

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**"DISEÑO DE UN HORNO DE ARCO ELECTRICO A ESCALA DE
LABORATORIO PARA LA OBTENCION DE SILICIO METALURGICO"**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Omar Eduardo Henríquez Meneses

Erick Alejandro Aguilar Castro

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres por el apoyo brindado durante todo el proceso estudiantil. Al Ing. Ignacio Wiesner por su valiosa aportación y por permitirnos usar las instalaciones de su empresa INTRAMET para la elaboración de este proyecto.

A los profesores que compartieron sus conocimientos y experiencias durante este periodo universitario, lo que nos permitió ejecutar este proyecto de una manera eficaz.


A la Dra. Ana Rivas y al Ing. Víctor Palacios, Directores de Tesis; por su aporte y guía a lo largo de este trabajo.

Omar Eduardo Henríquez Meneses
Erick Alejandro Aguilar Castro

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:


Omar Henríquez M.


Erick Aguilar C.


Ing. Ana Rivas F.

el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL". Estamos también de acuerdo que el vídeo de la presentación oral es de plena propiedad de la FIMCP.

RESUMEN

La cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial que se produce en grandes volúmenes al año en Ecuador, en vista de la problemática ambiental que representa la quema sin ningún control de este producto, el Área de Materiales y Procesos de Transformación adscrita a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), ha propuesto un proyecto para el uso de las cenizas de cascarilla de arroz en varias aplicaciones, entre ellas, la producción de silicio grado metalúrgico (99,99% de Si) por su alto contenido de silicio (93%)^[1].

La reducción de silicio a partir de la ceniza de arroz se la realiza mediante un proceso carbotérmico, es decir que requiere de un alto consumo de energía a elevadas temperaturas (1800°C a 2000°C), condiciones que se pueden alcanzar mediante un horno de arco eléctrico, sin embargo, en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) no se cuenta con este equipo y su venta a escala de laboratorio es muy restringida, por tal motivo, el presente proyecto plantea el diseño de un horno de arco eléctrico para su uso a escala de laboratorio con capacidad para procesar 5 kg de ceniza de cascarilla de arroz.

El horno diseñado está formado por un crisol de grafito, de forma cilíndrica y cóncavo en su base interna, en el cual se producen las reacciones químicas y sirve como ánodo para cerrar el circuito eléctrico. Las superficies del crisol están recubiertas con material aislante a base de ladrillos refractarios de magnesita y fibra de vidrio, los cuales minimizan las pérdidas de calor y permiten obtener temperaturas bajas (entre 150°C a 165°C) en las superficies de las planchas de acero AISI 1020 que cubren al horno. El sistema eléctrico del horno consta de dos máquinas soldadoras que al operar conjuntamente generan la alta intensidad de corriente (800 A.) que se requiere para elevar la temperatura alrededor de los 2000°C en la cámara de reacción para poder obtener silicio metalúrgico en un tiempo aproximado de 2 horas. Además el horno cuenta con un mecanismo de basculación para facilitar el vaciado, un mecanismo de porta electrodo, un mecanismo para el movimiento de la tapa y una bancada.

El horno de arco eléctrico diseñado puede ser usado para la fundición de otros tipos de materiales como por ejemplo acero, aluminio, hierro, ferroaleaciones, calcio, etc., debido a que la temperatura alcanzada por el horno es mayor al punto de fusión de los materiales mencionados.

Palabras Clave: Horno de arco eléctrico, cascarilla de arroz, silicio, electrodo, energía

ABSTRACT

The rice husk is an agro-industrial waste that is produced in large volumes per year in Ecuador, due to the environmental problems that causes the uncontrolled burning of this product, the Department of Materials and Transformation Processes attached to the Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences (FIMCP), has proposed a project for the use of this rice husk ash in various applications, like the production of metallurgical grade silicon (99.99% Si) for its high content silicon (93%).

The reduction to silicon from rice husk ash is performed by a carbothermic process, i.e. it requires a high energy consumption at high temperatures (1800 °C to 2000 °C), conditions which can be achieved through the use of an Electric Arc Furnace, however, the Escuela Superior Politecnica del Litoral (ESPOL) doesn't have this equipment and selling it on a laboratory scale is very limited, for this reason, this project involves the design of an electric arc furnace for use in laboratory scale, with a capacity to process 5 kg of rice husk ash.

The designed furnace is formed by a graphite crucible, of cylindrical shape and concave in its inner core, in which chemical reactions will occur and it also serves as an anode to close the electrical circuit. The crucible's surfaces are coated with an insulating material based on refractory magnesite bricks and glass fiber, which minimizes heat loss and can achieve low temperatures (between 150 °C to 165 °C) on the surfaces of the AISI 1020 steel plates covering the oven. The electric system of the furnace consists of two welding machines that operate together to generate the high current (800A) required to raise the temperature around 2000 °C in the reaction chamber to obtain metallurgical silicon in approximately 2 hours. Besides, the furnace has a tilt mechanism to facilitate emptying, an electrode holder mechanism, a mechanism for the movement of the lid and bench structure.

The electric arc furnace designed can be also used to melt other types of materials such as steel, aluminum, iron, ferroalloys, calcium, etc., due to the temperature reached by the furnace is higher than the melting point of the mentioned materials.

Key words: *Electric arc furnace, rice husk, silico, electrode, energy*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII

Capítulo 1:

1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo General	1
1.2.2 Objetivos Específicos	1
1.3 Marco teórico.....	2
1.3.1 Hornos de arco eléctrico.....	2
1.3.2 Tipos de hornos de arco eléctrico.....	2
1.3.3 Partes de un horno de arco eléctrico ^[4]	3
1.4 Silicio y sus aplicaciones ^[5]	4
1.5 Producción y requerimientos para el proceso de obtención de silicio en los hornos de arco eléctrico	4
1.6 Normas.....	5

Capítulo 2:

2.1 Metodología del procedimiento experimental para la obtención de silicio metalúrgico .	6
2.2 Metodología del diseño del horno de arco eléctrico	6
2.3 Alternativas para el diseño del horno de arco eléctrico.....	7
2.3.1 Matriz de decisión.....	7
2.4 Diseño de la estructura de la cámara de reacción del horno	8
2.4.1 Forma y dimensiones del crisol	8
2.4.2 Materiales que conforman el cuerpo del horno	9
2.5 Estudio térmico del horno	10
2.5.1 Pérdidas de calor por las paredes	10
2.5.2 Pérdidas de calor por la base y tapa	12

2.5.3	Energía que se requiere para la reducción del silicio grado metalúrgico.....	13
2.5.4	Calor total que se suministra al horno.....	13
2.5.5	Eficiencia térmica	13
2.6	Selección de equipos eléctricos que se requiere para el funcionamiento del horno	14
2.6.1	Determinación del diámetro del electrodo.....	15
2.6.2	Consumo específico del electrodo.....	15
2.6.3	Relación consumo del electrodo / consumo de energía eléctrica.....	16
2.7	Diseño del porta electrodo	17
2.7.1	Altura del porta electrodo.....	17
2.7.2	Espesor del porta electrodo.....	17
2.7.3	Sistema de refrigeración del porta electrodo.....	19
2.8	Diseño del sistema de control para el desplazamiento vertical del electrodo	21
2.8.1	Diseño del tornillo de potencia.....	21
2.8.2	Selección de Rodamientos	22
2.8.3	Selección del Motor paso a paso.....	22
2.8.4	Selección de controladores	23
2.9	Diseño del sistema de basculación del horno.	24
2.9.1	Diseño de ejes paralelos y volante.	24
2.9.2	Diseño de engranes	27
2.10	Diseño del mecanismo de movimiento de tapa con ayuda del software ANSYS. ...	28
2.11	Diseño de bancada con ayuda del software ANSYS	28

Capítulo 3:

3.1	Diseño de la estructura de la cámara de reacción del horno	29
3.1.1	Forma y dimensiones del crisol	29
3.2	Estudio Térmico.....	29
3.2.1	Energía requerida para la reducción del silicio grado metalúrgico	30
3.2.2	Calor total que se suministra al horno.....	30
3.2.3	Simulación del análisis térmico del horno	31
3.3	Equipos eléctricos seleccionados para el funcionamiento del horno.....	32
3.3.1	Diámetro del electrodo seleccionado.....	34
3.3.2	Consumo específico del electrodo.....	34
3.4	Dimensiones del porta electrodo	34
3.4.1	Resultados del sistema de refrigeración del porta electrodo.....	34
3.5	Dimensiones del sistema de control para desplazamiento del electrodo	35

3.5.1	Motor paso a paso seleccionado	36
3.5.2	Selección del controlador	36
3.6	Diseño del sistema de basculación del horno.	37
3.6.1	Diseño de ejes paralelos y volante.	37
3.6.2	Diseño de engranes.	38
3.7	Control de la temperatura en la cámara de reacción	39
3.8	Diseño del mecanismo de movimiento de tapa con ayuda del software ANSYS	40
3.9	Diseño de bancada con ayuda del software ANSYS	41
3.10	Análisis económico.....	42
3.10.1	Costo de Diseño.....	42
3.10.2	Análisis de Costo de materiales y mano de obra	42
3.10.3	Costo del mecanismo del porta electrodo.....	43
3.10.4	Costo del sistema eléctrico del horno	44
3.10.5	Costo del sistema de basculación	45
3.10.6	Costo del instrumento para el control de la temperatura.....	46
3.10.7	Costo total del diseño y construcción.....	46
3.10.8	Costo de un horno de arco eléctrico similar	47

Capítulo 4

4.1	Conclusiones.....	48
4.2	Recomendaciones.....	49

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de ingeniería Mecánica y Ciencia de la Producción
LEMAT	Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales
ISO	Organización Internacional de Normalización
DIN	Instituto Alemán de Normalización
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
AGMA	Asociación Americana de Equipos Manufacturados
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
AWG	American Wire Gauge
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero

SIMBOLOGÍA

SiO ₂	Oxido de silicio
C	Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
° C	Centígrados
K	Kelvin
Kg	kilogramos
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros cuadrados
cm ³	Centímetros cúbicos
mm	Milímetros
mm ²	Milímetros cuadrados
mm ³	Milímetros cúbicos
ft	Pies
in	Pulgadas
J	Joule
W	Watt
KW	Kilowatt
MPa	Mega Pascales
Lt	Litros
V	Voltaje
I	Corriente
A	Amperaje
∅	Diámetro
N	Newton
F	Fuerza
σ_{max}	Esfuerzo máximo
S _y	Resistencia a la fluencia del material
S	Módulo de resistencia del material

n	Factor de seguridad
T_s	Torque de subida del tornillo de potencia
T_b	Torque de bajada del tornillo de potencia
μ	Coefficiente de fricción estándar
F_r	Fuerzas Radiales
F_t	Fuerzas Tangenciales
d_m	Diámetro medio
p	Paso
S_o	Factor de seguridad de rodamientos de Bolas
P_o	Carga máxima aplicada en los rodamientos
C_{or}	Carga estática de los rodamientos
M_{max}	Momento máximo
P_d	Paso Diametral
TV	Tren de Engranés
b	Tamaño de raíz de engranes
h_t	Profundidad total de dientes de engranes
h_K	Profundidad de trabajo de engranes
t	Espesor de dientes
C	Distancia entre centros piñón- engrane
σ_{at}	Esfuerzo por Flexión
K_a	Factor de Aplicación
K_s	Factor de tamaño
K_m	Factor de distribución de carga
t_r	Espesor de corona
D_p	Diámetro primitivo
ohm	Ohmios
Hz	Hertz
$T_{sup.}$	Temperatura superficial
T_{∞}	Temperatura ambiente
ϑ	Gradiente de velocidad
k	Conductividad térmica
Pr	Numero de Prandtl

β	Coeficiente volumétrico de expansión térmica
Gr_L	Número de Grashof
Nu	Número de Nusselt
Ra_L	Número de Rayleigh
R	Resistencia térmica
Q_{conv}	Calor por conducción
Q_{rad}	Calor por radiación
σ	Constante de Stefan Boltzmann
$Area_{cont}$	Área de contacto de gases
g	Gravedad
L_{sc}	Longitud de superficie caliente
D_{elect}	Diámetro del electrodo
$H_{p.e}$	Altura del porta electrodo
\dot{m}	Flujo másico
C_p	Calor específico
Q_s	Consumo específico de electrodos
q_{ee}	Consumo de energía eléctrica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Horno de Arco Eléctrico Indirecto	2
Figura 1-2. Horno de Arco Eléctrico Directo.....	3
Figura 1-3. Consumo Global de Silicio Elemental Según sus Aplicaciones ^[5]	4
Figura 1-4. Proceso de Obtención de Silicio en Plantas Industriales ^[7]	5
Figura 2-1 Forma y dimensiones del Crisol de Grafito	9
Figura 2-2. Materiales que Conforman el Cuerpo del Horno	9
Figura 2-3. Balance de Energía en las Paredes del Horno	10
Figura 2-4. Pared Compuesta del Horno	11
Figura 2-5. Balance de Energía en la Tapa del Horno	12
Figura 2-6. Balance de Energía en la Base del Horno	13
Figura 2-7. Sistema Eléctrico del Horno.....	14
Figura 2-8. Relación de diámetros del electrodo ^[16]	16
Figura 2-9. Diseño de Forma del Porta Electrodo	17
Figura 2-10. Sistema de Refrigeración del Porta Electrodo.....	19
Figura 2-11. Fuerzas que Soporta el Tornillo de Potencia	21
Figura 2-12. Pulsos y Frecuencia de un Motor Paso a Paso ^[19]	23
Figura 2-13 Sistema de Control de Motor Paso a Paso	23
Figura 2-14. Partes del Sistema de Basculación.....	24
Figura 2-15. Fuerzas Ejercidas sobre el Volante	24
Figura 2-16. Fuerzas Radiales y Tangenciales	25
Figura 2-17. Eje Secundario	25
Figura 2-18. Eje Primario.....	26
Figura 2-19. Pasos Diametrales Estándares ^[21]	27
Figura 3-1. Dimensiones del crisol.....	29
Figura 3-2. Cargas Térmicas Aplicadas en el Horno.....	31
Figura 3-3 Flujo de Calor en el Exterior del Horno	31
Figura 3-4. Flujo de Calor desde el Interior del Horno.....	32
Figura 3-5. Distribución de la temperatura en el cuerpo del horno`	32
Figura 3-6. Forma y longitud del Eje Secundario	37
Figura 3-7. Forma y Longitud del Eje Primario.....	38
Figura 3-8. Temperatura de Trabajo de las Termocuplas ^[2]	39
Figura 3-9. Esfuerzo Equivalente Producido en el Mecanismo	40
Figura 3-10. Deformación producida en el Mecanismo	40
Figura 3-11. Deformación producida en la bancada.....	41
Figura 3-12. Esfuerzo Equivalente en la Bancada	41
Figura 3-13. Factor de Seguridad de la Bancada.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Decisión de Tipos de Hornos de Arco Eléctrico	7
Tabla 2. Ecuaciones para Determinar el Coeficiente Convectivo	12
Tabla 3. Densidad de Corriente de Electrodo de Grafito ^[15]	15
Tabla 4. Conductores de Cobre Según la Norma AWG ^[17]	18
Tabla 5. Especificaciones de la AGMA para dientes de engrane de profundidad total ^[21]	27
Tabla 6. Resultados de las Pérdidas de Calor por las Paredes	30
Tabla 7. Resultados de las Pérdidas de Calor por la tapa	30
Tabla 8. Resultados de las Pérdidas de Calor por la Base	30
Tabla 9. Condiciones Iniciales para la Simulación	31
Tabla 10. Características de las Máquinas Soldadoras	33
Tabla 11. Especificaciones Técnicas del Transformador	33
Tabla 12. Especificaciones Técnicas del Electrodo	34
Tabla 13. Especificaciones Técnicas del Motor Paso a Paso	36
Tabla 14. Especificaciones Técnicas del Controlador	37
Tabla 15. Parámetros de Diseño	38
Tabla 16. Resultados Obtenidos del Diámetro de Ejes	38
Tabla 17. Resultados Obtenidos de los Engranajes	38
Tabla 18. Especificaciones Técnicas del Termómetro Infrarrojo	39
Tabla 19. Resultados de Esfuerzo Equivalente y Deformación	40
Tabla 20. Resultados de Esfuerzo Equivalente y Deformación en la Bancada	41
Tabla 21. Costo de Materiales para el Cuerpo de la Cámara de reacción	42
Tabla 22. Costo Total del Cuerpo de la Cámara de Reacción	43
Tabla 23. Costo del Mecanismo del Porta Electrodo.....	43
Tabla 24. Costo del Sistema Eléctrico del Horno	44
Tabla 25. Costo del Sistema de Basculación.....	45
Tabla 26. Costo del Instrumento para el Control de la Temperatura	46
Tabla 27. Costo total para el diseño y construcción del horno	46
Tabla 28. Descripción y Costo de un Horno de Arco Eléctrico Similar	47

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1. Diseño general del horno de arco eléctrico	89
PLANO 2. Cuerpo del horno	90
PLANO 3. Sistema Mecánico de porta electrodo	91
PLANO 4. Sistema de basculación eje primario.....	92
PLANO 5. Sistema de basculación eje secundario	94
PLANO 6. Sistema de movimiento de tapa.....	95
PLANO 7. Bancada	98

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

El área de Materiales y Procesos de Transformación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL, tiene como proyecto experimentar un método de producción de silicio metalúrgico utilizando la sílice contenida en las cenizas de la cascarilla de arroz, arena silíceo proveniente de roca de cuarzo y arena de playa. El silicio grado metalúrgico se obtiene mediante un proceso carbotérmico con un alto consumo de energía a temperaturas que se encuentran alrededor de los 2000°C, condiciones que se pueden alcanzar mediante un horno de arco eléctrico, sin embargo la mayoría de estos hornos son fabricados para la industria metalúrgica y por ende de gran tamaño y solo se fabrican a escala de laboratorio bajo pedido en el exterior a un costo muy elevado.

Por este motivo, el presente proyecto plantea el diseño de un horno de arco eléctrico para su uso a escala de laboratorio con capacidad para procesar 5 kg de cenizas de la cascarilla de arroz, esperando obtener silicio metalúrgico en un tiempo de dos horas utilizando dos máquinas soldadoras disponibles en el laboratorio que tienen una potencia individual de 25 KVA.

1.2 Objetivos

1.2.1 **Objetivo General**

- Diseñar un horno de arco eléctrico a escala de laboratorio que sea capaz de producir silicio metalúrgico utilizando la ceniza de cascarilla de arroz.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

- Diseñar y seleccionar los materiales de las partes que constituyen el horno de arco eléctrico
- Determinar las pérdidas de calor a través de las superficies exteriores del horno y comparar los resultados simulados en ANSYS
- Determinar la energía necesaria requerida para obtener silicio grado metalúrgico.
- Seleccionar los equipos eléctricos y electrodos adecuados que permitan alcanzar temperaturas cercanas a los 2000 °C para realizar el proceso de reducción del silicio.
- Diseñar un mecanismo de basculación de fácil operación para el vaciado de la carga.
- Diseñar el mecanismo para el desplazamiento vertical del electrodo.
- Diseñar y simular en ANSYS el mecanismo que facilite el movimiento de la tapa del horno.
- Diseñar y simular en ANSYS la bancada o estructura que soporta el cuerpo del horno.
- Seleccionar un instrumento de medición de temperatura para el monitoreo continuo en el interior de la cámara de reacción.
- Estimar el costo de fabricación del diseño y construcción del horno de arco eléctrico.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Hornos de arco eléctrico

En estos tipos de hornos, el calentamiento del material se da por medio de un arco eléctrico, en los tipos industriales pueden alcanzar temperaturas internas muy altas de hasta 3800°C y pueden controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión ^[2].

Los hornos de arco eléctrico generalmente están compuestos por un crisol de un material conductor (grafito) y de materiales aislantes como ladrillos refractarios que rodean al horno para generar la mayor cantidad de concentración del calor y evitar pérdidas. El calor es añadido a la carga a través de la energía eléctrica suministrada por electrodos de sección redonda generalmente de grafito, formándose el arco eléctrico que funde la carga.

1.3.2 Tipos de hornos de arco eléctrico

- Horno de arco eléctrico indirecto.
- Horno de arco eléctrico directo.

Horno de arco eléctrico indirecto

En esta clase de hornos el calentamiento es producido por la radiación del arco eléctrico generado por dos electrodos de grafito que ingresan en forma horizontal al crisol a través de orificios ubicados en la parte superior en donde se localiza el material a fundir, de esta manera el calentamiento se produce sin tener contacto con la carga ^[3].

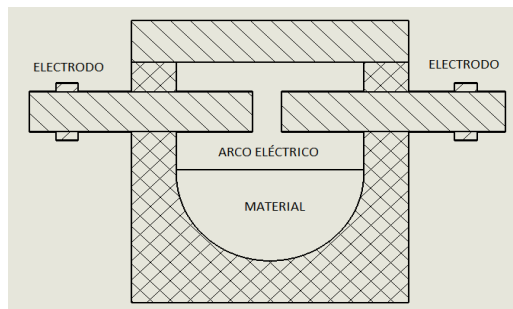


Figura 1-1. Horno de Arco Eléctrico Indirecto

Horno de arco eléctrico directo

Los hornos de arco eléctrico directo son los más usados en la industria, existen de tipo trifásico (3 electrodos) y monofásico (2 electrodos). En el caso monofásico para mejorar la distribución del calor por toda la carga se usa un crisol hecho de un material conductor de energía eléctrica (grafito) el cual hace la función de uno de los electrodos (Ver figura 1-2). El arco eléctrico se forma por la intensidad de corriente elevada que se transporta del electrodo al crisol de grafito que está conectado a tierra. El electrodo que actúa como cátodo es calentado por el paso de corriente emitiendo electrones que se dirigen a la superficie inferior del crisol que se comporta como ánodo produciéndose el aumento de la temperatura debido al choque entre los electrones y los iones liberados por las reacciones químicas producidas en el material que está fundiendo.

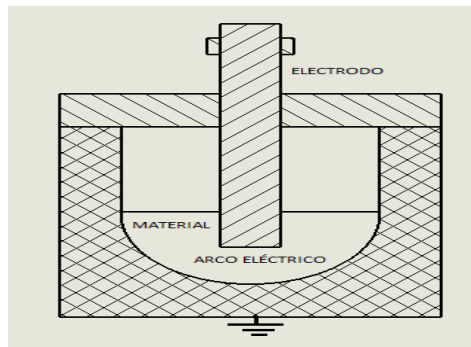


Figura 1-2. Horno de Arco Eléctrico Directo

1.3.3 Partes de un horno de arco eléctrico ^[4]

- **Cuba.-** Esta hecha generalmente de grafito, es la parte que contiene la colada y la puerta de carga.
- **Bóveda.-** Es la tapa del horno, está revestido de material refractario y en algunos casos contiene anillos metálicos refrigerados. Contiene agujeros para los electrodos.
- **Paredes del horno.-** Esta parte está en contacto con la masa líquida, está formado por ladrillos refractarios. Son de diferente material según la masa fundida que este en contacto, para formar las paredes se usan ladrillos refractarios de alúmina, magnesita, cromo-sita o de sílice, etc.
- **Solera.-** Es la parte inferior de la cámara de reacción, tiene forma cóncava y esta revestida con ladrillos refractarios de magnesita o dolomita que contiene al metal fundido.
- **Mecanismo de basculación.-** Este mecanismo sirve para vaciar el material fundido a la cuchara o a los moldes, puede ser mediante un sistema hidráulico o un sistema mecánico con engranes de volteo.
- **Electrodos.-** Son de grafito, en algunos casos están enriquecidos con potasio para mejorar su conductividad, entre ellos se produce el arco eléctrico con la ayuda de un transformador que generan la potencia necesaria para fundir la carga. Los electrodos se sujetan a las barras longitudinales con mordazas de cobre refrigeradas por agua.
- **Transformador.-** Es el elemento principal del equipo eléctrico, genera la potencia que alimenta al horno y reduce la tensión de entrada a la requerida en el horno, tiene un circuito secundario enfriado por agua y un sistema de aceite y agua forzada para mantener su temperatura dentro de los límites seguros de operación.

Otras partes:

- Plataforma.
- Brazos porta electrodos y columnas.
- Mecanismo de accionamiento de electrodos.
- Puerta de carga.
- Conexión de cable flexible
- Interruptor general.
- Sistema de refrigeración.
- Circuito hidráulico.

1.4 Silicio y sus aplicaciones ^[5]

Su símbolo químico es Si, su número atómico es 14, pertenece al grupo 14 de la tabla periódica de los elementos y se presenta en forma amorfa y cristalizada. Es el segundo elemento más abundante y constituye un 28 % de la corteza terrestre. Se obtiene en un horno eléctrico calentando sílice, o dióxido de silicio (SiO₂), utilizando carbono o magnesio como agentes reductores.

Tiene múltiples aplicaciones, es utilizado en la industria electrónica y microelectrónica debido a que es un material semiconductor, también está presente en la industria cementera en la forma de SiO₂ en el hormigón y ladrillos y además se usa en cerámicas, vidriados y esmaltados. En la figura 1-3 se muestra las principales aplicaciones del silicio elemental.

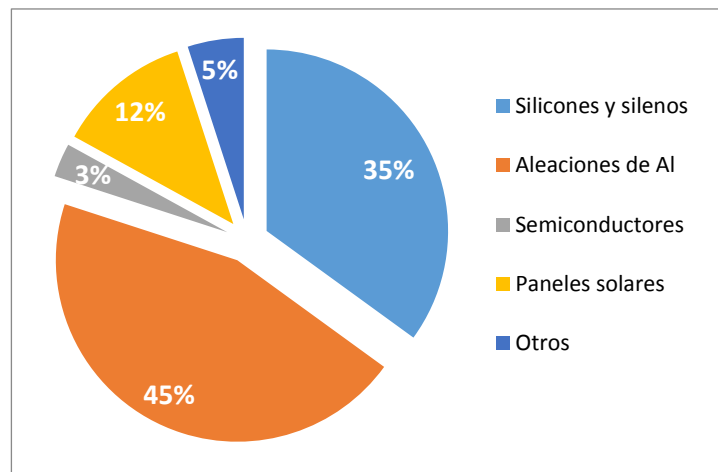


Figura 1-3. Consumo Global de Silicio Elemental Según sus Aplicaciones ^[5]

1.5 Producción y requerimientos para el proceso de obtención de silicio en los hornos de arco eléctrico

La obtención de silicio se puede llevar a cabo por varios procesos que con llevan a la reducción del óxido de silicio, comúnmente en la forma de sílice (SiO₂), para obtener silicio grado metalúrgico (Si-MG), cuya pureza oscila entre 98-99%. Los elementos C, Mg, Ca, Al y Ti son posibles agentes reductores del dióxido de silicio. La reacción entre SiO₂ y C (carbono) es altamente endotérmica ^[6], sin embargo este proceso de reducción es posible a temperaturas elevadas, en exceso de los 1800°C ^[7], en virtud del creciente aumento de entropía de la reacción. Esta temperatura se alcanza en hornos de arco eléctrico en la presencia de exceso de sílice para evitar la acumulación de carburos de silicio (SiC). Cercanos a los 2000°C, el SiO₂ se descompone para formar Si (l), mediante la reacción total representada por la ecuación (Ec. 1.1).



Por consideraciones económicas, el proceso carbotérmico es el empleado a escala industrial para producir silicio grado metalúrgico. El esquema de producción en plantas modernas se ilustra en la Figura 1-4 ^[4,5]. En la operación industrial, la materia prima constituida por sílice y carbono se mezclan a la salida de los silos de almacenamiento y es transportada mediante tuberías al horno de arco eléctrico sumergido, calentándola a temperaturas cercanas a los 2000°C. Las operaciones con arco sumergido minimizan las pérdidas de calor y las pérdidas de silicio contenido en los gases producidos en el sistema ^[6]. La sílice utilizada proviene comúnmente de rocas de cuarcita, y la fuente de carbono se encuentra típicamente en la forma de coque o carbón vegetal y virutas de madera. El coque o carbón vegetal actúan como agentes reductores y las virutas de madera se adicionan para mejorar la porosidad de la carga y acelerar las reacciones de reducción ^[9]. El silicio líquido obtenido es extraído por la zona inferior del horno, refinado y posteriormente solidificado.

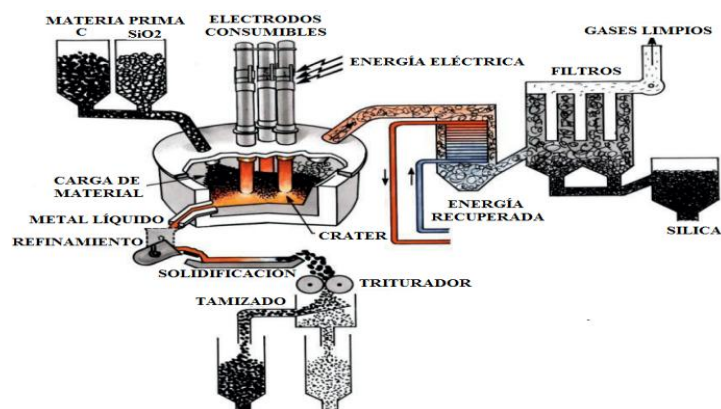


Figura 1-4. Proceso de Obtención de Silicio en Plantas Industriales ^[7]

1.6 Normas

- **ISO 5019-4-1988** Esta norma indica las dimensiones de los ladrillos refractarios. Además indica los tipos de ladrillos que se deben utilizar para diferentes temperaturas de operación en el diseño de hornos de fundición.
- **UNE 61042 – DIN 993-12** Expresa la temperatura mínima que resisten los diferentes tipos de ladrillos refractarios
- **ASTM A 510 - DIN 1013:** Esta norma indica las tolerancias permisibles en el cortado y rolado de planchas de acero.
- **ANSI/ASME B106. 1M – 1985:** Esta norma indica las recomendaciones y procedimientos que se deben tener al diseñar ejes de transmisión.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

En esta sección se explica la metodología para obtener silicio metalúrgico a partir de la cascarilla de arroz y la metodología del equipo primordial para llevar a cabo este experimento que es el diseño del horno de arco eléctrico. Además se describe el diseño detallado de cada uno de los componentes que conforman el horno de arco eléctrico, como es la selección de los materiales, dimensionamiento y procesos de fabricación.

2.1 Metodología del procedimiento experimental para la obtener de silicio metalúrgico

La cascarilla de arroz es sometida a un proceso de secado o deshidratación a temperaturas inferiores a 150 °C, pre-tratadas químicamente para reducir los componentes contaminantes para luego ser sometida a un proceso de calcinación en un intervalo entre 500 y 700 ° C, donde se queman los componentes orgánicos contenidos en la cascarilla. De la cantidad de materia prima que ha pasado por los 2 procesos anteriores se obtiene entre 18 a 20% de cenizas ^[10], es decir que se necesita aproximadamente 25 kg de cascarilla de arroz para obtener los 5 kg de ceniza que se introducirá en el horno de arco eléctrico.

Se realiza un análisis químico a la ceniza obtenida para conocer la cantidad de dióxido de silicio que contiene. Se mezclan las cenizas de la cascarilla de arroz y el agente reductor a diferentes proporciones (72 % y 28% respectivamente) ^[8], son introducidas al horno de arco eléctrico donde se producen diferentes reacciones químicas a temperaturas cercanas a 2000 °C formándose silicio líquido en el fondo del horno en un tiempo aproximado de 2 horas, para luego ser enfriado y obtener silicio metalúrgico con 98.99% de pureza.

2.2 Metodología del diseño del horno de arco eléctrico

La metodología para el diseño del horno de arco eléctrico es la siguiente:

1. Identificar los parámetros de diseño como: temperatura de proceso (2000°C) material a fundir (cenizas de cascarilla de arroz) con sus respectivas propiedades, forma y tamaño requerido del horno, etc.
2. Calculo del peso y volumen del material a fundir.
3. Dimensionamiento y forma de la estructura: cálculo del diámetro interior del horno, altura de la cámara de reacción, altura del baño, altura del techo o tapa.
4. Selección de los materiales aislantes de las paredes, tapa y base del horno.
5. Determinación de las pérdidas de calor por las paredes, base y tapa del horno.
6. Determinación de energía necesaria para producir silicio metalúrgico.
7. Selección del equipo eléctrico (transformador, soldadoras), para generar la energía eléctrica requerida por el horno.
8. Determinación de la intensidad de corriente y diámetro de electrodo.
9. Diseño el sistema de basculación del horno para descarga del material.
10. Diseño del porta electrodo y mecanismo para el movimiento vertical del electrodo.
11. Selección del instrumento para monitorear la temperatura en el interior de la cámara de reacción.

2.3 Alternativas para el diseño del horno de arco eléctrico

Como se mencionó en el capítulo 1, existen 2 tipos de hornos de arco eléctrico que son:

- Hornos de arco eléctrico indirecto.
- Hornos de arco eléctrico directo.

Para la selección de la mejor alternativa, se analiza mediante una matriz de decisión tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- **Potencia requerida:** Se pondera dependiendo de la energía que se requiere en cada uno de los casos para transmitir el calor al material a fundir, es decir cuál de los 2 tipos de horno requiere de mayor potencia para que se forme el arco eléctrico necesario que pueda distribuir la corriente por toda la carga y eleve la temperatura (2000°C) en la cámara de reacción.
- **Costo de construcción:** Se analiza de acuerdo a la cantidad del costo de equipos y materiales necesarios para la fabricación de cada tipo de horno.
- **Costo de operación:** Se califica en base a cuál de las 2 opciones requiere de menor consumo de energía y menor personal de operación.
- **Tamaño:** Esta categoría se basa en el espacio físico que ocupa cada tipo de horno.
- **Facilidad de uso:** En esta parte se analiza la facilidad que el usuario tenga para poder controlar el voltaje, corriente y movimiento de los electrodos para la formación del arco eléctrico.
- **Mantenimiento.-** Se califica la facilidad y costo para ejecutar el mantenimiento para cada tipo de horno.

2.3.1 Matriz de decisión

Se calificó cada uno de los parámetros de la siguiente manera:

- Mejor alternativa: 3
- Alternativa regular: 2
- Peor alternativa: 1

Tabla 1. Matriz de Decisión de Tipos de Hornos de Arco Eléctrico

PARAMETROS DE SELECCIÓN	TIPOS DE HORNO ELECTRICO	
	ARCO DIRECTO	ARCO INDIRECTO
Potencia Requerida	3	1
Costo de Construcción	3	2
Costo de Operación	3	1
Tamaño	3	1
Facilidad de uso	2	1
Mantenimiento	2	1
TOTAL	16	7

En la Tabla 1, se observa que la mejor alternativa es el horno de arco eléctrico directo. De tal manera en este proyecto se analizará este diseño por permitir la mejor transmisión de calor a la carga, menor costo de operación y requiere de menor cantidad de equipos para su funcionamiento.

2.4 Diseño de la estructura de la cámara de reacción del horno

2.4.1 Forma y dimensiones del crisol

El crisol es una de la parte más importante del horno, debido a que en este lugar se funde el material; está hecho de grafito que es un material conductor de energía eléctrica que actúa como ánodo cerrando el circuito para el paso de la corriente.

El crisol tiene la forma de un cilindro recto junto a un casquete esférico en la parte inferior (ver Figura 2-1).

Volumen del baño

El baño es el material a fundir, en este caso es la ceniza de la cascarilla de arroz que se localiza en el sector esférico, de esta manera se tiene una mejor distribución uniforme del calor por toda la carga y se evitan las concentraciones de esfuerzos en las esquinas que causan el daño prematuro del crisol.

Entonces el volumen del baño es determinado con la masa (5 kg) y la densidad ($1900 \frac{Kg}{m^3}$) de la ceniza de la cascarilla de arroz a fundir:

$$Volumen = \frac{masa}{densidad} \quad (Ec. 2.1)$$

Diámetro y altura del baño

La determinación del diámetro (D_{SE}) y altura del baño (h) se da mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{Baño} = V_{casquete\ esférico}$$

$$V_{Baño} = \frac{\pi h^2}{3} (3r - h) \quad (Ec. 2.2)$$

$$D_{SE} = 2 \times \sqrt{h \times (2r - h)} \quad (Ec. 2.3)$$

$$D_{SE} = D_{BAÑO}$$

Altura de la cámara de reacción

La altura de la cámara de reacción, es el espacio que debe de existir entre la superficie del baño hasta la tapa del horno, esta distancia debe ser de 0.4 a 0.6 el diámetro del baño ^[11].

$$H_1 = (0.4 \text{ a } 0.6) D_{BAÑO} \quad (Ec. 2.4)$$

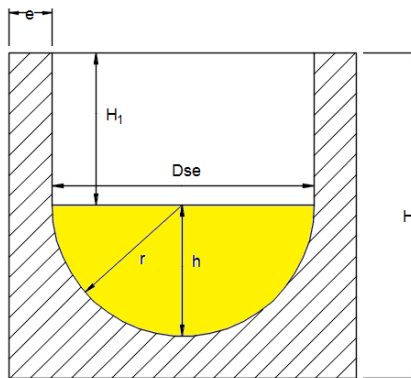


Figura 2-1 Forma y dimensiones del Crisol de Grafito

2.4.2 Materiales que conforman el cuerpo del horno

El cuerpo del horno está formado por materiales aislantes térmicos que recubren el crisol de grafito permitiendo baja tasa de pérdidas de calor (ver Figura 2-2). Estos materiales aislantes son:

- **Ladrillos refractarios de magnesita:** Pueden soportar la temperatura de diseño de (2000°C) del horno de arco eléctrico, debido a que el punto de fusión de estos ladrillos es de 2800°C. Además los ladrillos refractarios de magnesita presentan propiedades como: alta refractariedad, baja porosidad (25%) y buena resistencia a la escoria ^[12]. Tienen una densidad de $2000 \frac{Kg}{m^3}$ y la conductividad térmica es de $K_{2273 K} = 1.4 \frac{W}{mk}$. Las dimensiones normalizadas de los ladrillos refractarios son de $9 \frac{1}{2} \times 4 \frac{1}{2} \times 2 \frac{1}{2}$ pulgadas.
- **Fibra de vidrio:** Son buenos aislantes térmicos, están compuestas por filamentos finos de vidrio. La fibra de vidrio tiene una densidad de $40 \frac{Kg}{m^3}$ y una conductividad térmica $K_{750 K} = 0.125 \frac{W}{mk}$

Toda la superficie del cuerpo del horno está recubierto por planchas de acero AISI 1020 con un espesor adecuado para permitir el rolado de 1/4 de pulgadas. El acero AISI 1020 tienen una densidad de $7978 \frac{Kg}{m^3}$ y una conductividad térmica $K_{450 K} = 58 \frac{W}{mk}$

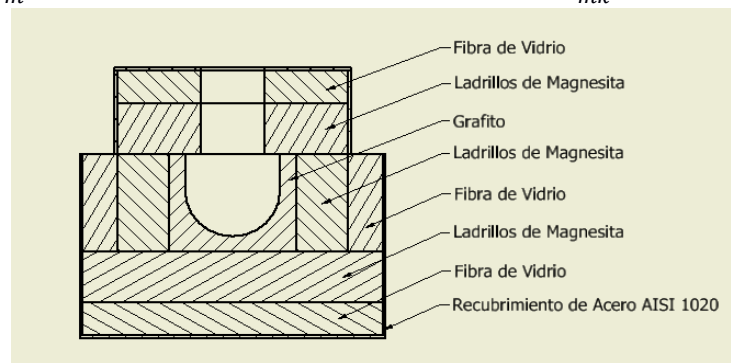


Figura 2-2. Materiales que Conforman el Cuerpo del Horno

2.5 Estudio térmico del horno

Bajo condiciones de estado estable, con una temperatura interna de 2000°C, se determina las pérdidas de calor a través de las superficies del horno:

- Por conducción, a través de los materiales que conforman el horno.
- Por convección, entre la superficie y el aire que rodea el cilindro.
- Por radiación debido a las ondas electromagnéticas transferida entre las superficies del horno y el medio ambiente.

2.5.1 Pérdidas de calor por las paredes

Para la determinar las pérdidas de calor por las paredes, se realiza el balance de energía en las superficies del horno (ver Figura 2-3).

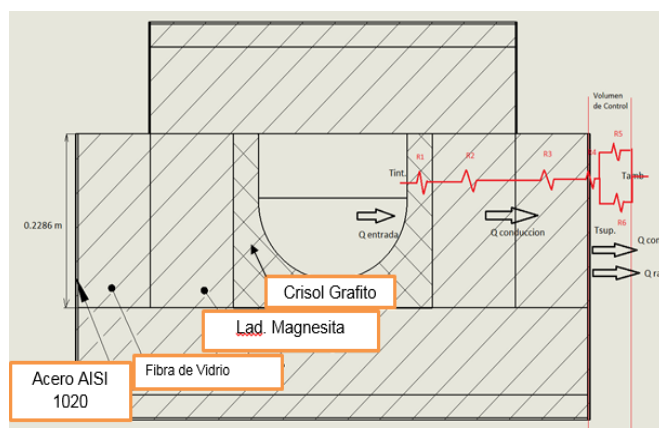


Figura 2-3. Balance de Energía en las Paredes del Horno

Para dicho balance de energía y determinar las pérdidas de calor se utilizan las siguientes ecuaciones ^[13]:

$$E_{entra} = E_{sale} \quad (Ec. 2.5)$$

$$Q_{conduccion} = Q_{conveccion} + Q_{radiacion} \quad (Ec. 2.6)$$

Donde las pérdidas por conducción, convección y radiación están dadas por las ecuaciones (Ec. 2.7), (Ec. 2.8) y (Ec. 2.9) respectivamente

$$Q_{cond} = \frac{T_{int} - T_{sup}}{\Sigma \left(\frac{\ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)}{2\pi kL} \right)} \quad (Ec. 2.7)$$

$$Q_{conv} = \frac{(T_{sup.} - T_{\infty})}{2h_{conv}kL} \quad (Ec. 2.8)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \times A_s \times \sigma (T_{sup}^4 - T_{alr}^4) \quad (Ec. 2.9)$$

Al reemplazar las ecuaciones (Ec. 2.7), (Ec. 2.8) y (Ec. 2.9) en la ecuación (Ec. 2.6), se tiene una ecuación con dos incógnitas (Ec. 2.10), debido a que el coeficiente de convección (h_{conv}) depende de la temperatura de superficie ($T_{sup.}$), se realiza un proceso iterativo asumiendo un valor inicial de $T_{sup.}$.

$$\frac{T_{int} - T_{sup}}{\Sigma \left(\frac{\ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)}{2\pi kL} \right)} = \frac{(T_{sup.} - T_{\infty})}{\frac{1}{h_{conv.} \times 2\pi rL}} + [\varepsilon \times A_s \times \sigma (T_{sup}^4 - T_{\infty}^4)] \quad (Ec. 2.10)$$

Dónde:

- Temperatura interna del crisol ($T_{int} = 2000^{\circ}\text{C}$)
- Temperatura de superficie ($T_{sup.}$).
- Temperatura ambiente ($T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$).
- Conductividad térmica (k).
- Emisividad (ε).
- Constante de Stefan Boltzmann (σ).
- Los radios externos (r_{ext}) e internos (r_{int}) de cada material que conforman las paredes del horno se muestran en la Figura 2-4

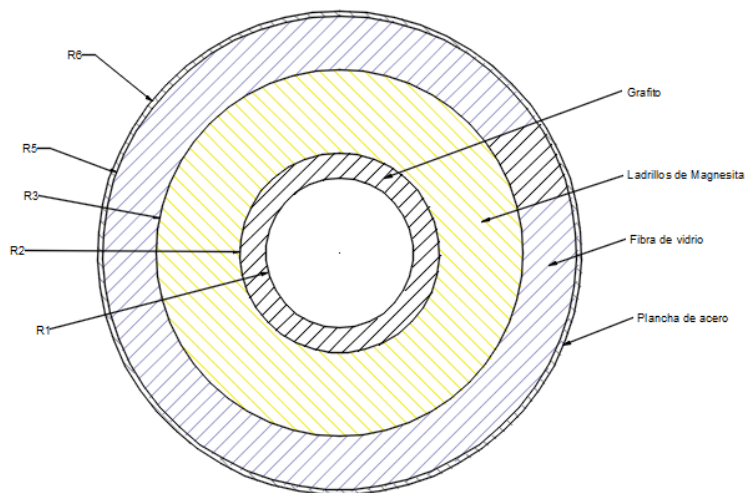


Figura 2-4. Pared Compuesta del Horno

- El coeficiente convectivo ($h_{conv.}$) se lo determina mediante las ecuaciones que se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Ecuaciones para Determinar el Coeficiente Convectivo

$T_{sup.}$	Iteraciones
T_{∞}	298 K
T_p	$T_p = \frac{T_{sup.} + T_{\infty}}{2}$ (Ec. 2.11)
Se analiza el cilindro como una placa plana si se cumple la (Ec. 2.12)	$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$ (Ec. 2.12)
Determinación del Número de Grashof, Rayleigh y Nusselt	$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L^3}{g^2}$ (Ec. 2.13)
	$Ra_L = Gr_L \times Pr$ (Ec. 2.14)
	$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2$ (Ec. 2.15)
Determinación $h_{conveccion}$	$\frac{Nu \times k}{L}$ (Ec. 2.16)

2.5.2 Pérdidas de calor por la base y tapa

Para determinar las pérdidas de calor, se analiza el área en contacto con los gases tanto en la base como en la tapa, despreciando las perdidas menores de calor que se producen en el resto de las áreas. Se realiza un balance de energía en la tapa (ver Figura 2-5) y en la base (ver Figura 2-6) del horno y se realiza un procedimiento similar al de las pérdidas de calor por las paredes, con la diferencia de que varían las ecuaciones para hallar los valores del número de Nusselt:

- Número de Nusselt: Para superficie superior caliente horizontal:

$$Nu = 0.54 \times Ra_L^{1/4} \quad (Ec. 2.17)$$

- Número de Nusselt: Para superficie inferior caliente horizontal

$$Nu = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (Ec. 2.18)$$

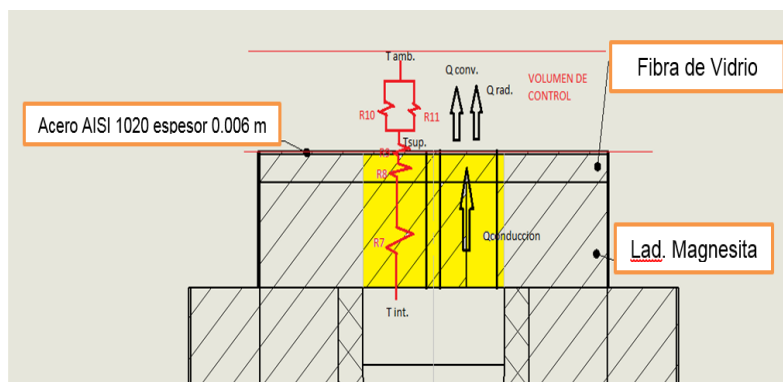


Figura 2-5. Balance de Energía en la Tapa del Horno

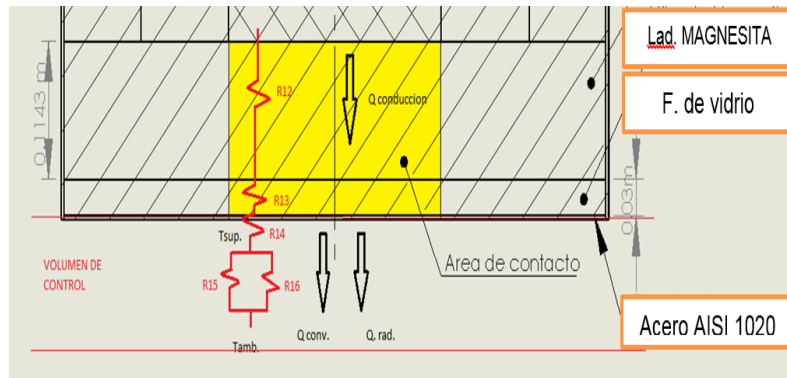


Figura 2-6. Balance de Energía en la Base del Horno

2.5.3 Energía que se requiere para la reducción del silicio grado metalúrgico

La energía que se requiere para realizar el proceso de obtención de silicio grado metalúrgico es de $(12.5 \text{ KWh}/\text{Kg})$ ^[14] por lo tanto para la carga de material de diseño del horno (5 Kg) se tiene:

$$E_{carga} = \frac{12.5 \text{ KWh}}{\text{Kg}} \times (\text{ceniza de cascarilla de arroz}) \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Por lo tanto el calor que se requiere para reducir el silicio en la cámara de reacción en el tiempo esperado (2 horas), es de:

$$Q_{carga} = \frac{E_{carga}(\text{KWh})}{\text{tiempo reducción del silicio (h)}} = \text{KW} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

2.5.4 Calor total que se suministra al horno

El calor total que se suministra al horno, es la suma entre el calor que se requiere para la reducción del silicio grado metalúrgico en el tiempo esperado y el calor total perdido por las superficies del horno.

$$Q_T = Q_{carga} + Q_{total \text{ perd.}} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

2.5.5 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica está dada por la razón entre el calor que se requiere para realizar el proceso de obtención de silicio metalúrgico y el calor total que se suministra al horno:

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{carga}}{Q_T} \times 100 \% \quad (\text{Ec. 2.22})$$

2.6 Selección de equipos eléctricos que se requiere para el funcionamiento del horno

Como se mencionó en el capítulo 1, se disponen de dos máquinas soldadoras con una potencia individual de 25 KVA. Se seleccionan los equipos eléctricos necesarios para que trabajen dichas máquinas y se produzca alta intensidad de corriente a baja tensión que eleve la temperatura hasta 2000 °C en la cámara de reacción del horno.

Para alimentar la potencia de 50 KVA que requieren las maquinas soldadoras, se selecciona un transformador monofásico de alta tensión de 75 KVA, cuya relación de transformación es de 7620 V a 120-240 V.

En la Figura 2-7 se muestra la secuencia de instalación de los equipos eléctricos, desde el voltaje de alta tensión que ingresa al transformador monofásico hasta la corriente a baja tensión que pasa por el electrodo hacia la cuba, aumentando la energía térmica debido al choque entre los electrones e iones producidos por las reacciones químicas que se generan en el material que está fundiendo.

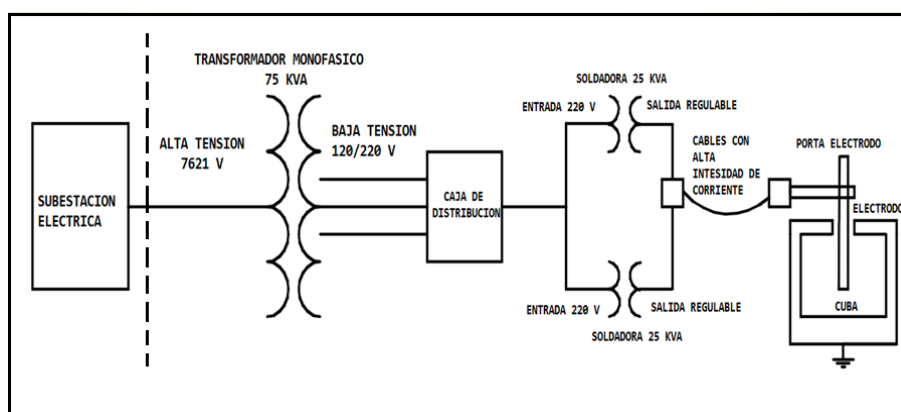


Figura 2-7. Sistema Eléctrico del Horno

Debido a que el transformador monofásico se encuentra instalado en la parte externa del laboratorio a la intemperie, se requiere de equipos de protección como:

- **Cajas porta fusibles y tira fusibles:** Protegen al transformador al aumentar la corriente por causa de un cortocircuito, siendo la primera parte en fundirse interrumpiendo la corriente para evitar el daño en el resto del equipo eléctrico.
- **Pararrayos:** Protege al transformador, atrayendo la energía del rayo y la dirige puesta a tierra.
- **Caja de distribución:** Su función es distribuir y controlar la energía a los diferentes circuitos o tomacorrientes donde se conectan las máquinas soldadoras. Además cuentan con breakers o protecciones para interrumpir automáticamente el paso de la corriente cuando existe un cortocircuito.

2.6.1 Determinación del diámetro del electrodo

Como se explicó anteriormente se debe tener dos electrodos para que se conforme el circuito y fluya la corriente de cátodo (-) a ánodo (+). El crisol donde se encuentra el material hace la función de uno de los electrodos actuando como ánodo, entonces se determina el diámetro del electrodo (cátodo) que recibe el flujo de corriente proporcionado por las máquinas soldadoras.

La determinación del diámetro del electrodo se da mediante la ecuación (Ec.2.23) ^[4], en donde influye la corriente máxima ($I = 800 A$) y la densidad de corriente que pasa por el área del electrodo:

$$D_{electrodo} = \sqrt{\frac{4 \times I}{\pi \times d_c}} \quad (Ec. 2.23)$$

La densidad de la corriente se la obtiene con la cantidad máxima de corriente transportada y el diámetro del electrodo, como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Densidad de Corriente de Electrodos de Grafito ^[15]

Diámetro nominal del electrodo (mm)	Carga de corriente transportada (Amperios)	Densidad de corriente A/cm^2
75	750 – 1400	20 – 31
100	1400 – 2400	19 – 30
130	2200 – 3400	17 – 26
150	3000 – 4500	16 – 25
200	5000 – 6900	15 – 21

2.6.2 Consumo específico del electrodo

Los factores que afectan al consumo específico de los electrodos son:

- Calidad de los electrodos.
- Parámetros eléctricos de operación.
- Resistencia del electrodo a la oxidación.
- Altura del Horno.
- Consumo específico de energía eléctrica.

Mediante la ecuación (Ec. 2.24), se determina el consumo específico del electrodo por cantidad de material fundido:

$$Q_s = k \times \left(\frac{\tan\phi}{X}\right) \times \left(\frac{D^2}{d^2}\right) \times q_{ee} \left[\frac{Kg \text{ electrodo}}{kg \text{ material fundido}} \right] \quad (Ec. 2.24)$$

En dónde:

k = Es el valor promedio que corresponde a electrodos de calidad regular ^[16]

$$k = 0.0233 \left(\frac{kg}{kA^2 \times Hrs} \right)$$

$\tan \phi$ = Factor de potencia de las maquinas soldadoras (*datasheet*)

$$FP = \cos \phi = 0.85$$

$$\tan \phi = 0.62$$

(Ec. 2.25)

$\frac{D^2}{d^2}$ = Relación del diámetro del cuerpo del electrodo y la punta (ver Figura 2-8)

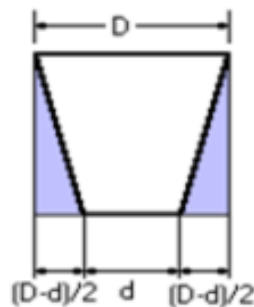


Figura 2-8. Relación de diámetros del electrodo ^[16]

X = Reactancia del electrodo seleccionado (ver Tabla 12)

q_{ee} = Consumo de energía eléctrica para obtener silicio metalúrgico:

$$q_{ee} = 12.5 \frac{KWh}{kg}$$

Considerando pérdidas eléctricas se toma un consumo de energía de:

$$q_{ee} = 15 \frac{KWh}{kg}$$

2.6.3 Relación consumo del electrodo / consumo de energía eléctrica

Mediante la ecuación (Ec. 2.26), se determina la energía eléctrica en KWh que se consume por cada kilogramo de electrodo.

$$\frac{Q_s}{q_{ee}} \left[\frac{Kg \text{ electrodo}}{kg \text{ material fundido}} \right] = \left[\frac{Kg \text{ electrodo}}{kg \text{ material fundido}} \right] \quad (Ec. 2.26)$$

2.7 Diseño del porta electrodo

El material del porta electrodo es de cobre; este es el elemento que conduce la energía eléctrica al electrodo, en su parte posterior se conectan con los cables de cobre que conducen la alta intensidad de corriente (800 Amperios) a baja tensión (40V.) que proporcionan las maquinas soldadoras. Además contiene mordazas de apriete para sostener el electrodo, en la Figura 2-8 se muestra la forma del porta electrodo.

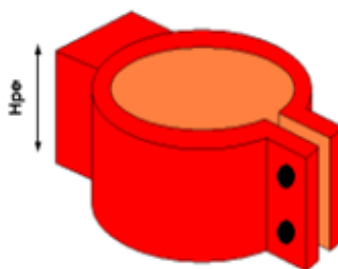


Figura 2-9. Diseño de Forma del Porta Electrodo

2.7.1 Altura del porta electrodo

Con la ecuación (Ec. 2.24), se determina la altura del porta electrodo:

$$H_{pe} = \frac{A_{interior}}{P_{electrodo}} \quad (Ec. 2.24)$$

El área interior del porta electrodo está dado por la ecuación (Ec. 2.25)

$$A_{interior} = \frac{I}{\rho_{corr.cobre}} \quad (Ec. 2.25)$$

Dónde:

I = corriente maxima de alimentacion al electrodo

La densidad de las juntas de cobre es de $\rho_{corr.cobre} = 4 a 6 \frac{A}{cm^2}$ [11]

2.7.2 Espesor del porta electrodo

Mediante la Tabla 4 de los conductores de cobre según la norma AWG (*American Wire Gauge*), se determina el número de alambres conductores que van a llevar la corriente desde las maquinas soldadoras hasta el porta electrodo.

Tabla 4. Conductores de Cobre Según la Norma AWG ^[17]

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Capacidad (A)
4/0	11.86	107.2	319
3/0	10.40	85.30	240
2/0	9.22	67.43	190
0	8.22	53.48	150
1	7.34	42.41	120
2	6.54	33.63	96
3	5.82	26.67	78
4	5.18	21.15	60
5	4.62	16.77	48
6	4.11	13.30	38
7	3.66	10.55	30

Se escoge el número de alambre conductor que pueda transportar la corriente máxima (800 A), se observa en la Tabla 4 que la capacidad máxima de corriente que soportan los conductores es de 319 A, entonces se necesitan 3 conductores de este tipo para transportar la corriente máxima que se mencionó.

Mediante la ecuación (Ec. 2.26), se determina la densidad de corriente en los conductores de cobre

$$\rho_{elec.en\ los\ conductores} = \frac{I_{TOTAL}}{Seccion\ del\ conductor(mm^2) \times \# conductores} \quad (Ec. 2.26)$$

Se determina el área del porta electrodo con el diámetro exterior e interior

$$A_{cond} = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - d_{int}^2) \quad (Ec. 2.27)$$

$$d_{int} = D_{electrodo}$$

$$D_{ext} = D_{electrodo} + espesor$$

Se reemplaza la (Ec. 2.27) en la (Ec. 2.25), y se obtiene la ecuación (Ec. 2.28):

$$\frac{\pi}{4} ((D_{electrodo} + 2e)^2 - D_{electrodo}^2) = \frac{I}{\rho_{electrica}} \quad (Ec. 2.28)$$

Se despeja "e", y se obtiene el espesor del porta electrodo

2.7.3 Sistema de refrigeración del porta electrodo

Debido a las altas temperaturas que se generan por el calor transferido entre el electrodo y el porta electrodo, este requiere de enfriamiento para evitar deformaciones en el cobre. El porta electrodo contiene un ducto en forma de espiral por donde circula agua para enfriamiento. Se determina el caudal de agua que debe pasar por el ducto para mantener el porta electrodo a una temperatura de $T_{p.elect} = 50^{\circ}\text{C}$, entrando agua a $T_{ent\ agua} = 24^{\circ}\text{C}$ y saliendo a $T_{sal.agua} = 35^{\circ}\text{C}$, la temperatura ambiente es $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ (ver Figura 2-10)

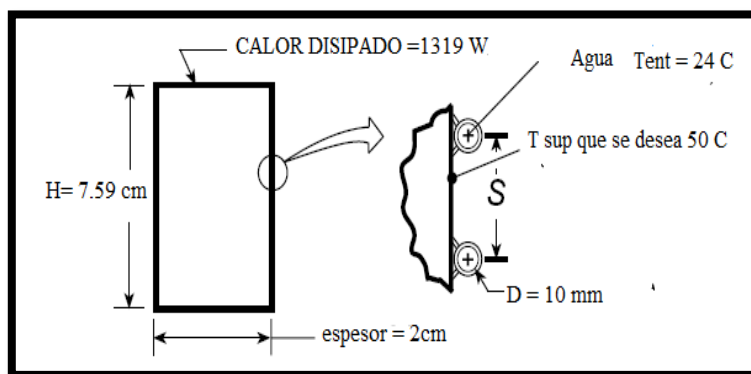


Figura 2-10. Sistema de Refrigeración del Porta Electrodo

El porta electrodo debe estar ubicado en el sector donde la temperatura del electrodo es cercana a $T_{cont.} = 500^{\circ}\text{C}$ [2].

Con los parámetros que se mencionó, se realizan los cálculos mediante la siguiente metodología:

- Se determina el calor disipado por el electrodo en el área en contacto con el porta electrodo, mediante la ecuación (Ec. 2.29):

$$Q_{disipado}(W) = \frac{(T_{cont.} - T_{amb})K}{\frac{1}{\left[h_{conv.} \left(\frac{W}{mK} \right) \right] \times Area_{cont.}}} \quad (Ec. 2.29)$$

Dónde:

El coeficiente convectivo ($h_{conv.}$) entre la superficie del electrodo y el aire que lo rodea, se lo determina con las ecuaciones (Ec. 2.11 a la Ec. 2.16) que se muestran en la Tabla 2.

- Se determinan las propiedades del agua a la temperatura media entre la temperatura de entrada y salida. Con la ecuación (Ec. 2.30), se calcula el flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{Q_{disipado}}{C_p(T_{sal\ agua} - T_{ent\ agua})} \quad (Ec. 2.30)$$

- Con la ecuación (Ec. 2.31), se determina el caudal del agua que debe pasar por el ducto en forma de espiral en el interior del porta electrodo y con la ecuación (Ec. 2.32) se determina la velocidad del agua.

$$Caudal_{agua} = \frac{\dot{m}}{\rho} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (Ec. 2.31)$$

$$V_{agua} = \frac{Caudal_{agua}}{A_{ductos}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (Ec. 2.32)$$

- La longitud de la espiral del ducto, se encuentra con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{T_s - T_{sal}}{T_s - T_{ent}} = \exp\left(-\frac{\pi\phi_{ducto}L \times h}{\dot{m} C_p}\right) \quad (Ec. 2.33)$$

- Se determina h_{conv} :

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} = \text{Se obtiene flujo laminar} \quad (Ec. 2.34)$$

$Nu = 3.66$ para flujo laminar, se encuentra h_{conv}

- Reemplazamos y despejamos L de la ecuación (Ec 2.33):
- Se determina el espaciado Lateral S (ver Figura 2-10) entre las vueltas:

$$N = \frac{L}{\pi} \quad (Ec. 2.35)$$

$$S = \frac{H}{N} \quad (Ec. 2.36)$$

2.8 Diseño del sistema de control para el desplazamiento vertical del electrodo

El electrodo se va consumiendo en el proceso de fundición, por esta razón se diseña un sistema o mecanismo que permita el desplazamiento vertical del electrodo. El sistema está conformado por un carro que se traslada por un tornillo de potencia, el movimiento del tornillo es generado por un motor paso a paso. El mecanismo está ubicado a un extremo del horno a la altura de la superficie de la tapa.

2.8.1 Diseño del tornillo de potencia

Se considera que el material empleado para el diseño del tornillo de potencia es acero AISI 1045. La fuerza total que soporta el tornillo de potencia es la suma del peso del electrodo, el peso del porta electrodo y el peso de la barra de acero (ver Figura 2-11), las cuales generan dos fuerzas (F1 y F2) sobre el tornillo.

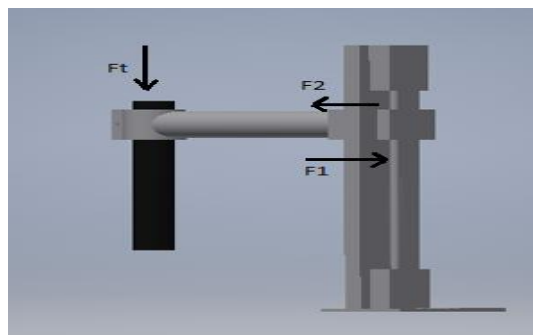


Figura 2-11. Fuerzas que Soporta el Tornillo de Potencia

Para el diagrama de cuerpo libre, se asume como una viga horizontal apoyada en sus extremos y se analiza en el punto más alto que llega el mecanismo.

Se realiza los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Mediante estas gráficas se escoge el momento máximo que soporta el tornillo.

Mediante la ecuación (Ec. 2.37), se determina el esfuerzo máximo del acero AISI 1045 (σ_{max}) con la resistencia a la fluencia del material (S_y) y el factor de seguridad para una viga horizontal apoyada en sus extremos (n)^[18],

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{n} \quad (Ec. 2.37)$$

Con la ecuación (Ec. 2.38), se calcula el módulo de resistencia del material

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}} \quad (Ec. 2.38)$$

Entonces, el diámetro del tornillo de potencia está dado por la ecuación (Ec. 2.39):

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \times S}{\pi}} \quad (Ec. 2.39)$$

2.8.2 Selección de Rodamientos

El elemento que va a utilizar rodamientos es el soporte del carro que se desliza en el tornillo de potencia, el cual permite el movimiento vertical del electrodo.

Los rodamientos se determinan con el diámetro del tornillo de potencia y la fuerza total que soportan que es el peso del electrodos, del porta electrodo y la barra de acero; la carga esta aplicada a los rodamientos en forma axial.

La capacidad de carga estática, se determina mediante la siguiente expresión:

$$S_o = \frac{C_{or}}{P_o} \quad (Ec. 2.40)$$

Dónde:

P_o = Es la carga máxima aplicada

S_o = Factor de seguridad para rodamientos de bolas con carga estática sometidos a cargas de choque ligero ^[18].

La capacidad de carga dinámica, se determina mediante la siguiente expresión:

$$C = P \left(\frac{60 \times n \times L_h}{10^6} \right)^{1/p} \quad (Ec. 2.41)$$

Dónde:

P = Es la carga máxima aplicada

n = RPM del tornillo de potencia

L_h = Vida nominal para máquinas de servicio de 8 horas, que no siempre se usan completamente, este valor es obtenido mediante tablas ^[18].

$p = 3$ Exponente de ecuación de vida para rodamientos de bolas ^[18].

Con la determinación de los valores de capacidad de carga estática y dinámica y con el diámetro del tornillo, se selecciona los rodamientos con los catálogos NTN

2.8.3 Selección del Motor paso a paso

El motor paso a paso transmite movimientos precisos al tornillo de potencia mediante impulsos de corriente recibidos, se hace girar de un sentido a otro de acuerdo a la secuencia de los impulsos mencionados y la velocidad de giro depende de la frecuencia.

Por cada pulso aplicado el motor ejecuta un paso, es decir que ejecuta movimientos que van desde 0.36° a 90° . Para un giro completo de 360° se necesitarían 4 pasos de 90° y 1000 pasos de 0.36° ^[19] (ver Figura 2-12).

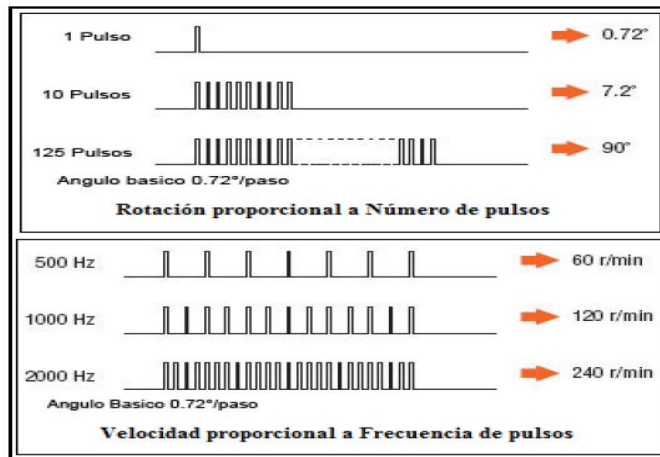


Figura 2-12. Pulsos y Frecuencia de un Motor Paso a Paso ^[19]

El motor paso a paso se lo selecciona con el torque máximo que requiere el tornillo de potencia para subir toda la carga. El torque de subida y el torque de bajada se lo determinan con las ecuaciones (Ec. 2.42) y (Ec. 2.43) respectivamente.

$$T_s = \frac{F dm}{2} \left(\frac{l + \pi \mu dm}{\pi dm - \mu l} \right) \quad (Ec. 2.42)$$

$$T_b = \frac{F dm}{2} \left(\frac{\pi \mu dm - l}{\pi dm + \mu l} \right) \quad (Ec. 2.43)$$

Se escoge el mayor torque (*Oz. in*) y se selecciona el motor paso a paso

2.8.4 Selección de controladores

En el mercado son conocidos como *drivers*, cada conductor contiene su propio sistema de comandos que únicamente lo conoce su controlador, la función es recibir los comandos programados por el usuario y traducir los pulsos enviándolos hacia un conductor que transforma la señal del pulso en impulsos de corriente que excitan las bobinas del motor y se produce el movimiento (ver Figura 2-13)

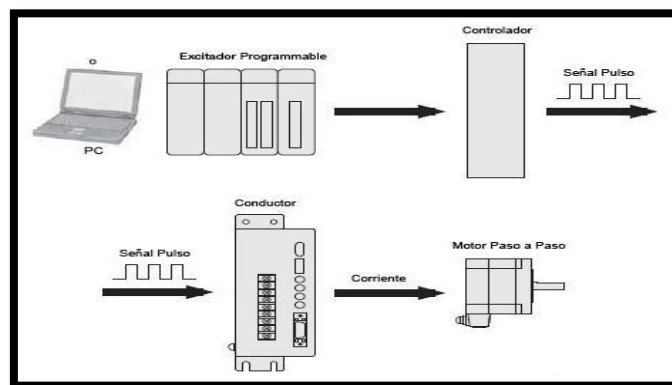


Figura 2-13 Sistema de Control de Motor Paso a Paso

2.9 Diseño del sistema de basculación del horno.

El diseño del sistema de basculación consiste en determinar las dimensiones y materiales de las partes que lo constituyen (ver Figura 2-14), y seleccionar los soportes o chumaceras que permiten el movimiento bascular.

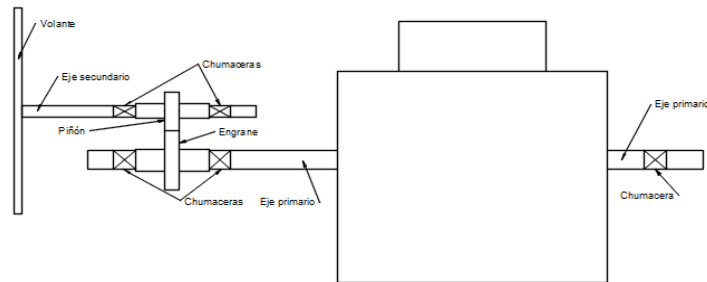


Figura 2-14. Partes del Sistema de Basculación

2.9.1 Diseño de ejes paralelos y volante.

Volante.

Para determinar el diámetro del volante se debe considerar las limitaciones de tamaño, debido a que es incómodo para una persona abrir demasiado los brazos y rotar el volante, también se debe considerar la fuerza que ejerce la persona para realizar el torque, debido a que se puede lesionar. Es decir se debe seleccionar un diámetro que permita realizar un gran torque con un mínimo esfuerzo.

Ejes paralelos.

Para diseñar los ejes paralelos primero se selecciona el material a usar y se define la forma y longitud de los ejes que permitan acoplar de forma fácil los rodamientos y engranes, luego se determina el torque en el volante (ver Figura 2-15) con la ecuación (Ec. 2.44), el cual es igual al torque que se produce en el piñón y se transmite al engrane. Este torque permite determinar las fuerzas tangenciales y radiales sobre el piñón y engrane (ver Figura 2-16) con las ecuaciones (Ec. 2.45) y (Ec. 2.46) respectivamente, seleccionando previamente los diámetros de paso estándar para cada uno de ellos y el ángulo de presión “ θ ”.

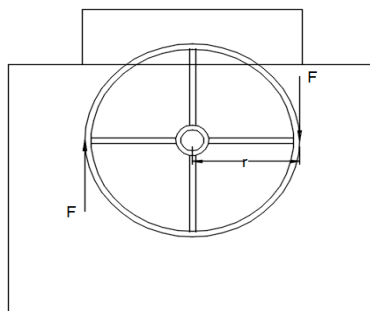


Figura 2-15. Fuerzas Ejercidas sobre el Volante

$$T = 2F r \quad (\text{Ec. 2.44})$$

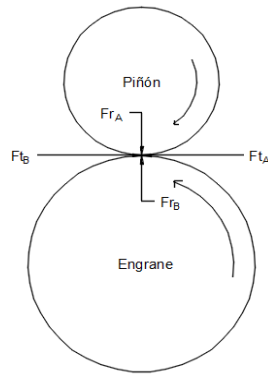


Figura 2-16. Fuerzas Radiales y Tangenciales

$$F_{tA} = F_{tB} = \frac{T}{\left(\frac{D}{2}\right)} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

$$F_{rA} = F_{rB} = F_{tA} \tan \theta \quad (\text{Ec. 2.46})$$

Al determinar las fuerzas radiales y tangenciales sobre los engranes, se puede hallar las reacciones en los puntos C y D del eje secundario (ver Figura 2-17) utilizando las ecuaciones (Ec. 2.47) y (Ec. 2.48) respectivamente, y las reacciones en los puntos F, G y H del eje primario, en donde por facilidad analítica, se determinan las reacciones en los planos “y” y “z” respectivamente y se considera al eje primario continuo en toda su longitud (ver Figura 2-18).

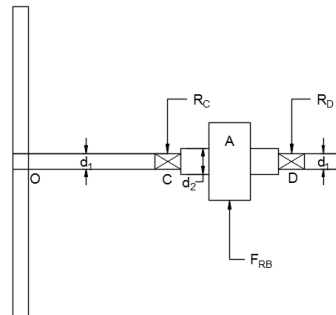


Figura 2-17. Eje Secundario

$$\sum M_D = 0 \quad (\text{Ec. 2.47})$$

$$\sum M_C = 0 \quad (\text{Ec. 2.48})$$

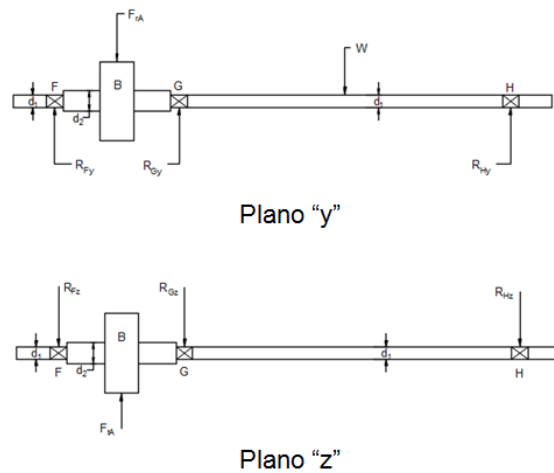


Figura 2-18. Eje Primario

Para encontrar las reacciones en los planos “y” y “z”, primero se tiene que realizar el método de superposición, para determinar la fuerza de reacción en el punto G utilizando las ecuaciones para la deflexión (Ec. 2.49), (Ec. 2.50) y (Ec. 2.51) correspondientes a cada plano, debido a que el eje es estáticamente indeterminado. Luego se determinan las reacciones en los puntos F y H con las ecuaciones (Ec. 2.52) y (Ec. 2.53) en cada plano.

$$Y_G = \frac{Fa(L-x)}{6EIL}(x^2 + a^2 - 2Lx) \quad (\text{Ec. 2.49})$$

$$Y_G = \frac{Fbx}{6EIL}(x^2 + b^2 - L^2) \quad (\text{Ec. 2.50})$$

$$Y_G = \frac{R_{Gy}a^2b^2}{3EIL} \quad (\text{Ec. 2.51})$$

$$\sum M_H = 0 \quad (\text{Ec. 2.52})$$

$$\sum M_F = 0 \quad (\text{Ec. 2.53})$$

Una vez se encuentra todas las reacciones que actúan sobre los ejes, se determina el momento máximo aplicado en cada eje, utilizando el diagrama de momento flector y se halla el diámetro de los ejes con la ecuación (Ec. 2.54) ^[20] siguiendo las recomendaciones de AGMA. Debido a que las chumaceras tienen diámetros estándares, si se requiere, el eje puede ser sobre dimensionado para dichos diámetros.

$$d = \left[\frac{32n}{\pi} * \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fs} \frac{T_m}{s_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 2.54})$$

2.9.2 Diseño de engranes

En el diseño de los engranes se debe tener presente que se conoce el diámetro de paso del piñón (D_A), el diámetro de paso del engrane (D_B) y el ángulo de presión los cuales se utilizaron para hallar los diámetros de los ejes. Por lo tanto para hallar las dimensiones de los dientes de los engranes (ver Tabla 5), se requiere seleccionar el paso diametral (ver Figura 2-19). El número de dientes del piñón y engrane están dados por las ecuaciones (Ec. 2.55) y (Ec. 2.56) respectivamente, el diámetro exterior de los engranes se halla por la ecuación (Ec. 2.57) y la distancia de centro a centro de los ejes está dado por la ecuación (Ec. 2.58).

Tabla 5. Especificaciones de la AGMA para dientes de engrane de profundidad total ^[21]

Parámetro	Paso grueso ($P_d < 20$)
Adendum a	1 / P_d
Dedendum b	1.25 / P_d
Profundidad de trabajo	2 / P_d
Profundidad total	2.25 / P_d
Espesor circular del diente	1.571 / P_d

Grueso ($p_d < 20$)	Fino ($p_d \geq 20$)
1	20
1.25	24
1.5	32
1.75	48
2	64
2.5	72
3	80
4	96
5	120
6	
8	
10	
12	
14	
16	
18	

Figura 2-19. Pasos Diametrales Estándares ^[21]

$$N_A = P_d * D_A \quad (\text{Ec. 2.55})$$

$$N_B = P_d * D_B \quad (\text{Ec. 2.56})$$

$$D_{ext.} = D_{paso} + 2a \quad (\text{Ec. 2.57})$$

$$C = \frac{N_A + N_B}{2 * P_d} \quad (\text{Ec. 2.58})$$

Para determinar el esfuerzo de flexión y el esfuerzo por contacto de los engranes se utiliza las ecuaciones (Ec. 2.59) y (Ec. 2.60) respectivamente, siguiendo las recomendaciones de AGMA. Estos esfuerzos nos permiten seleccionar el material de los engranes pues los esfuerzos permisibles por flexión y contacto deben ser mayores a los obtenidos.

$$\sigma_b = \frac{w_t p_d K_a K_s K_m K_B K_I}{F J K_v} \quad (\text{Ec. 2.59})$$

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\frac{w_t C_a C_s C_m C_f}{F d I C_v}} \quad (\text{Ec. 2.60})$$

2.10 Diseño del mecanismo de movimiento de tapa con ayuda del software ANSYS.

Para diseñar el mecanismo que permita mover la tapa, se utiliza el software ANSYS versión estudiantil, el cual simula la forma de actuar del mecanismo en la realidad. Esta simulación se realiza de la siguiente forma: ingresar el dibujo del mecanismo al software ANSYS usando la extensión de .STEP para el dibujo, ingresar las fuerzas que actual sobre el mecanismo y ejecutar el programa para simular.

En caso de que los resultados en la simulación no sean los esperados, se rediseña el mecanismo hasta que el diseñador crea son convenientes.

2.11 Diseño de bancada con ayuda del software ANSYS

Para el diseño de la bancada se utiliza un procedimiento similar al utilizado para diseñar el mecanismo de movimiento de la tapa.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

En esta sección se muestran y se analizan los resultados obtenidos mediante la metodología mostrada en el capítulo anterior de cada una de las partes que conforman el horno de arco eléctrico.

3.1 Diseño de la estructura de la cámara de reacción del horno

Con la carga de 5 kg a la que se diseñó el horno y la densidad de $1900 \frac{kg}{m^3}$ del material a fundir (cenizas de cascarilla de arroz), se obtuvo los siguientes resultados:

3.1.1 Forma y dimensiones del crisol

Las formas y dimensiones del crisol se dan en base al volumen del baño obtenido que fue de $2.63 \times 10^{-3} m^3$, este volumen del material se ubica en la parte esférica del crisol, del cual se obtuvo una altura de baño de 11 cm., y un diámetro de 21 cm.

La altura entre la superficie del baño y la tapa del horno es de 8.4 cm., en este espacio se ubican los gases que se producen en las reacciones químicas del material que se funde.

En la Figura 3-1 se muestran las dimensiones obtenidas del crisol de grafito:

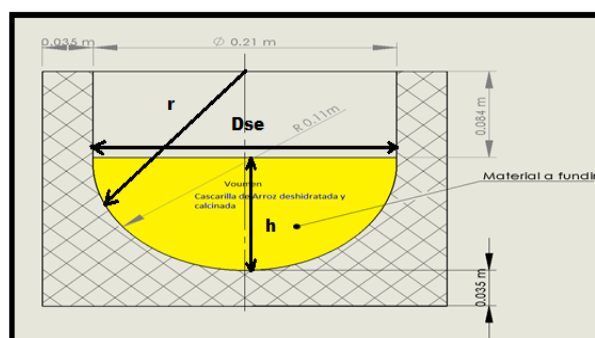


Figura 3-1. Dimensiones del crisol

3.2 Estudio Térmico

Con los ladrillos de magnesita y fibra de vidrio utilizados como material aislante con bajo nivel de conductancia, se obtuvo minimizar las pérdidas de calor en la cámara de reacción del horno obteniendo una eficiencia térmica del 92%. Además se obtuvo temperaturas entre 150 °C a 165 °C en las superficies de las planchas de acero AISIS 1020 que rodean al horno.

Con la metodología descrita en la sección 2.5.1 y 2.5.2 para la determinación de las pérdidas de calor por las paredes, tapa y base del horno analizado en estado estable y partiendo de una temperatura máxima interna de 2000°C, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las Tablas 6, 7 y 8 respectivamente. (El detalle de las iteraciones para determinar la temperatura superficial y las pérdidas de calor por las paredes, tapa y base del horno, se muestran en el Apéndice A, B y C respectivamente)

Tabla 6. Resultados de las Pérdidas de Calor por las Paredes

Temperatura interna	2273 K. (2000°C)
Temperatura en la superficie	425 K. (152°C)
Pérdidas por conducción	1048.75 W.
Pérdidas por convección	430.06 W.
Pérdidas por radiación	610.71 W.
Pérdidas de calor total en las paredes	2089.49 W.

Tabla 7. Resultados de las Pérdidas de Calor por la tapa

Temperatura interna	2273 K. (2000°C)
Temperatura en la superficie	433 K. (160 °C)
Pérdidas por conducción	82.09 W.
Pérdidas por convección	39.93 W.
Pérdidas por radiación	42.91 W.
Pérdidas de calor total en la tapa	164.93 W.

Tabla 8. Resultados de las Pérdidas de Calor por la Base

Temperatura interna	2273 K. (2000°C)
Temperatura en la superficie	438 K. (165 °C)
Pérdidas por conducción	91.93 W.
Pérdidas por convección	45.53 W.
Pérdidas por radiación	51.11 W.
Pérdidas de calor total en la base	188.57 W.

3.2.1 Energía requerida para la reducción del silicio grado metalúrgico

La energía para que se lleven a cabo los procesos que con llevan a la reducción del óxido de silicio, comúnmente en la forma de sílice (SiO₂) y obtener los 5 kg de silicio grado metalúrgico (Si-MG) fue de 62.5 KWh. Como se mencionó en el capítulo 1 se desea obtener el proceso en 2 horas, que es el tiempo que se ha obtenido en experimentaciones con cantidad similares de cenizas de cascarilla de arroz.

Entonces se obtuvo que la energía requerida es de:

$$Q_{carga} = \frac{62.5 \text{ KWh}}{2 \text{ h}} = 31.25 \text{ KW}$$

3.2.2 Calor total que se suministra al horno

El calor total que se suministró a la cámara de reacción es el suma calor requerido para carga y el calor total perdido por las paredes, tapa y base:

$$Q_T = 31.25 \text{ KW} + 2.44 \text{ KW} = 33.69 \text{ KW}$$

3.2.3 Simulación del análisis térmico del horno

Se simuló el análisis térmico del horno de arco eléctrico mediante el uso del software ANSYS para comprobar los cálculos realizados, teniendo como dato la temperatura interior, el calor de entrada en la cámara de reacción y las propiedades de los materiales que conforman las paredes, base y tapa. A continuación se muestran los pasos realizados y los resultados obtenidos:

- Se definieron las condiciones iniciales como se muestra en la Tabla 9 y en la Figura 3-2

Tabla 9. Condiciones Iniciales para la Simulación

Flujo de Calor (W)	33690
Temperatura (°C)	2000 (Fundición del Material)
Convección	$h(10, 11) \text{ W/m}^2\text{°C}$ Tamb. 22 °C
Radiación	$e: 0,9$ Tamb. 22 °C

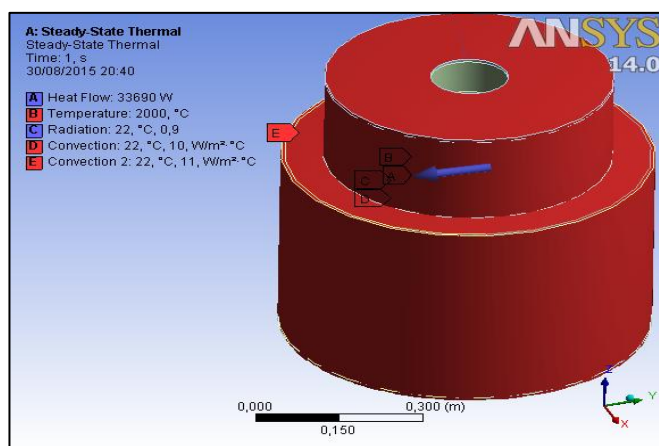


Figura 3-2. Cargas Térmicas Aplicadas en el Horno

Las direcciones del flujo de calor en la parte exterior e interior del horno se observan en la Figura 3-3 y en la Figura 3-4 respectivamente, en las cuales se muestran las direcciones del flujo de calor que se distribuyen por el cuerpo del horno, en las que se observa como las líneas de flujo van decreciendo conforme llegan a la superficie exterior, mostrando que los materiales aislantes utilizados permitieron el menor paso del calor hacia el ambiente.

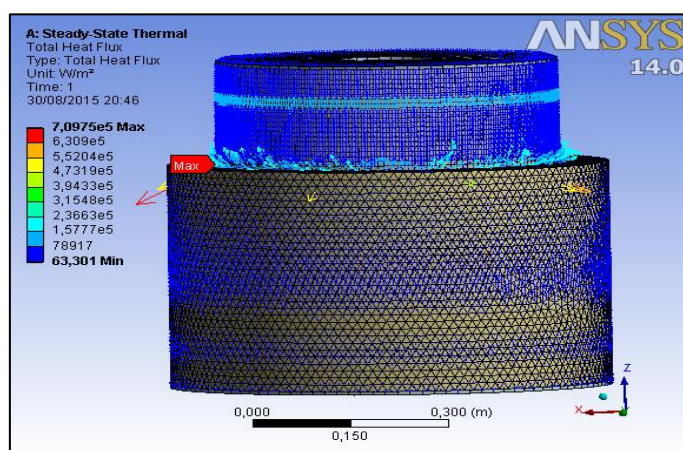


Figura 3-3 Flujo de Calor en el Exterior del Horno

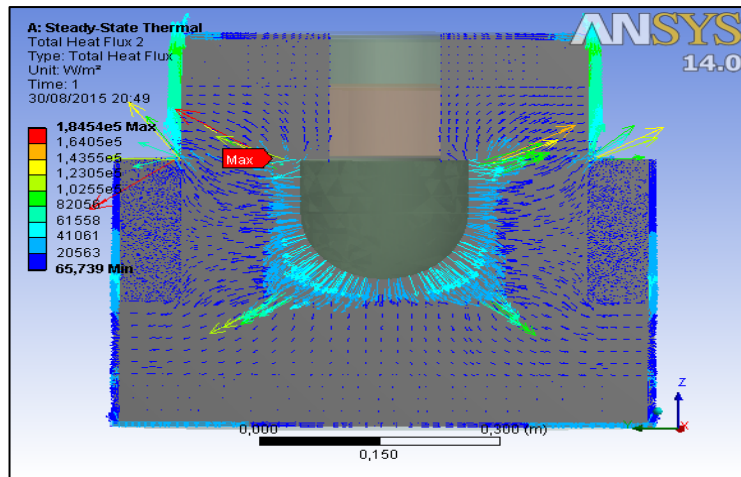


Figura 3-4. Flujo de Calor desde el Interior del Horno

En la figura 3-5, se observa la variación de la temperatura desde la cámara de reacción hasta la superficie externa del horno.

Se obtuvieron las mismas temperaturas a las obtenidas analíticamente, además se observa que los ladrillos de magnesita permitieron descender la temperatura desde los 2000 °C hasta aproximadamente 500°C, y la fibra de vidrio con el espesor utilizado de 7.62 cm. permitió descender la temperatura entre 150°C y 165°C en las superficies del acero AISI 1020 que cubren al horno.

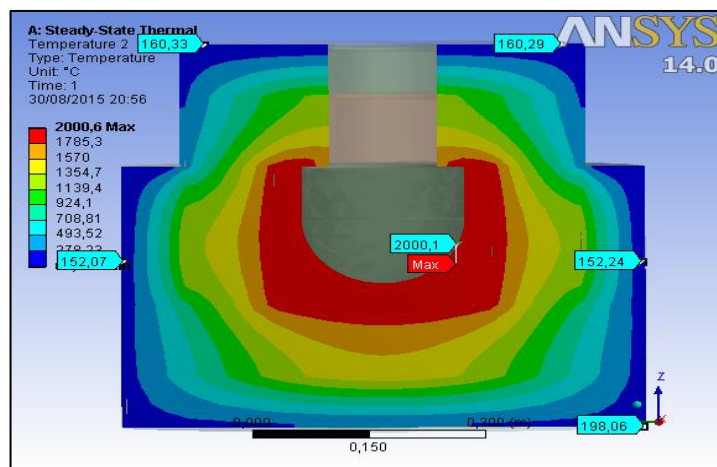


Figura 3-5. Distribución de la temperatura en el cuerpo del horno`

3.3 Equipos eléctricos seleccionados para el funcionamiento del horno

Como se mencionó en la sección 1.1, se disponen de 2 máquinas soldadoras trifásicas con una potencia individual de 25 KVA., lo cual haciéndolas trabajar juntas se obtiene una potencia de 50 KVA, que es mayor a la requerida por el horno (33.69 KVA) para poder producir los 5 kg de silicio metalúrgico. De esta manera las maquinas soldadoras operan sin llegar a la potencia máxima de trabajo, lo que ayuda a que no se sobrecalienten y puedan dañarse prematuramente.

Las soldadoras al trabajar conjuntamente se obtuvo un máximo de corriente a la salida de 800 Amperios, a un nivel de voltaje de cada una de ellas de 40 V; en la Tabla 10 se muestran las características de las maquinas soldadoras

Tabla 10. Características de las Máquinas Soldadoras

				
MODELO: Idealarc R3R-400 Soldadora Lincoln Stick K1285-16				
ENTRADA: TRIFASICA				
60 Hertz		Frecuencia	50 Hertz	
230	460	Voltaje	220	440
77	38.5	Amperaje	77	38.5
Factor de Potencia		0.85	Potencia	25 KVA
Salida		Voltaje	40	
		Amperaje	400	

Para alimentar la potencia de 50 KVA que requieren las maquinas soldadoras, se seleccionó un transformador monofásico de alta tensión de 75 KVA, cuya relación de transformación es de 7620 V a 120-240 V. En el mercado se consiguen transformadores de 5, 10,15, 25, 37.5, 50, 75, 100 KVA, etc., por esta razón se seleccionó un transformador mayor a la potencia a la que va a operar.

Las especificaciones técnicas del transformador se muestran en la Tabla 11

Tabla 11. Especificaciones Técnicas del Transformador

Norma de construcción	441210
Características Eléctricas	
Potencia	75 KVA
Tensión Primaria	7.6 KV
Tensión Secundaria	120/240 V
Tensión de cortocircuito	$\leq 3\%$
Frecuencia	60 Hz
Refrigeración	ONAN
Elevación de Temperatura	65°C
Línea de fuga	267 mm

Debido a que el transformador monofásico se encuentra instalado en la parte externa del laboratorio a la intemperie, se seleccionaron los equipos de protección:

- **Fusibles de alta tensión:** Para la potencia del transformador, el seccionador fusible usado es de tipo abierto unipolar de 27 kV - 125kV BIL - 125 Amperios
- **Pararrayos:** Se usan pararrayos estándar, la cual se seleccionó un pararrayos polimérico de 10 Kv.

- Los cables de alta tensión son conductores AWG # 2 de 15 Kv.

3.3.1 Diámetro del electrodo seleccionado

Con la ecuación (Ec. 2.23), se obtuvo un diámetro de electrodo de 7.7 cm el cual va a conducir una corriente máxima de 800 amperios a una densidad de corriente de 20 A/cm^2 . En la Tabla 12, se muestran las características del electrodo seleccionado.

Tabla 12. Especificaciones Técnicas del Electrodo

Diámetro del electrodo	77 mm
Longitud	500 mm
Peso del Electrodo	20.58 kg
Resistividad Eléctrica	950 $\mu\Omega/\text{cm}$
Reactancia del electrodo	0.4-0.6 Ω
Carga de rotura de Tracción	75 kg/cm ²
Carga de rotura a Flexión	150 kg/cm ²
Carga de rotura a compresión	215 kg/cm ²

3.3.2 Consumo específico del electrodo

- Se obtuvo un consumo de electrodo de 0.88 kilogramos por cada kilogramo de material fundido.
- Además el consumo de energía es de 1 KWh por cada 0.058 kg de electrodo consumido.

3.4 Dimensiones del porta electrodo

Con la metodología mostrada en la sección 2.7, para determinar las dimensiones del porta electrodo que soporte la corriente máxima de 800 amperios a baja tensión (40 V), se obtuvieron las siguientes dimensiones:

- La altura del porta electrodo es de 7.59 cm
- El diámetro interior, es el diámetro del electrodo de 7.7 cm
- El diámetro exterior es de 11.7 cm
- Para que llegue la corriente a baja tensión desde las maquinas soldadoras al porta electrodo se conectan 3 conductores número 4/0 AWG en la parte posterior. Los conductores de cobre tienen un diámetro de 11.86 mm, y cada uno puede transportar una corriente de 319 amperios.

3.4.1 Resultados del sistema de refrigeración del porta electrodo

Para evitar deformaciones o daños prematuros en el porta electrodo debido a las altas temperaturas presentes, se hace pasar agua por un ducto en forma espiral en el interior del porta electrodo.

Con la metodología explicada en la sección 2.7.3, para poder mantener el porta electrodo a una temperatura de 50°C, entrando agua a temperatura ambiente de 24°C por el ducto del porta

electrodo y saliendo a una temperatura de 35°C, teniendo en cuenta que la temperatura inicial en la sección del electrodo donde está ubicado el porta electrodo es de 500°C. Se obtuvo los siguientes resultados para que se cumplan estos parámetros:

- El calor disipado por el electrodo hacia el porta electrodo es de:

$$Q_{disipado} = 1319 \text{ W}$$

- Con el calor disipado por el electrodo y el calor específico a la temperatura media del agua de 302.5 K, se obtuvo un flujo másico de:

$$\dot{m} = 0.028 \frac{\text{kg}}{\text{seg}}$$

- El caudal de agua que debe pasar por los ductos es:

$$Caudal_{agua} = 1.68 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

- Para que se produzca el enfriamiento mencionado, por el ducto en forma de espiral de diámetro de 1cm., debe pasar el agua a una velocidad de:

$$V_{agua} = 0.35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- La longitud de la espiral es de 1.2 metros, dando 4 vueltas por el perímetro medio del porta electrodo con un espaciado S entre vueltas de 19.31 mm. (ver Figura 2-10)

(El detalle de los cálculos de las dimensiones y sistema de refrigeración del porta electrodo, se muestran en el Apéndice D)

3.5 Dimensiones del sistema de control para desplazamiento del electrodo

En la sección 2.8, se explicó la metodología para el diseño del sistema de control para el desplazamiento vertical del electrodo conforme se va consumiendo, de la cual se obtuvo los siguientes resultados: (el detalle de los cálculos de esta sección se muestran en el Apéndice E)

- Como se mencionó el material utilizado para el diseño del tornillo de potencia es acero AISI 1045, de la cual se obtuvo que la fuerza total que soporta el tornillo es de 182.96 N, produciéndose un momento flector máximo de 88.65 Nm.
- Con la resistencia a la fluencia del material y un factor de seguridad de 2 (recomendado para columnas empotradas en sus extremos), se obtuvo que el esfuerzo máximo que soporta el tornillo de potencia es de:

$$\sigma_{max} = 155 \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$$

- Finalmente con un módulo de resistencia de 571.93 mm³, se obtuvo que el diámetro del tornillo de potencia es de 20 mm.

Para la determinación de los rodamientos del carro que se desliza en el tornillo de potencia y permite el desplazamiento del electrodo, se obtuvo una capacidad de carga estática de 2849.4 N y una carga dinámica de 851.28 N; con el diámetro de 20 mm del tornillo, se seleccionó

rodamientos NTN rígidos de bolas tipo abierto 6804. (La selección del rodamiento en el catálogo NTN se muestra en el Apéndice F)

3.5.1 Motor paso a paso seleccionado

El motor paso a paso se lo seleccionó con el torque máximo que requiere el tornillo de potencia. Para esto se determinó el torque que necesita el tornillo para subir la carga y el toque para bajar la carga, la cual se obtuvo los siguientes resultados:

$$T_{subida} = 3008 \text{ N. mm}$$

$$T_{bajada} = 84.92 \text{ N. m}$$

Se escoge el par de torsión mayor de 3008 N. mm , este torque permitirá subir y bajar los componentes que sostienen al electrodo. Las unidades de torque para seleccionar el motor paso a paso son Oz. in , entonces:

$$T_s = 3008 \text{ N. mm} \times \frac{1 \text{ Kg}}{9.8 \text{ N}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} \times \frac{16 \text{ Oz}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} = 425 \text{ Oz. in}$$

En la Tabla 13, se muestran las especificaciones técnicas del motor paso a paso

Tabla 13. Especificaciones Técnicas del Motor Paso a Paso

	
CARACTERISTICAS	
Modelo	HT34-600-8
Factor de Forma	NEMA 34
Torque(Oz.in)	600
Corriente Nominal	6 Amp/fase
Longitud del motor	3 in
Resistencia	0.35 Ohms/fase
Inductancia	3 Mh/fase
Peso del motor	4.55 Lbs

3.5.2 Selección del controlador

El controlador se seleccionó según el motor paso a paso a utilizar, ya que como se mencionó en la sección 2.8.4, cada conductor tiene su propio sistema de comandos que únicamente lo

conoce su controlador. En la Tabla 14, se presentan las especificaciones técnicas del controlador o *driver*.

Tabla 14. Especificaciones Técnicas del Controlador

Driver MondoStep 7.8 Bi-Polar Driver	
	
Para Motores estándar NEMA 34	Corriente de salida hasta 7.8 A.
Alimentación de voltaje hasta +80 VDC	Entrada de frecuencia de pulso 300 KHz
16 resoluciones seleccionables, 51200 pasos/ rev.	Paso / dirección y modos CW / CCW

3.6 Diseño del sistema de basculación del horno.

3.6.1 Diseño de ejes paralelos y volante.

El diámetro del volante se determinó por observación de hornos, con similares dimensiones, considerando las limitaciones de tamaño y fuerza, teniendo como resultado un diámetro de 600 mm en el cual se aplican fuerzas de 30 Kg, produciendo un torque de 180 Nm.

Para el diseño de los ejes en paralelo se utilizó acero AISI 1020 y se definió la forma y longitud de los ejes (ver Figuras 3-6 y 3-7). Además se seleccionó como premisas el diámetro de paso del piñón, el diámetro de paso del engrane y el ángulo de presión (ver Tabla 15), parámetros que junto a las propiedades del material de los ejes, la consideración de continuidad del eje primario y las recomendaciones de AGMA se tuvo como resultado los valores mostrados (ver Tabla 16).

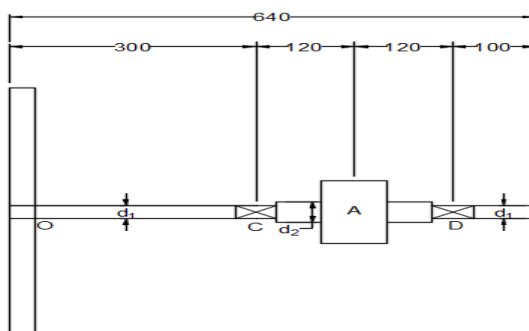


Figura 3-6. Forma y longitud del Eje Secundario

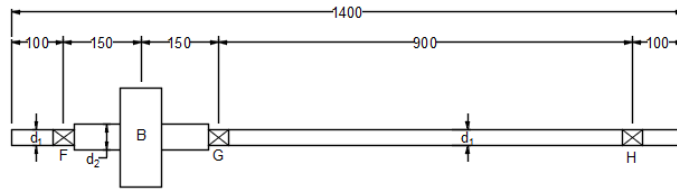


Figura 3-7. Forma y Longitud del Eje Primario

Tabla 15. Parámetros de Diseño

Diámetro de paso de piñón (D_A)	4.375 in
Diámetro de paso de engrane (D_B)	6.875 in
Ángulo de presión (θ)	20°

Tabla 16. Resultados Obtenidos del Diámetro de Ejes

Eje Primario	
d1	35 mm
d2	42 mm
Eje Secundario	
d1	55 mm
d2	66 mm

3.6.2 Diseño de engranes.

Para el diseño de engranes se seleccionó un paso diametral ($Pd = 8$), el cual permitió obtener las dimensiones de los engranes, el número de dientes del piñón, el número de dientes del engrane, el diámetro exterior de cada engrane, la distancia de centro a centro de los ejes, el esfuerzo por flexión y el esfuerzo por contacto de cada engrane (ver Tabla 17). Por lo tanto el material que se seleccionó para los engranes con respecto al esfuerzo de contacto del piñón, fue el acero AISI 4140 templado y revenido a 800 °F

Tabla 17. Resultados Obtenidos de los Engranes

Dimensiones Comunes			
Adéndum a		0.125 in	
Dedéndum b		0.15625 in	
Profundidad de trabajo		0.25 in	
Profundidad total		0.28125 in	
Espesor circular del diente		0.196375 in	
Distancia de centro a centro de los eje (C)		5625 in	
Piñón		Engrane	
Diámetro exterior (D_{oA})	4.625 in	Diámetro exterior (D_{oB})	7.125 in

3.8 Diseño del mecanismo de movimiento de tapa con ayuda del software ANSYS

Los resultados obtenidos de la simulación con ANSYS (ver Figura 3-9 y 3-10), permitieron determinar los esfuerzos y las deformaciones que se producen en el mecanismo (ver Tabla 19).

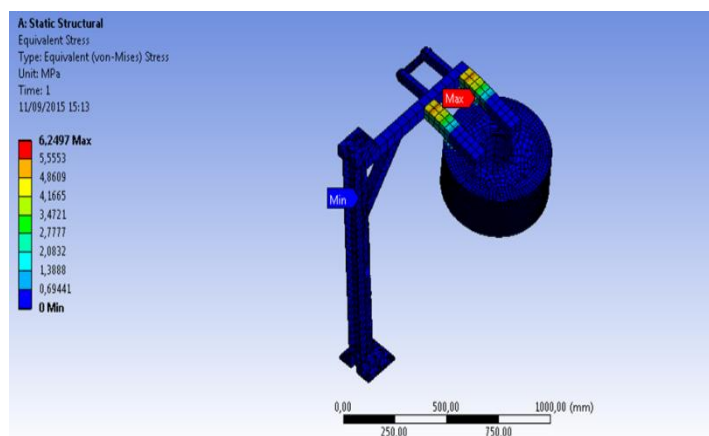


Figura 3-9. Esfuerzo Equivalente Producido en el Mecanismo

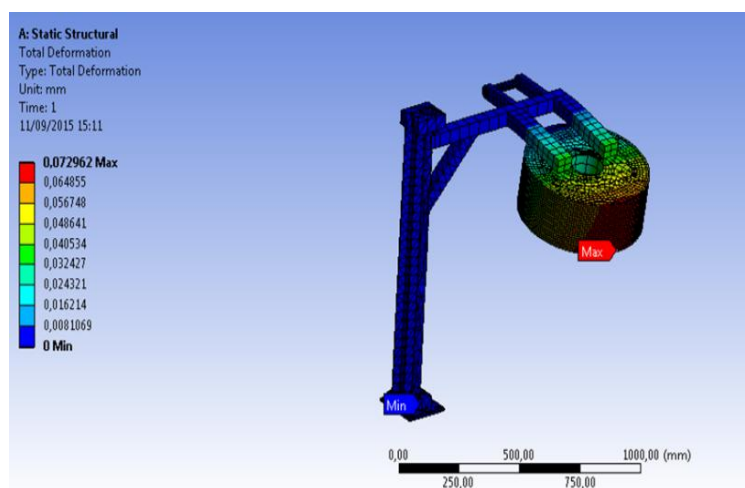


Figura 3-10. Deformación producida en el Mecanismo

En la Tabla 19, se muestra el esfuerzo equivalente máximo que soporta todo el mecanismo, así también la deformación máxima producida, como se observa en las Figura 3-9 y Figura 3-10, el mecanismo va a soportar el peso de la tapa sin que este falle, ya que como se observa la máxima deformación se encuentra en las barras que soportan la tapa, pero se tiene una deformación insignificante de 0.073 mm

Tabla 19. Resultados de Esfuerzo Equivalente y Deformación

Esfuerzo Equivalente Máximo	6.25 MPa
Deformación Máxima	0.73

3.9 Diseño de bancada con ayuda del software ANSYS

Los resultados obtenidos de la simulación con ANSYS (ver Figura 3-11 y 3-12), permitieron determinar los esfuerzos y las deformaciones que se producen en el mecanismo (ver Tabla 20)

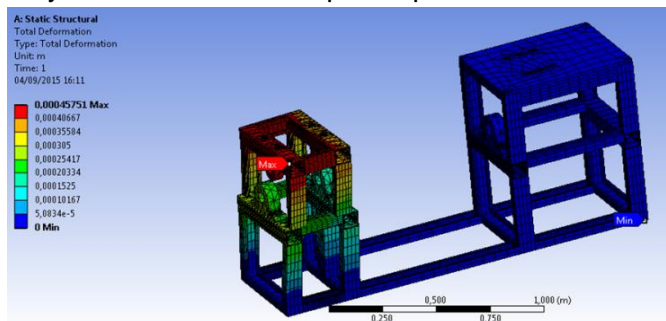


Figura 3-11. Deformación producida en la bancada

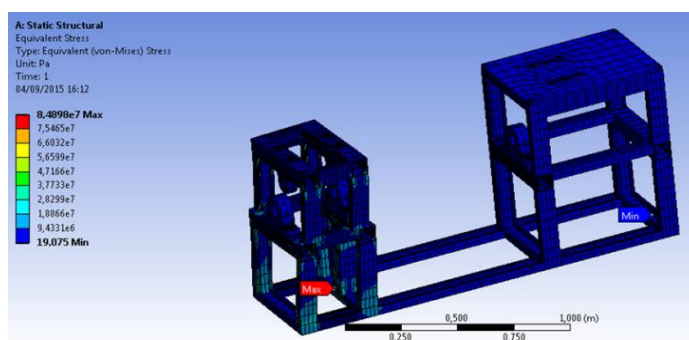


Figura 3-12. Esfuerzo Equivalente en la Bancada

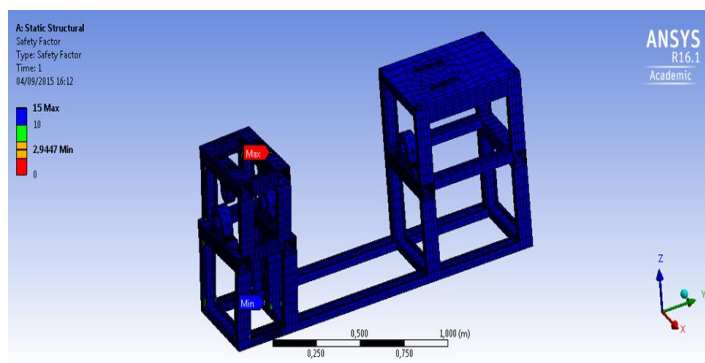


Figura 3-13. Factor de Seguridad de la Bancada

Se observa en la Figura 3-11 que la máxima deformación está en la sección donde se ubica los apoyos del eje que soporta al cuerpo del horno, con una deformación insignificante de 0.41 mm, pero este no falla ya que se obtuvo un factor de seguridad de 15 (ver Figura 3-13).

Tabla 20. Resultados de Esfuerzo Equivalente y Deformación en la Bancada

Esfuerzo Equivalente Máximo	84.9 MPa
Deformación máxima	0.41 mm

3.10 Análisis económico

Para realizar el análisis económico se cotiza el precio de los materiales de todas las partes que conforman el horno de arco eléctrico, el costo de mano de obra y el costo de diseño.

3.10.1 Costo de Diseño

El monto por la realización del diseño es un valor que se lo suma al costo del material y al de la mano de obra.

Para el costo del diseño se considera las horas aplicadas para la investigación y realización de este proyecto, considerando un valor por hora de \$ 50 y un tiempo aproximado de 100 horas.

Entonces se tiene un costo de diseño de \$ 5000. Como este trabajo ha sido realizado por 2 personas se tiene un costo final de diseño de \$ 10000.

3.10.2 Análisis de Costo de materiales y mano de obra

A continuación se muestra el análisis de costo de materiales y mano de obra por cada sección que conforman el horno de arco eléctrico.

Tabla 21. Costo de Materiales para el Cuerpo de la Cámara de reacción

Descripción	Cant.	Precio	Precio Total
Ladrillos de Magnesita (9" x 4 ½" x 2 ½")	50	\$ 5.30	\$ 265
Láminas de Fibra de Vidrio (116"x48"x7.5")	1	\$ 60	\$ 60
Cemento Refractario (Tambores de 35 kg)	1	\$ 44	\$ 44
Plancha Acero AISI 1020 (1220x2440x6) mm	2	\$128.97	\$ 257.94
Cilindros de Grafito (35 kg)	1kg	\$ 4.18	\$ 146.30
		Subtotal	\$ 773.24
		IVA	\$ 92.78
		Total	\$ 865.78

En la Tabla 22, se muestra el costo total para la construcción del cuerpo de la cámara de reacción, sumado el costo de materiales más el valor de la mano de obra que incluye:

- Costo de maquinado: Corte, rolado y soldadura de la plancha de acero y maquinado de la forma del Crisol y del electrodo de Grafito.
- Costo de ensamble: pegado de ladrillos y unión de elementos
- Costo de uso de equipo, herramientas, energía eléctrica, etc. (costos indirectos)
- Ensamble total del cuerpo.

Tabla 22. Costo Total del Cuerpo de la Cámara de Reacción

Mano de obra	Unidad	Cant.	Precio U.	Precio total
Mecánico de 1ra	Hrs.	16	\$10	\$ 160
Ayudante Mecánico	Hrs.	16	\$5	\$ 80
Sub Total				\$ 240
Cargas Sociales 20.5 %				\$ 49.20
Costo de Maquinado				\$85
Costos indirectos (herramientas)				\$ 25
TOTAL				\$ 399.20
TOTAL FINAL (Materiales + mano de obra)				\$ 1264.98

3.10.3 Costo del mecanismo del porta electrodo

En la Tabla 23, se muestra el costo de los materiales y el costo de la mano de obra para el ensamblado e instalación de todo el mecanismo.

Tabla 23. Costo del Mecanismo del Porta Electrodo

Material	Cant.	Precio U.	Precio total
Anillo de cobre sujetador del electrodo Espesor: 20 mm	1	\$ 92.88	\$ 92.88
Motor paso a paso HT34-600-8 600 Oz-in	1	\$ 130	\$ 130
Driver: MondoStep 7.8 Bi-Polar	1	\$ 150	\$ 150
Husillos de Bolas: Ø 18 mm, paso= 5 mm	1	\$ 100	\$ 100
Rodamiento radial de Bolas 6804	2	\$ 20	\$ 40
Chumacera tipo brida	2	\$ 15	\$ 30
Guía: Perfil cuadrado de acero	1	\$ 3.50	\$ 3.50
Tornillo Sin Fin Ø 18 mm	1	\$ 20	\$ 20
Soportes de motor y del mecanismo		\$ 25	\$ 25
PC con software para el control	1	\$ 700	\$ 700
Costo mano obra (instalación)			\$ 150
TOTAL			\$ 850

3.10.4 Costo del sistema eléctrico del horno

En la Tabla 24, se muestran los costos de los equipos eléctricos que se requieren para el horno, además se detalla el costo de la mano de obra para la instalación, la cual es realizada por un electricista de 1ra y un ayudante eléctrico en un tiempo de 20 horas.

Tabla 24. Costo del Sistema Eléctrico del Horno

Descripción	Cant.	Precio U.	I.V.A.	Precio total
Transformador Inatra 75 kva (7.6 KV/120-240 V)	1	\$ 2850	\$ 342	\$ 3192
Seccionador fusible UNIP. Abierto 15/27 KV BIL, 8 KA, 100A	1	\$ 7	\$ 9.36	\$ 87.36
Tira fusible A.T. cabeza removible 10 A, TIPO K	1	\$ 18.50	\$ 2.22	\$ 20.72
Pararrayos clase distribución, oxido metalico, 10 kV	1	\$ 88.40	\$ 10.61	\$ 99.01
Cartucho fusible para BT, tipo NH tamaño 1, 160 A	1	\$ 5	\$ 0.6	\$ 5.60
Cable para 15kV AWG 2 XLPE	1	\$ 89.70	\$ 10.76	\$ 100.46
Otros materiales: tubos rígidos de 3 in, ganchos, grapas terminal, abrazaderas, pernos, pletina.		\$ 50	\$ 6	\$ 56
Total de costo de equipos eléctricos				\$ 3561.15
Mano de obra	Unidad	Cant.	Precio unitario	Precio Total
Electricista de 1ra	Hrs	20	\$15	\$300
Ayudante eléctrico	Hrs	20	\$7	\$140
Sub total				\$ 440
Cargas sociales 20.5%				\$90.20
Gastos de herramientas 5%				\$22
Total				\$ 552.20
Costo total final del sistema eléctrico				\$ 4113.35

3.10.5 Costo del sistema de basculación

En la Tabla 25, se muestra el costo de los materiales para el sistema de basculación del horno, además del costo de la mano de obra para el ensamble y soldadura de las piezas. Para este trabajo se necesitan un mecánico de 1ra y un ayudante, trabajando cada uno de ellos 16 horas a un costo por hora de \$10 y \$5, respectivamente.

Tabla 25. Costo del Sistema de Basculación

Descripción	Cant.	Precio U.	Precio Total
Piñón de Acero AISI 4140 templado y revenido a 800 °F , \emptyset paso = 4.625 in	1	\$ 50	\$ 50
Engrane de Acero AISI 4140 templado y revenido a 800 °F , \emptyset paso = 7.125 in	1	\$ 65	\$ 65
Eje primario 1 de transmisión \emptyset = 66 mm L=0.5032 m – Acero AISI 1020	1	\$ 80	\$ 80
Eje primario 2 de transmisión \emptyset = 55 mm L=0.2032 m – Acero AISI 1020	1	\$ 60	\$ 60
Eje secundario de transmisión \emptyset = 42 mm, L=0.64 m – Acero AISI 1020	1	\$ 92	\$ 92
Volante \emptyset 60 cm. (varilla redonda 3/4)	1	\$ 22	\$ 22
Chumacera SKT,YSP 211-2F	3	\$ 20	\$ 60
Chumacera SKT,YSP 207-2F	2	\$ 20	\$ 40
Pernos M12	4	\$ 0.40	\$ 1.60
Pernos M16	6	\$ 0.50	\$ 3
Total			\$ 473.60

Mano de obra	Unidad	Cant.	Precio U.	Precio total
Mecánico de 1ra	Hrs.	16	\$10	\$ 160
Ayudante Eléctrico	Hrs.	16	\$5	\$ 80
Total				\$ 240
Cargas Sociales 20.5 %				\$49.2
Gasto de Herramientas 20 %				\$ 48
Total				\$337.20
Costo total final del sistema de basculación				\$ 810.80

3.10.6 Costo del instrumento para el control de la temperatura

En la Tabla 26, se muestra el costo del termómetro infrarrojo de doble láser, que es utilizado para el control de la temperatura en la cámara de reacción del horno de arco eléctrico

Tabla 26. Costo del Instrumento para el Control de la Temperatura

Descripción	Cant.	Precio Unitario	I.V.A.	Precio total
Termómetro Infrarrojo doble láser, Extech 42570, rango de temperatura (-50 a 2200°C)	1	\$ 2238	\$ 268.50	\$ 2506.50
TOTAL				\$ 2506.50

3.10.7 Costo total del diseño y construcción

En la siguiente Tabla 25,7se indica el costo de diseño y los costos finales de las secciones analizadas anteriormente, con la sumatoria de todos los valores, se obtiene el costo final de este proyecto.

Tabla 27. Costo total para el diseño y construcción del horno

Descripción	Costo
Costo de Diseño	\$10000
Cuerpo de la cámara de reacción	\$1264.98
Mecanismo porta electrodo	\$ 850
Sistema Eléctrico	\$ 4113.34
Sistema de Basculación	\$ 810.8
Control de la temperatura	\$ 2506.50
Costo del sistema de movimiento de tapa	\$ 725
Costo de Bancada	\$ 830
COSTO TOTAL FINAL	\$ 21100.62

3.10.8 Costo de un horno de arco eléctrico similar

En la Tabla 28, se muestra las características y el costo de un horno de arco eléctrico similar al realizado en este proyecto, el precio final de este horno no incluye el costo de importación e impuestos aduaneros.

Tabla 28. Descripción y Costo de un Horno de Arco Eléctrico Similar

Condición	Nuevo
Lugar de origen	Henan, China (Mainland)
Modelo	DS-002
Diámetro cuba	200 mm
Capacidad	5 kg
Potencia Transformador	50 KVA
Voltaje de entrada	AC-400
Voltaje de Salida	DC-220
Diámetro del electrodo	80 mm
Temperatura de Alcance	2000°C
Conveniente para fundir materiales	acero , hierro, chatarra de ferroaleaciones, carburo de calcio, carburo de silicio, silicio industrial,, chatarra de acero, hierro inoxidable etc.
Costo	\$30000 a \$35000



DS De Song Technology Trading co.,ltd

de-song.en.alibaba.com

<http://www.de-song.com.cn>

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el diseño de cada una de las partes que constituyen el horno de arco eléctrico, este puede realizar el proceso de reducción de silicio a partir de la ceniza de la cascarilla de arroz en un tiempo de 2 horas, cumpliendo así con el objetivo general propuesto en el presente proyecto.
- El crisol está hecho de grafito debido a que es fácil de maquinar y se le puede dar cualquier forma deseada, además sirve como ánodo en el circuito eléctrico, permitiendo reducir el tamaño del horno.
- El crisol en donde se funde el material tiene forma esférica en su parte inferior, lo que permite una distribución de calor uniforme e impide que el material fundido se quede en las esquinas o que se produzcan concentraciones de esfuerzos, que pueda desgastar de una manera acelerada el crisol de grafito.
- Seguido del crisol, el horno está compuesto por ladrillos de magnesita porque tienen un punto de fusión de 2800°C lo cual evita que se cristalice y se rompan los ladrillos en corto tiempo.
- Las maquinas soldadoras disponibles en el laboratorio satisfacen la potencia requerida por el horno para fundir la carga propuesta de la ceniza de cascarilla de arroz.
- Con los ladrillos de magnesita y fibra de vidrio utilizados como materiales aislantes, redujeron en gran medida las pérdidas de calor, obteniendo una eficiencia térmica en el horno de 92 %, permitiendo mayor concentración de calor en la cámara de reacción.
- El tiempo del proceso de reducción de silicio puede disminuir al aumentar la corriente, sin embargo se debe tener presente que se requieren maquinas soldadoras de mayor potencia para que cumplan con dichas condiciones, además se debe estimar un diámetro de electrodo mayor.
- El porta electrodo requiere ser enfriado o refrigerado por agua para evitar deformaciones debido a las altas temperaturas.
- El motor paso a paso transmite movimientos precisos al tornillo de potencia, permitiendo que sea controlado con mayor facilidad el desplazamiento del electrodo conforme se vaya consumiendo durante el proceso de fundición.

- Para controlar la temperatura en la cámara de reacción se deben utilizar instrumentos especiales, uno de ellos es el termómetro infrarrojo que trabaja a niveles de temperaturas superiores a los 2000°C, además que permite al usuario controlar la temperatura sin necesidad de acercarse completamente a la superficie del horno, debido a que el termómetro seleccionado permite sensar a una distancia de hasta 50 pulgadas.
- El silicio obtenido en el horno tiene un alto grado de pureza, por lo que puede ser utilizado para fabricar paneles solares e instrumentos eléctricos que requieren este tipo de material.
- El horno de arco eléctrico diseñado puede ser usado para la fundición de otros tipos de materiales como por ejemplo acero, aluminio, hierro, ferroaleaciones, calcio, etc., debido a que la temperatura alcanzada por el horno es mayor al punto de fusión de los materiales mencionados.
- El mecanismo de basculación y del movimiento de la tapa, han sido diseñados para brindar facilidad al operador, permitiéndole manejar los sistemas sin necesidad de mucho esfuerzo.
- La construcción de este horno permite un ahorro de aproximadamente 15000 dólares, en comparación en adquirir un equipo en el exterior con características similares para la producción de silicio grado metalúrgico.

4.2 Recomendaciones

- Se puede elevar la corriente para disminuir el tiempo del proceso de fundición, sin embargo se recomienda trabajar con una corriente de 800 A y un voltaje de 40 V para evitar el sobrecalentamiento de las maquinas soldadoras y el desgaste prematuro de los electrodos.
- Durante el tiempo de operación mantener las maquinas soldadoras en lugares ventilados para evitar el sobrecalentamiento.
- Se debe tener cuidado al mover la tapa del horno después de finalizado el proceso de fundición debido a que puede haber remanentes de concentraciones de SiO₂ en la superficie interna de la tapa.
- El horno debe ser operado por al menos 2 personas, para facilitar la operación del horno durante el proceso.
- Medir la temperatura dentro del horno cada 15 minutos, para alcanzar la temperatura requerida y a la vez no sobrepasar la temperatura del proceso de obtención del silicio, ya que se pueden alcanzar la temperatura de fusión de los ladrillos de magnesita causando que se cristalicen.
- Utilizar todos los implementos de seguridad como, mascarilla, gafas, guantes, etc.; al utilizar el horno para evitar cualquier tipo de riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kalapathy, U. (2000). *A simple method for production of pure silica from rice hull ash*. Arkansas, U.S.A.: Bioresource Technology 73
- [2] Paschkis, V. (1960). *Industrial Electric Furnace and Appliances*. New York, U.S.A.: Interscience Publishers.
- [3] Fundición y Metales. (2013). Fundición: Hornos de arco indirecto. Recuperado de <http://fundicionmetales.blogspot.com/2013/04/fundicion-hornos-de-arco-indirecto.html>
- [4] Copa, J.F. (2009). *Diseño de un horno eléctrico por arco con capacidad de 500 kg*. Tesis de Ingeniería Electromecánica, U.T.O., Oruro, Bolivia.
- [5] Photovoltaic Education Network (2014). Refining Silicon. Recuperado de <http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/refining-silicon>.
- [6] S.G. Hutchison, L. S. Richardson, and C.M. Wai (1988). *Carbothermic Reduction of Silicon Dioxide-A Thermodynamic Investigation*. Metallurgical Transactions B.
- [7] Myrhaug, E.H. J.K. Tuset and H. Tveit Proceedings (2004). *Tenth International Ferroalloys Congress; Reaction mechanisms of charcoal and coke in the silicon process*. South África: Tenth International Ferroalloys Congress.
- [8] M. Abdellatif, (2011). *DC arc smelting of silicon: Is it technically feasible?*. Randburg, South Africa: Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- [9] K. Kweku, L. (2010). *Synthesis of High Purity Silicon from Rice Husks*. Tesis de MsC, Universidad de Toronto, Toronto, Canada.
- [10] Plaza, E. (2009). *Obtención experimental de fural a partir de la cascara de arroz*. Tesis de Ingeniería Química, Universidad Estatal de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- [11] Edneral F.P. 1979. *Electrometallurgy of Steel and Ferro Alloys*. Moscow, Russia: MIR Publishers.
- [12] Hornos (2006). *Lección 3.- Hornos de Arco*. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion3.HornosARCO.2006.pdf>
- [13] Incropera, F. (1999). *Fundamentos de Tránsito de Calor*, 4ta ed. México: Prentice Hall.

- [14] G.N. Tiwari, G.N. (2006). *Solar Energy Technology Advances*. New York, U.S.A.: Nova Publishers - *Technology & Engineering*.
- [15] Graphite Electrodes (2005). *Allowed Current Carrying Load of Electrode of Regular power*. Recuperado de <http://www.lpmie.com/old/txt/GRAPHITE2.htm>.
- [16] Jaccard, L.R. (2006). *Consumo Específico de Electrodo en Hornos Eléctricos de Arco*. Recuperado de jaccard.com.br/es/consumo.htm
- [17] Soldaduras Foro (2010). *Selección correcta de los cables para soldadura*. Recuperado de <http://soldaduras.foroactivo.com/t23-seleccion-correcta-de-los-cables-para-soldadura>
- [18] Budynas, R., Keith, J. (2008). *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A.
- [19] Maldonado, F. (2015). *Diseño de una maquina fresadora CNC para mecanizado de prototipos de barcos de madera*. Tesis de Ingeniería Mecánica, ESPOL, Guayaquil, Ecuador.
- [20] NORMA ANSI/ASME B106. 1M (1985): Diseño de flechas de transmisión
- [21] Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas, un enfoque integrado, cuarta edición*. México: Pearson Educación

APÉNDICES

APÉNDICE A

ITERACION PARA EL CALCULO TRANSFERENCIA DE CALOR POR LAS PAREDES

	GRAFITO			LAD. DE MAGNESITA			FIBRA DE VIDRIO			PLANCHA DE ACERO			Tin	Tf	Tamb	Qcond.		
	L	PI	Rext 1	R int 1	K1	Rext 2	R int 2	K2	Rext 3	R int 3	K3	Rext 4	R int 4	K4				
1	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	623	298	936.384
2	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	523	298	993.135
3	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	473	298	1021.51
4	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	453	298	1032.86
6	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	373	298	1078.26
7	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	423	298	1049.89
8	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	425	298	1048.75
9	0.229	3.1416	0.14	0.105	38	0.2543	0.14	1.4	0.331	0.2543	0.13	0.3368	0.331	58	2273	413	298	1055.56

Tp	φ	K	Pr	β	Gr	Ral	Nussel	h	Rc	Qconv	σ	ϵ	Qrad	Qsalida	E
460.5	3.52E-05	0.0381	0.6855	0.0022	66942319	45888959.7	48.26	8.03	0.26	1263.05	5.67E-08	0.9	3524.156	4787.2	-3850.82
410.5	2.76E-05	0.0345	0.689	0.0024	84323549.3	58098925.4	51.77	7.82	0.26	851.18	5.67E-08	0.9	1652.298	2503.5	-1510.35
385.5	2.48E-05	0.0327	0.6929	0.0026	86428668.7	59886424.5	52.28	7.48	0.28	632.86	5.67E-08	0.9	1040.982	1673.8	-652.335
375.5	2.37E-05	0.0319	0.6949	0.0027	86123714.1	59847368.9	52.29	7.3	0.28	547.61	5.67E-08	0.9	844.8759	1392.5	-359.625
335.5	1.94E-05	0.0289	0.702	0.003	69608610.5	48865244.6	49.32	6.24	0.33	226.38	5.67E-08	0.9	283.169	509.55	568.7128
360.5	2.20E-05	0.0308	0.6979	0.0028	83957030.2	58593611.4	51.99	7	0.3	423.44	5.67E-08	0.9	595.6648	1019.1	30.77806
361.5	2.26E-05	0.0312	0.6969	0.0028	80607643.8	56175466.9	51.34	7	0.3	430.06	5.67E-08	0.9	610.7186	1040.8	7.969394
355.5	2.15E-05	0.0304	0.6989	0.0028	82012301.8	57318397.7	51.66	6.87	0.3	382.34	5.67E-08	0.9	523.5365	905.88	149.6825

APÉNDICE B

ITERACION PARA EL CALCULO TRANSFERENCIA DE CALOR POR LA TAPA DEL HORNO

pi	D. Tapa	D. Electr.	AREA Ct	Per	Lsc	LADRILLOS DE MAGNESITA		FIBRA VIDRIO		PLANCHA		Tin	Tf	Tamb	Tf	Qcond.
						espesor	K2	espesor	K3	espesor	K4					
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	623	298	460.5	45.92
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	573	298	435.5	47.32
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	543	298	420.5	48.15
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	533	298	415.5	48.43
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	513	298	405.5	48.99
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	463	298	380.5	50.38
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	433	298	365.5	51.21
3.14	0.21	0.14	0.0192	0.66	0.029	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	437	298	367.5	51.1

ϑ	k	Pr	β	Gr	Ra	Nu	h	Rc	Qconv.	σ	ϵ	Qrad	Qsalida	E
3.06E-05	0.0381	0.686	0.0022	183459.5	125761.508	10.17	13.27	3.92	82.96	5.67E-08	0.9	140.18	223.1	-177
3.52E-05	0.0363	0.687	0.0023	124047.7	85233.1538	9.227	11.48	4.53	60.73	5.67E-08	0.9	98.109	158.8	-112
2.88E-05	0.0356	0.688	0.0024	170979.7	117685.317	10	12.2	4.26	57.52	5.67E-08	0.9	77.622	135.1	-87
2.82E-05	0.0349	0.689	0.0024	173112.3	119222.467	10.03	12	4.33	54.26	5.67E-08	0.9	71.505	125.8	-77.3
2.70E-05	0.0342	0.69	0.0025	177031.1	122062.917	10.09	11.83	4.39	48.94	5.67E-08	0.9	60.263	109.2	-60.2
2.42E-05	0.0323	0.694	0.0026	180230.4	125061.848	10.15	11.23	4.63	35.65	5.67E-08	0.9	37.38	73.03	-22.7
2.26E-05	0.0311	0.697	0.0027	176018.7	122667.461	10.11	10.79	4.82	28.03	5.67E-08	0.9	26.773	54.8	-3.59
2.28E-05	0.0313	0.697	0.0027	177099.4	123349.753	10.12	10.87	4.78	29.08	5.67E-08	0.9	28.067	57.14	-6.04

APÉNDICE C

ITERACION PARA EL CALCULO TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA BASE DEL HORNO

pi	D. BASE	AREA cont	Per	Lsc	LADRILLOS DE MAGNESITA		FIBRA DE VIDRIO		PLANCHA		Tin	Tf	Tamb	TP	Qcond.
					espesor	K2	espesor	K3	espesor	K4					
3.14	0.21	0.0346	0.66	0.053	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	453	298	375.5	91.18
3.14	0.21	0.0346	0.66	0.053	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	438	298	368	91.93
3.14	0.21	0.0346	0.66	0.053	0.1143	1.4	0.0762	0.125	0.00635	58	2273	439	298	368.5	91.88

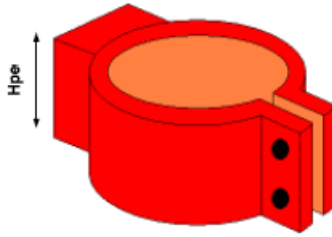
ϑ	k	Pr	β	Gr	Ra	Nu	h	Rc	Qconv.	σ	ϵ	Qrad	Qsalida	E
2.37E-05	0.0319	0.695	0.00266	1041460.89	723711.17	7.88	4.79	6.03	25.72	5.67E-08	0.9	60.49	86.21097	4.97
2.29E-05	0.0314	0.696	0.00272	1030131.64	717383.68	15.7	9.39	3.07	45.53	5.67E-08	0.9	51.11	96.643993	-4.71
2.29E-05	0.0314	0.696	0.00271	1036082.01	721527.51	15.7	9.4	3.07	45.92	5.67E-08	0.9	51.71	97.631407	-5.75

APÉNDICE D

CÁLCULOS DE LAS DIMENSIONES DEL PORTAELECTRODO

DISEÑO DEL PORTAELECTRODO

El material de la porta electrodos es de cobre, la densidad de corriente de juntas de cobre es de: $\rho_{corr.cobre} = 4 \text{ a } 6 \frac{A}{cm^2}$



Área Interior del Porta electrodo

$$A_{interior} = \frac{I}{\rho_{corr.cobre}}$$

$I = \text{corriente de alimentacion al electrodo} = 416.6 \text{ A}$

$$A_{interior} = \frac{916 \text{ A}}{5 \frac{A}{cm^2}} = 183.2 \text{ cm}^2$$

Perímetro del Electrodo

$$P_{electrodo} = 2\pi r =$$

$$P_{electrodo} = 2\pi \left(\frac{7.7 \text{ cm}}{2} \right)$$

$$P_{electrodo} = 24.19 \text{ cm}$$

Altura del Porta electrodo

$$H_{p.elect} = \frac{A_{interior}}{P_{electrodo}}$$

$$H_{p.elect} = \frac{183.2 \text{ cm}^2}{24.12 \text{ cm}} = 7.59 \text{ cm}$$

Espesor del Porta electrodos

Número de Conductores:

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Capacidad (A)
4/0	11,86	107,2	319
3/0	10,4	85,3	240
2/0	9,226	67,43	190
0	8,252	53,48	150
1	7,348	42,41	120
2	6,544	33,63	96
3	5,827	26,67	78
4	5,189	21,15	60
5	4,621	16,77	48
6	4,115	13,3	38
7	3,665	10,55	30

TABLA 2.3. Conductores de Cobre AWG

$$\#conductores = \frac{916 A}{319 A} = 3$$

Densidad eléctrica en los conductores de cobre:

$$\rho_{electrica} = \frac{916 A}{107.2 mm^2 \times 3} = 2.84 \frac{A}{mm^2}$$

Área del Porta electrodo:

$$A_{cond} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$d = D_{electrodo}$$

$$D = D_{electrodo} + espesor$$

Reemplazando:

$$A_{cond} = \frac{\pi}{4} ((D_{electrodo} + 2e)^2 - D_{electrodo}^2)$$

Tenemos que:

$$\frac{\pi}{4} ((D_{electrodo} + 2e)^2 - D_{electrodo}^2) = 2 \times \frac{916 A}{2.84 \frac{A}{mm^2}}$$

Resolviendo:

$$\frac{\pi}{4} ((77 + 2e)^2 - 77^2) = \frac{916 A}{2.84 \frac{A}{mm^2}}$$

Factor de seguridad =2, debido a los cambios bruscos de corriente:

$$e = 9.49 mm \times 2 = 19 mm \approx 2 cm$$

SISTEMA DE REFRIGERACION DEL PORTA ELECTRODOS

El porta electrodo contiene un ducto en forma de espiral por donde circula agua para en enfriamiento, se utilizara agua como refrigerante:

ASUMIMOS:

$$T_{\text{entrada agua}} = 24^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{salida}} = 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{amb}} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{graf 1}} = 500^{\circ}\text{C} \text{ en el \u00e1rea en contacto con el portaelectrodo}$$

$$T_{\text{porta elect}} = 50^{\circ}\text{C} \text{ es la temperatura a la que se desea mantener}$$

Calor disipado en el \u00e1rea en contacto del electrodo con el porta electrodo:

$$\text{Perimetro}_{\text{graf}} = \pi \Phi_{\text{elect}} = \pi(0.077\text{m}) = 0.24 \text{ m}$$

$$T_m = \frac{(500 + 273)\text{K} + (25 + 273)}{2} = 535.5\text{K}$$

Propiedades del aire a 535.5K:

$$\nu = 4.55 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

$$k = 0.0439 \left(\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right)$$

$$Pr = 0.683$$

$$\beta = \frac{1}{535.5\text{K}} = 1.86 \times 10^{-3} (\text{K}^{-1})$$

Determinamos con la Ec. 2.12 el N\u00famero de Grashof:

$$Gr_L = \frac{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \times 1.86 \times 10^{-3} (\text{K}^{-1}) \times (773 \text{ K} - 298 \text{ K}) (0.24 \text{ m})^3}{\left(4.55 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \right)^2} = 56940940.81$$

Con la Ec. 2.14:

$$Ra_L = 38890662.58$$

Con la Ec. 2.15:

$$Nu = 63.12$$

Entonces con la Ec. 2.16:

$$h_{\text{conveccion}} = \frac{(63.12) \times 0.0439 \left(\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right)}{0.24 \text{ m}} = 11.54 \left(\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right)$$

$$Q_{disipado} = \frac{(773 - 298)K}{11.54 \left(\frac{W}{mK}\right) \times 0.24 m} = 1319 W$$

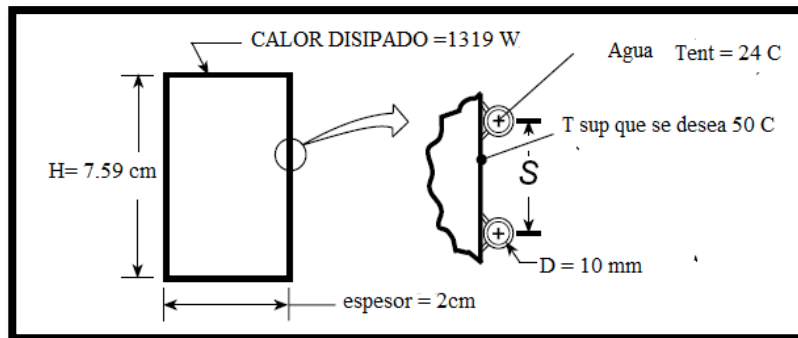


FIGURA. VISTA EN CORTE LATERAL DEL PORTAELECTRODO

PROPIEDADES AGUA $T_m = 302.5 K$

$$\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

$$C_p = 4179 \frac{J}{Kg.K}$$

$$\mu = 85.5 \times 10^{-2} \frac{N.s}{m^2}$$

$$k = 613 \times 10^{-3} \frac{W}{m.K}$$

Flujo Másico:

$$\dot{m} = \frac{Q_{disipado}}{C_p(T_{sal} - T_{ent})}$$

$$\dot{m} = \frac{1319 W}{4179 \frac{J}{Kg.K} (308 K - 297 K)} = 0.028 \frac{kg}{seg}$$

$$Caudal_{agua} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.028 \frac{kg}{seg}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 2.8 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Caudal_{agua} = 1.68 \frac{lt}{min}$$

Área de ductos en Porta electrodos

$$A_{ductos} = 7.85 \times 10^{-5} m^2$$

Velocidad del Agua en los ductos:

$$V_{agua} = \frac{Caudal_{agua}}{A_{ductos}} = \frac{2.8 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{7.85 \times 10^{-5} m^2} = 0.35 \frac{m}{s}$$

Longitud de la espiral del ducto:

Lo determinamos mediante la ecuación:

$$\frac{T_s - T_{sal}}{T_s - T_{ent}} = \exp\left(-\frac{\pi \phi_{ducto} L \times h}{\dot{m} C_p}\right)$$

Determinamos h :

$$Re_D = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} = \frac{4 \left(0.028 \frac{kg}{seg}\right)}{\pi (0.01 m) \times 85.5 \times 10^{-2} \frac{N \cdot s}{m^2}} = 4.16 \text{ Flujo laminar}$$

$Nu = 3.66$ para flujo laminar

$$h = \frac{3.66 \left(613 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K}\right)}{0.01} = 224.35 \left(\frac{W}{mK}\right)$$

Despejando L y reemplazando de la Ec:

$$L = 1.2 m$$

Espaciado Lateral S entre las vueltas:

$$N = \frac{L}{\pi} = \frac{1.2 m}{\pi \times 0.097 m} = 3.93$$
$$S = \frac{H}{N} = \frac{75.9 mm}{3.93} = 19.31 mm$$

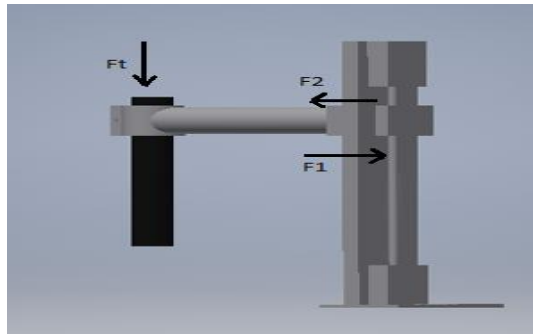
APÉNDICE E

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA DESPLAZAMIENTO DEL ELECTRODO

El sistema está conformado por un carro que se traslada por un tornillo sin fin.

Considerando las longitudes de los electrodos y el espacio permitido para subir la tapa, diseñamos a una altura máxima de 600 mm.

Realizamos sumatorias de fuerzas ejercidas por el soporte sobre las guías y el tornillo sin fin:



$$\sum M = 0$$

$$F_1(x_1) + F_2(x_1) + F_T(x_3) = 0$$

$$F_1 = -\frac{F_T}{2} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)$$

$$F_2 = \frac{F_T}{2} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)$$

La fuerza total está dada por la suma de la fuerza ejercida por peso del electrodo y el peso del portaelectrodo:

$$W_{elect.} = 2210 \frac{kg}{m^3} \times \left(\pi \left(\frac{0.077m}{2} \right)^2 \times 0.5m \right) \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 50.47 N$$

El porta electrodo es de cobre, calculamos su peso:

$$W_{portaelect.} = 8940 \frac{kg}{m^3} \times \left(\pi \left(\frac{0.117}{2} \right)^2 - \left(\frac{0.077}{2} \right)^2 \right) \times 0.075 \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 40.08 N$$

Peso de Barra Acero:

$$W_{barra} = 7850 \frac{kg}{m^3} \times (0.075m \times 0.04m \times 0.4) \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 92.41 N$$

$$W_{total} = 182.96 N$$

$$F_a = -189.96 \left(\frac{0.6 \text{ m}}{0.12 \text{ m}} \right)$$

$$F_a = -949.8 \text{ N}$$

$$F_b = 189.96 \left(\frac{0.6 \text{ m}}{0.12 \text{ m}} \right)$$

$$F_b = 949.8 \text{ N}$$

Obtenemos una carga máxima de 949.8 N

SELECCION DEL TORNILLO SIN FIN

El tornillo de potencia es un tornillo sin fin que se traslada en unos husillos de bolas, el material a utilizar es el Acero AISI 1045.

Para el diagrama de cuerpo libre, asumiremos como una viga horizontal apoyada en sus extremos y analizaremos en el punto más alto que llega el mecanismo.

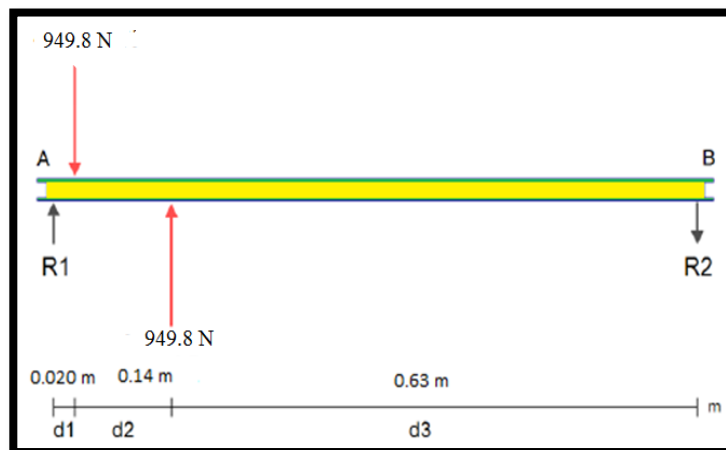


FIGURA. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL TORNILLO SIN FIN

Realizamos los cálculos correspondientes para determinar el valor de las reacciones:

$$\sum M_A = 0$$

$$-(949.8 \text{ N} \times 0.020 \text{ m}) + (949.8 \text{ N} \times 0.14 \text{ m}) - (R_2)(0.63 \text{ m}) = 0$$

$$R_2 = 180.91 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - 949.8 + 949.8 - 180.91 \text{ N} = 0$$

$$R_1 = 180.91 \text{ N}$$

Realizamos las gráficas de fuerzas cortantes y momento flector:

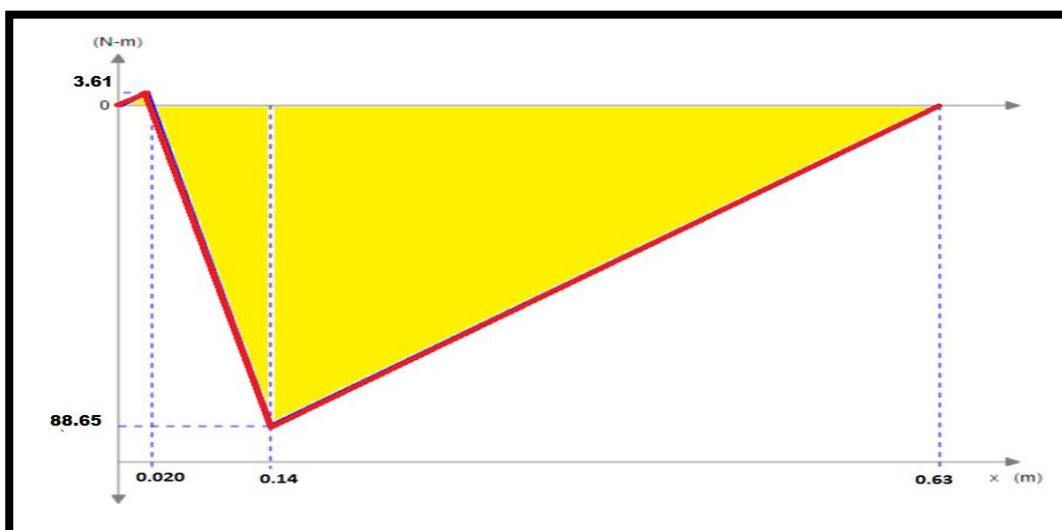


FIGURA. GRAFICA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN LA GUIA

Observamos en la gráfica que el momento flector máximo es 88.65 Nm, con este valor encontramos el módulo de resistencia del material de la guía:

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

Donde:

$$\sigma_{max} = \frac{S_y}{n}$$

De las tablas, encontramos que para el acero AISI-1045 el $S_y = 310 \left(\frac{N}{mm^2} \right)$

$n = \text{Factor de seguridad (1.5 – 2.5)}$

$$\sigma_{max} = \frac{310 \left(\frac{N}{mm^2} \right)}{2}$$

$$\sigma_{max} = 155 \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Entonces con la ecuación, calculamos el módulo de resistencia:

$$S = \frac{88.65 \text{ N.m} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}}{155 \left(\frac{N}{mm^2} \right)}$$

$$S = 571.93 \text{ mm}^3$$

DIÁMETRO DEL TORNILLO

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \times S}{\pi}}$$

$$D = 18 \text{ mm}$$

Seleccionamos un D= 20 mm, debido al diámetro de rodamientos para el tornillo de potencia disponibles en el mercado

PAR DE TORSIÓN PARA EL TORNILLO DE POTENCIA

El torque que se requiere para hacer girar el tornillo para subir la carga es:

$$T_s = \frac{F \cdot dm}{2} \left(\frac{l + \pi \mu \cdot dm}{\pi \cdot dm - \mu l} \right)$$

Donde:

$$dm = D - \frac{p}{2}$$

$p = 2 \text{ mm}$ para $D = 18 \text{ mm}$ (tabla 8.1)

$$dm = 20 \text{ mm} - \frac{2.5}{2} = 18.75 \text{ mm}$$

$\mu = 0.15$ (coeficiente de fricción estándar para HB)

$l = 10 \text{ mm}$ (paso menor para $D = 20 \text{ mm}$)

Reemplazando:

$$T_s = \frac{(949.8 \text{ N})(20 \text{ mm})}{2} \left(\frac{10 \text{ mm} + \pi (0.15)(20 \text{ mm})}{\pi (20 \text{ mm}) - 0.15(10 \text{ mm})} \right)$$

$$T_s = 3008 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

El torque requerido por el tornillo para bajar la carga:

$$T_b = \frac{F \, dm}{2} \left(\frac{\pi \mu \, dm - l}{\pi \, dm + \mu l} \right)$$

$$T_b = \frac{(949.8 \text{ N})(20 \text{ mm})}{2} \left(\frac{\pi (0.15)(20 \text{ mm}) - 10 \text{ mm}}{\pi (20 \text{ mm}) + 0.15(10 \text{ mm})} \right)$$

$$T_b = 84.92 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Escogemos el par de torsión mayor que es $3008 \text{ N} \cdot \text{mm}$, este torque permitirá subir y bajar los componentes que sostienen al electrodo. Las unidades de torque para seleccionar el motor paso a paso son $\text{Oz} \cdot \text{in}$, entonces:

$$T_s = 3008 \text{ N} \cdot \text{mm} \times \frac{1 \text{ Kg}}{9.8 \text{ N}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} \times \frac{16 \text{ Oz}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} = 425 \text{ Oz} \cdot \text{in}$$

En Anexos se muestra el motor paso a paso seleccionado y se explica el funcionamiento

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Rodamientos para el Tornillo de Potencia

Como ya se determinó el tornillo de potencia tiene un diámetro de 18 mm y soportan una fuerza de 949.8 N.

Mediantes estos parámetros se seleccionaran los rodamientos.

Para carga estática:

$$S_o = \frac{C_{or}}{P_o}$$

$$P_o = \text{Carga maxima aplicada} = 949.8 \text{ N}$$

$$S_o = 3$$

Factor de seguridad para rodamientos de bolas con carga estatica sometidos a cargas de choque (catalogos NTN)

$$C_{or} = P_o \times S_o$$

$$C_{or} = 949.8 \text{ N} \times 3 = 2849.4 \text{ N}$$

Para carga dinámica:

$$C = P \left(\frac{60 \times n \times L_h}{10^6} \right)^{1/p}$$

$$P = 949.8 \text{ N}$$

$$n = 10 \text{ RPM}$$

Vida nominal

$$L = L_h \times 2 \times S \times n_s \times 60$$

L_h = Vida nominal para máquinas para servicio de 8 horas, que no siempre se usan completamente, por tablas:

$$L_h = 12000$$

$p = 3$ Exponente de ecuacion de vida para rodamiento de bolas. (Catalogo SKF)

Reemplazando:

$$C = 949.8 \text{ N} \left(\frac{60 \times (10 \text{ RPM}) \times 12000}{10^6} \right)^{1/3}$$

$$C = 851.28 \text{ N}$$

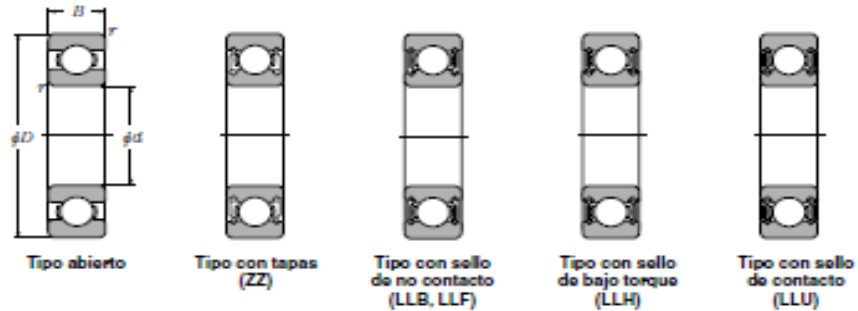
Con los valores de carga estática y dinámica encontrados y con el diámetro de 20 mm del tornillo, seleccionamos con el catalogo NTN (Apéndice) rodamientos rígidos de bolas tipo abierto 6804

APÉNDICE F

Selección de Rodamientos para el Tornillo Sin Fin del porta electrodo

Catalogo NTN

Rodamientos Rígidos de Bolas



d 10 ~ 20mm

d	Dimensiones principales				Capacidades básicas de carga				Factor f_p	Velocidades límites				Número de rodamientos				
	mm		$r_{max}^{(1)}$		kN		kgf			r.p.m.		r.p.m.		tipo abierto	con tapas	con sello de no contacto	con sello de bajo torque	con sello de contacto
	D	B	0.1	0.3	C_r	C_{or}	C_r	C_{or}		grasa tipo abierto ZZ	aceite tipo abierto LLB	Z LB	LLH					
10	15	3	0.1	—	0.855	0.435	87	44	15.7	10 000	12 000	—	—	6700	—	—	—	—
	19	5	0.3	—	1.83	0.925	187	94	14.8	32 000	38 000	—	24 000	6800	ZZ	LLB	—	LLU
	22	6	0.3	0.3	2.7	1.27	275	129	14.0	30 000	36 000	—	21 000	6900	ZZ	LLB	—	LLU
	26	8	0.3	—	4.55	1.96	465	200	12.4	29 000	34 000	25 000	21 000	6000	ZZ	LLB	LLH	LLU
	30	9	0.6	0.5	5.10	2.39	520	244	13.2	25 000	30 000	21 000	18 000	6200	ZZ	LLB	LLH	LLU
35	11	0.6	0.5	8.20	3.50	835	355	11.4	23 000	27 000	20 000	16 000	6300	ZZ	LLB	LLH	LLU	
12	18	4	0.2	—	0.930	0.530	95	54	16.2	8 300	9 500	—	—	6701	—	LLF	—	—
	21	5	0.3	—	1.92	1.04	195	106	15.3	29 000	35 000	—	20 000	6801	ZZ	LLB	—	LLU
	24	6	0.3	0.3	2.89	1.46	295	149	14.5	27 000	32 000	—	19 000	6901	ZZ	LLB	—	LLU
	28	7	0.3	—	5.10	2.39	520	244	13.2	26 000	30 000	—	—	16001	—	—	—	—
	28	8	0.3	—	5.10	2.39	520	244	13.2	26 000	30 000	21 000	18 000	6001	ZZ	LLB	LLH	LLU
	32	10	0.6	0.5	6.10	2.75	620	280	12.7	22 000	26 000	20 000	16 000	6201	ZZ	LLB	LLH	LLU
37	12	1	0.5	9.70	4.20	990	425	11.1	20 000	24 000	19 000	15 000	6301	ZZ	LLB	LLH	LLU	
15	21	4	0.2	—	0.940	0.585	96	59	16.5	6 600	7 600	—	—	6702	—	LLF	—	—
	24	5	0.3	—	2.08	1.26	212	128	15.8	26 000	31 000	—	17 000	6802	ZZ	LLB	—	LLU
	28	7	0.3	0.3	3.65	2.00	375	204	14.8	24 000	28 000	—	16 000	6902	ZZ	LLB	—	LLU
	32	8	0.3	—	5.60	2.83	570	289	13.9	22 000	26 000	—	—	16002	—	—	—	—
	32	9	0.3	0.3	5.60	2.83	570	289	13.9	22 000	26 000	18 000	15 000	6002	ZZ	LLB	LLH	LLU
	35	11	0.6	0.5	7.75	3.60	790	365	12.7	19 000	23 000	18 000	15 000	6202	ZZ	LLB	LLH	LLU
42	13	1	0.5	11.4	5.45	1 170	555	12.3	17 000	21 000	15 000	12 000	6302	ZZ	LLB	LLH	LLU	
17	23	4	0.2	—	1.00	0.660	102	67	16.3	5 000	6 700	—	—	6703	—	LLF	—	—
	26	5	0.3	—	2.23	1.46	227	149	16.1	24 000	28 000	—	15 000	6803	ZZ	LLB	—	LLU
	30	7	0.3	0.3	4.65	2.58	475	263	14.7	22 000	26 000	—	14 000	6903	ZZ	LLB	—	LLU
	35	8	0.3	—	6.80	3.35	695	345	13.6	20 000	24 000	—	—	16003	—	—	—	—
	35	10	0.3	0.3	6.80	3.35	695	345	13.6	20 000	24 000	16 000	14 000	6003	ZZ	LLB	LLH	LLU
	40	12	0.6	0.5	9.60	4.60	980	465	12.8	18 000	21 000	15 000	12 000	6203	ZZ	LLB	LLH	LLU
	47	14	1	0.5	13.5	6.55	1 380	685	12.2	16 000	19 000	14 000	11 000	6303	ZZ	LLB	LLH	LLU
62	17	1.1	—	22.7	10.8	2 320	1 100	11.1	14 000	16 000	—	—	6403	—	—	—	—	
20	27	4	0.2	—	1.04	0.730	106	74	16.1	5 000	5 700	—	—	6704	—	LLF	—	—
	32	7	0.3	0.3	4.00	2.47	410	252	15.5	21 000	25 000	—	13 000	6804	ZZ	LLB	—	LLU
	37	9	0.3	0.3	6.40	3.70	660	375	14.7	19 000	23 000	—	12 000	6904	ZZ	LLB	—	LLU
	42	8	0.3	—	7.90	4.50	810	455	14.5	18 000	21 000	—	—	16004	—	—	—	—
	42	12	0.6	0.5	9.40	5.05	955	515	13.9	18 000	21 000	13 000	11 000	6004	ZZ	LLB	LLH	LLU
	47	14	1	0.5	12.8	6.65	1 310	680	13.2	16 000	18 000	12 000	10 000	6204	ZZ	LLB	LLH	LLU
52	15	1.1	0.5	15.9	7.90	1 620	805	12.4	14 000	17 000	12 000	10 000	6304	ZZ	LLB	LLH	LLU	

1) Dimensión mínima permitida para el chaflán r.

APÉNDICE G

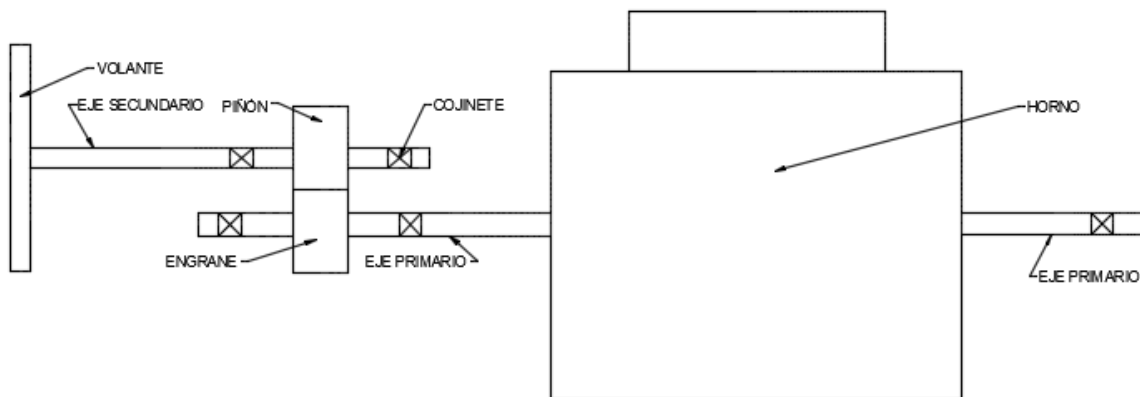
CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE BASCULAMIENTO

DISEÑO DE SISTEMA DE MOVIMIENTO BASCULANTE

DISEÑO DE EJES

Para el diseño de los ejes, consideramos los siguientes parámetros:

- La línea de acción de los ejes que soportan el peso del horno, pasa por el centro de gravedad del mismo para minimizar la fuerza de torsión ejercida por la persona.



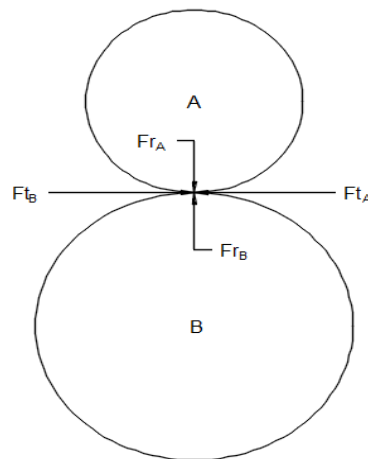
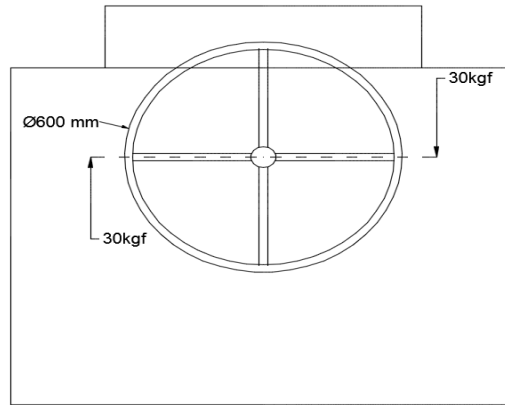
DISEÑO DE EJE SECUNDARIO

Para diseñar el eje secundario se debe considerar los siguientes parámetros:

- Las fuerzas que actúan sobre el eje secundario son, la fuerza de reacción del piñón y la fuerza resultante del torque ejercido por la persona.
- El diámetro del volante no puede ser muy grande, debido a que el horno será basculado por una persona y esta no podría abrir demasiado los brazos.
- La fuerza necesaria para realizar el torque no debe ser excesiva.
- Material de diseño acero AISI 1020 extruido en frío.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y por inspección de hornos con dimensiones similares se asumió que el volante tiene un diámetro de 600mm y la fuerza promedio que una persona realiza en el volante es de 30kgf en cada mano, parámetros que permiten un fácil manejo del sistema de basculación. Además se conoce los siguientes parámetros del material:

- $S_y = 393 \text{ MPa}$
- $S_{ut} = 469 \text{ MPa}$
- $E = 207 \text{ GPa}$



Realizando los cálculos respectivos determinamos las fuerzas resultantes en el piñón y el engrane

TORQUE MAXIMO REALIZADO EN EL VOLANTE

$$T = 2F r$$

$$T = 2(300N)(0.3m)$$

$$T = 180Nm$$

FUERZAS EN LOS ENGRANES

Para determinar las fuerzas tangenciales del tren de engranes, seleccionamos los diámetros estándares de ambos y el ángulo de presión:

- Piñón ($D_A = 4\frac{3}{8} \text{ in} = 0.11 \text{ m}$)
- Engrane ($D_B = 6\frac{7}{8} \text{ in} = 0.17 \text{ m}$)

FUERZAS TANGENCIALES

$$F_{tA} = F_{tB} = \frac{T}{\left(\frac{D}{2}\right)}$$

$$F_{tA} = F_{tB} = \frac{180Nm}{\left(\frac{0.11 \text{ m}}{2}\right)} = 3273 \text{ N}$$

FUERZAS RADIALES

$$F_{rA} = F_{rB} = F_{tA} \tan \theta$$

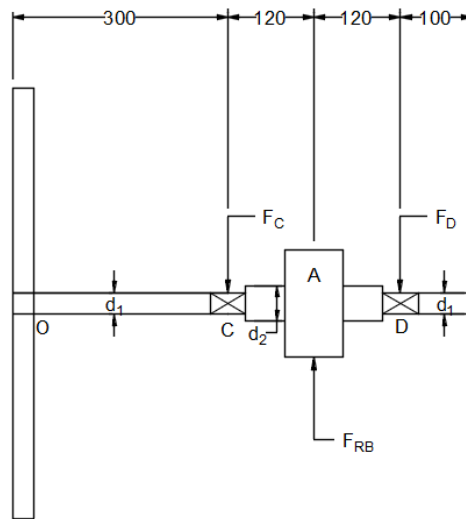
$$F_{rA} = F_{rB} = 3273N(\tan 20^\circ) = 1191.3N$$

FUERZAS RESULTANTES

$$F_{RA} = F_{RB} = \sqrt{F_{tA}^2 + F_{rA}^2}$$

$$F_{RA} = F_{RB} = \sqrt{(3273N)^2 + (1191.3N)^2} = 3483.1N$$

FUERZAS QUE ACTUAN EN EL EJE



$$\sum M_C = 0$$

$$-F_{RB}(0.12m) + F_D(0.24m) = 0$$

$$F_D = \frac{3483.1N(0.12m)}{0.24m} = 1741.55N$$

$$\sum F = 0$$

$$-F_C + F_{RB} - F_D = 0$$

$$F_C = 3483.1 - 1741.55N = 1741.55N$$

DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR

$$\begin{cases} V = 0 \\ M = 0 \end{cases}$$

Para (0

$$\leq X \leq 0.3)m$$

$$\begin{cases} V = -1741.55N \\ M = -1741.55(X - 0.3) \end{cases}$$

Para (0.3

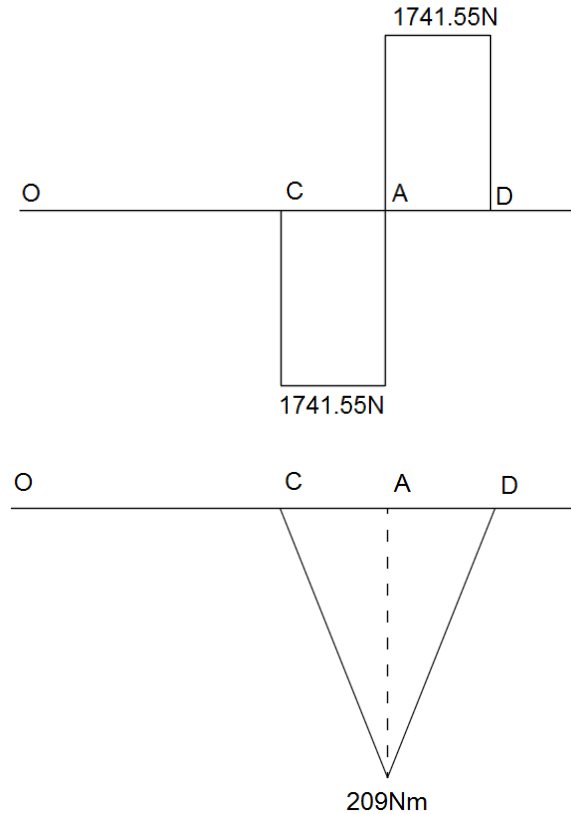
$$\leq X \leq 0.42)m$$

$$\begin{cases} V = 1741.55N \\ M = -1741.55(X - 0.3) + 3483.1N(X - 0.42) \end{cases}$$

Para (0.42

$$\leq X \leq 0.54)m$$

$$\begin{cases} V = 0 \\ M = -1741.55N(X - 0.3) + 3483.1N(X - 0.42) - 1741.55N(X - 0.54) \end{cases} \text{ Para } (0.54 \leq X \leq 0.64)m$$



De acuerdo a la norma ANSI/ASME para el diseño de flechas de transmisión, identificada como B106. 1M - 1985

$$d = \left[\frac{32n}{\pi} * \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fs} \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{3}}$$

n	AGMA recomienda factores de seguridad en el rango de 2 a 3, por lo tanto asumiremos un factor de seguridad $n = 2.5$
$S'_e = 0.5S_{ut}$	$S'_e = 0.5(469 * 10^6) = 234.5 * 10^6 \text{ Pa}$
C_{carga}	Como la carga es a flexión y torsión, $C_{carga} = 1$
$C_{tamaño}$	Como no conocemos el tamaño de la pieza asumiremos que $C_{tamaño} = 1$
$C_{superficie}$	$C_{superficie} = 4.51(469)^{-0.265} = 0.88$
$C_{temperatura}$	Para valores de temperatura $T \leq 460 \text{ }^\circ\text{C}$, $C_{temperatura} = 1$

$C_{confiabilidad}$	Para una confiabilidad del 50%, $C_{confiabilidad} = 1$
q	Asumiendo un $r = 0.01in$, $q = 0.5$
D/d	En vista que no conocemos las dimensiones de los ejes, asumimos un valor de $D/d = 1.2$
K_t	AGMA recomienda valores de 2 a 3, por lo tanto asumiremos que $K_{t\ flexion} = 3$ y $K_{t\ torsion} = 2$, ya que $K_{t\ torsion} < K_{t\ flexion}$
K_f	$K_f = 1 + 0.5(3 - 1) = 2$
K_{fs}	$K_{fs} = 1 + 0.5(2 - 1) = 1.5$
S_e	$S_e = C_{carga}C_{tamaño}C_{superficie}C_{temperatura}C_{confiabilidad}S'_e$ $S_e(1)(1)(0.88)(1)(1)(234.5 * 10^6) = 206.36 * 10^6 Pa$

$$d_2 = \left[\frac{32(2.5)}{\pi} * \left[\left(\frac{(2)(209)}{206.36 * 10^6} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{(1.5)(180)}{393 * 10^6} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_2 = 0.03774 m \approx 38 mm$$

$$D/d = 1.2$$

$$d_1 = \frac{38}{1.2} = 31.66 \approx 32 mm$$

DISEÑO DE EJES PRIMARIOS

Para diseñar los ejes secundarios se debe considerar los siguientes parámetros:

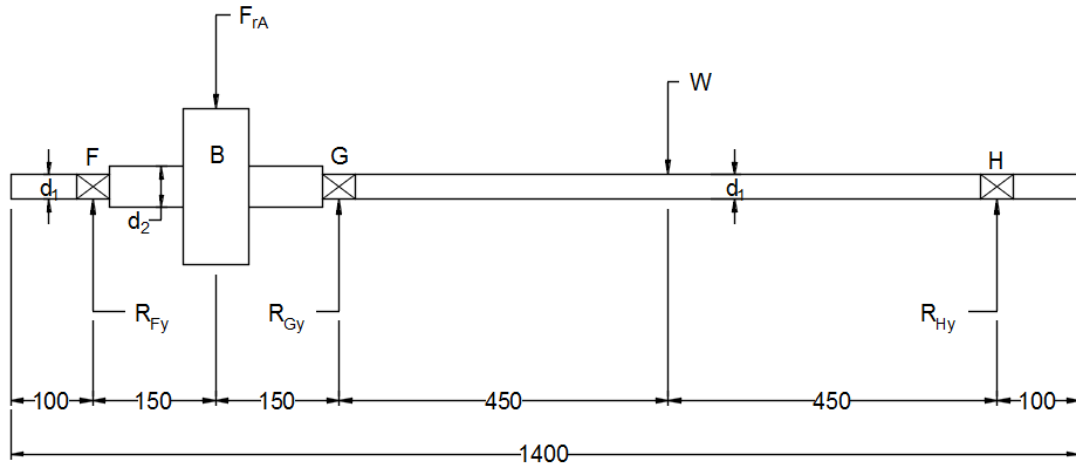
- Como los ejes secundarios son coloniales, para fines analíticos, se asumirá que se trata de un solo eje
- Material de diseño AISI 1020 extruido en frio.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, podemos decir que, el eje es estáticamente indeterminado, debido a la fuerza que el engrane ejerce sobre el eje y el peso del horno son conocidas, mientras que las fuerzas ejercidas sobre el eje en los puntos "F", "G" y "H" son desconocidas, por lo tanto se utilizará el Método de Superposición para encontrar las reacciones en los apoyos. Además se conocen los siguientes parámetros del material:

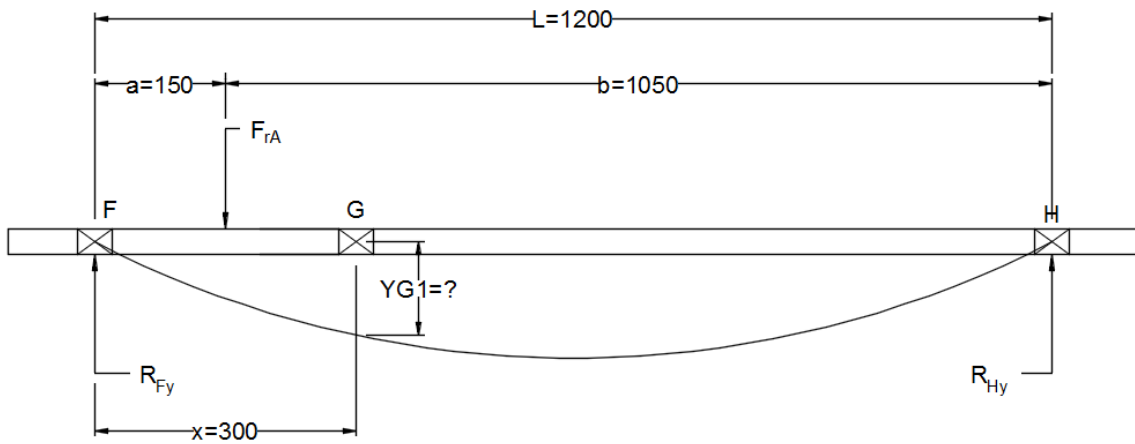
- $S_y = 393 MPa$
- $S_{ut} = 469 MPa$

- $E = 207 \text{ GPa}$

FUERZAS APLICADAS AL EJE EN EL PLANO "Y"



Caso uno

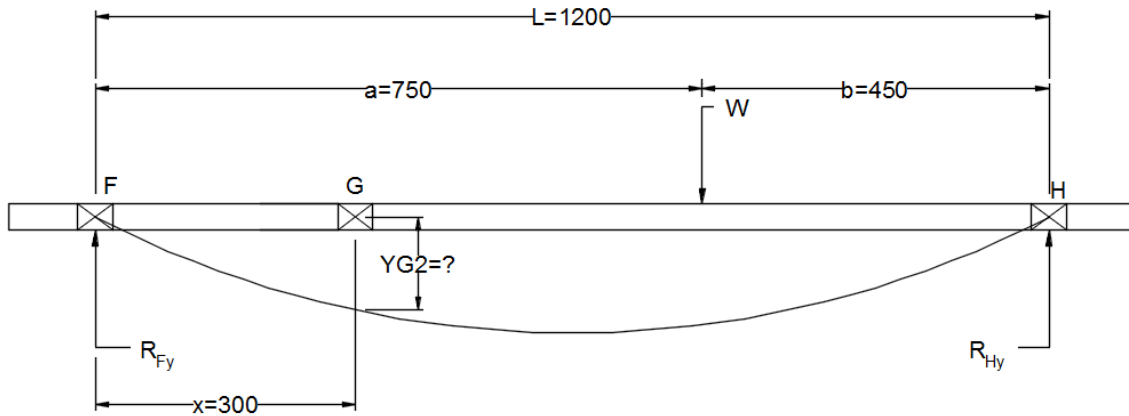


$$Y_{G1} = \frac{F_{rA}bx}{6EIL}(x^2 + b^2 - L^2)$$

$$Y_{G1} = \frac{(1191.3\text{N})(1.05\text{m})(0.3\text{m})}{6(1.2\text{m})EI}((0.3\text{m})^2 + (1.05)^2 - (1.2)^2)$$

$$Y_{G1} = -\frac{12.90 \text{ m}}{EI}$$

Caso dos

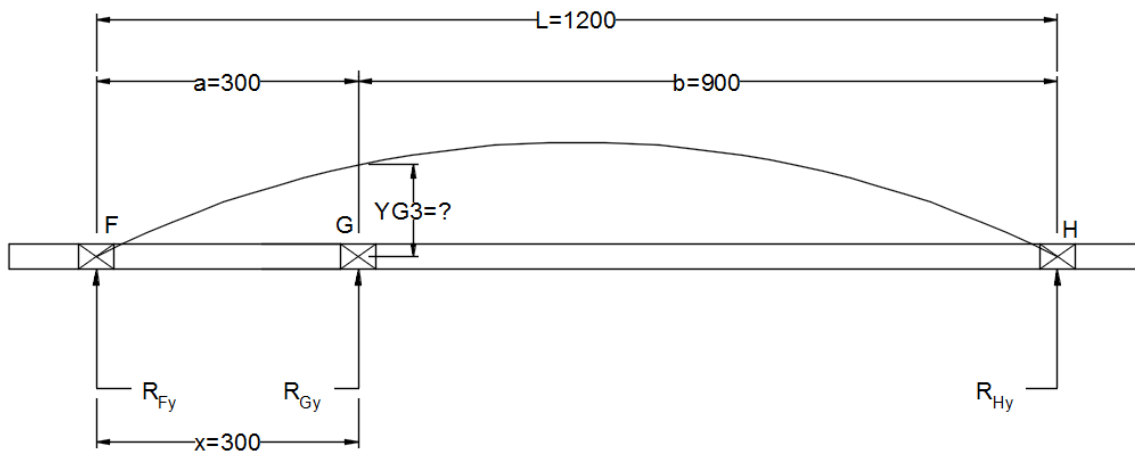


$$Y_{G2} = \frac{Wbx}{6EIL}(x^2 + b^2 - L^2)$$

$$Y_{G2} = \frac{(4546.35N)(0.45m)(0.3m)}{6(1.2m)EI}((0.3m)^2 + (0.45)^2 - (1.2)^2)$$

$$Y_{G2} = -\frac{97.82 \text{ m}}{EI}$$

Caso tres



$$Y_{G3} = \frac{R_{Gy}a^2b^2}{3EIL}$$

$$Y_{G3} = \frac{R_{Gy}(0.3m)^2(0.9m)^2}{3(1.2m)EI}$$

$$Y_{G3} = \frac{0.02025R_{Gy}}{EI}$$

REACCION EN EL APOYO "RGy"

$$\begin{aligned}\sum Y_G &= 0 \\ Y_{G1} + Y_{G2} + Y_{G3} &= 0 \\ -\frac{12.90 \text{ m}}{EI} - \frac{97.82 \text{ m}}{EI} + \frac{0.02025 R_{Gy}}{EI} &= 0 \\ R_{Gy} &= 5467.65 \text{ N}\end{aligned}$$

REACCIONES EN LOS APOYOS "RFy" Y "RHy"

$$\begin{aligned}\sum M_F &= 0 \\ 1191.3 \text{ N}(0.15 \text{ m}) - 5467.65 \text{ N}(0.3 \text{ m}) + 4546.35 \text{ N}(0.75 \text{ m}) - R_{Hy}(1.2 \text{ m}) &= 0 \\ R_{Hy} &= \frac{1948.16 \text{ Nm}}{1.2 \text{ m}} = 1623.46 \text{ N} \\ \sum F_y &= 0 \\ R_{Fy} - 1191.3 + 5467.65 \text{ N} - 4546.35 \text{ N} + 1623.46 \text{ N} &= 0 \\ R_{Fy} &= -1353.46 \text{ N}\end{aligned}$$

DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN PLANO "Y"

$$\begin{cases} V = 0 \\ M = 0 \end{cases} \quad \text{Para } (0 \leq X \leq 0.1) \text{ m}$$

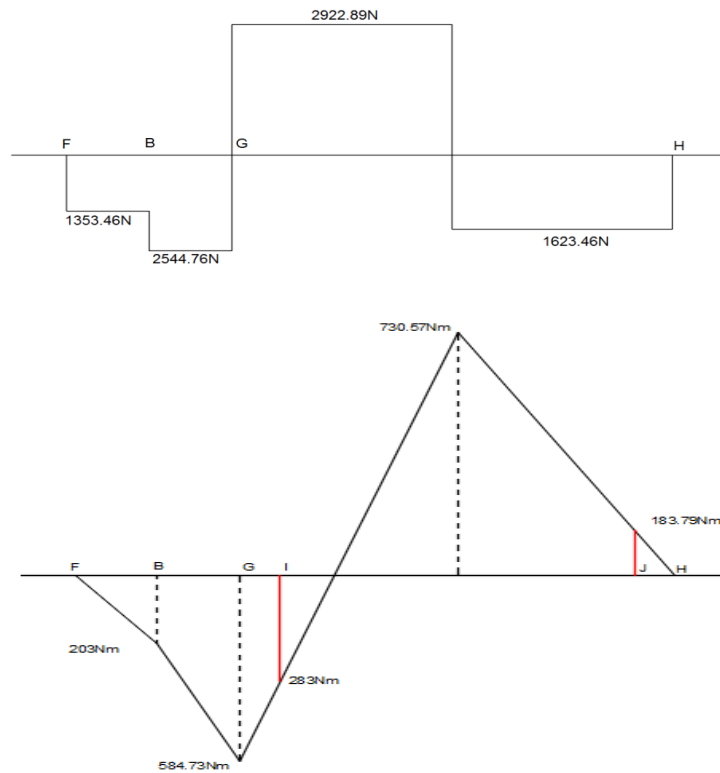
$$\begin{cases} V = -1353.46 \text{ N} \\ M = -1353.46 \text{ N}(X - 0.1) \end{cases} \quad \text{Para } (0.1 \leq X \leq 0.25) \text{ m}$$

$$\begin{cases} V = -2544.76 \text{ N} \\ M = -1353.46 \text{ N}(X - 0.1) - 1191.3 \text{ N}(X - 0.25) \end{cases} \quad \text{Para } (0.25 \leq X \leq 0.4) \text{ m}$$

$$\begin{cases} V = 2922.89 \text{ N} \\ M = -1353.46 \text{ N}(X - 0.1) - 1191.3 \text{ N}(X - 0.25) + 5467.65 \text{ N}(X - 0.4) \end{cases} \quad \text{Para } (0.4 \leq X \leq 0.85) \text{ m}$$

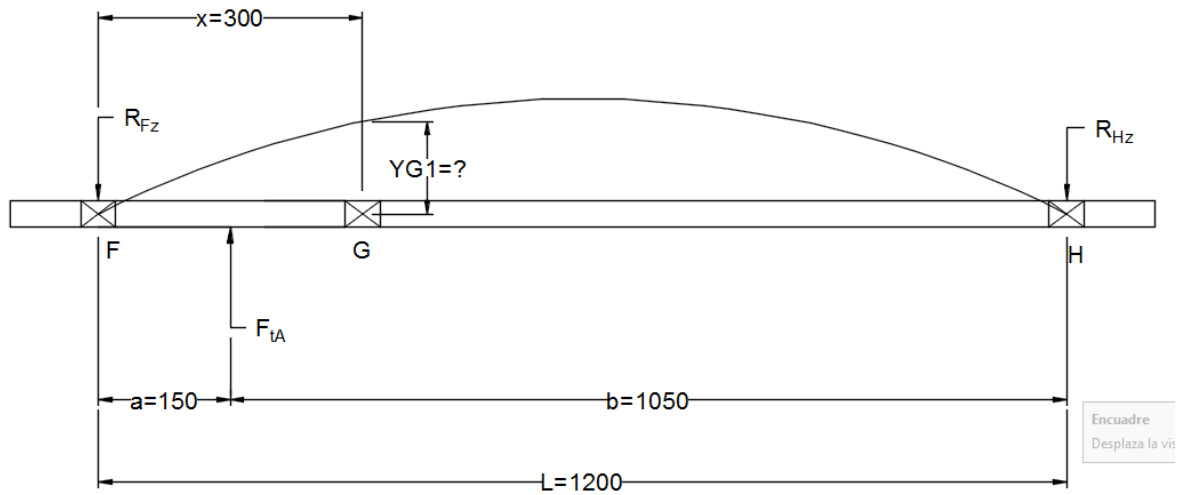
$$\begin{cases} V = -1623.46 \text{ N} \\ M = -1353.46 \text{ N}(X - 0.1) - 1191.3 \text{ N}(X - 0.25) + 5467.65 \text{ N}(X - 0.4) - 4546.35 \text{ N}(X - 0.85) \end{cases} \quad \text{Para } (0.85 \leq X \leq 1.3) \text{ m}$$

$$\begin{cases} V = 0 \\ M = -1353.46 \text{ N}(X - 0.1) - 1191.3 \text{ N}(X - 0.25) + 5467.65 \text{ N}(X - 0.4) - 4546.35 \text{ N}(X - 0.85) + 1623.46 \text{ N}(X - 1.3) \end{cases} \quad \text{Para } (1.3 \leq X \leq 1.4) \text{ m}$$



FUERZAS APLICADAS AL EJE EN EL PLANO "Z"

Caso uno

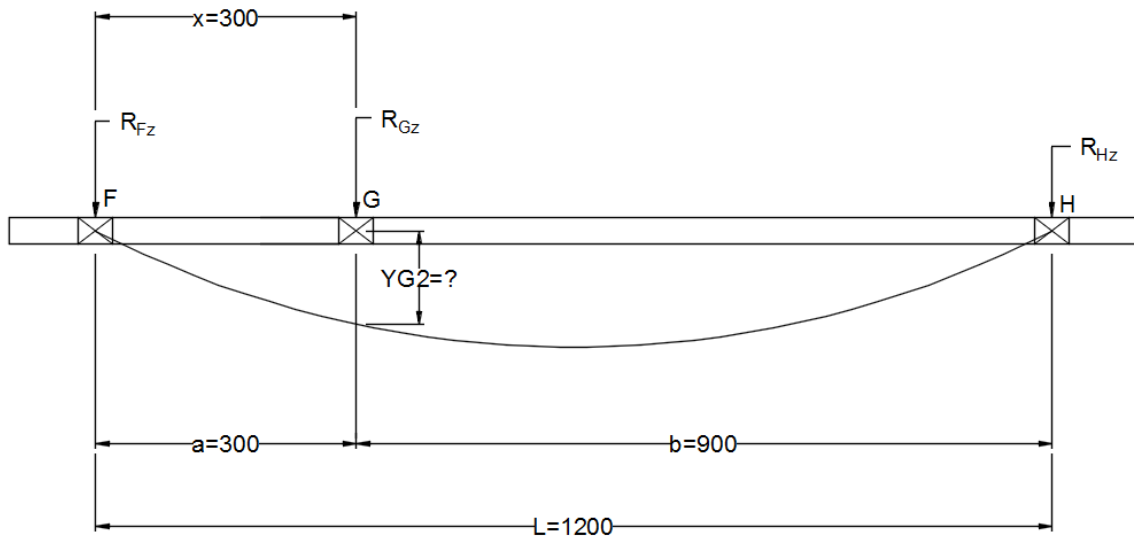


$$Y_{G1} = -\frac{F_{tA}bx}{6EIL}(x^2 + b^2 - L^2)$$

$$Y_{G1} = -\frac{(3273N)(1.05m)(0.3m)}{6(1.2m)EI}((0.3m)^2 + (1.05)^2 - (1.2)^2)$$

$$Y_{G1} = \frac{35.44m}{EI}$$

Caso dos



$$Y_{G3} = -\frac{R_{Gz}a^2b^2}{3EI}$$

$$Y_{G3} = -\frac{R_{Gz}(0.3m)^2(0.9m)^2}{3(1.2m)EI}$$

$$Y_{G3} = -\frac{0.02025R_{Gz}}{EI}$$

REACCION EN EL APOYO "R_{Gz}"

$$\sum Y_G = 0$$

$$Y_{G1} + Y_{G2} = 0$$

$$\frac{35.44m}{EI} - \frac{0.0231R_{Gz}}{EI} = 0$$

$$R_{Gz} = 1750.12N$$

REACCIONES EN LOS APOYOS "R_{Fz}" Y "R_{HZ}"

$$\sum M_F = 0$$

$$-3273N(0.15m) + 1750.12N(0.3m) + R_{Hz}(1.2m) = 0$$

$$R_{Hz} = -\frac{34.05Nm}{1.2m} = -28.375N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_{Fz} + 3273N - 1750.12N - (-28.375N) = 0$$

$$R_{Fz} = 1551.375N$$

DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN PLANO "Z"

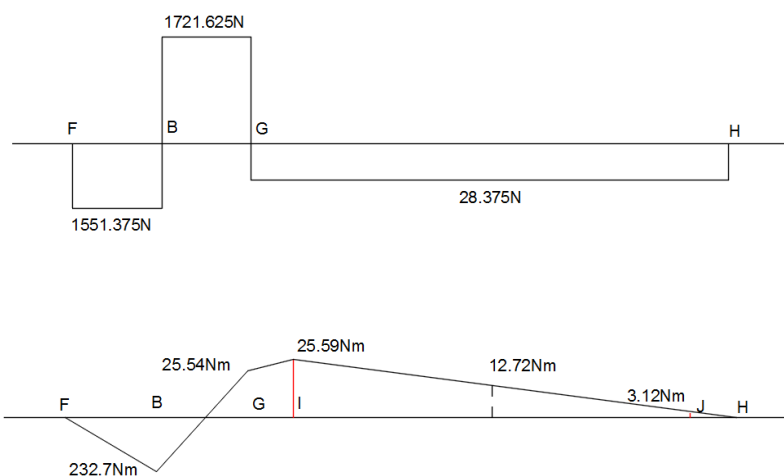
$$\begin{cases} V = 0 \\ M = 0 \end{cases} \quad \text{Para } (0 \leq X \leq 0.1)m$$

$$\begin{cases} V = -1551.375N \\ M = -1551.375N(X - 0.1) \end{cases} \quad \text{Para } (0.1 \leq X \leq 0.25)m$$

$$\begin{cases} V = 1721.625N \\ M = -1551.375N(X - 0.1) + 3273N(X - 0.25) \end{cases} \quad \text{Para } (0.25 \leq X \leq 0.4)m$$

$$\begin{cases} V = -28.375N \\ M = -1551.375N(X - 0.1) + 3273N(X - 0.25) - 1750.12N(X - 0.4) \end{cases} \quad \text{Para } (0.4 \leq X \leq 1.3)m$$

$$\begin{cases} V = 0 \\ M = -1551.375N(X - 0.1) + 3273N(X - 0.25) - 1750.12N(X - 0.4) + 28.375N(X - 1.4) \end{cases} \quad \text{Para } (1.3 \leq X \leq 1.5)m$$



$$M_{max} = \sqrt{M_{Gy}^2 + M_{Gz}^2}$$

$$M_{max} = \sqrt{(730.57)^2 + (12.72)^2}$$

$$M_{max} = 730.68Nm$$

De acuerdo a la norma ANSI/ASME para el diseño de flechas de transmisión, identificada como B106. 1M - 1985

$$d = \left[\frac{32n}{\pi} * \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fs} \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{3}}$$

n	AGMA recomienda factores de seguridad en el rango de 2 a 3, por lo tanto asumiremos un factor de seguridad $n = 2.5$
$S'_e = 0.5S_{ut}$	$S'_e = 0.5(469 * 10^6) = 234.5 * 10^6 \text{ Pa}$
C_{carga}	Como la carga es a flexión y torsión, $C_{carga} = 1$
$C_{tamaño}$	Como no conocemos el tamaño de la pieza asumiremos que $C_{tamaño} = 1$
$C_{superficie}$	$C_{superficie} = 4.51(469)^{-0.265} = 0.88$
$C_{temperatura}$	Para valores de temperatura $T \leq 460 \text{ }^\circ\text{C}$, $C_{temperatura} = 1$
$C_{confiabilidad}$	Para una confiabilidad del 50%, $C_{confiabilidad} = 1$
q	Asumiendo un $r = 0.01 \text{ in}$, $q = 0.5$
D/d	En vista que no conocemos las dimensiones de los ejes, asumimos un valor de $D/d = 1.2$
K_t	AGMA recomienda valores de 2 a 3, por lo tanto asumiremos que $K_{t \text{ flexion}} = 3$ y $K_{t \text{ torsion}} = 2$, ya que $K_{t \text{ torsion}} < K_{t \text{ flexion}}$
K_f	$K_f = 1 + 0.5(3 - 1) = 2$
K_{fs}	$K_{fs} = 1 + 0.5(2 - 1) = 1.5$
S_e	$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S'_e$ $S_e(1)(1)(0.88)(1)(1)(234.5 * 10^6) = 206.36 * 10^6 \text{ Pa}$

$$d_1 = \left[\frac{32(2.5)}{\pi} * \left[\left(\frac{(2)(730.68)}{206.36 * 10^6} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{(1.5)(285.77)}{393 * 10^6} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{3}}$$

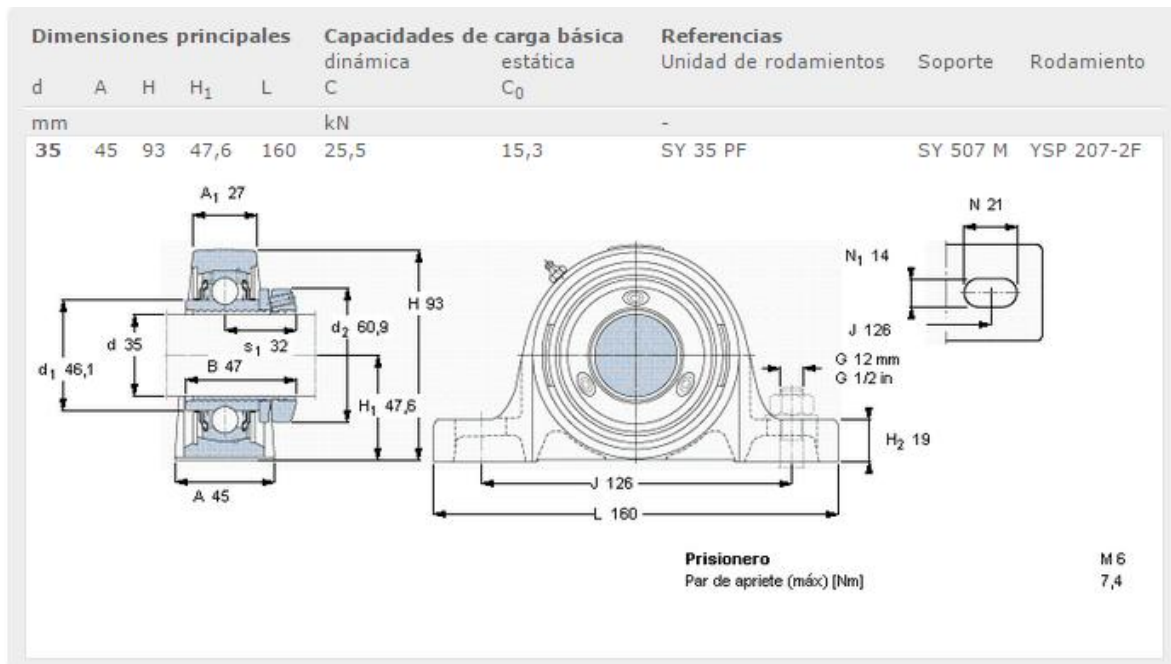
$$d_1 = 0.05666 \text{ m} \approx 60 \text{ mm}$$

$$D/d = 1.2$$

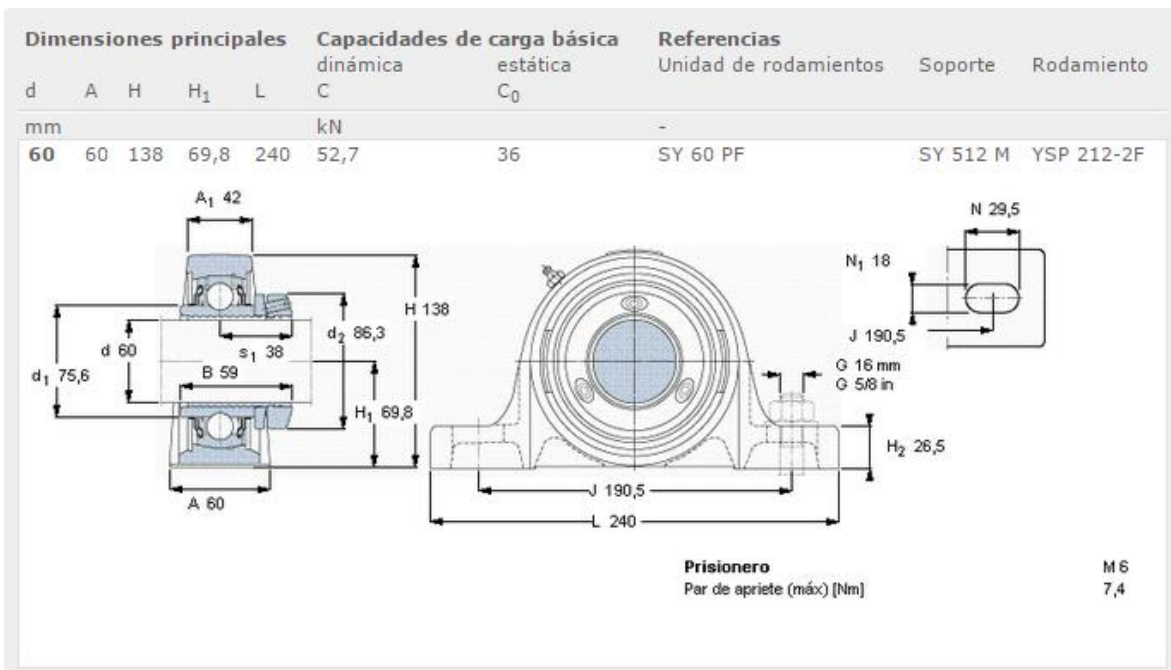
$$d_2 = (60)(1.2) = 72 \text{ mm}$$

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Para el eje secundario seleccionamos el siguiente soporte de pie con rodamiento



Para el eje primario uno y dos, seleccionamos el siguiente soporte de pie con rodamiento.















DISEÑO DE ENGRANES.

En el diseño de ejes, se seleccionó los diámetros primitivos de los engranes para analizar las fuerzas sobre los ejes, por lo tanto nuestros diámetros primitivos inicialmente son:

- Diámetro de Piñón ($D_A = 111.125 \text{ mm} = 4.375 \text{ in} = 4\frac{3}{8} \text{ in}$)
- Diámetro de Engrane ($D_B = 174.625 \text{ mm} = 6.875 \text{ in} = 6\frac{7}{8}$)

Además conocemos otros datos iniciales como el ángulo de presión de los dientes ($\phi = 20^\circ$), la velocidad de rotación máxima ejercida por el hombre o la velocidad máxima de rotación del piñón debe ser menor a un rpm ($n_A \leq 1 \text{ rpm}$) y el paso diametral ($P_d = 8$), el cual seleccionamos.

Tamaño de diente	Pitch	Tamaño de diente	Pitch
	40		8
	32		6
	24		5
	20		4
	16		3
	12		
	10		

NUMERO DE DIENTES:

Piñón:

$$D_A = \frac{N_A}{P_d}$$

$$N_A = 4.375(8) = 35$$

Engrane:

$$D_B = \frac{N_B}{P_d}$$

$$N_B = 6.875(8) = 55$$

TREN DE ENGRANES:

Usando las ecuaciones para tren de engranes determinamos la velocidad de rotación en el engrane.

$$TV = \frac{N_B}{N_A}$$

$$TV = \frac{55}{35} = 1.57 \text{ rpm}$$

$$n_B = \frac{n_A}{TV}$$

$$n_B = \frac{1}{1.57} = 0.64 \text{ rpm}$$

PASO CIRCULAR:

$$p = \frac{\pi}{P_d} = \frac{\pi}{8} = 0.39 \text{ in}$$

TAMAÑO DE CABEZA:

$$a = \frac{1}{P_d} = \frac{1}{8} = 0.125 \text{ in}$$

TAMAÑO DE RAÍZ:

$$b = \frac{1.25}{P_d} = \frac{1.25}{8} = 0.16 \text{ in}$$

PROFUNDIDAD TOTAL:

$$h_t = a + b = 0.125 + 0.16 = 0.285 \text{ in}$$

PROFUNDIDAD DE TRABAJO

$$h_K = 2(a) = 2(0.125) = 0.25 \text{ in}$$

ESPESOR DE LOS DIENTES:

$$t = \frac{p}{2} = \frac{0.39}{2} = 0.195 \text{ in}$$

DIÁMETRO EXTERIOR:

- Piñón:

$$D_o = D_A + 2a$$

$$D_o = 4.375 + 0.25 = 4.625 \text{ in}$$

- Engrane:

$$D_o = D_B + 2a$$

$$D_o = 6.875 + 0.25 = 7.125 \text{ in}$$

DISTANCIA CENTRAL ENTRE AMBOS:

$$C = \frac{N_A + N_B}{2 * P_d}$$

$$C = \frac{35 + 55}{2(8)} = 5.625 \text{ in}$$

ESFUERZOS POR FLEXIÓN AGMA:

Usando la ecuación del esfuerzo de flexión de AGMA, determinaremos el material del piñón y engranes, al comprar los esfuerzos.

$$\sigma_{at} = \frac{w_t p_d K_a K_s K_m K_B K_I}{F J K_v}$$

$$\sigma_{at} < S_{at}$$

FACTOR DE GEOMETRICO:

Usando la gráfica podemos determinar el factor de forma del piñón y del engrane.

Factor geométrico J para flexión de la AGMA, para 20°, y dientes de profundidad total con carga del HPSTC																	
Dientes en el engrane	Dientes en el piñón																
	12		14		17		21		26		35		55		135		
	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	
12	U	U															
14	U	U	U	U													
17	U	U	U	U	U	U											
21	U	U	U	U	U	U	0.33	0.33									
26	U	U	U	U	U	U	0.33	0.35	0.35	0.35							
35	U	U	U	U	U	U	0.34	0.37	0.36	0.38	0.39	0.39					
55	U	U	U	U	U	U	0.34	0.40	0.37	0.41	0.40	0.42	0.43	0.43			
135	U	U	U	U	U	U	0.35	0.43	0.38	0.44	0.41	0.45	0.45	0.47	0.49	0.49	

- Piñón $J_A = 0.40$
- Engrane $J_B = 0.42$

FACTOR DE APLICACIÓN:

Dado que la fuente de poder, para mover el sistema es el hombre y el tiempo de cada movimiento de basculación es relativamente largo, supondremos que la persona esta descansada y ejercerá una fuerza uniforme, además, la maquina impulsada tiene un impacto moderado. Por lo tanto tenemos:

Aplicación de factores K_a			
Máquina impulsora	Máquina impulsada		
	Uniforme	Impacto moderado	Impacto fuerte
Uniforme (motor eléctrico, turbina)	1.00	1.25	1.75 o mayor
Impacto suave (motor de varios cilindros)	1.25	1.50	2.00 o mayor
Impacto medio (motor de un solo cilindro)	1.50	1.75	2.25 o mayor

$$K_a = 1.25$$

Este valor de factor de aplicación corresponde tanto para el piñón como para el engrane.

FACOR DE TAMAÑO:

La AGMA no ha establecido aun estándares para los factores de tamaño, pero recomienda hacer:

$$K_s = 1$$

FACTOR DE DIRTRIBUCION DE CARGA:

Una regla practica útil es mantener el ancho de la cara F de un engrane recto dentro de los limites $8/P_d < F < 16/P_d$ con un valor nominal de $12/P_d$, razón conocida como factor de ancho de cara.

$$F = \frac{12}{P_d} = \frac{12}{8} = 1.5 \text{ in}$$

Factores K_m de distribución de carga

Ancho de cara in (mm)	K_m
<2 (50)	1.6
6 (150)	1.7
9 (250)	1.8
≥20 (500)	2.0

$$K_m = 1.6$$

FACTOR DE ESPESOR DEL ARO:

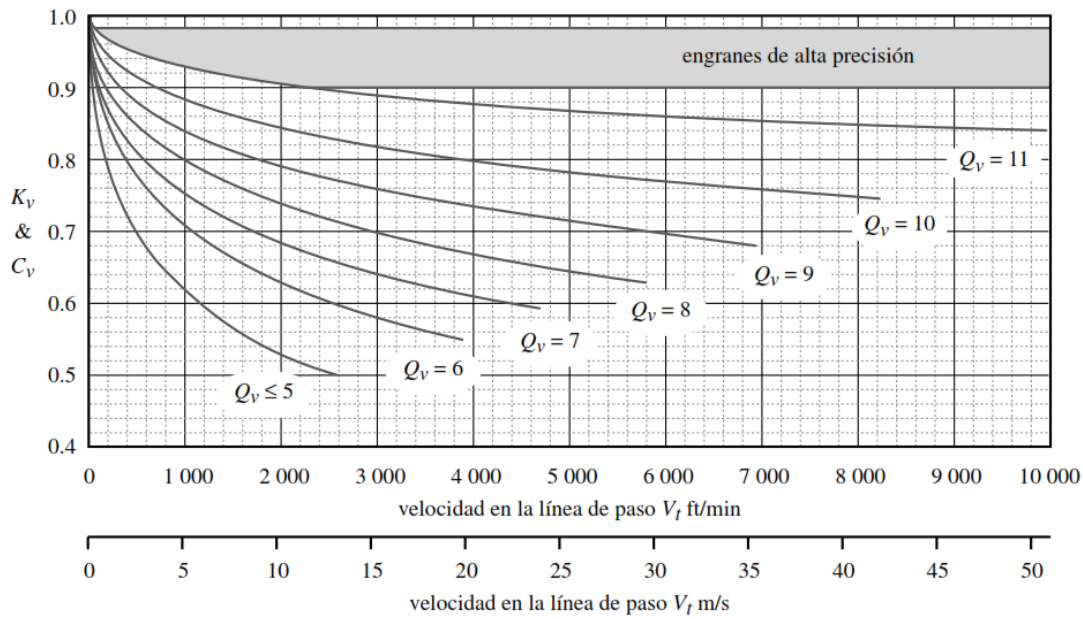
Como se utilizará un engranes de disco solido $K_B = 1$

FACTOR DINAMICO:

Como la velocidad es mínima, el factor dinámico es aproximadamente uno.

$$v = \frac{\pi D_p n}{12}$$

$$v = \frac{\pi(4 \text{ in})(1)}{12} = 1.047 \text{ ft}/\text{min}$$



$$K_v = 1$$

ESFUERZOS DE FLEXION

- **Esfuerzo de flexión para el Piñón.**

$$\sigma_{at} = \frac{w_t p_d}{F J_A} \frac{K_a K_S K_m K_B}{K_v}$$

$$\sigma_{at} = \frac{(734.75)(8)}{(1.5)(0.40)} \frac{(1.25)(1)(1.6)(1)}{1} = 19593.33 \text{ psi}$$

- **Esfuerzo de flexión para el Engrane:**

$$\sigma_{at} = \frac{w_t p_d}{F J_B} \frac{K_a K_S K_m K_B}{K_v}$$

$$\sigma_{at} = \frac{(734.75)(8)(1.25)(1)(1.6)(1)}{(1.5)(0.42) \cdot 1} = 18660.32 \text{ psi}$$

ESFUERZOS DE SUPERFICIAL

$$\sigma_{AC} = C_p \sqrt{\frac{W_t C_a C_s C_m}{F p_d I C_v}}$$

Dónde

- $C_a = K_a$:
- $C_s = K_s$
- $C_m = K_m$
- $C_v = K_v$

FACTOR GEOMETRICO

Para hallar el valor del factor de geometría "I" usamos las siguientes ecuaciones:

$$\rho_A = \sqrt{\left(r_A + \frac{1}{P_d}\right)^2 - (r_A \cos \phi)^2} - \frac{\pi}{P_d} \cos \phi$$

$$\rho_A = \sqrt{\left(2.1875 + \frac{1}{8}\right)^2 - (2.1875 \cos 20^\circ)^2} - \frac{\pi}{8} \cos 20^\circ$$

$$\rho_A = 0.69$$

$$\rho_B = C \operatorname{sen} \phi - \rho_A$$

$$\rho_B = 5.625(\operatorname{sen} 20^\circ) - 0.69$$

$$\rho_B = 1.23$$

$$I = \frac{\cos \phi}{\left(\frac{1}{\rho_A} + \frac{1}{\rho_B}\right) D_A}$$

$$I = \frac{\cos 20^\circ}{\left(\frac{1}{0.69} + \frac{1}{1.23}\right) 4.375}$$

$$I = 0.073$$

COEFICIENTE ELASTICO

Para el valor de “ C_p ” usamos la siguiente tabla:

Coeficiente elástico C_p de la AGMA en unidades de $[\text{psi}]^{0.5}$ ($[\text{MPa}]^{0.5}$)*†							
Material del piñón	E_p psi (MPa)	Material del engrane					
		Acero	Hierro maleable	Hierro nodular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Acero	30E6 (2E5)	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	25E6 (1.7E5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24E6 (1.7E5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22E6 (1.5E5)	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5E6 (1.2E5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	16E6 (1.1E5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

†Los valores de E_p en esta tabla son aproximados; se utilizó $\nu = 0.3$ como una aproximación de la razón de Poisson para todos los materiales. Si existen números más precisos de E_p y ν , éstos se deberían emplear en la ecuación 7.23 para determinar C_p .

$$C_p = 2300$$

$$\sigma_{AC} = C_p \sqrt{\frac{W_t C_a C_s C_m}{F p_d I C_v}}$$

Por lo tanto el esfuerzo superficial o de contacto será:

- Para el Piñón.

$$\sigma_{CA} = 2300 \sqrt{\frac{(734.75)(1.25)(1)(1.6)}{(1.5)(4.375)(0.073)(1)}}$$

$$\sigma_{AC} = 127384.50 \text{ psi}$$

- Para el Engrane.

$$\sigma_{CA} = 2300 \sqrt{\frac{(734.75)(1.25)(1)(1.6)}{(1.5)(6.875)(0.073)(1)}}$$

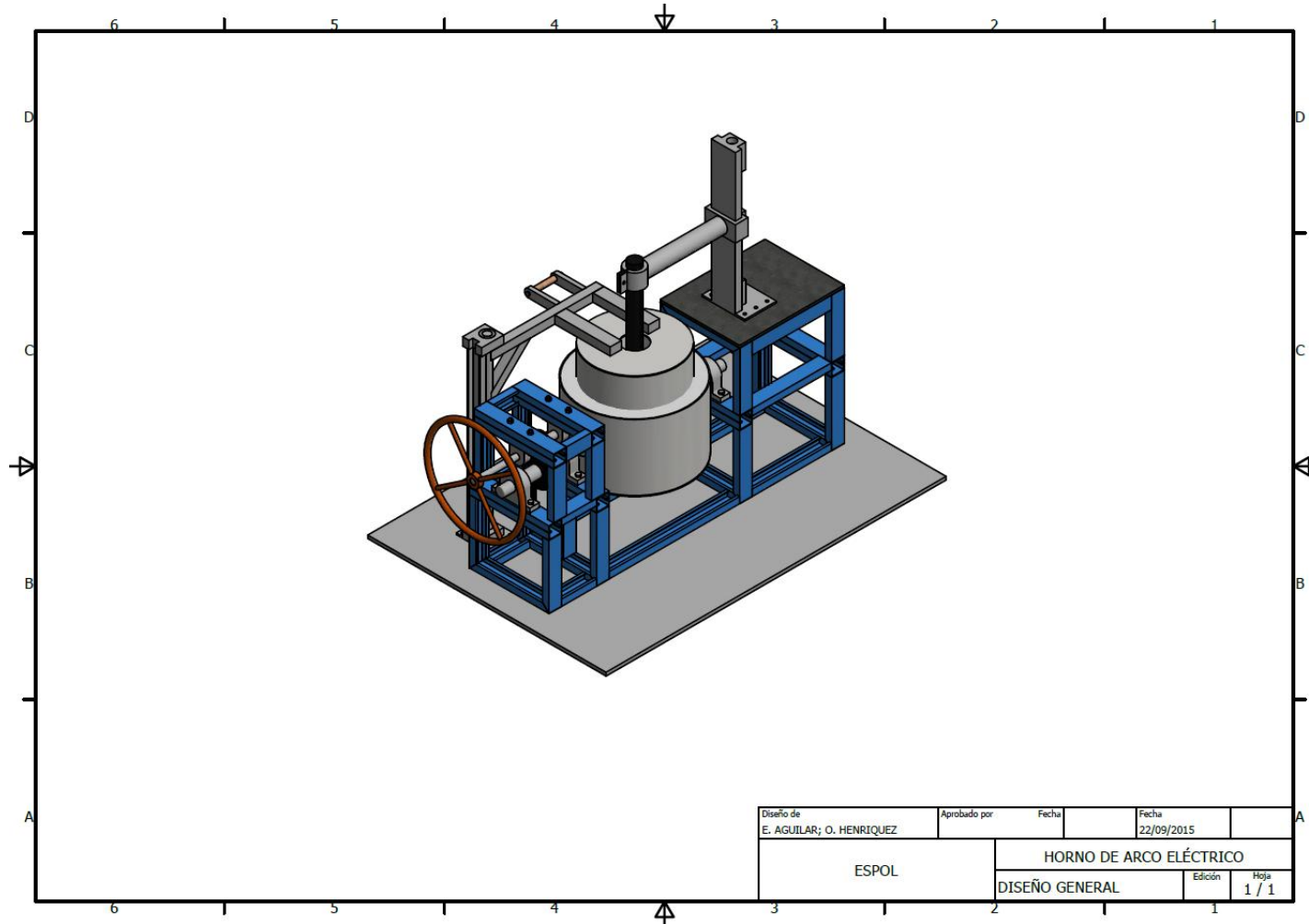
$$\sigma_{AC} = 101617.7 \text{ psi}$$

Por lo tanto el material a usar para los engranes es acero AISI 4140 templado y revenido a 800 °F

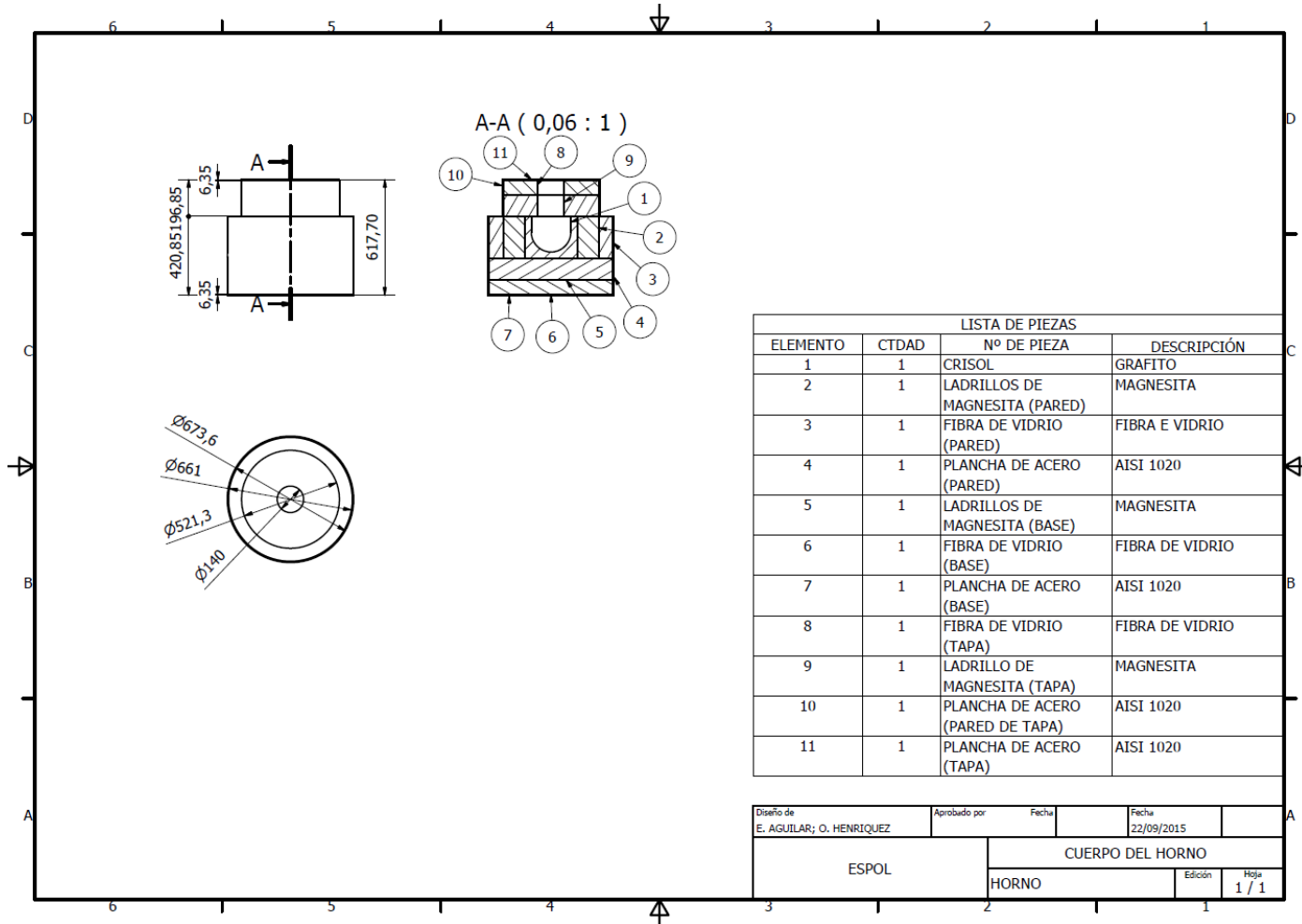
APÉNDICE H

Planos Esquemáticos

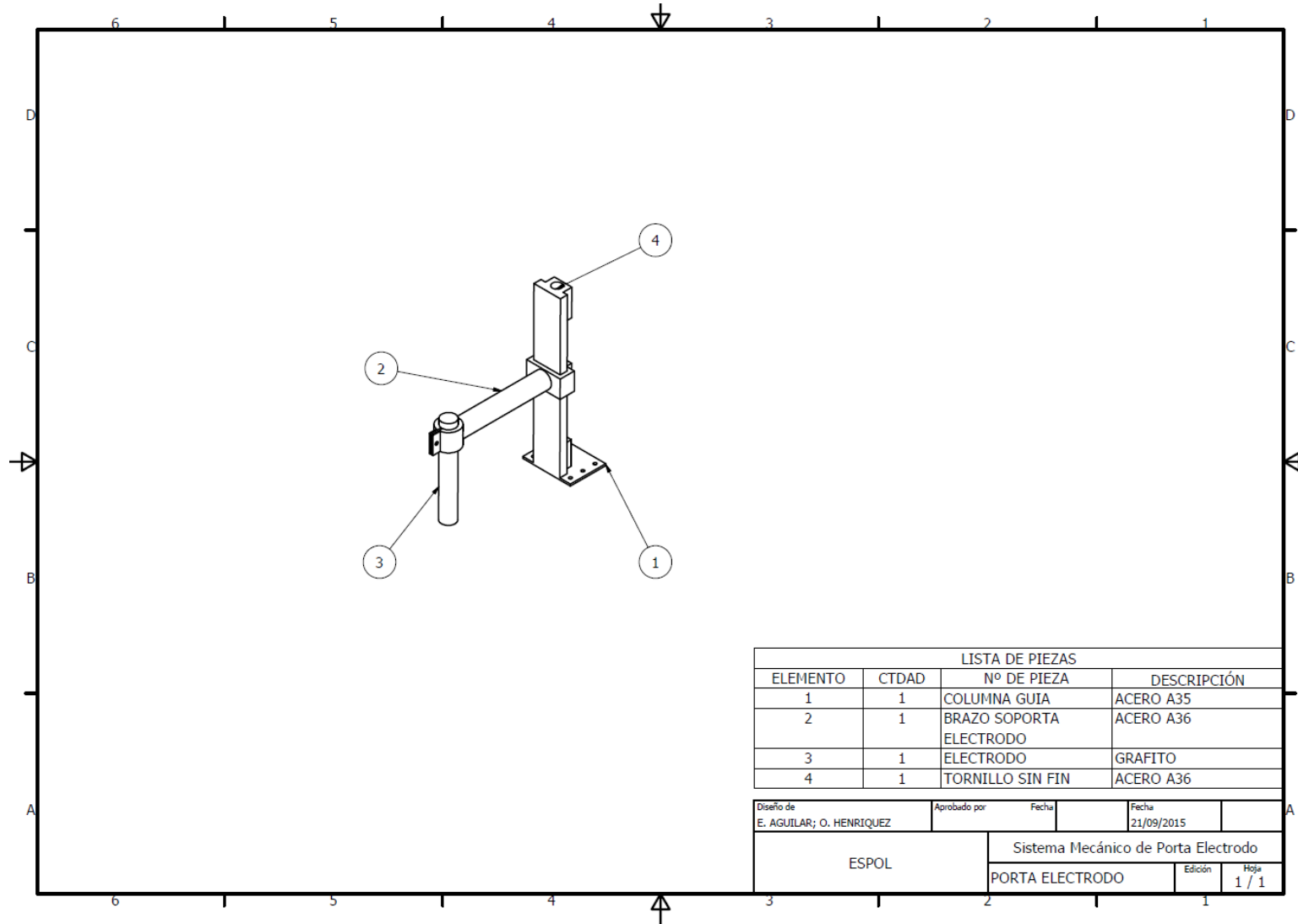
PLANO 1. Diseño general del horno de arco eléctrico



PLANO 2. Cuerpo del horno



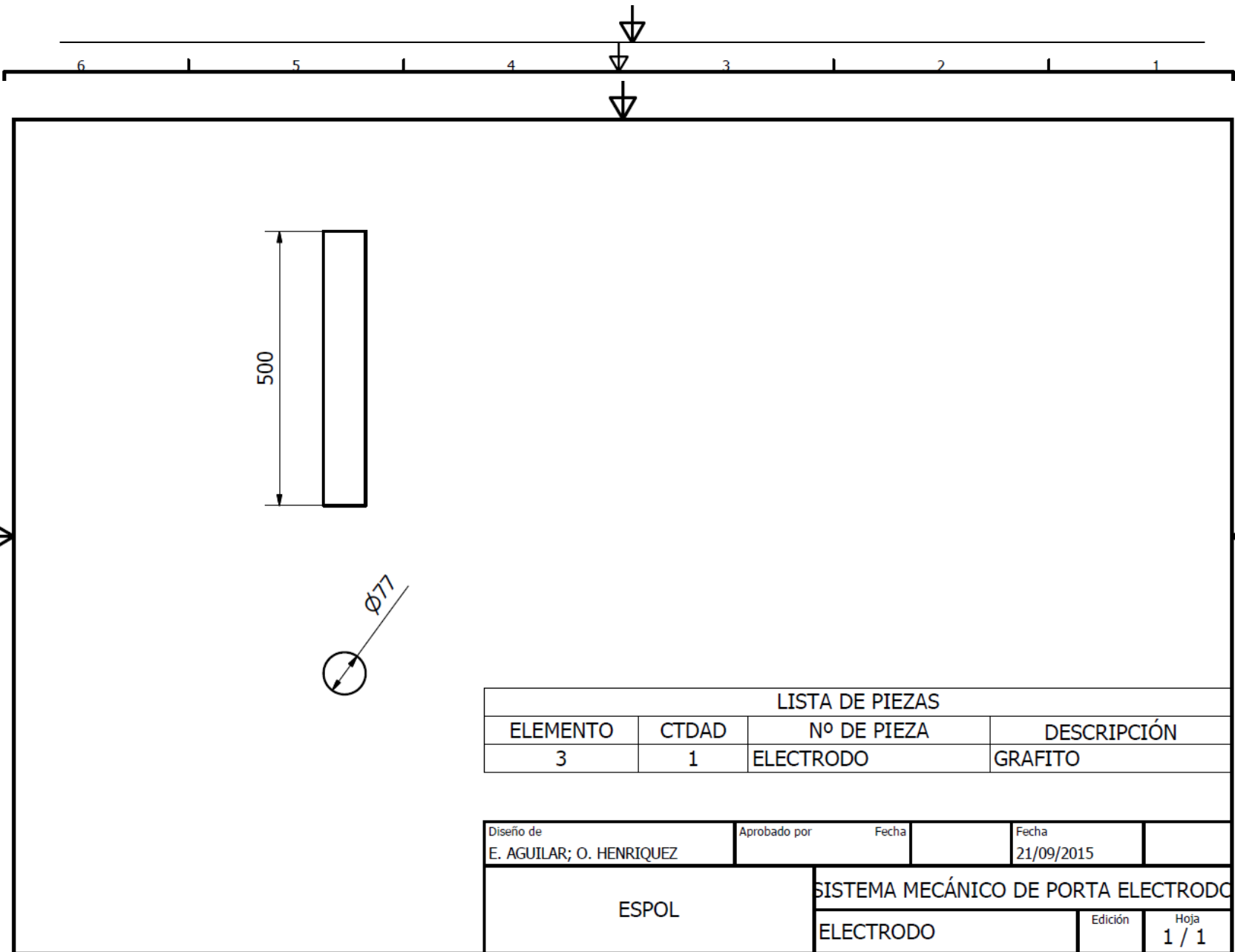
PLANO 3. Sistema Mecánico de porta electrodo



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	COLUMNA GUIA	ACERO A35
2	1	BRAZO SOPORTA ELECTRODO	ACERO A36
3	1	ELECTRODO	GRAFITO
4	1	TORNILLO SIN FIN	ACERO A36

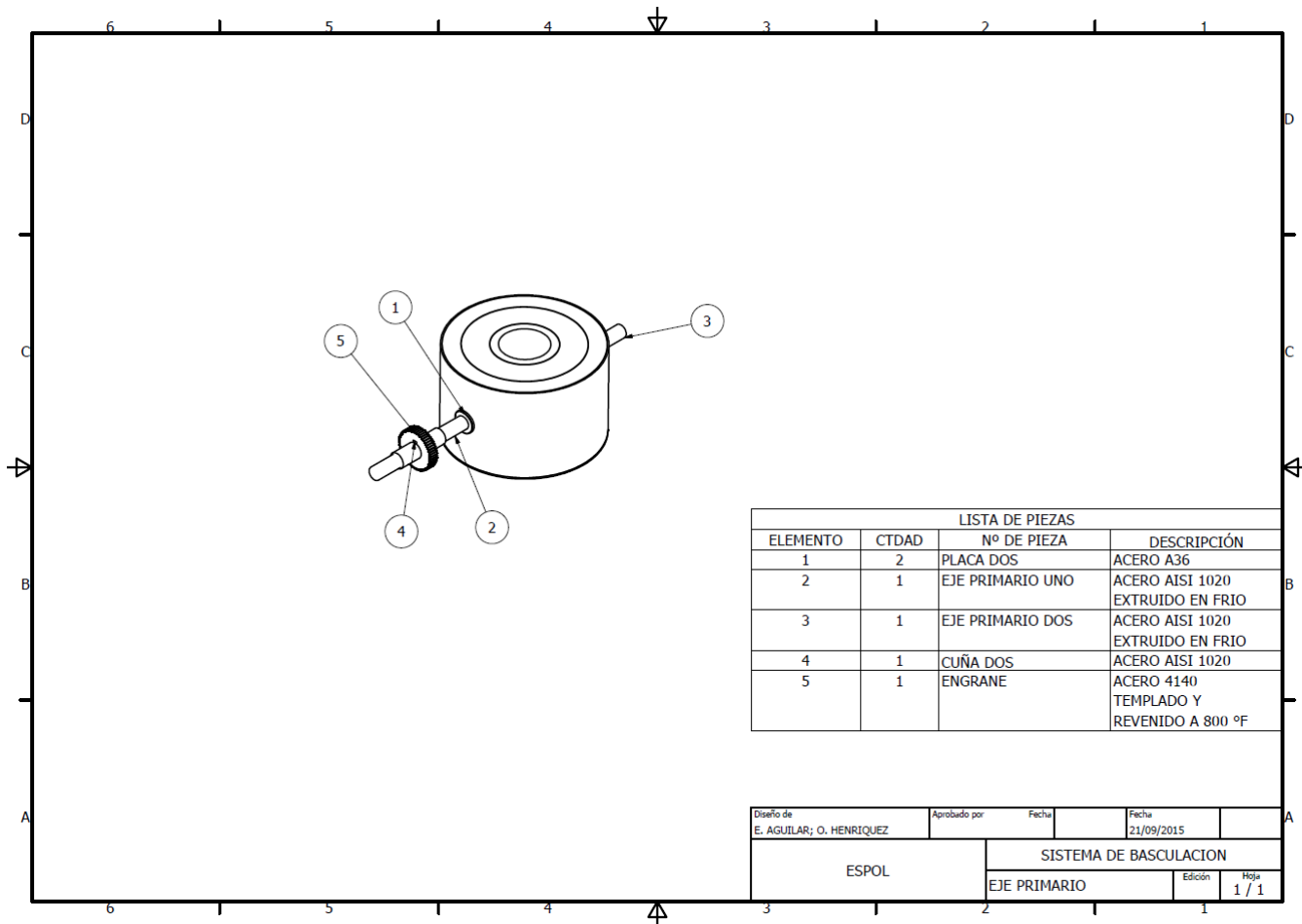
Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha	Fecha
			21/09/2015
ESPOL		Sistema Mecánico de Porta Electrodo	
		PORTA ELECTRODO	Edición Hoja 1 / 1

PLAN
O 4.
Sistema
de
basc
ulaci
ón
eje
prima
rio



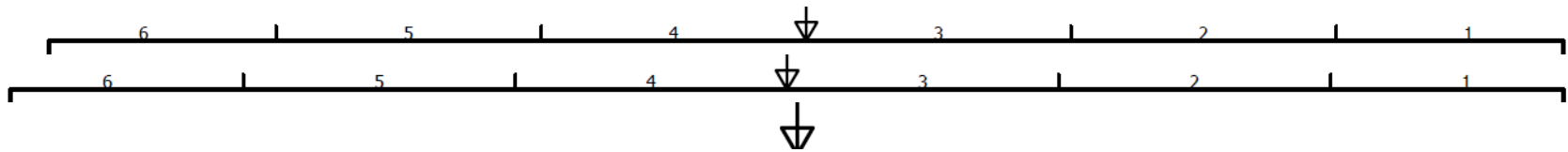
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
3	1	ELECTRODO	GRAFITO

Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha	Fecha 21/09/2015
ESPOL		SISTEMA MECÁNICO DE PORTA ELECTRODO	
ELECTRODO		Edición	Hoja 1 / 1

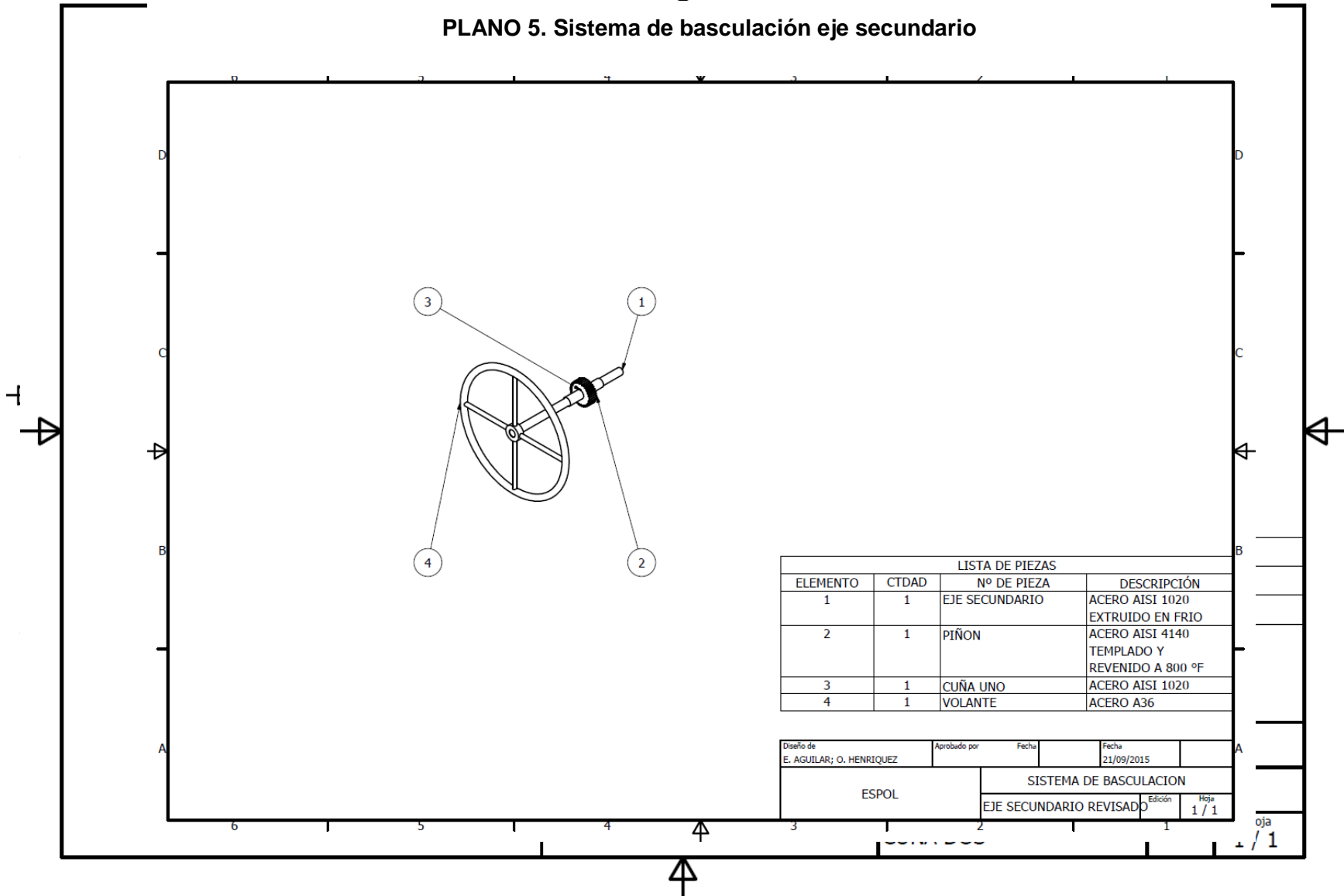


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	PLACA DOS	ACERO A36
2	1	EJE PRIMARIO UNO	ACERO AISI 1020 EXTRUIDO EN FRIO
3	1	EJE PRIMARIO DOS	ACERO AISI 1020 EXTRUIDO EN FRIO
4	1	CUÑA DOS	ACERO AISI 1020
5	1	ENGRANE	ACERO 4140 TEMPLADO Y REVENIDO A 800 °F

Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha 21/09/2015	
ESPOL		SISTEMA DE BASCULACION	
		EJE PRIMARIO	Edición Hoja 1 / 1



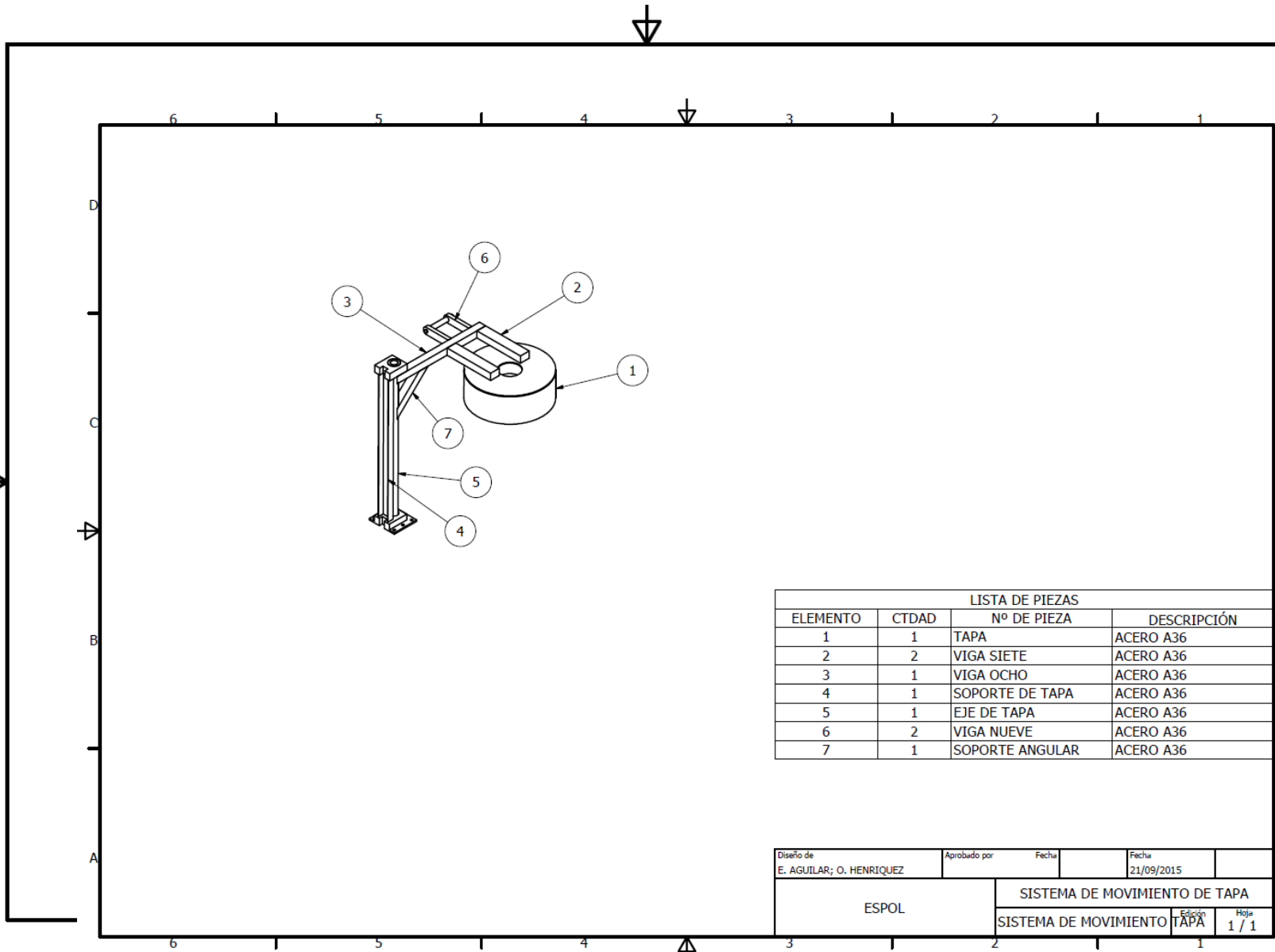
PLANO 5. Sistema de basculación eje secundario



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	EJE SECUNDARIO	ACERO AISI 1020 EXTRUIDO EN FRIO
2	1	PIÑON	ACERO AISI 4140 TEMPLADO Y REVENIDO A 800 °F
3	1	CUÑA UNO	ACERO AISI 1020
4	1	VOLANTE	ACERO A36

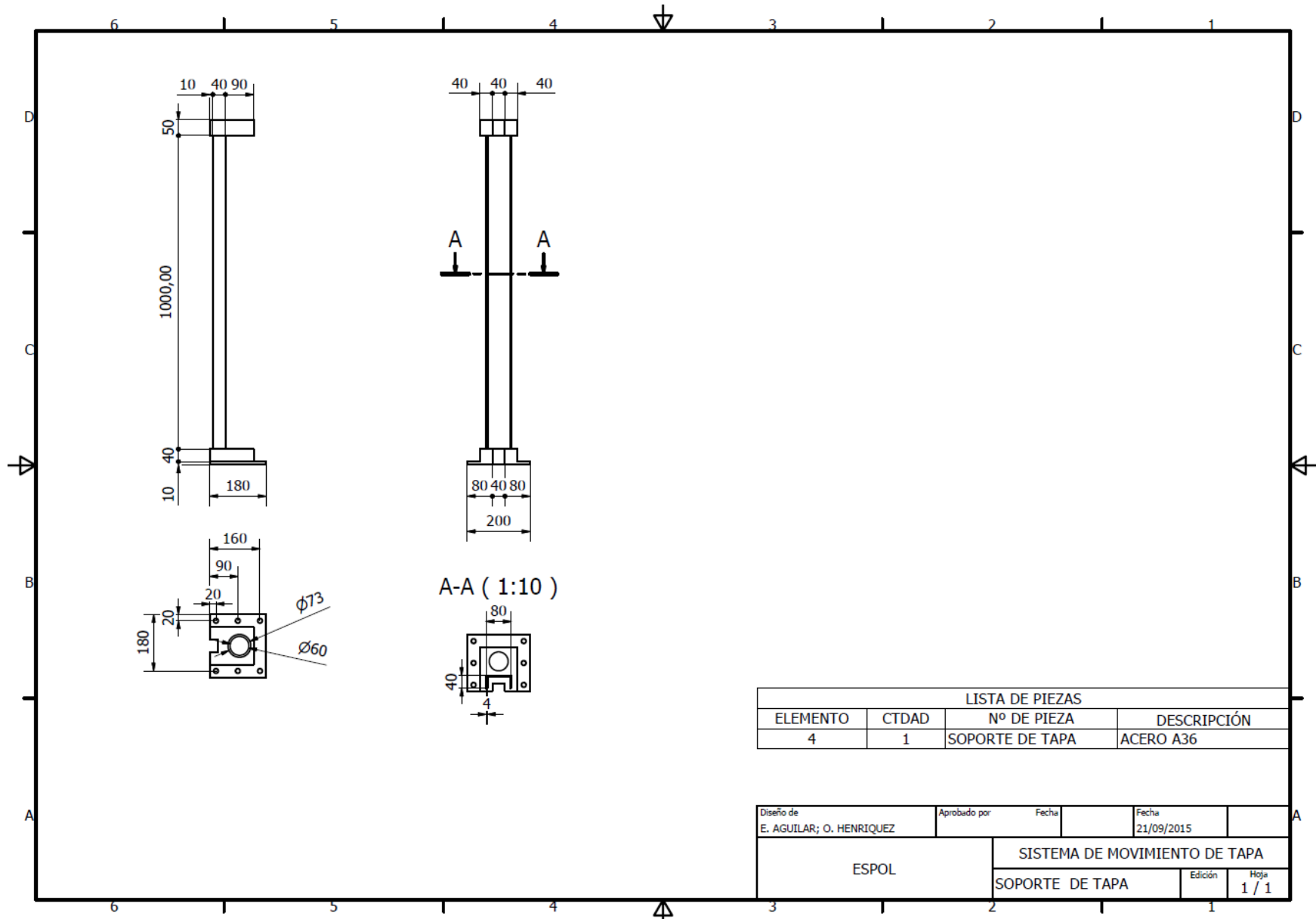
Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha 21/09/2015	Fecha
ESPOL		SISTEMA DE BASCULACION	
		EJE SECUNDARIO REVISADO	Edición Hoja 1 / 1

PLA
NO
6.
Siste
ma
de
movi
mien
to de
tapa



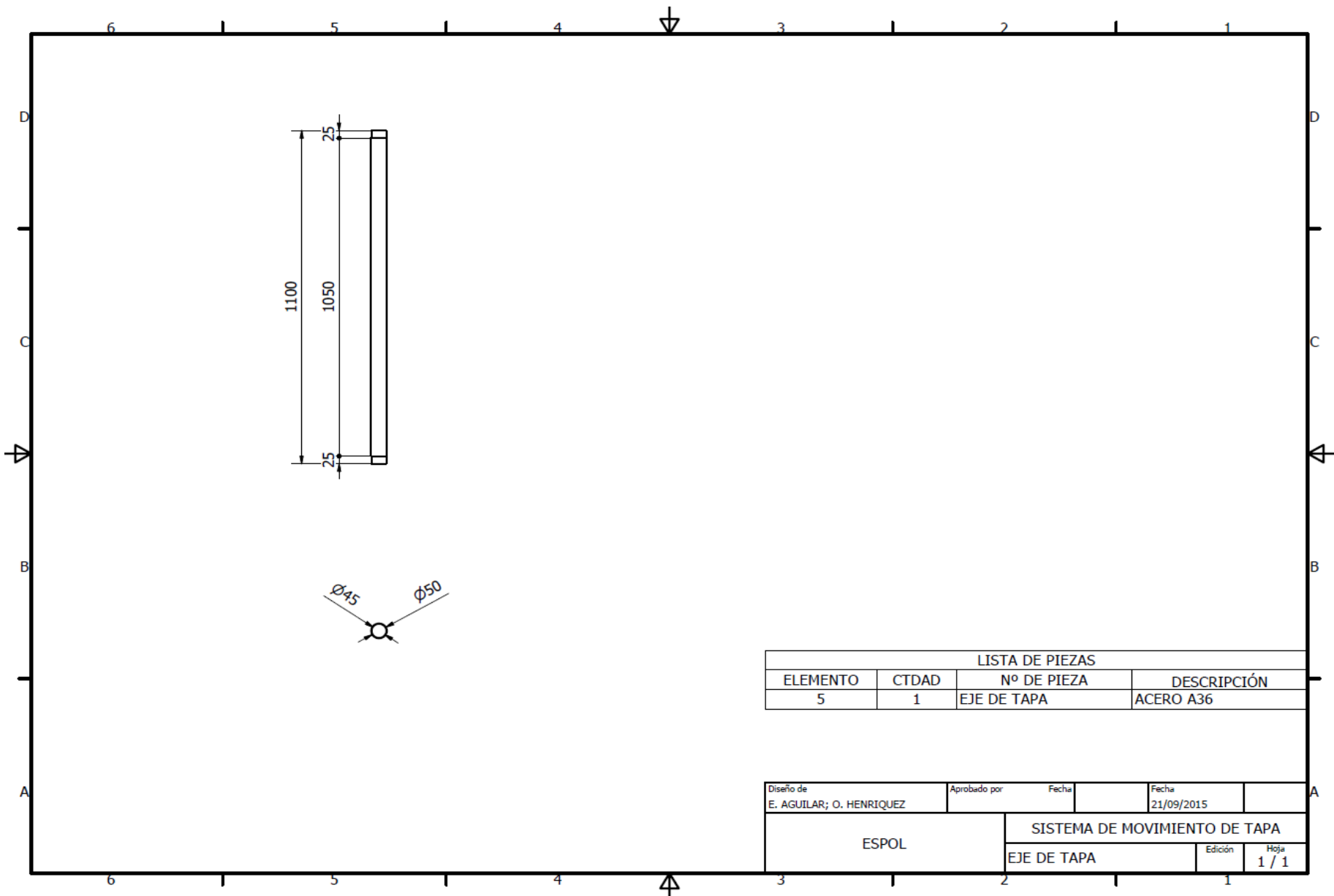
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	TAPA	ACERO A36
2	2	VIGA SIETE	ACERO A36
3	1	VIGA OCHO	ACERO A36
4	1	SOPORTE DE TAPA	ACERO A36
5	1	EJE DE TAPA	ACERO A36
6	2	VIGA NUEVE	ACERO A36
7	1	SOPORTE ANGULAR	ACERO A36

Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha 21/09/2015	Fecha
ESPOL		SISTEMA DE MOVIMIENTO DE TAPA	
		SISTEMA DE MOVIMIENTO TAPA	Edición 1 / 1



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
4	1	SOPORTE DE TAPA	ACERO A36

Diseño de E. AGUILAR; O. HENRIQUEZ	Aprobado por	Fecha	Fecha 21/09/2015
ESPOL		SISTEMA DE MOVIMIENTO DE TAPA	
		SOPORTE DE TAPA	Edición Hoja 1 / 1



PLANO 7.

Bancada

