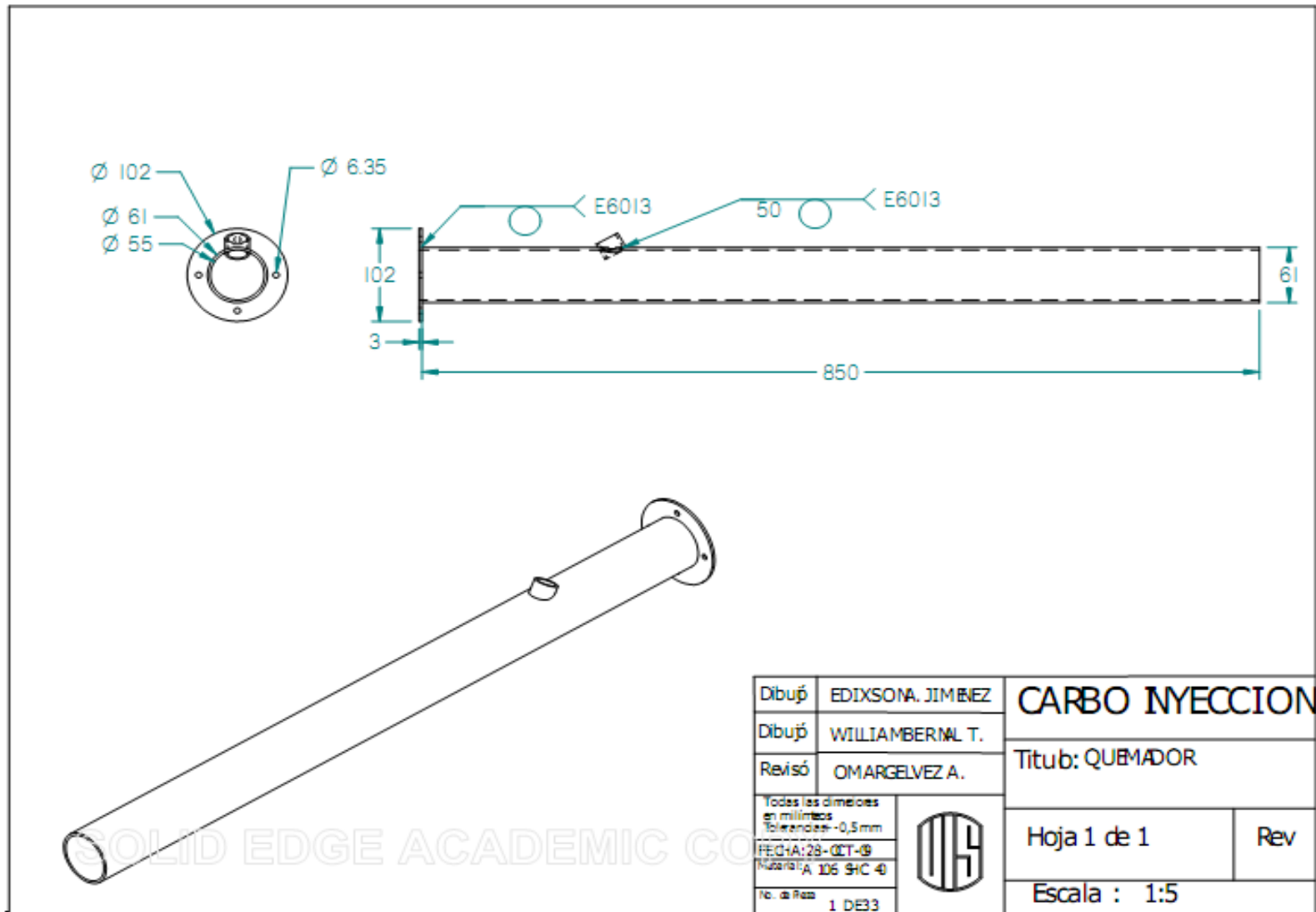


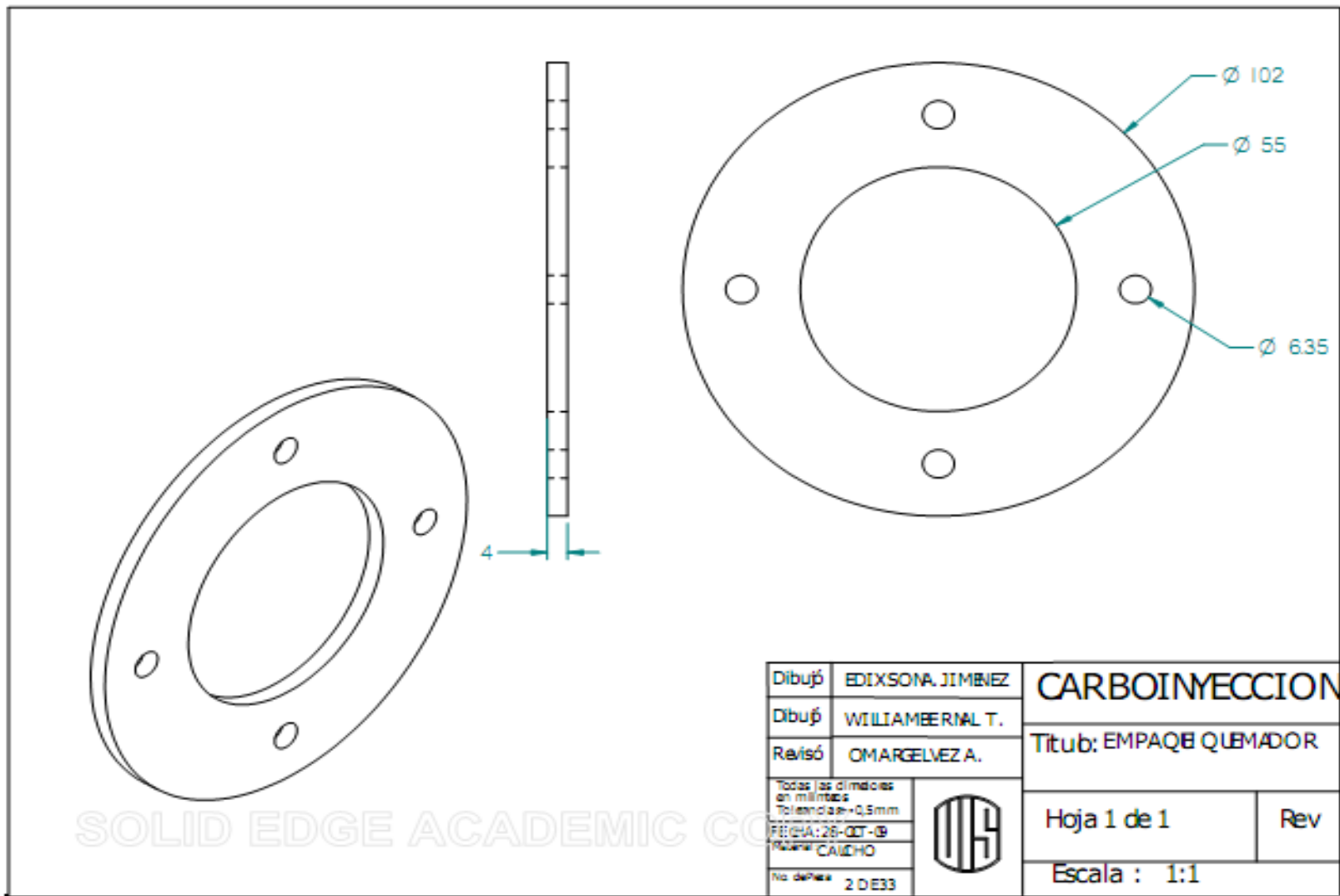
- Se debe recargar la tolva cada 40 min aproximadamente
Cuando se termine el proceso debe apagarse primero el sistema de dosificación con el botón rojo de parada y luego se gira el botón de arranque, el cual interrumpe la de alimentación eléctrica, finalmente se apaga el ventilador centrífugo y se procede a guardar la máquina en un lugar seco y protegido de la intemperie.
- Se recomienda engrasar los engranajes al menos una vez cada 15 días y lubricar la cadena del agitador también cada 15 días.

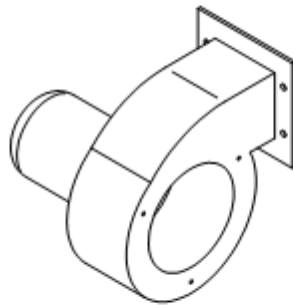
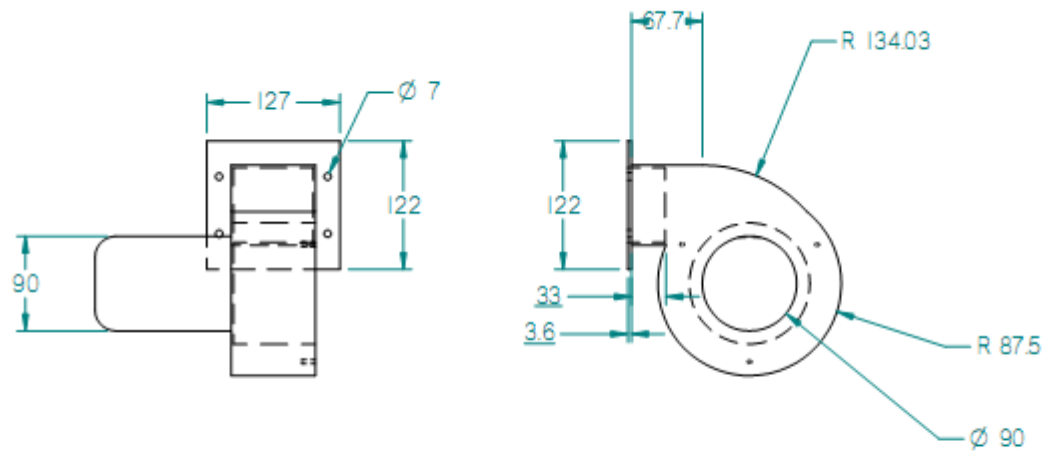
6. Guía para la solución de problemas

Problema	Compruebe	Solución
La maquina no prende	Que la conexión eléctrica este bien, que los botones de la caja de control enciendan	Conectar bien la maquina a la toma, revisar las conexiones eléctricas de la empresa y de la maquina
	Que el variador de frecuencia este encendido	Oprimir el botón P, con el cual se lleva a cabo el encendido
La maquina prende, pero los ejes no se mueven	Que el sistema de dosificación no esté atascado.	Quitar la tolva y la placa limitadora, limpiar con un cepillo los ejes
La maquina prende, pero se presentan ruidos en los ejes	Que no hayan caído objetos extraños en el sistema de dosificación, como arandelas, tornillos, trozos de madera.....	Apagar inmediatamente la maquina con el botón rojo de la caja de control y quitar la tolva y la placa limitadora para revisar y limpiar.
La maquina prende, no hay ruidos, pero no sale carbón por el tubo	Que el aire este fluyendo de manera normal	Apagar inmediatamente la maquina con el botón rojo de la caja de control y quitar el tubo quemador, el embudo y revisar que el embudo no esté atascado con carbón en láminas.
La maquina funciona bien, pero el carbón no se está quemando bien	Que el sistema de aire y el de carbón estén funcionando correctamente y revise si el carbón con el que se cargo la tolva está bien seco(caliente)	Si el carbón no está bien seco, hay que retirarlo de la tolva y secarlo con el calor generado por la caldera o con un sistema de intercambio de calor con el vapor.


ANEXO 2
PLANOS DEL CARBO INYECCION

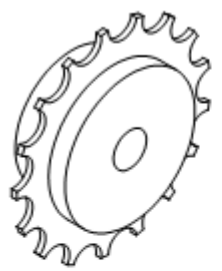
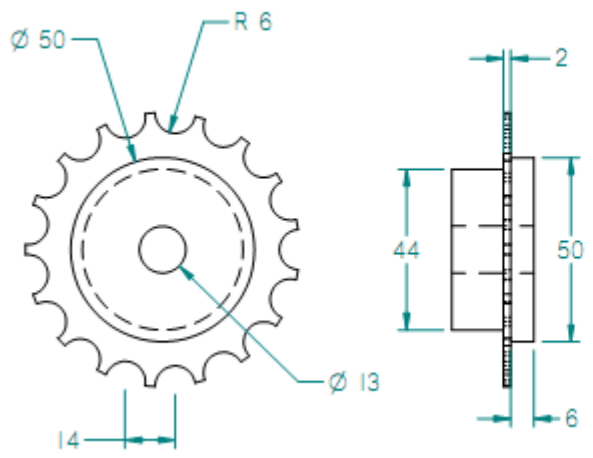




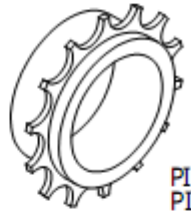
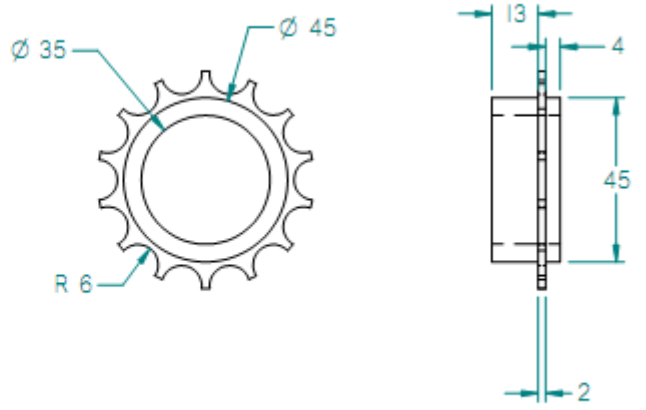


SOLID EDGE ACADEMIC CO

Dibujó	EDIXSONA. JIMBEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILLIAMBERNAL T.	Titub: VENTILADOR CENTRIFUGO	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: 0,5mm FECHA: 28-OCT-09 Material:		 Escala : 1:5	
No. de pieza 4 DE33			



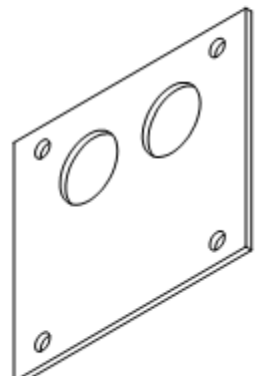
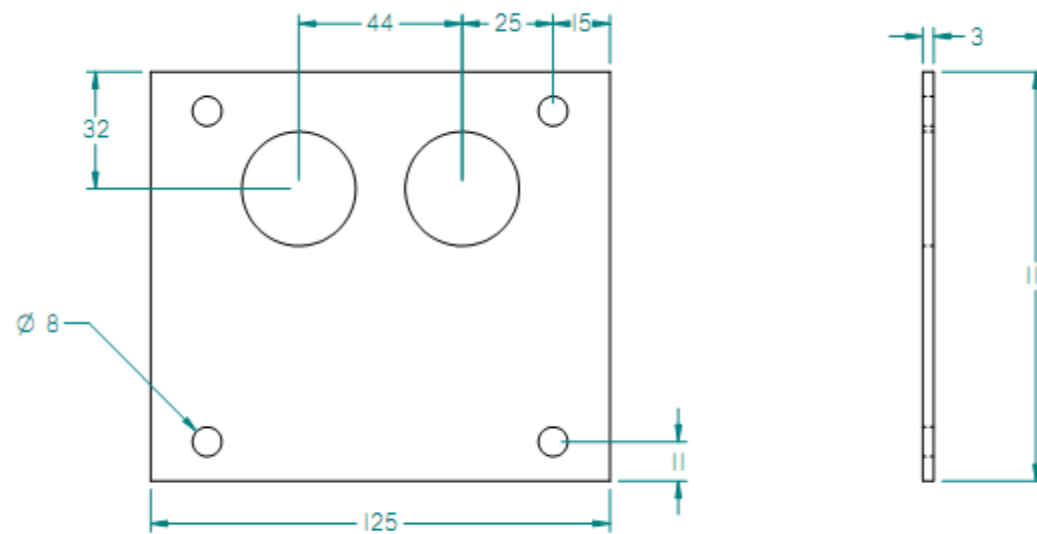
PIÑÓN CONDUCTO
PIEZA 14
Z = 17
M = 74




PIÑÓN CONDUCTOR
PIEZA 9
Z = 14

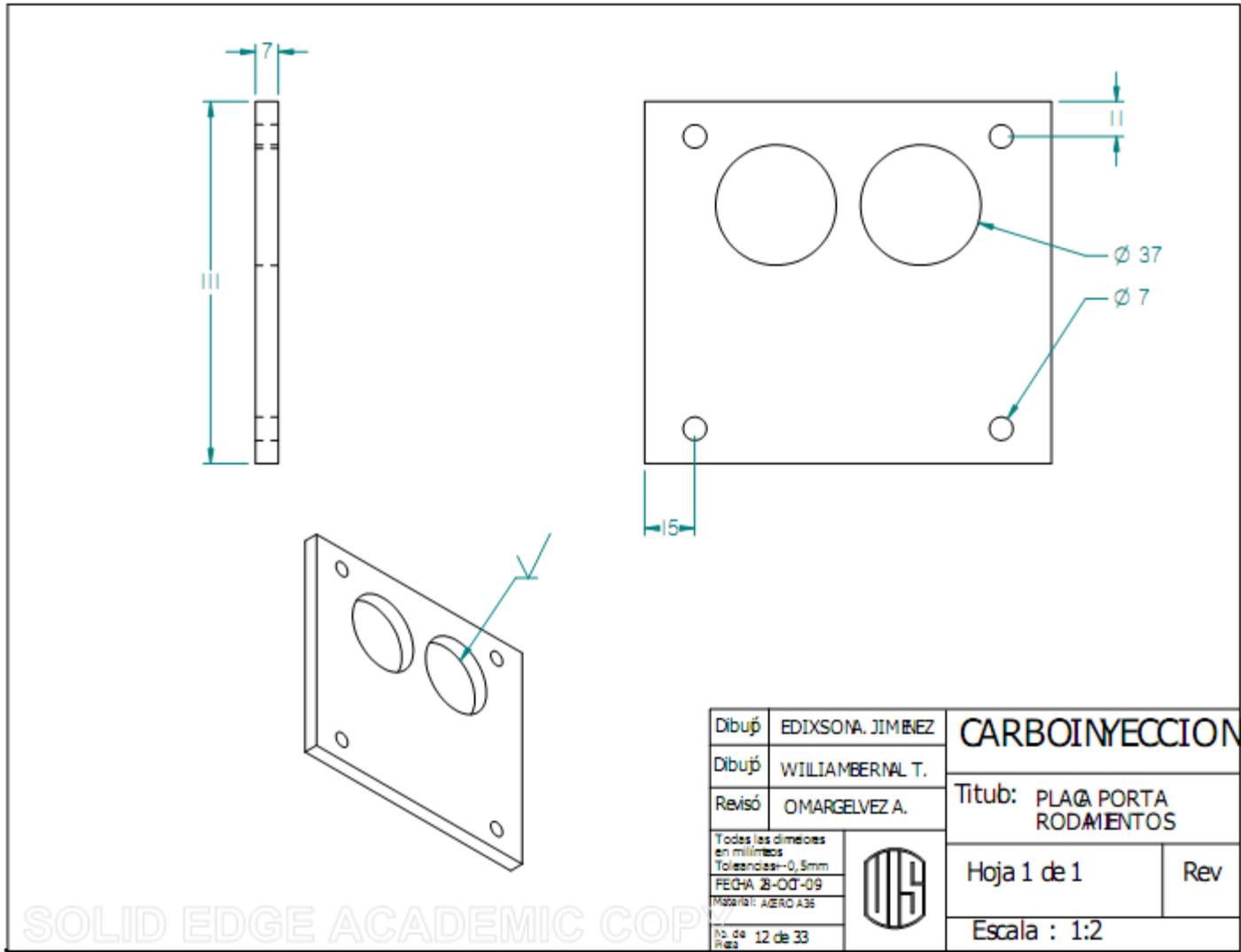
Dibujó	EDIXSONA. JIMÉNEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILLIAMBERNAL T.	Titub: PIÑONES DE AGITADOR	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: ±0,5mm FECHA: 28-OCT-09 Materia:			Escala :
No. de 9, 14 de 33 Pieza			

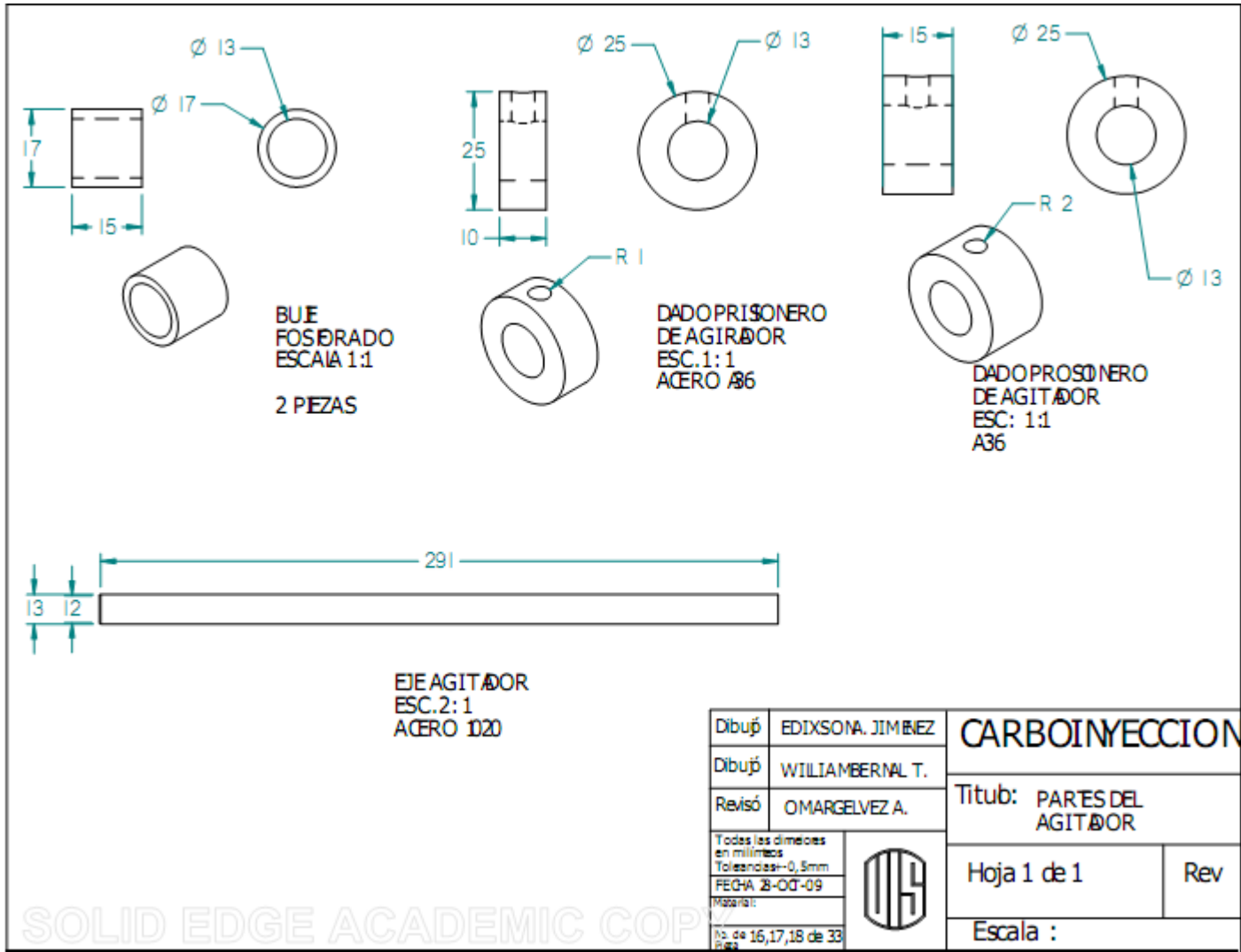
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

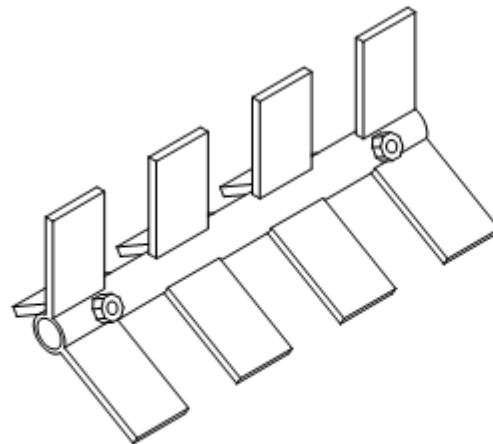
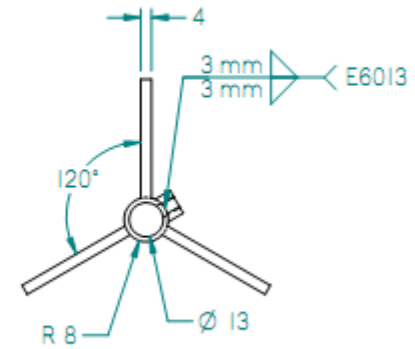
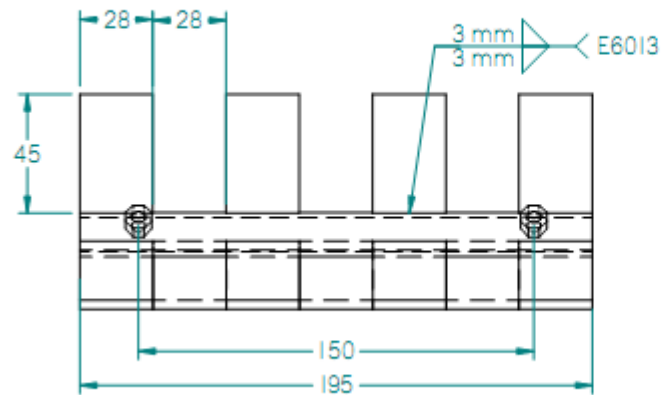



Dibujó	EDIXSONA, JIMÉNEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILIAMBERNAL T.	Titub: PLACA RETENEDORA	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: $\pm 0,5\text{mm}$ FECHA: 2-07-09 MATERIAL: AERODAS		 Escala : 1:2	
No. de Hoja: 10 de 33			

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

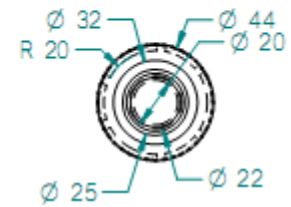
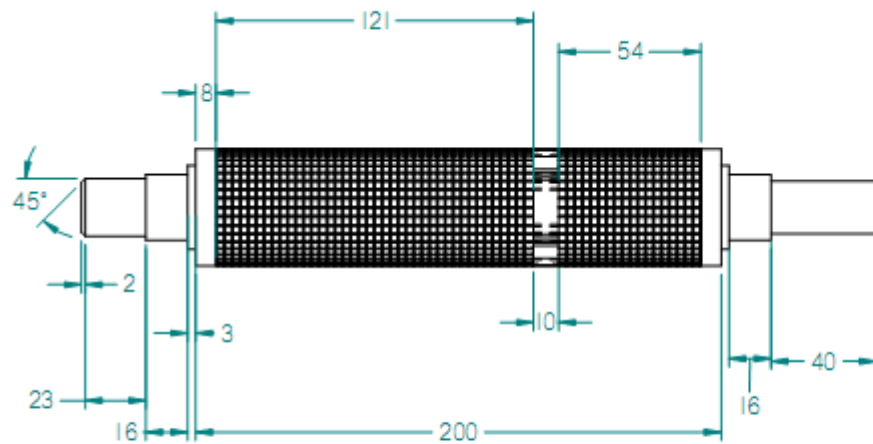




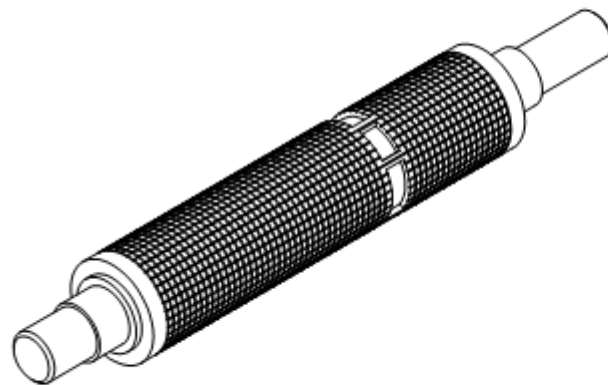


Dibujó	EDIXSONA. JIMÉNEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILIAMBERNAL T.	Titub: AGITADOR	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: -0,5mm FECHA: 28-OCT-09 MATERIAL: A36			
Nº de Hoja	19 de 33		


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

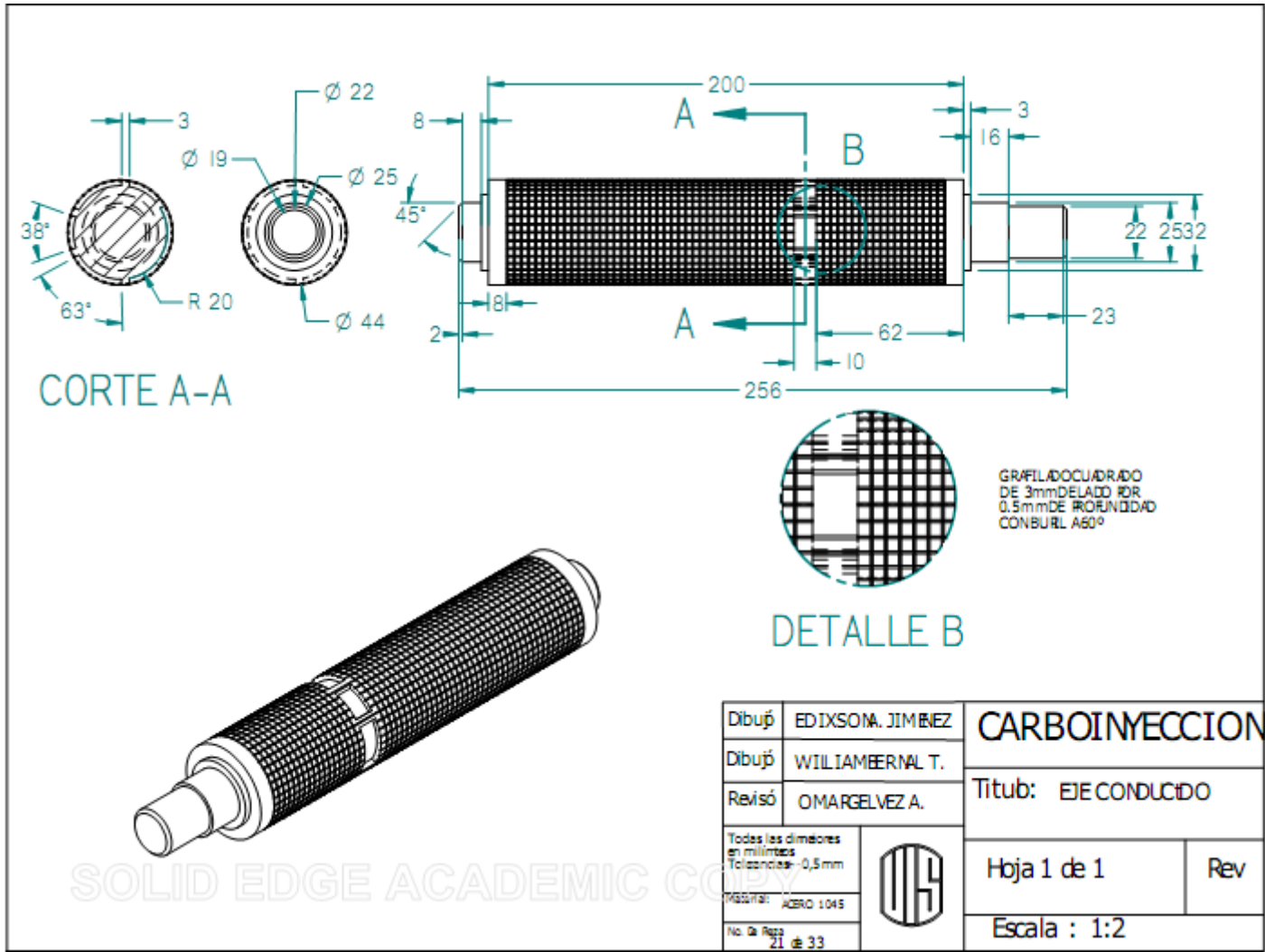


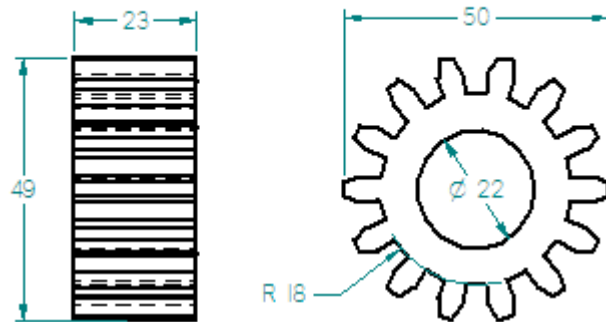
NOTA LAS DIMENSIONES EN LAS RANURAS IGUAL QUE EN EL EJE CONDUCTOR



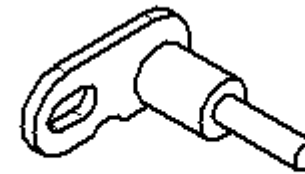
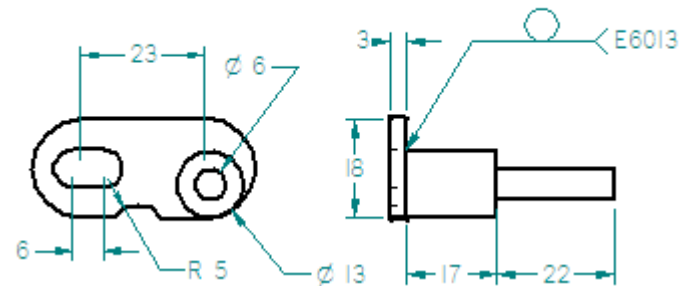
SOLID EDGE ACADEMIC C

Dibuñ	EDIXSONA, JIMNEZ	CARBOINYECCION	
Dibuñ	WILLIAMBERNAL T.	Titub: EJE CONDUCTOR	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: 0,5mm Norma: ABNC 1045 No. de Paga: 20 DE 33		 Escala : 1:2	

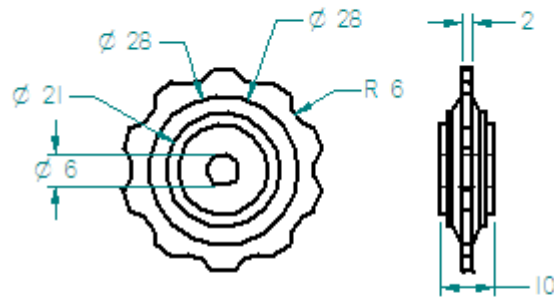




ENGRANAJES 2 PIEZAS
ACERO , PIEZA 22




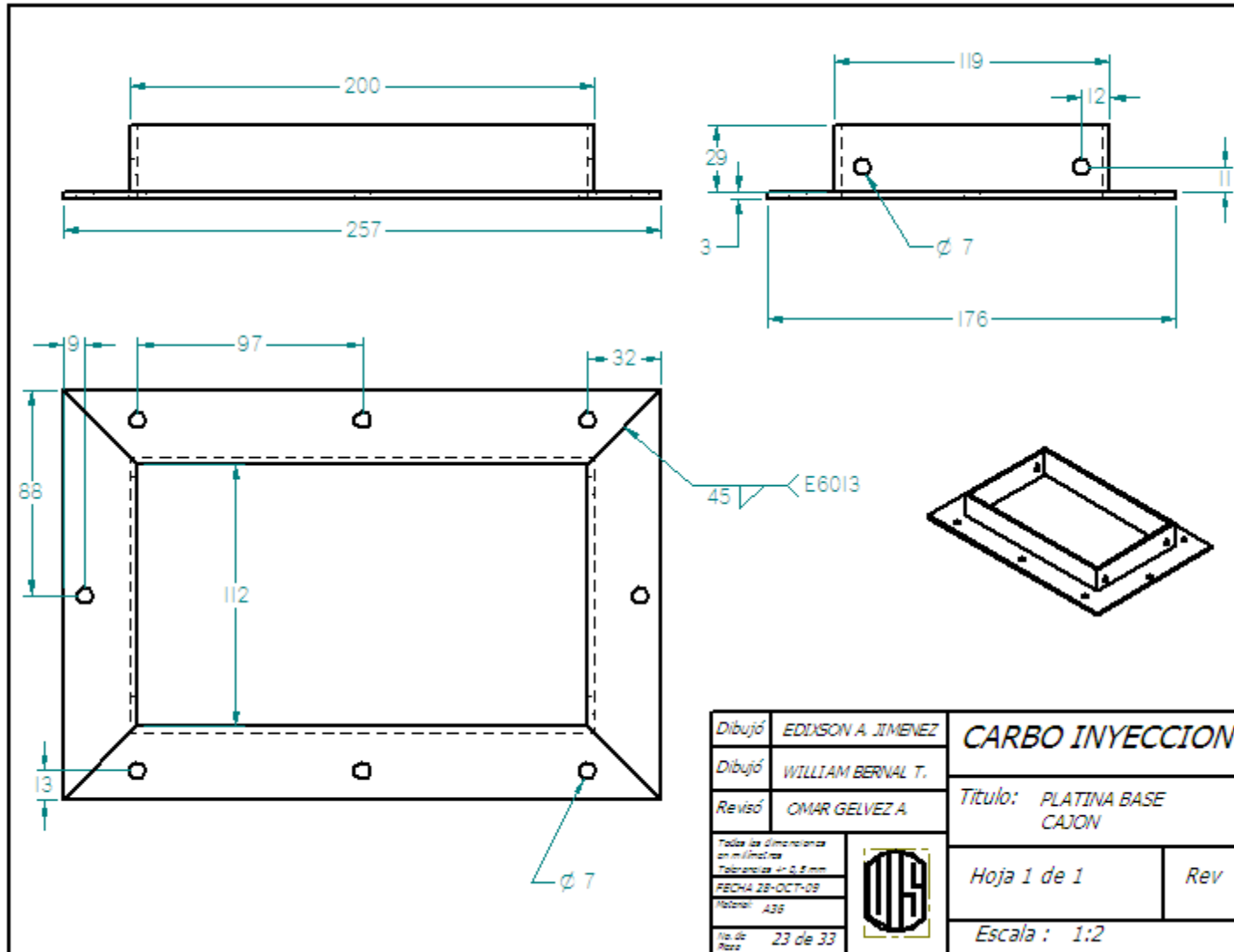
TENSOR, 1 PIEZA
A 35
PIEZA 15

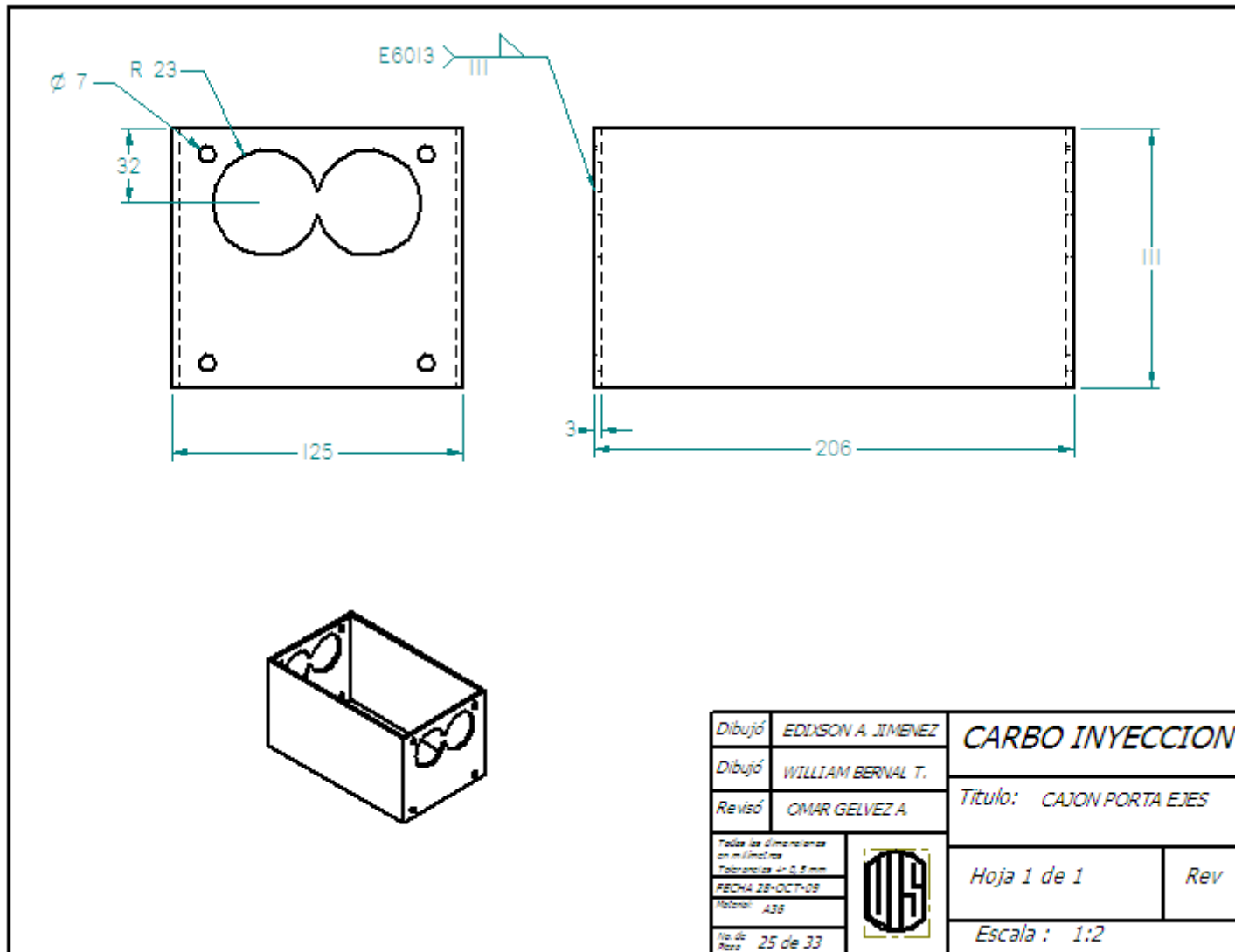


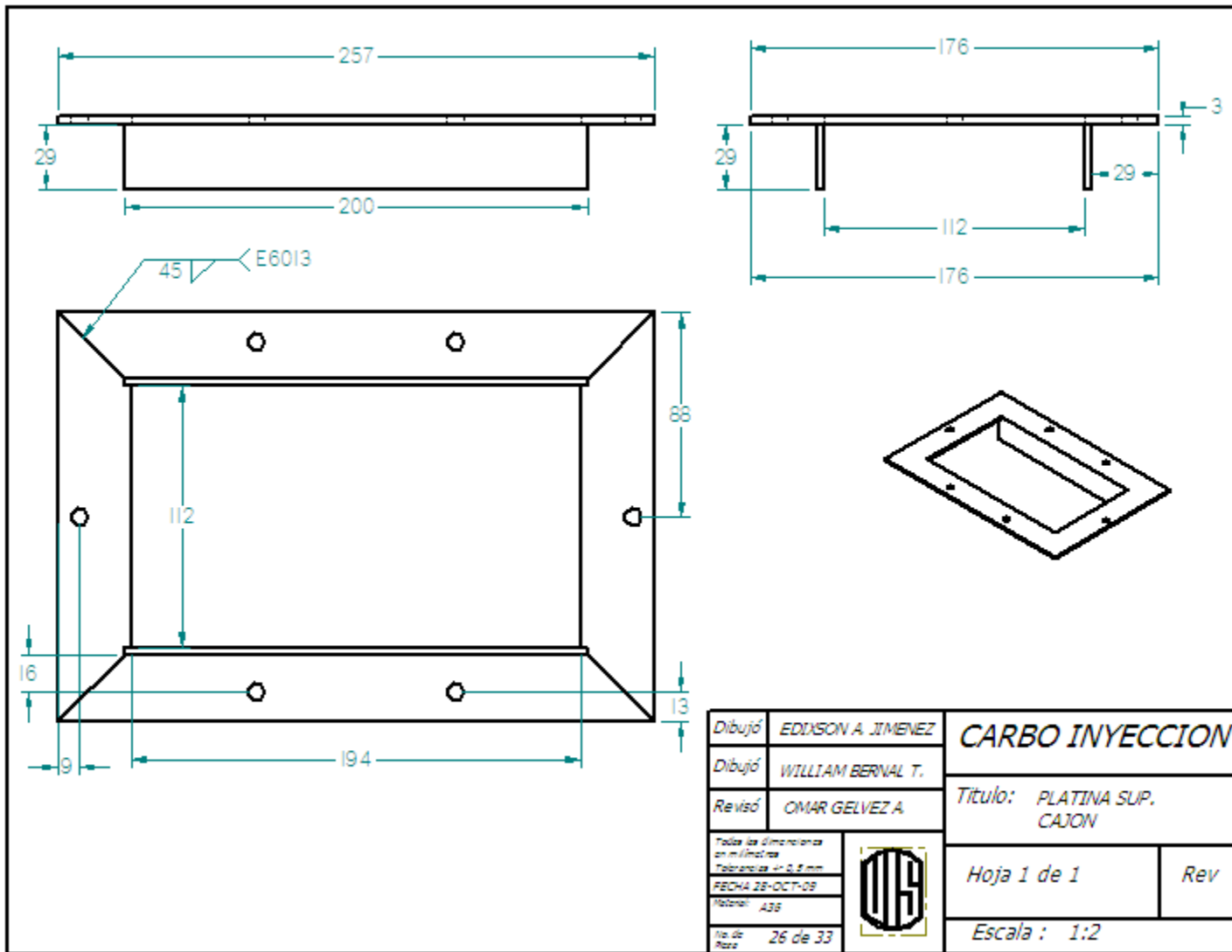
PIÑON TENSOR, 1 PIEZA
PLASTICO
PIEZA 13

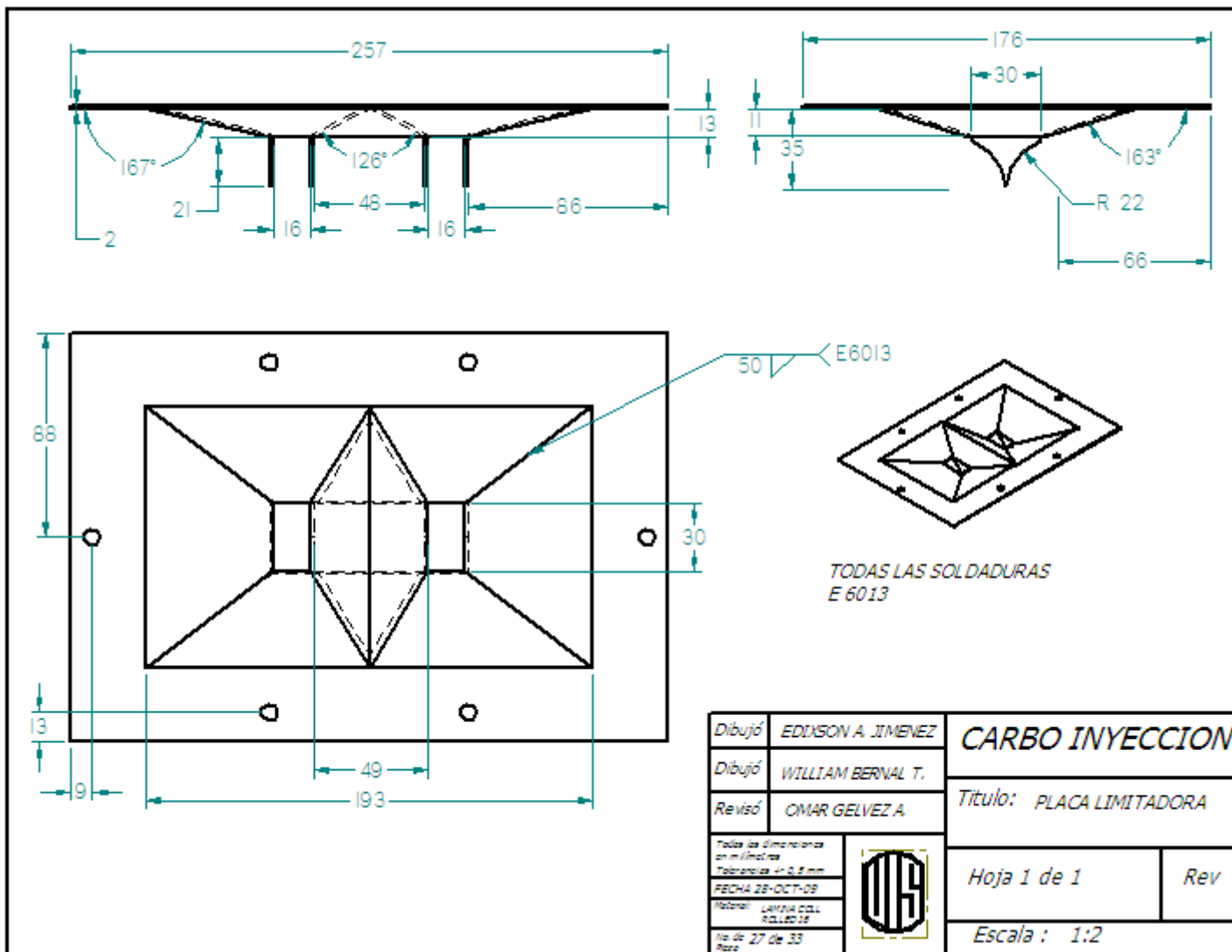


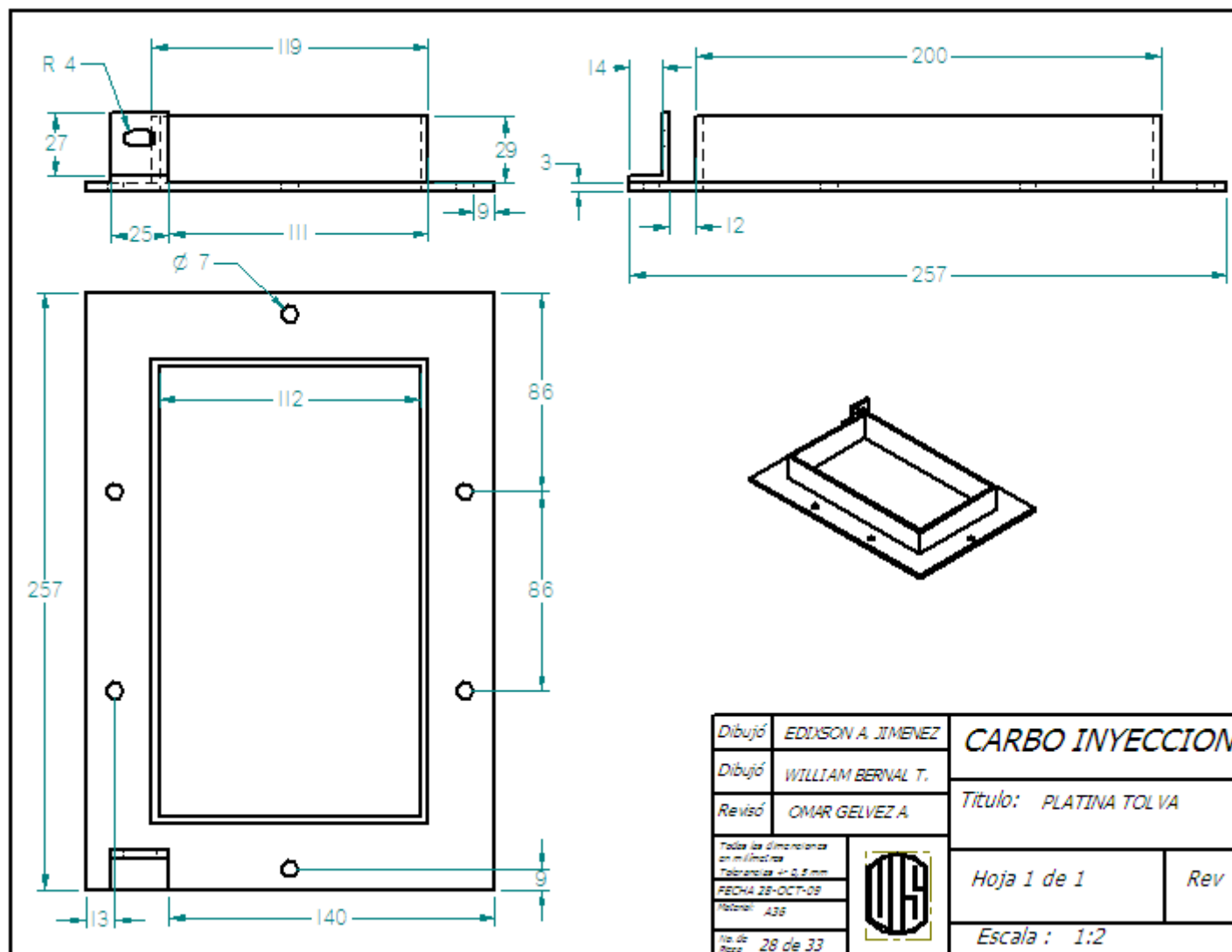
Dibujó	EDIXSON A. JIMENEZ	CARBO INYECCION	
Dibujó	WILLIAM BERNAL T.	Titulo: PIÑON, ENGRANAJE Y TENSOR	
Revisó	OMAR GELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
<small>Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias ± 0,2 mm FECHA 28-OCT-08 Folios:</small>		Escala :	
<small>No. de 22,13,15 de 33 Pieza</small>			

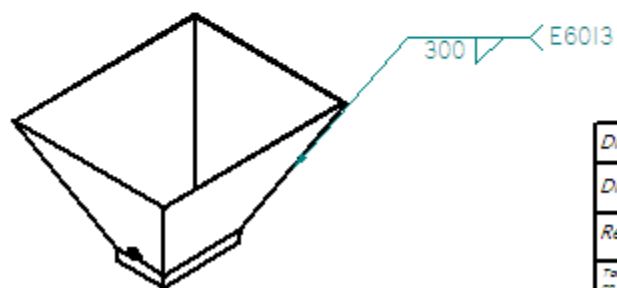
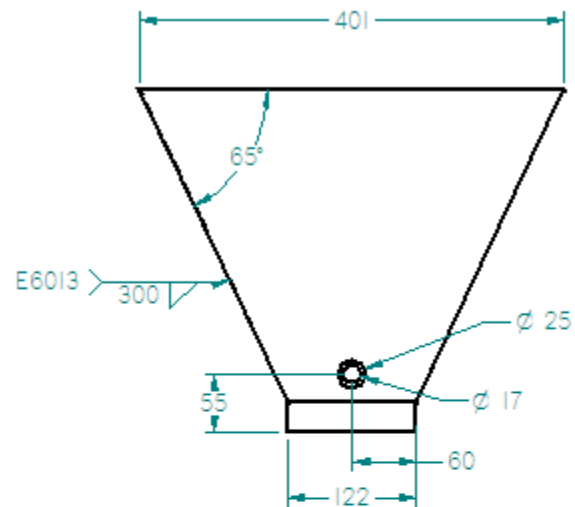
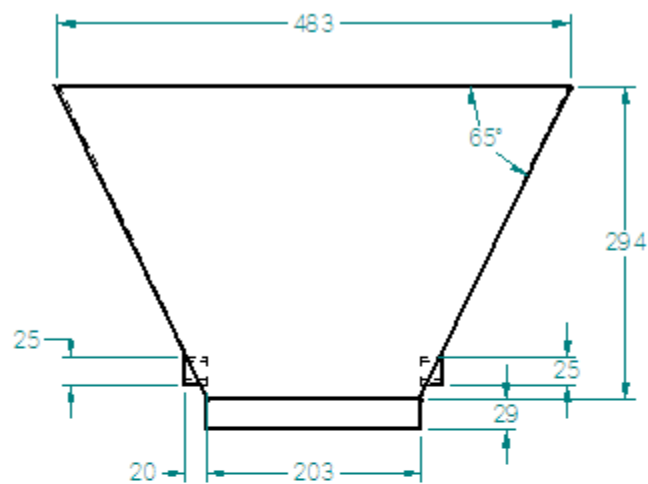





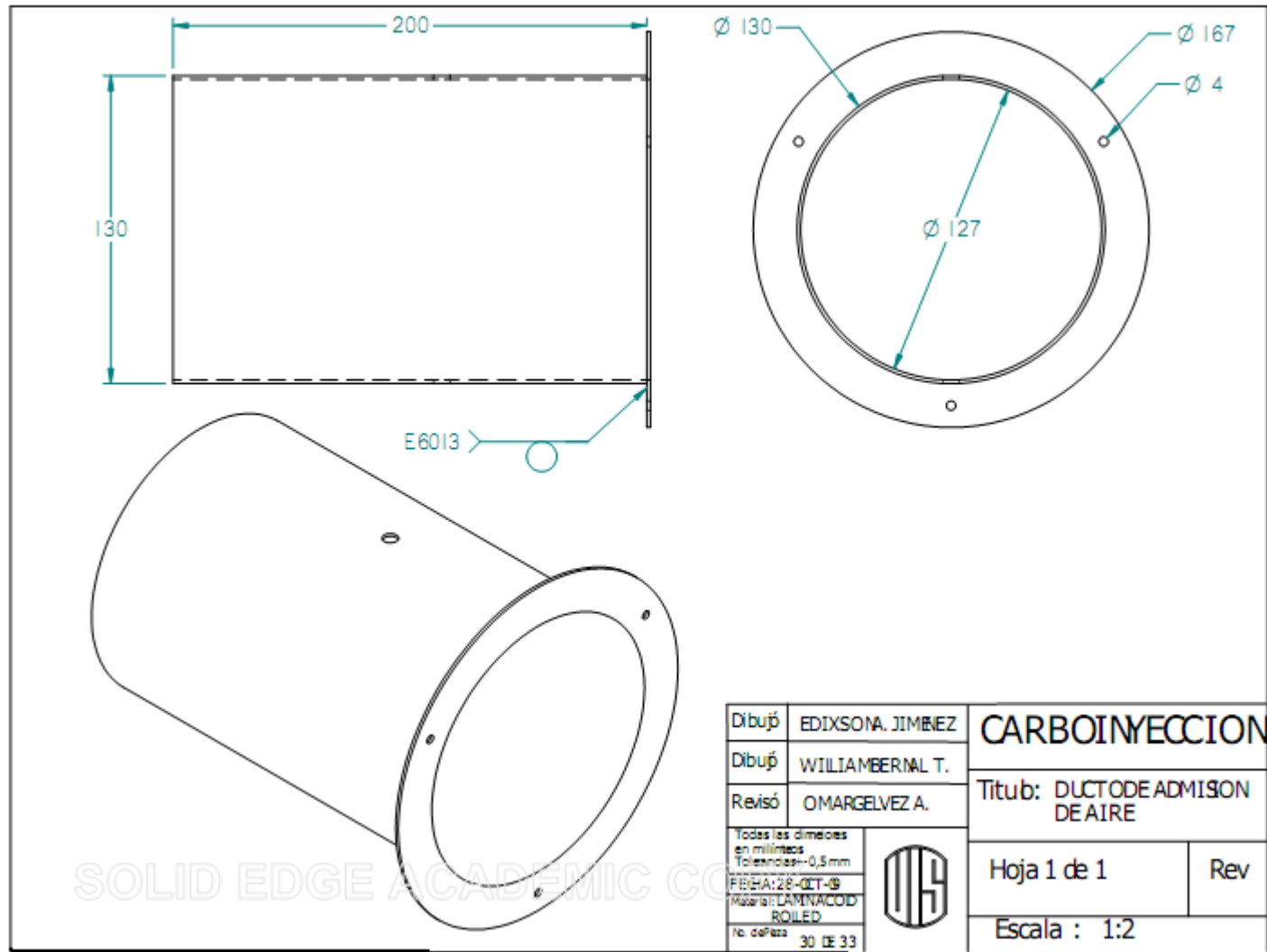


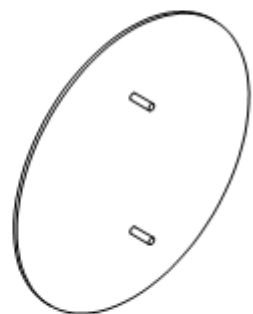
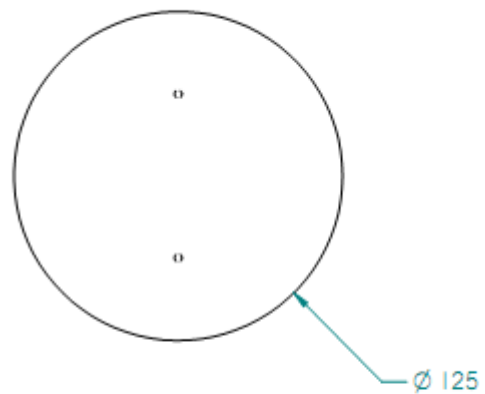
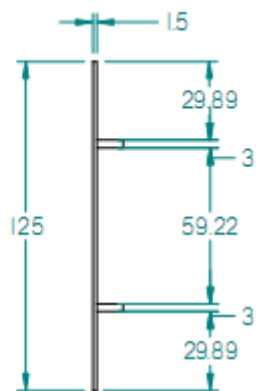







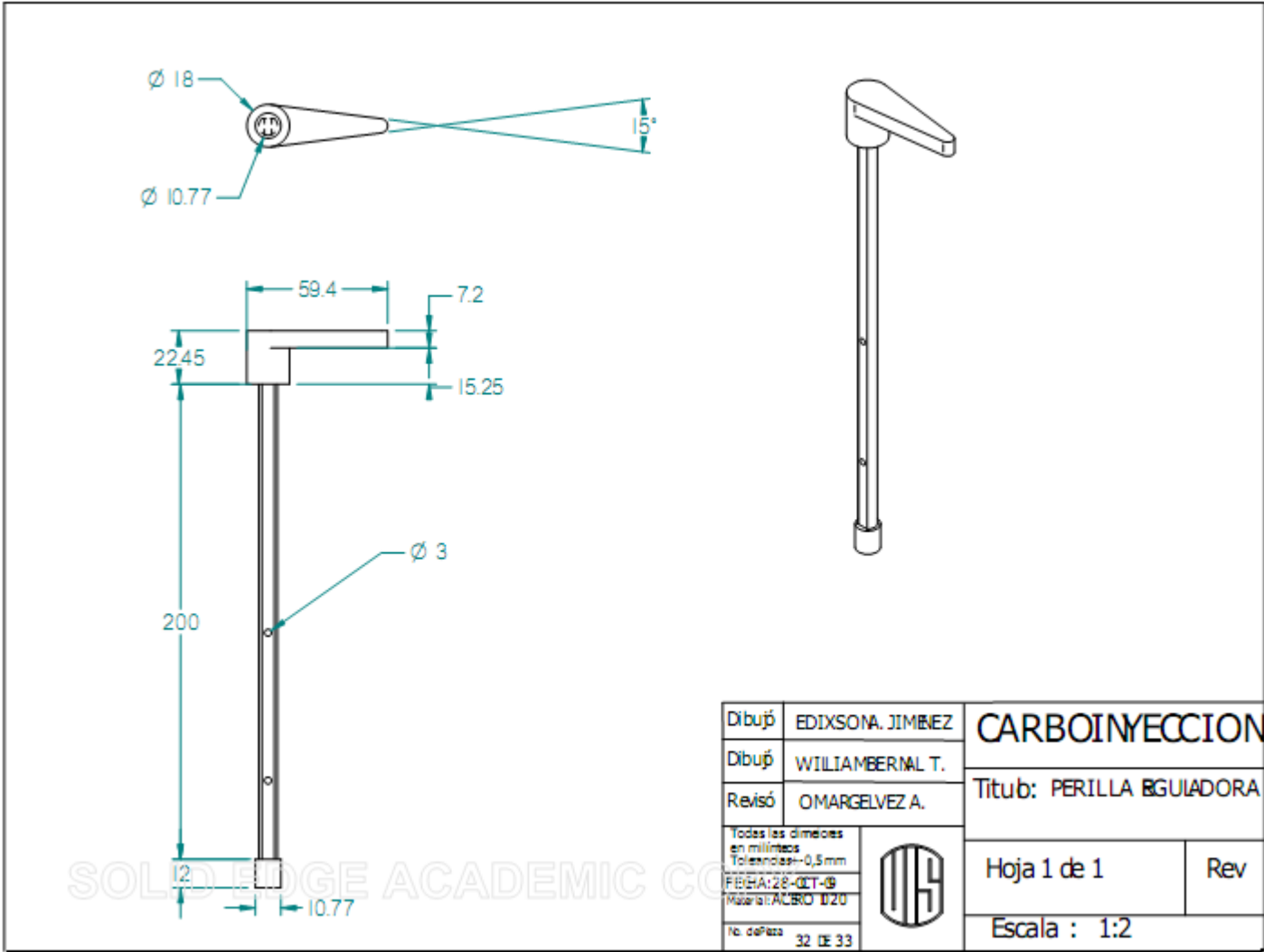
Dibujó	EDIXSON A. JIMENEZ	CARBO INYECCION	
Dibujó	WILLIAM BERNAL T.	Titulo: TOLVA	
Revisó	OMAR GELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancia en 0,5 mm FECHA 28-OCT-08 Material: LAMINA COLO ROLLEO 14 No. de Hoja 29 de 33		 Escala : 1:5	



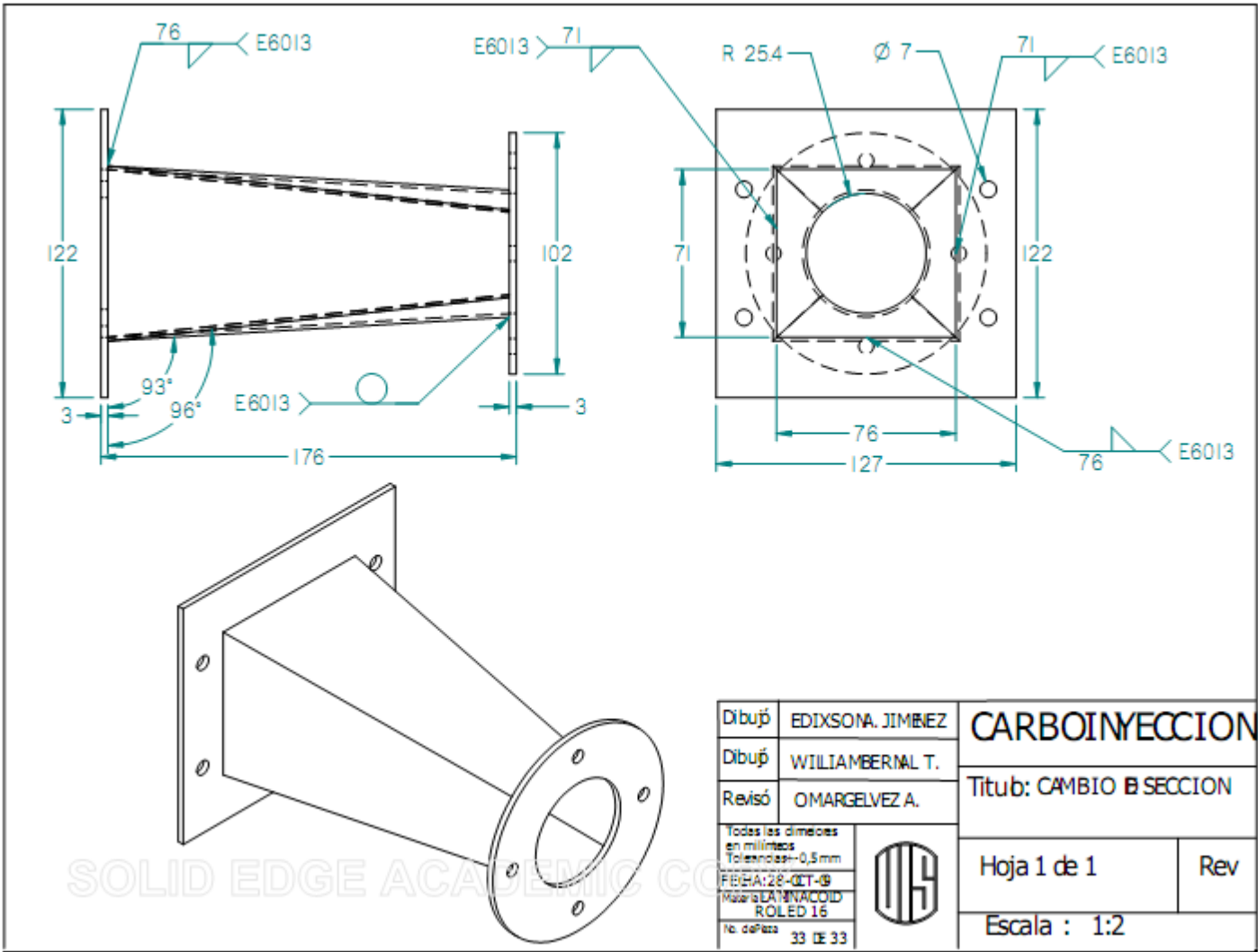



Dibujó	EDIXSONA. JIMENEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILLIAMBERNAL T.	Titub: VALVUA MARIPOSA	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: ±0.5mm FECHA: 28-OCT-09 Material: LAMINACOID ROILED No. de Paga 31 DE 33		 Escala : 1:2	

SOLID EDGE ACADEMIC CO



Dibujó	EDIXSONA, JIMNEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILLIAMBERNAL T.	Titub: PERILLA BGUIADORA	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimencioes en milímetros Tolerancias: ±0,5mm FECHA: 28-OCT-09 Material: ALERO D20			Escala : 1:2
No. de pieza	32 DE 33		



Dibujó	EDIXSONA, JIMNEZ	CARBOINYECCION	
Dibujó	WILLIAMBERNAL T.	Titub: CAMBIO DE SECCION	
Revisó	OMARGELVEZ A.	Hoja 1 de 1	Rev
Todas las dimensiones en milímetros Tolerancias: ±0,5mm FECHA: 28-OCT-09 Material: ALUMINACIÓ ROLED 16 No. de pieza 33 DE 33		 Escala : 1:2	