

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL DESARROLLO
DE UN EQUIPO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS
MEDIANTE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA**

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

Julio Antonio Arostegui Tamayo

DIRECTOR: Ing. Víctor Andrade

CODIRECTOR: Ing. José Guasumba

Sangolquí – Ecuador
2006

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. JULIO ANTONIO AROSTEGUI TAMAYO, como requisito parcial para la obtención del título de INGENIERO MECÁNICO.

Ing. Víctor Andrade

Director del Proyecto

Ing. José Guasumba

Codirector del Proyecto

Fecha de certificación: 31 mayo 2006

Sangolquí, 2006-0-25

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL DESARROLLO
DE UN EQUIPO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS
MEDIANTE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA”**

ELABORADO POR:

Julio Antonio Arostegui Tamayo

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EL DECANO

DEDICATORIA

A mí amada Sandra: esposa y madre abnegada, y a mis hijos Michelle Estefanía, Daniela Fernanda y Josué David.

AGRADECIMIENTO

A mi amado DIOS, por su permanente ayuda y soporte de mi vida, a mi esposa, a mis hijos, a mis padres y a mis suegros.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.	iii
DEDICATORIA.	iv
AGRADECIMIENTOS.	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.	x
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS Y DIAGRAMAS.	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.	xv
RESUMEN.	xvi
INTRODUCCIÓN.	xvii

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

	Pág
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Definición del problema.	6
1.3 Objetivos.	6
1.3.1 General.	6
1.3.2 Específicos.	6
1.4 Alcance.	7
1.5 Justificación e importancia.	8
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA	
2.1 Radiación solar.	9
2.2 Radiación directa.	16
2.3 Radiación difusa.	16
2.4 Albedo.	17
2.5 Aplicaciones de energía solar de media y alta temperatura.	18
2.5.1 Concentradores Parabólicos.	27
2.5.2 Lentes de Fresnell.	33
2.5.3 Torres de Potencia.	38
2.6 Matriz de decisión.	40
CAPÍTULO 3: TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN METALES	
3.1 Materiales y su clasificación.	43
3.1.1 Tipos de materiales.	44
3.1.2 Enlaces atómicos para la configuración de materiales.	45
3.1.3 Redes cristalográficas existentes.	48

3.1.4	Diagramas de fase.	53
3.1.5	Aceros.	55
3.1.6	Fundiciones.	59
3.2	Temple.	60
3.2.1	Calentamiento.	61
3.2.2	Enfriamiento.	61
3.2.3	Métodos comunes.	62
3.2.4	Efectos del temple.	63
3.3	Revenido.	63
3.3.1	Colores de revenido.	64
3.3.2	Variaciones en las características mecánicas.	65
3.4	Recocido.	65
3.4.1	Recuperación.	65
3.4.2	Recristalización.	66
3.4.3	Crecimiento de grano.	67
3.5	Selección del procedimiento.	69
CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS CON ENERGÍA SOLAR		
4.1	Estructura soporte.	81
4.1.1	Cálculo de reacciones sobre el espejo.	81
4.1.2	Cálculo de los elementos que soportan el espejo.	82
4.1.3	Análisis por estabilidad.	85
4.1.4	Análisis por resistencia.	87
4.2	Sistema de seguimiento del concentrador manual según calendario solar	87
4.2.1	Peso de los elementos estructurales.	87
4.2.2	Diseño del eje	89
4.2.3	Cálculo del mecanismo sin fin corona.	96
4.2.4	Selección de rodamientos.	101
4.3	Cálculo del concentrador.	104
4.3.1	Calculo dimensional del espejo.	104

4.3.2	Relación entre el foco y el diámetro del paraboloide.	105
4.3.3.	Volumen y peso del espejo.	107
4.3.4.	Diseño térmico de la cámara de reacción.	111
4.4	Diseño del soporte de la pieza a ser tratada térmicamente.	119
4.5	Selección de materiales.	123
4.6	Diagramas de fabricación.	125
4.7	Montaje.	132

CAPITULO 5: ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

5.1	Gastos directos.	134
5.2	Gastos indirectos.	134
5.3	Costos de fabricación y montaje.	136
5.4	Logística de materiales.	136
5.5	Servicios especializados.	137
5.6	Imprevistos.	137
5.7	Presupuesto de inversión.	137
5.8	Ingresos anuales..	138
5.8.1	Servicio de tratamientos térmicos.	138
5.8.2	Capacitación energética a la comunidad.	138
5.8.3	Servicio académico para alumnos DECEM.	138
5.9	Costos de operación.	139
5.10	Datos para el análisis financiero.	138
5.11	VAN.	139

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones.	142
6.2	Recomendaciones.	144

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 2.1. Distribución espectral.	10
Figura 2.2. Balance de radiación en la tierra.	11
Figura 2.3. Distribución espectral de la luz solar (AM2) directa y difusa.	12
Figura 2.4. Definición de la altura solar, β , acimut, α y cenit, z .	12
Figura 2.5. Variación estacional de la irradiancia total sobre planos orientados en forma diversa.	14
Figura 2.6. Tipos de radiación: directa, difusa, albedo o reflejada.	15
Figura 2.7. Radiación Directa.	16
Figura 2.8. Radiación Difusa.	16
Figura 2.9. Albedo.	17
Figura 2.10. Insolación directa, insolación difusa.	18
Figura 2.11. Colector plano con un espejo plano.	20
Figura 2.12. Colector plano con dos espejos planos.	21
Figura 2.13. Relaciones entre razón de concentración y temperatura de operación del absorbedor.	25
Figura 2.14. Concentrador parabólico compuesto.	26
Figura 2.15. Concentrador de curvatura simple o cilíndrico parabólico.	27
Figura 2.16. Concentrador de curvatura compuesta o paraboloide.	28
Figura 2.17. Algunos concentradores de seguimiento continuo.	28
Figura 2.18. Captador cilíndrico-parabólico.	29
Figura 2.19. Sistema SRTA con diferentes posiciones de la radiación solar incidente.	31
Figura 2.20. Horno para TTM, con concentrador cilíndrico parabólico.	33
Figura.2.21. Sección transversal de lente de Fresnell y lente convencional.	34
Figura 2.22. Lentes convergentes.	34
Figura 2.23. Lentes divergentes.	35
Figura 2.24. Geometría de un lente cilíndrico convencional.	35
Figura 2.25. Espejo tipo Fresnell.	37

Figura 2.26. Horno para TTM, utilizando Lente de Fresnell.	37
Figura 2.27. Sistema de torre central.	38
Figura 2.28. Horno para TTM utilizando una Torre de potencia.	39
Figura 2.29. Alternativa A. Campo de helióstatos y paraboloides.	40
Figura 2.30. Alternativa B solución al problema planteado en este proyecto.	41
Figura 2.31. Alternativa C. Campo de helióstatos y torre central.	41
Figura 3.1. Disposición atómica en un cristal de cobre metal.	46
Figura 3.2. Formación de un par iónico ion sodio-ion cloro a partir de átomos de sodio y cloro.	46
Figura 3.3. Enlace covalente en la molécula de hidrógeno.	47
Figura 3.4 Las 14 celdillas unidades convencionales de Bravais.	49
Figura 3.5 Celdillas unidad: principales estructuras cristalinas metálicas.	50
Figura 3.6. Factor de empaquetamiento de las principales estructuras cristalinas metálicas.	51
Figura 3.7. Algunos planos cristalográficos con sus índices de Miller .	52
Figura 3.8. Diagrama esquemático de la sección transversal de un tubo de rayos X de filamento sellado.	52
Figura 3.9. Espectro de emisión de rayos X cuando se utiliza molibdeno metal como blanco en un tubo de rayos X operando a 35 kV.	53
Figura 3.10 Diagrama de equilibrio de fases aproximado presión-temperatura (PT) para el hierro puro.	54
Figura 3.11. Diagrama de Equilibrio Fe-C	55
Figura 3.12. Rangos de temperatura (grados Fahrenheit) para tratamientos térmicos	62
Figura 3.13. Efecto de la deformación previa sobre la temperatura para el inicio de la recristalización.	67
Figura 3.14. Representación esquemática de la variación de las propiedades mecánicas del ciclo de recocido posterior al trabajado en frío.	68
Figura 3.15. Equipo básico de matriz-punzón, para corte o embutición	69
Figura 3.16. Matriz de corte.	70
Figura 3.17. Punzón de corte.	71

Figura 3.18. Punzón de embutición.	72
Figura 3.19. Matriz de embutición.	74
Figura 4.1 Diagrama de fuerzas sobre el espejo.	81
Figura 4.2 Estructura rectangular y espejo .	82
Figura 4.3 Carga de granizo sobre el pórtico.	83
Figura 4.4 Diagrama de fuerzas sobre las columnas.	86
Figura 4.5 Perfil cuadrado para las columnas.	87
Figura 4.6 Eje horizontal.	89
Figura 4.7 Fuerza de empuje en el mecanismo sin fin corona.	89
Figura 4.8 Estructura y brazo de rotación.	90
Figura 4.9 Fuerzas espaciales que actúan sobre el eje.	91
Figura 4.10 Diagrama de cortante con respecto al eje y, momento flector con respecto al eje z.	93
Figura 4.11 Diagrama del cortante con respecto al eje z, y momento flector con respecto al eje y.	93
Figura 4.12 Eje horizontal.	96
Figura 4.13 Tornillo sin fin corona.	96
Figura 4.14 Mecanismo de seguimiento en dos ejes.	103
Figura 4.15 Perfil representativo de la lente de Fresnell.	106
Figura 4.16 Lente de Fresnell.	107
Figura 4.17 Parábola en el plano z-y.	108
Figura 4.18 Parábola en el plano z-x.	109
Figura 4.19. Modelo térmico de la cámara de reacción.	112
Figura 4.20. Cámara de reacción con paredes cilíndricas compuestas.	115
Figura 4.21 Alternativas para el dimensionamiento de la cámara de reacción.	120
Figura 4.22 Cilindros concéntricos de la cámara.	122
Figura 4.23 Cámara de reacción.	122
Figura 5.1 Ingresos y egresos del proyecto.	139

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS Y DIAGRAMAS

	Pág.
Fotografía 1: Matriz de corte construida en acero K100.	71
Fotografía 2: Punzón de corte en acero DF2.	72
Fotografía 3: Punzón de embutición en acero DF2.	73
Fotografía 4: Matriz de embutición en acero Bohler K460.	74
Fotografía 5: Conjunto matriz-punzón para corte.	75
Fotografía 6: Conjunto matriz-punzón para embutición.	76
Fotografía 7: (a) Pared interior de matriz;(b) vista del área de corte del punzón.	76
Fotografía 8: (a) Visualización del radio de embutición; (b) Cavidad para alivio de presión.	77
Fotografía 9: Montaje adecuado para el tratamiento térmico de punzones y matrices.	121
Fotografía 10: Se producen aberraciones y dispersiones por la ubicación de la matriz en el fondo del recipiente.	121
Fotografía 11: En este montaje matriz-recipiente, producen pérdidas de calor por convección y radiación.	121
Diagrama 1 Proceso de fabricación de la cámara de reacción.	126
Diagrama 2 Proceso de fabricación del eje horizontal.	127
Diagrama 3 Proceso de fabricación de la rueda dentada.	128
Diagrama 4 Proceso de fabricación del tornillo sin fin.	129
Diagrama 5 Proceso de fabricación de la estructura móvil.	130
Diagrama 6 Proceso de fabricación estructura fija (bastidor).	131
Diagrama 7 Proceso de ensamblaje de subsistemas.	133

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Algunos valores representativos de los concentradores CPC.	26
Tabla 2.2. Matriz elemental de selección de alternativas.	42
Tabla 3.1 Clasificación de retículos espaciales en sistemas cristalinos.	48
Tabla 3.2. Correspondencia de temperaturas.	64
Tabla 3.3. Características de los aceros indeformables para matricería.	77
Tabla 3.4 Peso de las herramientas de corte y embutición.	78
Tabla 3.5. Características de los aceros para punzones y matrices.	79
Tabla 3.6 Consumo energético para tratamientos térmicos.	80
Tabla 4.1 Peso de los elementos estructurales.	88
Tabla 4.2 Datos del perfil parabólico.	106
Tabla 4.3 Resultados de cálculo del sistema térmico.	119
Tabla 4.4 Materiales para el horno solar.	124
Tabla 5.1 Materiales directos para la construcción del horno solar.	134
Tabla 5.2. Mano de obra directa.	135
Tabla 5.3 Mano de obra indirecta.	135
Tabla 5.4 Materiales indirectos.	136
Tabla 5.5 Resumen del presupuesto para la fabricación del horno solar.	137
Tabla 5.6 Ingreso anual por el servicio de TT.	138
Tabla 5.7 Ingreso por capacitación a profesionales y técnicos de la industria.	138
Tabla 5.8 Ingresos por uso del equipo de laboratorio.	138

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RADICACIÓN SOLAR EXISTENTE EN EL PAÍS.
- ANEXO B APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA AL MEJORAMIENTO SUPERFICIAL DE MATERIALES.
- ANEXO C CHUMACERAS DE PISO Y DE PARED PARA ANCLAJE DE EJES.
- ANEXO D PLANOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS CON ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA.
- D1: Mecanismo de rotación de la estructura y lente de Fresnell.
 - D2: Diagrama de fuerzas sobre el eje horizontal.
 - D3: Eje horizontal.
 - D4: Dimensiones del eje de rotación.
 - D5: Fuerza de contacto en tornillos sinfín corona.
 - D6: Mecanismo sinfín corona.
 - D7: Alojamiento del eje vertical.
 - D8: Mecanismo de giro del eje vertical en 3D.
 - D9: Reductor de velocidad.
 - D10: Horno de tratamientos térmicos.
- ANEXO E DISEÑO TÉRMICO DEL CONCENTRADOR.

RESUMEN

En la actualidad, dada la importancia de conservar el **medio ambiente**, se torna indispensable generar y desarrollar otro tipo de tecnologías para producir bienes y servicios cuyo impacto permita un “Desarrollo Sostenible” en el tiempo, de tal manera que las generaciones futuras puedan habitar en un mundo que les ofrezca las mejores condiciones de vida posible.

Este proyecto está orientado, precisamente a la utilización de energías no convencionales, cuyo impacto al medio ambiente no tiene comparación con la extrema contaminación que produce la utilización de combustibles fósiles. Las energías no convencionales que se pueden obtener a través de diferentes procesos pueden ser utilizadas en varios campos: uno de ellos, es la metalurgia en el área de tratamientos térmicos y mejoramiento de superficies metálicas.

Adicionalmente, la demanda de energía proveniente de combustibles fósiles esta aumentando, y podría ocurrir que esta demanda supera a la oferta, con lo cual se desencadenaría una crisis energética de impredecibles consecuencias, situación que igualmente crea la necesidad de recurrir a otras tecnologías que nos permitan utilizar fuentes de energía renovables, en previsión de lo que pudiere ocurrir en un futuro cercano.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo realiza un análisis actual del medio ambiente y la indispensable necesidad de orientar el desarrollo y la tecnología a las estrategias para la conservación de la energía, planteadas en el “Protocolo de Kyoto”.

Dentro de las alternativas para captar energía generada por el sol, se establecen los rangos de temperatura que se alcanzarían; esta información se orientada a establecer qué tipo de tratamiento térmico en metales es factible realizar utilizando energías no convencionales. Se realizará el diseño del horno a partir de datos obtenidos por cálculos cuantitativos y estadísticos, que nos permitirán establecer la forma y dimensiones, considerando un diseño mecánico, adecuado a las necesidades planteadas en este proyecto.

Finalmente, se realizará el análisis técnico económico para el desarrollo de este equipo, y se lo concluirá en base de los datos obtenidos durante todo el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Estocolmo, Suecia, del 5 al 16 de junio de 1972, a la que asistieron 1.200 delegados pertenecientes a 112 países y 30.000 observadores de la más variada procedencia, además de 1.000 periodistas de todo el mundo, constituyó la más importante iniciativa tomada hasta el momento en el terreno de la conservación del **medio ambiente** y de la lucha contra la contaminación y, por primera vez, se concibe esta como causa de desequilibrio, a nivel planetario, el mismo que afecta a la calidad de vida de todos los habitantes de nuestro planeta: la Tierra.

En el informe generado en la Conferencia: “Una tierra solamente”, se definieron estrategias fundamentales para empezar a estructurar una política planetaria referente a la protección del **medio ambiente**, teniendo en cuenta que la naturaleza no es un bien inagotable ni eterno, sino temporal; pues es muy frágil y corre el riesgo de desaparecer, llevándose consigo, en esa extinción, a la humanidad entera.

En este informe se demuestra que existen límites para el uso de los recursos naturales; límites para el nivel de sustancias tóxicas que el cuerpo humano, la tierra y los seres vivos pueden tolerar; límites para las intervenciones que los sistemas ecológicos pueden soportar; límites para la conmoción psíquica que los hombres y la sociedad pueden sufrir como consecuencia de la degradación social y natural.

A partir de este evento, de carácter mundial; a efecto de definir estrategias en busca de la conservación del **medio ambiente**, se empieza a dar importancia al tema de la conservación del planeta, y es así como se habla del Ecodesarrollo, que propone la gestión racional de los recursos, con el fin de mejorar el hábitat

global del hombre, y garantizar una mejor calidad de vida para todos los seres humanos.

En el año de 1983 se crea, dentro de la Organización de las Naciones Unidas: la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo, en la que se define, por primera vez, el concepto de “Desarrollo Sostenible”, en los siguientes términos: “Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas”.

En 1988 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) establecieron el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), a efecto de evaluar la información relevante científica, técnica y socio-económica para entender los riesgos de las incidencias humanas en el cambio climático. Este panel se reúne en sesión plenaria cada año. El primer reporte de valoración lo obtuvo en el año de 1990. El segundo reporte sobre cambio climático, en 1995, el mismo que fue la base para la adopción del Protocolo de Kyoto en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambios Climáticos.

En el año de 1991, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, UNESCO, produjo un estudio titulado “Marco para la investigación sobre la dimensión humana de los cambios globales del ambiente”, en el cual se identifican cuatro categorías universales de asaltos a la naturaleza: el cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, la lluvia ácida y la extinción de las especies.

El imparable aumento del dióxido de carbono en la atmósfera entraña la probabilidad del efecto invernadero o recalentamiento global con resultados catastróficos para las costas de los continentes. El aumento en la atmósfera de fluorocarbonos y otros halo carbonos producidos por los acondicionadores del

aire, las refrigeradoras y los aerosoles disminuyen la capa de ozono que protege a los seres vivos de los efectos perniciosos de los rayos solares. La lluvia ácida con sus contenidos elevados de óxidos de nitrógeno y dióxido de sulfuro provenientes de las emisiones industriales devasta lentamente ríos y lagos, bosques, esculturas al aire libre y monumentos arquitectónicos. El planeta experimenta la pérdida de especies vivas comparables tal vez con las experimentadas con la muerte en masa causada por los cambios geológicos.

En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambios Climáticos celebrada en Río de Janeiro, Brasil, el 5 de junio de 1992; en su declaración final conocida como Cumbre de la Tierra, se manifiesta la necesidad de conciliar el desarrollo económico con el manejo adecuado de los recursos naturales, dentro del marco del “Desarrollo Sostenible”, mediante la implementación de políticas nacionales y de relaciones internacionales.

Dentro de este contexto general, los asistentes a este evento acordaron, en forma concreta: a estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Proteger el sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, sobre la base de la equidad y de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus respectivas capacidades.

Tomar medidas de precaución para prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos.

Promover y apoyar el desarrollo, la aplicación y la difusión, incluida la transferencia, de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en todos los sectores pertinentes, entre ellos la energía, el transporte, la industria, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos.

En diciembre de 1997, en Kyoto, Japón, se lleva a cabo la Tercera Conferencia de las Partes sobre Cambio Climático. El resultado de esta Convención es el denominado Protocolo de Kyoto, en el cual los países industrializados, con el fin de promover el desarrollo sostenible, se comprometen a reducir las emisiones de gases de invernadero, mediante la implementación de políticas y medidas acordes con las circunstancias nacionales.

Delegados de más de 160 naciones participaron en la Tercera Conferencia de las Partes sobre Cambio Climático, en la que se orientó la discusión en el informe presentado por los expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático que declara que: “el balance de las evidencias sugiere una influencia humana en el clima global”, y que es necesario estabilizar las emisiones de los gases de invernadero como medida de prevención del cambio climático.

Los 34 países que intervinieron, se comprometieron a tomar medidas para reducir la totalidad de las emisiones de esos gases, a un nivel inferior del 5.2% al de 1990, en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2012; por lo tanto, cada país o grupo, dentro de estos 34 países, debería tomar medidas para lograr esta disminución; es así como la Comunidad Europea, los Estados Unidos de América, y otros países de este grupo, ya han empezado a prepararse para este reto.

Adicionalmente, debemos anotar que la demanda de energía está aumentando. Esta necesidad no ha sido cubierta por los nuevos descubrimientos de combustibles fósiles: como el petróleo, gas natural y carbón, de los cuales, cada vez con mayor apremio y en mayores cantidades, ha dependido el mundo hasta

ahora. Enormes cantidades de estos combustibles se formaron hace millones de años a partir de la vegetación sepultada bajo toneladas de tierra y rocas, pero se están consumiendo a un ritmo alarmante, mientras que los nuevos yacimientos son cada vez más difíciles de encontrar.

La situación descrita, crea la necesidad de recurrir a otras tecnologías que nos permitan utilizar fuentes de energía renovables, en previsión de esta posible crisis energética a futuro, así como para prevenir el deterioro del **medio ambiente**.

Dentro de esta línea de acción, el 12 de febrero del 2006, los ministros de Finanzas de los países miembros del Grupo de los Ocho, G8 (integrado por los Estados Unidos de América, Canadá, Japón, Gran Bretaña, Francia, Alemania, Italia y Rusia), reunidos en Moscú, se pronunciaron sobre los siguientes temas: la economía mundial, libre comercio, seguridad energética y gripe aviaria.

Para los países más poderosos del planeta, el crecimiento económico mundial es sólido y debe mantenerse en el 2006; sin embargo, persisten riesgos, especialmente precios energéticos elevados y volátiles. Añadieron que la crisis energética puede superarse con mecanismos de mercado, y que hay que facilitar la diversificación de la producción y del consumo energético, desarrollar fuentes alternativas de energía y proteger el medio ambiente.

Al igual que los 34 países, nuestro país no está exento de esta responsabilidad ética-moral; si bien es cierto que no se encuentre dentro de este grupo; sin embargo, es importante empezar a pensar en aportar, de alguna manera, con acciones y medidas positivas encaminadas a disminuir la emisión de gases que afecten el **medio ambiente**. Este proyecto, precisamente apunta hacia este loable objetivo, pues el diseño que se propone no contamina el **medio ambiente**; adicionalmente es un diseño que propone realizar tratamientos térmicos en metales con un equipo alternativo.

1.2. Definición del problema

En la economía de los combustibles fósiles se puede afirmar que para mantener encendida una bombilla incandescente, de 100 watios, durante 24 horas, se necesita quemar 250 Kg. de carbón, lo que nos hace advertir que todo el proceso de transformación de las energías primarias e intermedias hasta alcanzar su aplicación final que produce calor y trabajo, tiene un rendimiento desalentador equivalente al 2,5%: es decir el sistema energético convencional, aparte de ineficiente es contaminador; por estas razones a escala global se realizan importantes esfuerzos en investigación y desarrollo para alcanzar tecnologías eficientes y sustentables, basadas en el uso de energía alternativa. Es por estas razones que con el desarrollo del presente proyecto se pretende estudiar los aspectos inherentes al desarrollo de un horno para tratamiento térmico de metales utilizando energía solar concentrada, mediante una lente de Fresnell.

1.3. Objetivos

1.3.1 General

Realizar el estudio de factibilidad para el desarrollo de un equipo de tratamientos térmicos en metales utilizando energía solar concentrada.

1.3.2 Específicos

- Analizar la problemática que genera la utilización de combustibles fósiles y su impacto sobre el **medio ambiente**.
- Realizar el estudio de ciertos tipos de concentradores de energía solar, para determinar las aplicaciones y los campos de temperatura que se pueden alcanzar con cada uno de ellos.
- Analizar la correspondencia entre los diferentes procesos de tratamientos térmicos en metales, con las temperaturas obtenidas utilizando óptica de concentración, mediante radiación solar directa, y establecer que tipo de tratamientos térmicos puede realizarse con estos dispositivos.

- Fomentar el uso de energía solar concentrada con aplicación a la metalurgia de alta temperatura.

1.4 Alcance

Con el desarrollo de este proyecto se pretende incursionar en el ámbito de las energías renovables de alta entalpía, al concebir un sistema térmico que no contamine el **medio ambiente** y permita utilizar una fuente energética alternativa, que no provenga de combustibles fósiles, cuyo uso indiscriminado, en el mediano y largo plazo podría degenerar en una crisis energética. Ante este panorama de eventual crisis energética, la Universidad debe enfocar sus esfuerzos de investigación y desarrollo hacia la mejora tecnológica y a la búsqueda de soluciones integrales que contribuyan a la conservación de nuestro ambiente natural, y al mejoramiento de la calidad de vida de la población que lo habita; estableciendo armonía entre las diversas tipologías.

Por otra parte, el desarrollo técnico de este proyecto, tiene especial importancia al presentar el diseño de un horno para tratamientos térmicos de metales utilizando energía solar, que bien podría ser utilizado, en su oportunidad, en el Laboratorio de Metalurgia de la Escuela Politécnica del Ejército pues, entre otras, tiene la ventaja de que sus costos operativos, al utilizar energías renovables, se reducen considerablemente; consiguiendo los mismos resultados metalúrgicos que se obtendrían al realizar tratamientos térmicos con un equipo que utilice energía generada por combustibles fósiles.

1.5. Justificación e importancia

El proyecto está plenamente justificado porque busca alcanzar importantes innovaciones para el aprovechamiento energético solar de alta temperatura.

La conservación del **medio ambiente**, a efecto de que el hombre pueda habitar en un mundo que le ofrezca las mejores condiciones de vida posible y evitar la destrucción de nuestro planeta.

Aprovechar fuentes de energía alternativa, reduciendo las aplicaciones de tipo convencional, especialmente las producidas por la utilización de combustibles fósiles, que tienen un importante peso específico en la contaminación ambiental.

La escasa inversión en investigación científica y tecnológica es notoria en los países subdesarrollados ya que se han convertido en sociedades de consumo donde no existe la menor respuesta ante los espectaculares avances que se consiguen en las naciones industrializadas, es por esta razón que aún los pequeños pasos que se puedan lograr mediante la innovación, permitirán mejorar la calidad de vida de las actuales y futuras generaciones.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

2.1. Radiación solar

La radiación solar está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Algunas de ellas (las de longitud de onda comprendida entre 0,4 y 0,7 μm) pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que se conoce como luz visible. Otras, aunque no son visibles, hacen notar igualmente sus efectos, al ceder a los cuerpos la energía que transportan.

La radiación solar es una manifestación electromagnética de la energía que presenta una amplia distribución espectral, es decir, una gran variedad de componentes elementales de distintas longitudes de onda. El rendimiento de cualquier conversión depende del margen de radiaciones para las que puede trabajar (los materiales que forman los colectores determinan fundamentalmente esta propiedad). Por ello, es necesario utilizar modelos de radiación solar que describan su composición espectral y diferencien los efectos atmosféricos sobre cada componente (figura 2.1).

Una medida de la energía procedente del Sol la constituye la constante solar. Se denomina así a la energía que por unidad de tiempo, que se recibe fuera de la atmósfera terrestre sobre la unidad de superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares en su distancia media, el valor de irradiancia que se admite actualmente es de: $I = 1354 \text{ W/m}^2$ que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2 .

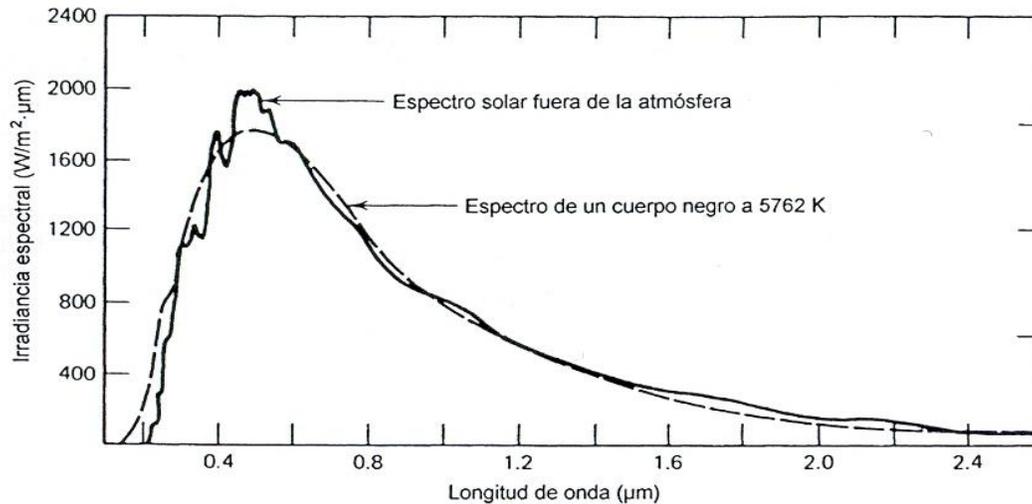


Figura 2.1 Distribución espectral de la radiación solar.

En el equilibrio de la radiación terrestre con el Sol, la aportación solar es equilibrada por una combinación de radiaciones de onda corta y larga que devueltas por la atmósfera y por la superficie de la tierra. La distribución espectral de esta emisión es también próxima a la de un cuerpo negro con una temperatura efectiva de 252 K.

La energía solar es la única fuente a partir de la cual podemos obtener más energía que en el momento actual sin contribuir a un nuevo aporte de energía térmica en la atmósfera. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, aunque el aporte térmico total no varía, su distribución puede variar. El consumo urbano de energía es superior a la aportación solar por superficie, mientras que el consumo agrícola de energía es inferior a la incidencia solar local (figura 2.2).

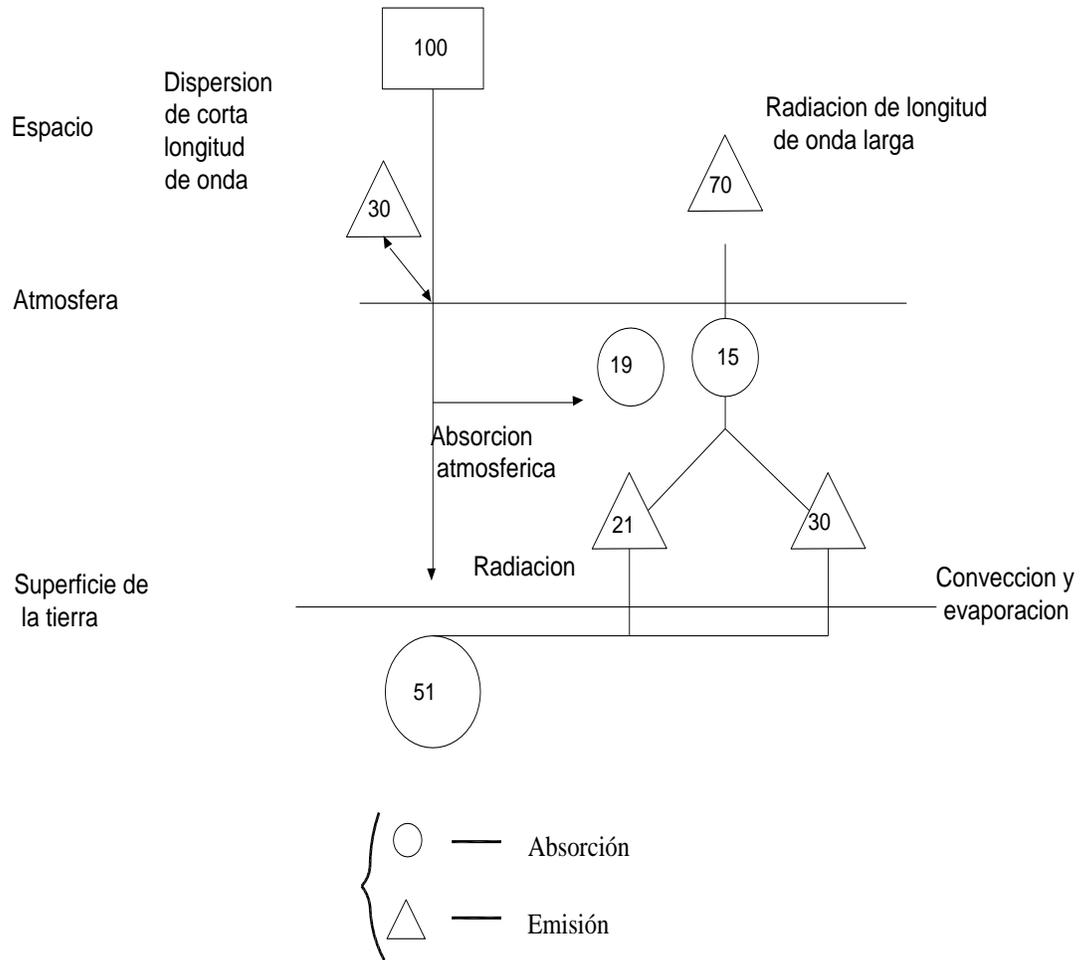


Figura 2.2 Balance de radiación en la tierra.

La radiación media solar es de 1254 W/m^2 , que representa sólo un 40 por 100 de la recibida en los lugares más favorecidos, y de esta cantidad el 60% es radiación difusa. Como la distribución espectral de la luz solar difusa es distinta a la correspondiente a la luz solar directa (figura 2.3). Un colector solar que depende de la longitud de onda, tendrá diferentes rendimientos para diferentes condiciones atmosféricas.

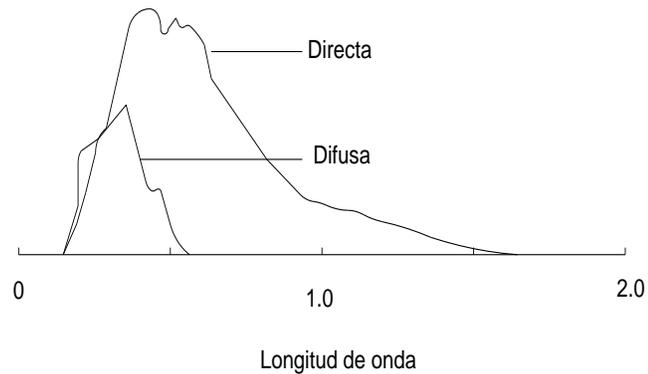


Figura 2.3 Distribución espectral de la luz solar (AM2) directa y difusa.

El cálculo de las horas de luz solar en un lugar, acoplado al conocimiento de la trayectoria aparente del Sol a través del cielo permite realizar comparaciones teóricas sobre el rendimiento relativo de colectores fijos y móviles con seguimiento solar, así como establecer un límite superior a la cantidad de energía captada.

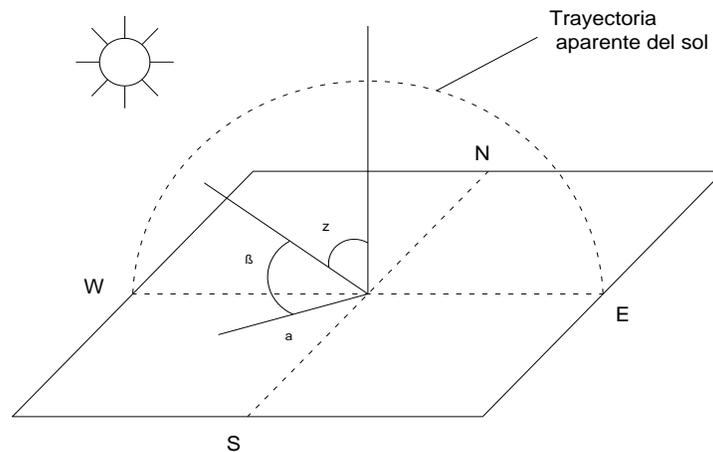


Figura 2.4 Definición de la altura solar β , acimut α y cenit z .

β = ángulo formado por la línea del Sol al centro de la Tierra y la tangente a la superficie terrestre.

α = ángulo formado por el meridiano sur y la proyección de la Tierra-Sol, medido en el plano horizontal hacia el oeste.

z = ángulo formado por la línea del Sol-centro de la Tierra y la normal a la superficie terrestre.

Esto es posible, pues el ángulo del Sol por encima del plano del ecuador celeste (la declinación solar) está tabulado para diversas latitudes a lo largo del año. El cálculo de las horas de luz solar es obviamente un problema geométrico tridimensional. Aunque complicado. Este número, combinado con el número de masas de aire del lugar a lo largo del año y el 3% de variación estacional de la constante solar (debido a la excentricidad de la órbita terrestre) permite obtener la máxima insolación anual del lugar. A continuación se indican las ecuaciones que dan la posición del Sol por encima del horizonte. El ángulo horario de un lugar es igual al número de minutos transcurridos desde el *mediodía solar* local dividido por cuatro para convertirlo en grados. Debemos usar el mediodía solar como referencia, ya que el tiempo de reloj local se mantiene arbitrariamente constante en veinticuatro zonas, cada una con una dispersión de grados de longitud, mientras que el Sol atraviesa un grado cada cuatro minutos (figura 2.4).

$$\text{Sen } \beta = \text{Cos } L \text{ Cos } D \text{ Cos } H + \text{Sen } L \text{ Sen } D \quad (2.1)$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{\text{Cos } D \text{ Sen } H}{\text{Cos } \beta} \quad (2.2)$$

En donde L = latitud, D = declinación y H = ángulo horario.

Estos ángulos se tabulan también para diversas latitudes y ciertas fechas.

La figura 2.5 muestra la variación estacional de la insolación total que incide sobre una superficie horizontal, una superficie vertical mirando al sur y **una superficie mirando al sur**. Pero inclinada un ángulo L respecto a la horizontal. No se ha tenido en cuenta la nubosidad que será mucho más evidente en los meses de invierno en el Reino Unido; sin embargo, en invierno es ventajoso un colector vertical: un colector inclinado tiene una ventaja adicional durante todo el año excepto en los meses de verano. Para corregir este gráfico en lo que se refiere a la radiación difusa predominante en invierno, debe utilizarse un factor geométrico.

La radiación global directa (procedente directamente del Sol) se refleja por la presencia de las nubes, el vapor de agua, y se dispersa por las moléculas de agua, el polvo en suspensión.

La suma de estas componentes da lugar a la radiación global (figura 2.6).

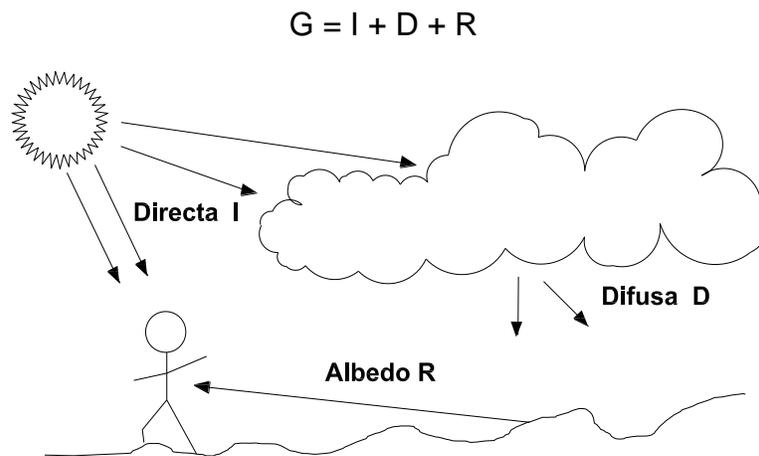


Figura 2.6 Radiación directa, difusa, albedo o reflejada.

Por todo esto, la radiación solar que llega a una superficie se divide en tres:

- Radiación directa
- Radiación difusa
- Albedo

Por lo que la suma de estas tres, nos da como resultado la radiación total o global que podemos captar.

Radiación total

Es el resultado de de la suma de Radiación directa, difusa, y reflejada o albedo, cuando la medida de la radiación se realiza sobre una superficie horizontal no se tiene en cuenta la reflejada, en este caso a la suma de la directa y la difusa se la denomina Radiación global.

2.2. Radiación Directa

Formada por los rayos procedentes del Sol directamente puede enfocarse y producir una imagen (figura 2.7).



Figura 2.7 Radiación Directa.

2.3. Radiación Difusa

Es la procedente de toda la bóveda celeste, excepto la que llega del Sol. Originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera, incluidas las nubes. La radiación difusa (dispersa) incide sobre una superficie bajo cualquier ángulo y, por tanto, no puede ser enfocada (figura 2.8).

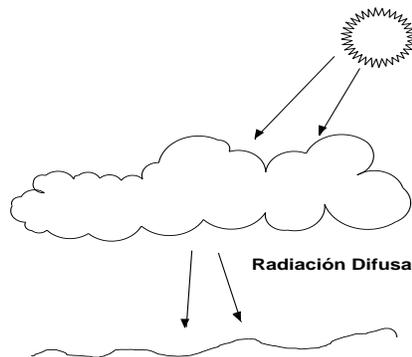


Figura 2.8 Radiación Difusa.

2.4. Albedo

Procedente del suelo, debida a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre éste. Depende directamente de la naturaleza. Al cociente entre la radiación reflejada y el incidente en la superficie de la tierra se le llama albedo.

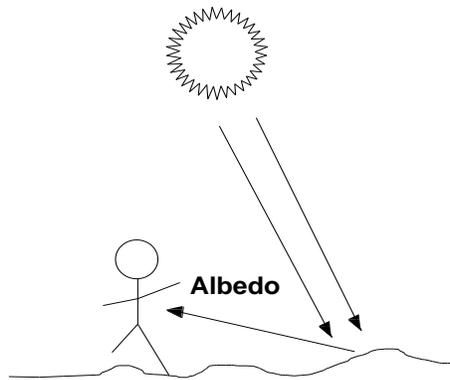


Figura 2.9 Albedo

La insolación directa sobre una superficie inclinada es igual a la cantidad (IN) que recibiría la superficie si fuera normal a los rayos solares, multiplicada por el coseno del ángulo de incidencia (figura 2.9).

La insolación difusa sobre una superficie inclinada viene dada, aproximadamente, por la cantidad recibida por una superficie horizontal (IH) multiplicada por el cuadrado del coseno del ángulo de inclinación de la superficie dividido por dos. La componente difusa de la radiación recibida decrece, lentamente a medida que se incrementa el ángulo de inclinación, pero puede existir también, en una proporción difícil de calcular por causa de la dispersión de la insolación en el suelo y por reflexiones y radiación procedente de superficies próximas (figura 2.10).

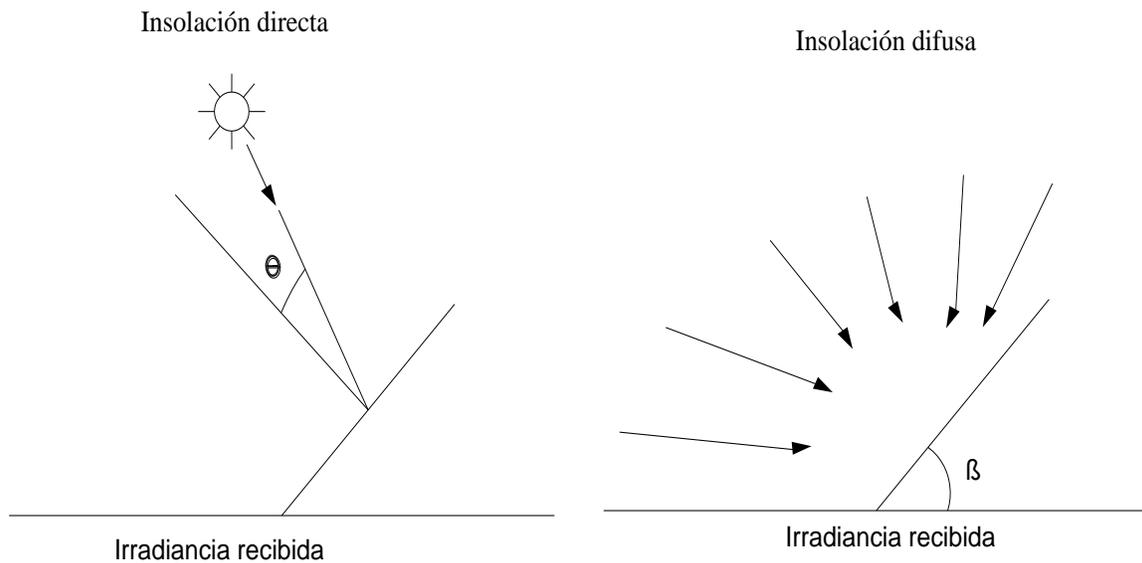


Figura 2.10 Insolación directa, insolación difusa.

De la figura anterior se desprende que θ es el ángulo que forma el rayo incidente y la normal a la superficie y β es el ángulo de inclinación de la superficie.

2.5. Aplicaciones de energía solar de media y alta temperatura

El Sol como recurso renovable, nos da la posibilidad de captar su energía en elementos que el hombre ha creado a lo largo de su existencia, estos equipos se han desarrollado a través del tiempo creando nuevas tecnologías para captar la energía que irradia el Sol, por medio de concentradores cuya transformación puede ser en energía térmica, para producir calor, o en energía fotovoltaica para producir electricidad.

a) Ventajas del empleo de concentradores:

1. La cantidad de energía almacenada sobre la superficie de absorción por unidad de área aumenta, con lo cual se pueden alcanzar altas temperaturas

aprovechables en algún ciclo termodinámico o en dispositivos termoiónicos, termoeléctricos, magnetohidrodinámicos u otros.

2. Reduciendo las pérdidas de calor al utilizar un absorbedor de menor área no sólo se mejoran las eficiencias térmicas sino que también se reducen efectos transitorios, ya que la masa térmica es mucho más pequeña que en colectores planos.

3. Los costos se reducen, pues se reemplaza un absorbedor costoso por un área reflectora o refractora menos costosa.

b) Principales desventajas de los concentradores:

1. Trabajan sólo con la componente directa de la radiación solar; el criterio de selección de estos sistemas debe incluir características geográficas, quedando restringida su utilización a lugares de alta insolación.

2. La calidad óptica de la superficie reflectora requiere mantenimiento y protección intensiva contra su exposición a la intemperie.

Para la solución del problema planteado para este proyecto, necesitamos de concentradores que transformen la energía captada del sol en calor.

Los concentradores estacionarios se caracterizan por su concentración: mayor de 1 y menor de 10; no requieren un seguimiento preciso sino sólo un ajuste ocasional a lo largo del año. En cambio, los concentradores con razón de concentración dentro del intervalo de 10 a 3 000 necesitan que sus curvaturas geométricas sean muy precisas, al igual que su mecanismo seguidor.

Los concentradores menos complejos de este tipo son los que no requieren seguimiento continuo del Sol; éstos tienen un ángulo de aceptación muy grande,

concentración baja y diseño con base en alguna curvatura sencilla; su orientación debe ser en dirección este-oeste a fin de obtener mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptación grandes; las concentraciones pueden llegar hasta 10 con un tiempo de captación del orden de 7 h. Los concentradores más simples son los primeros (figura 2.10), corresponde a un colector plano inclinado un ángulo β que recibe la radiación solar proveniente del Sol y la reflejada por un espejo horizontal; la segunda (figura 2.11) presenta colectores horizontales con espejos inclinados que reflejan la radiación sobre el colector.

Estos colectores se denominan de baja temperatura, pues los rangos que se pueden alcanzar están entre 38°C y 100°C.

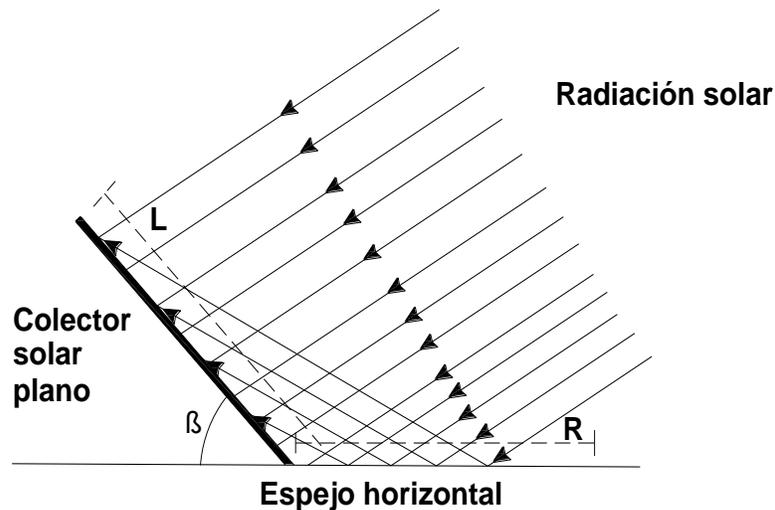


Figura 2.11 Colector plano con un espejo plano.

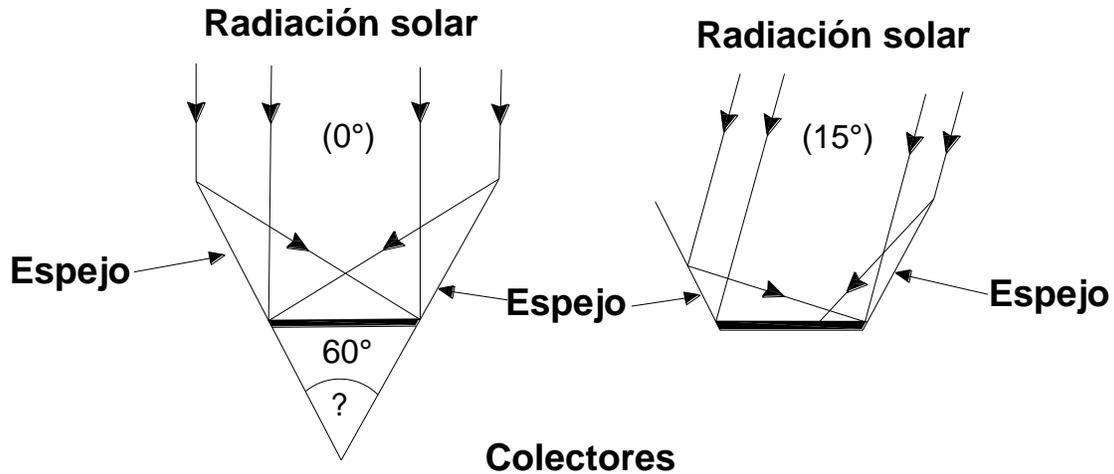


Figura 2.12 Colector plano con dos espejos planos.

Los llamados concentradores de media y alta temperatura, son dispositivos en los que se obtiene alta densidad de energía (radiación concentrada) sobre un absorbedor, suficiente para lograr temperaturas superiores a 200°C , pudiéndose llegar hasta 3800°C . Para lograr altas concentraciones (RC superior a 100) se requieren mecanismos muy precisos para seguir el movimiento virtual del Sol.

Dentro de los concentradores de media temperatura, considerada esta entre 100°C A 400°C se encuentran los concentradores cilíndricos parabólicos, y los paraboloides de revolución o parabólicos; finalmente están los denominados concentradores de alta temperatura, que son aquellos cuyas temperaturas se encuentran entre 400°C hasta 3000°C ; para esto se utilizan hornos solares, concentradores parabólicos, torres de potencia.

Para el desarrollo del proyecto propuesto, es de interés el análisis de concentradores de media y alta temperatura.

En el marco de estas tecnologías se propone diferentes modelos que nos permitan decidir con cual de estas alternativas se desarrollarán los cálculos y análisis respectivos para la consecución del objetivo de este proyecto que, como

ya se mencionó, **consiste en el diseño de un horno para tratamientos térmicos utilizando energía solar concentrada.**

A continuación citaremos algunas definiciones necesarias para entender los concentradores solares:

Radiación solar:

Energía radiante recibida del Sol en su forma directa y difusa. La componente directa es la que se recibe directamente del Sol sin haber sufrido ninguna desviación en su trayectoria; la difusa se debe a su dispersión al atravesar la atmósfera y reflexión sobre la Tierra.

Colector solar

Dispositivo que absorbe la radiación solar y transfiere su energía a un fluido.

Concentrador

Dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor.

Absorbedor

Componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar.

Área del absorbedor

Área que recibe la radiación concentrada.

Área de apertura

Área del captador que intercepta la radiación solar.

Razón de concentración (RC)

Se define como el cociente entre el área de la superficie colectora y el área del absorbedor.

Ángulo de aceptación

Amplitud de la zona angular dentro de la cual la radiación es captada por el absorbedor de un concentrador. Por ejemplo, el valor mínimo de aceptación es del orden de $1/2^\circ$ y se debe al tamaño finito del Sol, mientras que un colector plano tiene un ángulo de aceptación de 180° .

Eje de concentrador

Línea que pasa por el foco y su vértice.

Ángulo de borde

Ángulo formado por el eje de un concentrador (tipo parabólico) y la línea imaginaria que va desde su borde al punto focal.

Absortancia

Razón de la radiación solar absorbida a la radiación incidente.

Emitancia

Razón de radiación emitida por la superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura.

Eficiencia óptica de un colector

Razón de la energía captada por el colector solar a la energía solar incidente sobre el colector.

Helióstato

Dispositivo que sirve para reflejar la componente directa de la radiación solar sobre un blanco fijo, es utilizado en torres de potencia.

Reflejancia

Razón de radiación reflejada de un material a la radiación incidente sobre el mismo.

Reflejancia especular

Esta consiste cuando una fracción de la energía entrante incide sobre un espejo con un ángulo de incidencia particular, entonces ésta es reflejada dentro de un cierto ángulo sólido que estará centrado alrededor de un rayo reflejado con un ángulo igual al de incidencia respecto de la normal.

Factor de forma

Razón de la energía (radiación) incidente sobre el absorbedor a la radiación directa incidente sobre el área de apertura del concentrador.

Transmitancia

Razón de la energía radiante transmitida por un material dado a la energía solar incidente.

Eficiencia óptica de un colector

Razón de radiación que recibe la apertura de un colector ideal en dirección al Sol a la que es eventualmente absorbida por el absorbedor de un colector real que puede no estar dirigido directamente hacia el Sol.

Esta eficiencia depende de la reflejancia del espejo, transmitancia de la envolvente que pueda existir sobre el absorbedor, absortividad del absorbedor, factor de forma del sistema concentrador y del ángulo de incidencia de los rayos concentrados hacia el absorbedor.

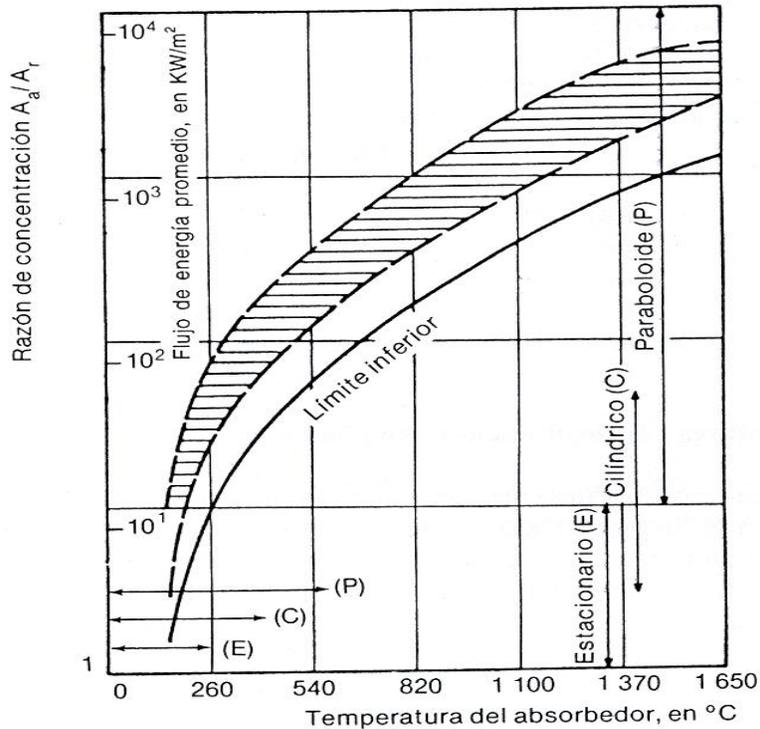


Figura 2.13 Relaciones entre razón de concentración y temperatura de operación del absorbidor.

La curva límite inferior representa razones de concentración a las cuales las pérdidas térmicas son iguales a la energía generada. La región sombreada corresponde a eficiencias de colección de 40 a 60% y representa el intervalo usual de buena operación. La escala de densidad de flujo muestra la densidad de flujo promedio de radiación reflejada en el área focal.

Los concentradores estacionarios de mayor concentración son los llamados parabólicos compuestos (CPC), desarrollados por Welford y Winston (1978) y Rabl (1976). Están formados por dos segmentos parabólicos simétricamente colocados alrededor de un eje; el foco de cada parábola se localiza en el extremo de la superficie del absorbidor coincidente con la parábola opuesta. El ángulo de cada eje de la parábola proporciona el ángulo de aceptación del concentrador.

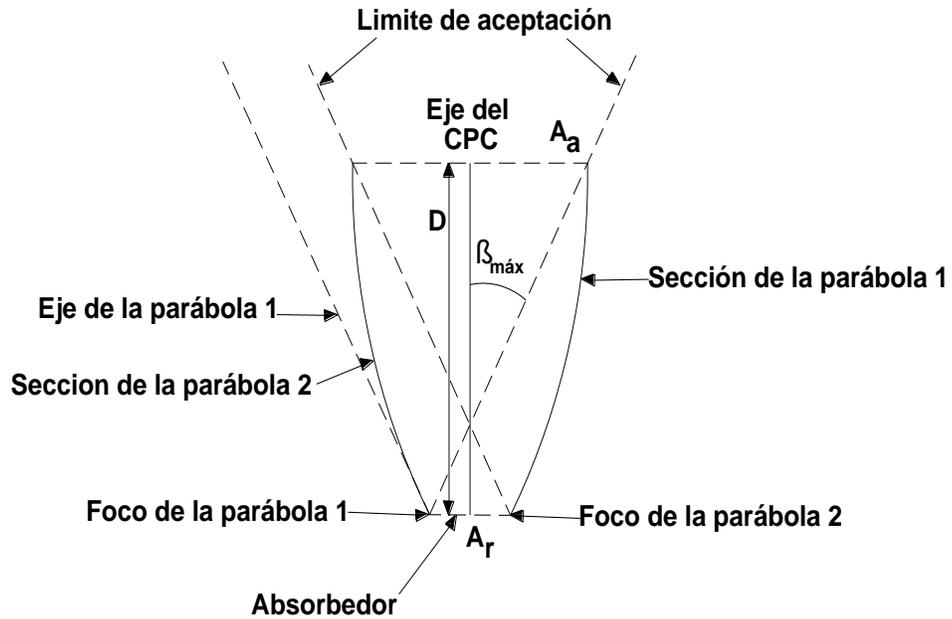


Figura 2.14 Concentrador parabólico compuesto.

Tabla 2.1 Algunos valores representativos de los concentradores CPC:

Razón de concentración	Ángulo de aceptación (θ_{\max})	Número de reflexiones en el espejo
10	5,7	1,25
5	11,5	0,99
1,4	36	0,25

$$R = I - (e_m)^n \quad (2.3)$$

En donde:

R representa las pérdidas por reflejancia, e_m reflejo del espejo, y n número de reflexiones.

2.5.1 Concentradores Parabólicos

Cuando se necesitan concentraciones mayores de 10 por períodos diarios de 6 h por día a lo largo de todo el año, se requieren sistemas con seguimiento del Sol. Existen dos tipos diferentes de concentradores al respecto: los de curvatura simple o concentradores cilíndricos, ya sea con curvatura circular o parabólica, (figura 2.15), y los de curvatura compuesta, o tipo platillo como los paraboloides de revolución y los casquetes semiesféricos (figura 2.16). Los concentradores de curvatura simple necesitan mecanismo seguidor con un grado de libertad (foco lineal), y los de curvatura compuesta dos grados de libertad (foco puntual). En estos sistemas, el seguimiento del Sol se hace generalmente a través de sensores foto sensitivos que envían una señal de naturaleza eléctrica a un sistema electrónico y un servomecanismo.

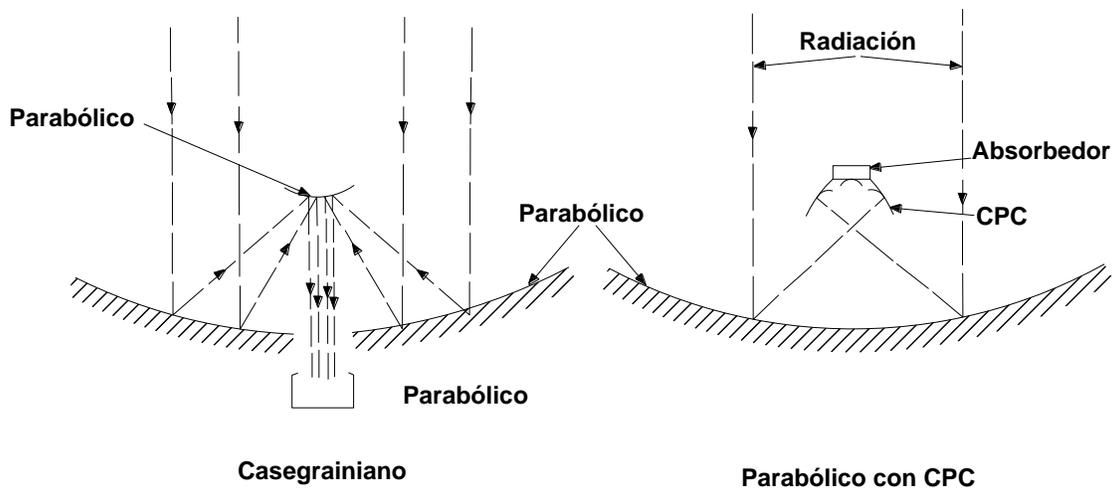


Figura 2.15 Concentrador de curvatura simple o cilíndrico parabólico.

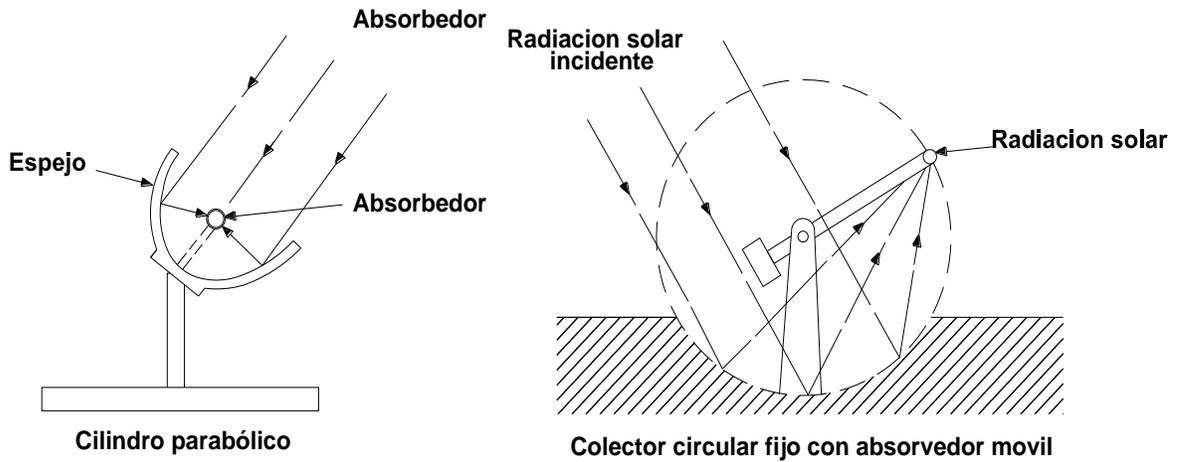


Figura 2.16 Concentrador de curvatura compuesta o paraboloide.

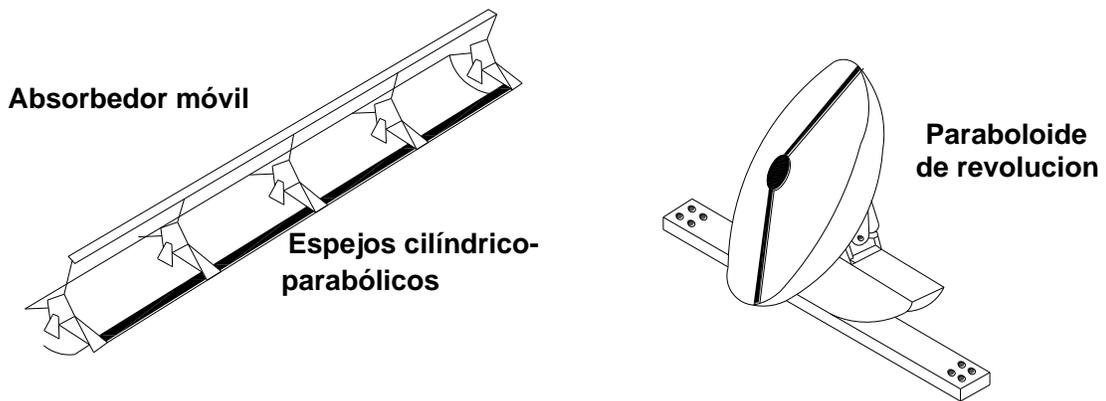


Figura 2.17 Concentradores de seguimiento continuo.

Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador cilíndrico-parabólico figura 2.18. En general, en los sistemas que están operando actualmente, el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultáneamente; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola.

Las concentraciones en dichos sistemas están en el intervalo de 15 a 50, y las temperaturas de trabajo alcanzables son del orden de 200°C y 350°C.

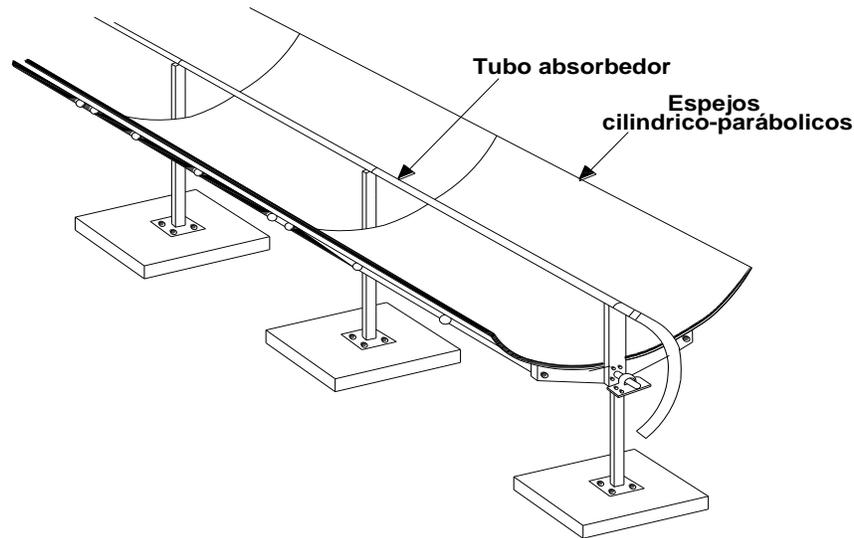


Figura 2.18 Captador cilíndrico-parabólico.

Para concentraciones arriba de 50 es necesario utilizar sistemas de curvatura compuesta, como son los reflectores parabólicos o los casquetes semiesféricos. Idealmente, estos sistemas funcionan durante todo el día con una incidencia de la radiación normal a su apertura con excepción del sistema conocido como reflector esférico estacionario con absorbedor móvil (SRTA), que se lo analizaremos más adelante.

a) Parabolooides de revolución

Los espejos parabólicos son los únicos que mantienen una distancia focal constante desde el vértice del propio espejo.

El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje óptico.

En este tipo de concentradores se pueden alcanzar concentraciones de 500 a 3600. Debido al tamaño finito del Sol y a imperfecciones en la construcción de los espejos, el foco en sistemas de este tipo no es puntual. Las temperaturas que se han logrado alcanzar en estos sistemas van desde los 500 hasta los 2000 °C.

Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiactivas; generalmente no es necesario utilizar cubierta en el absorbedor para evitar efectos conectivos.

El funcionamiento de un paraboloide de alta concentración es mucho más sensible a las propiedades ópticas del sistema que a las pérdidas térmicas.

b) Sistema SRTA

En la figura 2.19 se muestra cómo con un espejo a base de un casquete semiesférico se efectuaría el enfoque sobre un absorbedor lineal de tamaño apreciable, colocado paralelo a la radiación solar incidente.

Dado que el espejo es estacionario en este tipo de concentradores, se pueden construir con relativa facilidad unidades grandes. Además, se reducen grandemente las pérdidas que ocurren al transportar la energía térmica, y los costos de instalación y bombeo del fluido de trabajo. Con excepción de la torre central (sobre la cual explicaremos más adelante), otros tipos de concentradores consisten en muchos colectores pequeños que sufren pérdidas térmicas y mecánicas al transportar los fluidos de trabajo.

Una de las desventajas de este sistema es la llamada pérdidas por el coseno del ángulo de incidencia de la radiación solar. Ya que la apertura de este concentrador no sigue al Sol, la componente directa de la radiación solar es proporcional al

coseno del ángulo entre los rayos solares y la normal al plano de apertura, o sea al ángulo de incidencia, el cual depende de la latitud del lugar y de la orientación del espejo, y varía con la hora del día y la época del año. Dado que las pérdidas del absorbedor por convección y radiación son constantes para una temperatura dada, la eficiencia de este sistema depende del ángulo de incidencia, por lo que resultan adecuados en regiones de baja latitud.

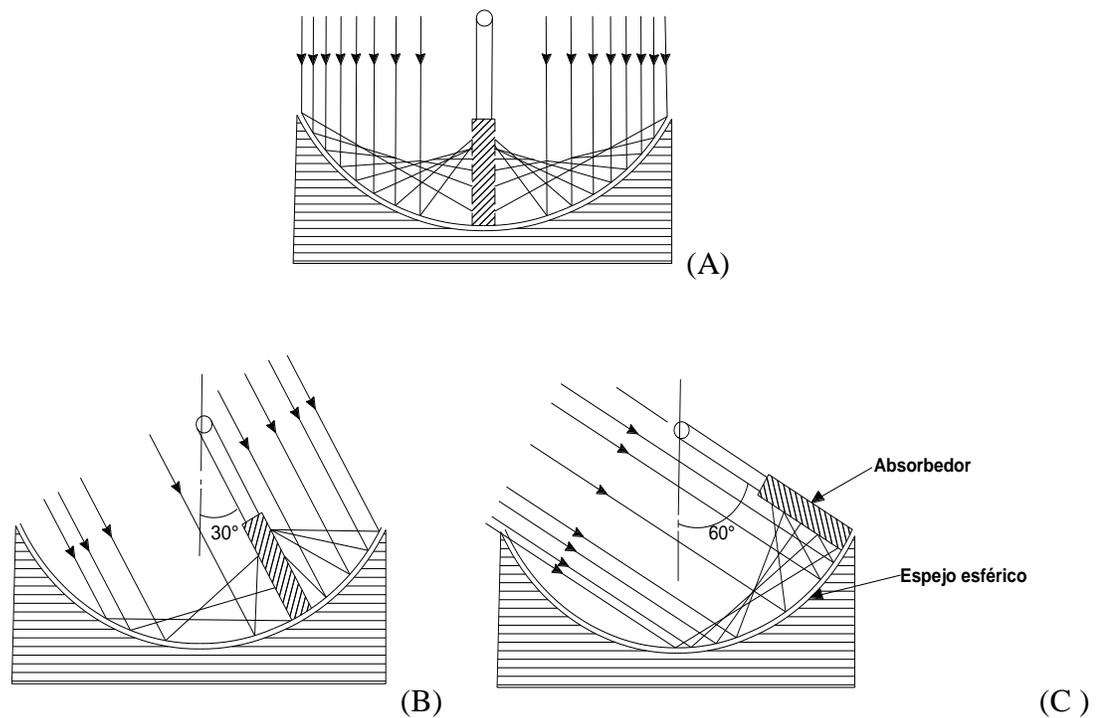


Figura 2.19 Sistema SRTA con diferentes posiciones de la radiación solar incidente.

- (A) Eje focal paralelo al rayo de incidencia.
- (B) Eje focal rotado 30° .
- (C) Desplazamiento del eje focal con un ángulo de 60° .

Cualquier tipo de concentrador aprovecha únicamente la componente directa de la radiación solar; por ello, la selección del concentrador más apropiado depende del lugar geográfico en que será utilizado.

Los principales desarrollos que se hacen actualmente en este campo de aplicación de la energía solar se encuentran aún a nivel de prototipos en nuestro país; otros países como Estados Unidos e Israel, ya han industrializado estos sistemas.

Las principales limitaciones de los concentradores son: calidad, durabilidad y costo; el aumento de los dos primeros y el abatimiento del último son tema de investigación y desarrollo en diferentes laboratorios del mundo.

Por lo que respecta a la comprobación opticogeométrica de los espejos, es importante destacar que para estudios de concentradores es necesario contar con un laboratorio de óptica en el que se puedan realizar pruebas como las enunciadas en este trabajo.

Una de las principales aplicaciones de los concentradores es en procesos industriales, para producir calor a temperaturas entre 100 y 300 °C; el estado de este arte es tal que estas aplicaciones ya se llevan a la práctica (Kreith, Davenport y Feustel, 1983).

Tomando en cuenta estas consideraciones, se propone la primera alternativa para la solución del problema planteado en este proyecto, y se trata de un horno para tratamientos térmicos de metales utilizando un concentrador parabólico, con estructura soporte, sistema de seguimiento en dos ejes, y una cámara de reacción para realizar determinados tratamientos térmicos (figura 2.20).

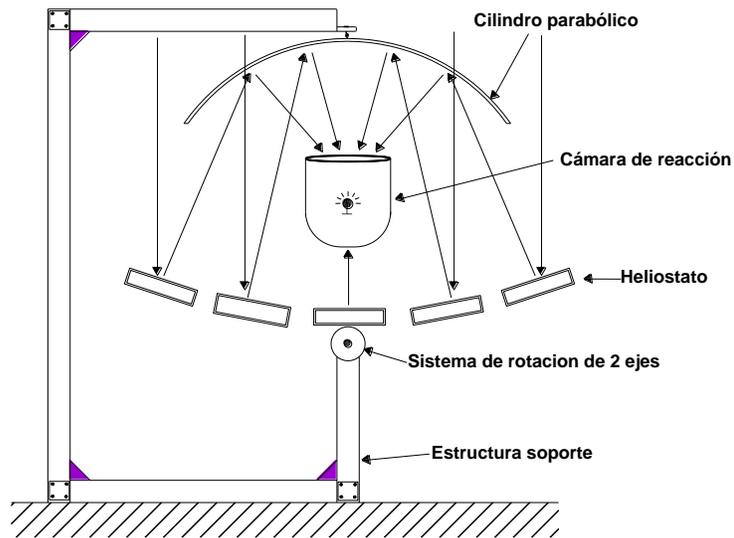


Figura 2.20 Horno para TTM, con concentrador cilíndrico parabólico compuesto.

2.5.2 Lente de Fresnell

a) Posibilidades de concentración:

Existen dificultades en la obtención de grandes elementos ópticos refractantes, por lo que se sugiere que los espejos y no los lentes se conviertan en importantes colectores foto térmicos.

En cuanto a las lentes, se pueden utilizar como concentradores para pequeñas aplicaciones, de allí que para reducir el peso del dispositivo se puede convertir en una lente de Fresnell con superficie perfilada de acuerdo como se indica en la figura 2.21.

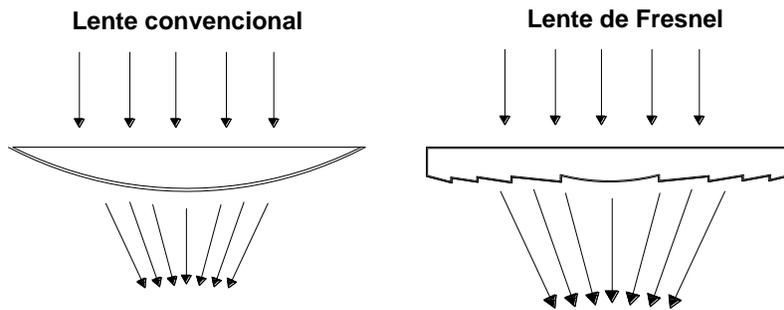


Figura 2.21 Sección transversal de una lente de Fresnell y un lente convencional.

b) Geometría de lentes:

Los lentes convergentes tienen mayor espesor en el centro que en los bordes, y los rayos luminosos que inciden en ellos, son paralelos al eje convergente en un foco real (figura 2.22).

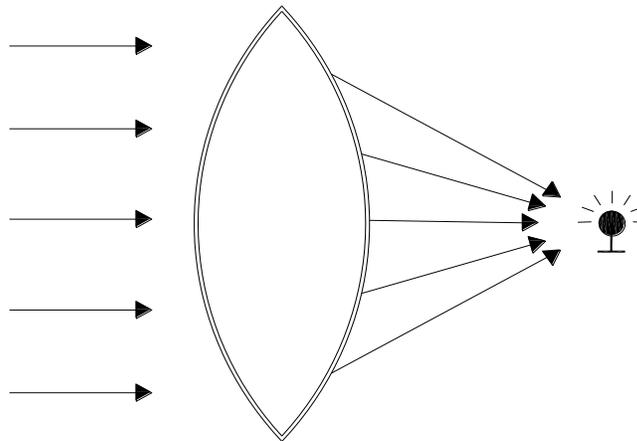


Figura 2.22 Lentes convergentes.

Por otra parte el foco es virtual en los lentes divergentes como se lo muestra en la siguiente figura 2.23.

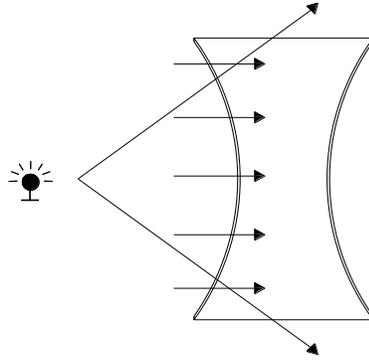


Figura 2.23 Lentes divergentes.

La distancia entre el foco principal y el centro de la lente se denomina distancia focal. Para el presente proyecto se utilizará la lente convergente la misma que puede ser de tipo convencional o de Fresnell.

Radio de curvatura del espejo.

El radio de curvatura del espejo se lo determina con la siguiente relación:

$$r = 2 * f \tag{2.4}$$

En donde: f es la distancia focal y r el radio de curvatura del espejo, como se muestra en la figura 2.24.

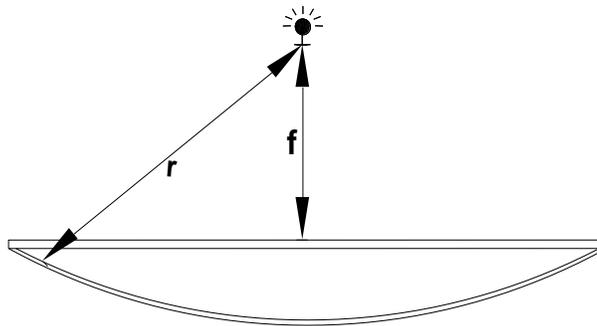


Figura 2.24 Geometría de un lente cilíndrico convencional.

Distancia focal

Como se había manifestado anteriormente es la distancia que existe entre el diámetro del espejo y esta ubicado en el eje focal real donde convergen los rayos luminosos.

Existen diversas correlaciones que permiten encontrar la distancia focal, sin embargo dentro del estudio de elementos ópticos se recomienda utilizar el siguiente rango de aplicación:

$$0.25 \leq \frac{f}{d} \leq 0.6 \quad (2.5)$$

Además, es importante anotar que la siguiente ecuación nos permite calcular el valor c , que es la profundidad de la parábola en el centro para un paraboloide de disco circular.

$$c = \frac{d}{16 \left(\frac{f}{d} \right)} \quad (2.6)$$

En donde : c es la profundidad de la parábola en el centro para un paraboloide de disco circular, f es el foco y d es el diámetro del espejo.

Existen alternativas en cuanto a la utilización del lente de Fresnell, una de ellas es la captación de la energía solar para concentrarla en la cámara de reacción, ubicada en el foco de la parábola como se muestra en la figura 2.25.

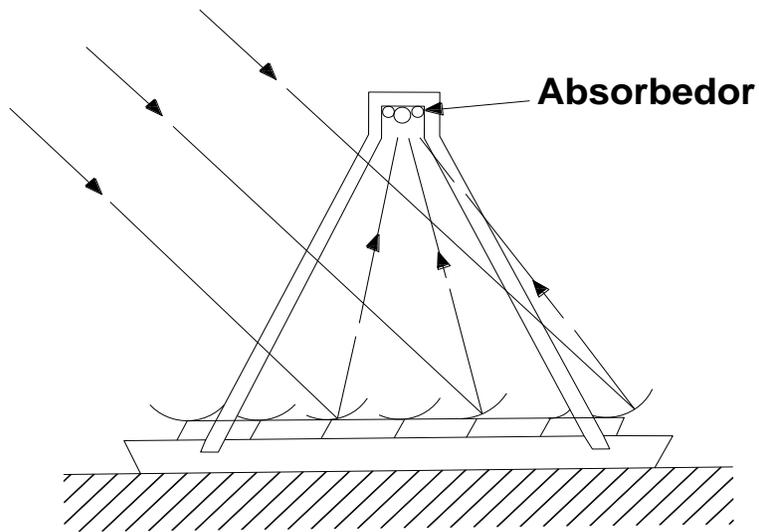


Figura 2.25 Espejo tipo Fresnell.

De lo analizado anteriormente se presenta como segunda alternativa para la solución del problema motivo de este proyecto, un horno para tratamientos térmicos utilizando una lente de Fresnell, con estructura soporte, y sistema de seguimiento con dos grados de libertad (figura 2.26).

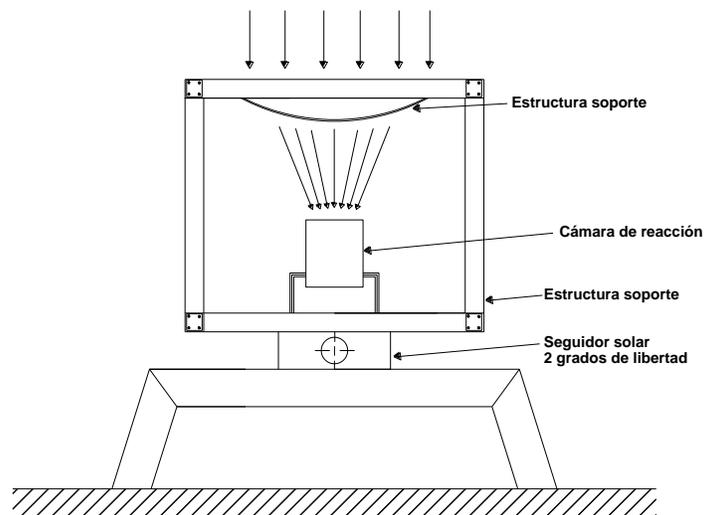


Figura 2.26 Horno para TTM, utilizando Lente de Fresnell.

2.5.3 Torres de Potencia

Se desarrolla actualmente para generar altas potencias, del orden de MW. Consiste en un conjunto de helióstatos que reflejan la radiación solar directa hacia una torre central, con un absorbedor colocado en la parte alta de la torre.

En dichos sistemas se logran razones de concentración máximas de 3 000 Y temperaturas en el intervalo entre 500 y 2000 °C. El arreglo del sistema de torre central evita instalar gran cantidad de tuberías para cubrir grandes distancias de transporte del fluido de trabajo, reduciendo así las pérdidas de calor. El mayor costo de este tipo de instalación se debe a la gran cantidad de helióstatos que siguen al Sol y a que el absorbedor debe ser capaz de recibir a 1 a 2 MW/m² de flujo de energía solar y transferir el calor con un mínimo de pérdidas (figura 2.27).

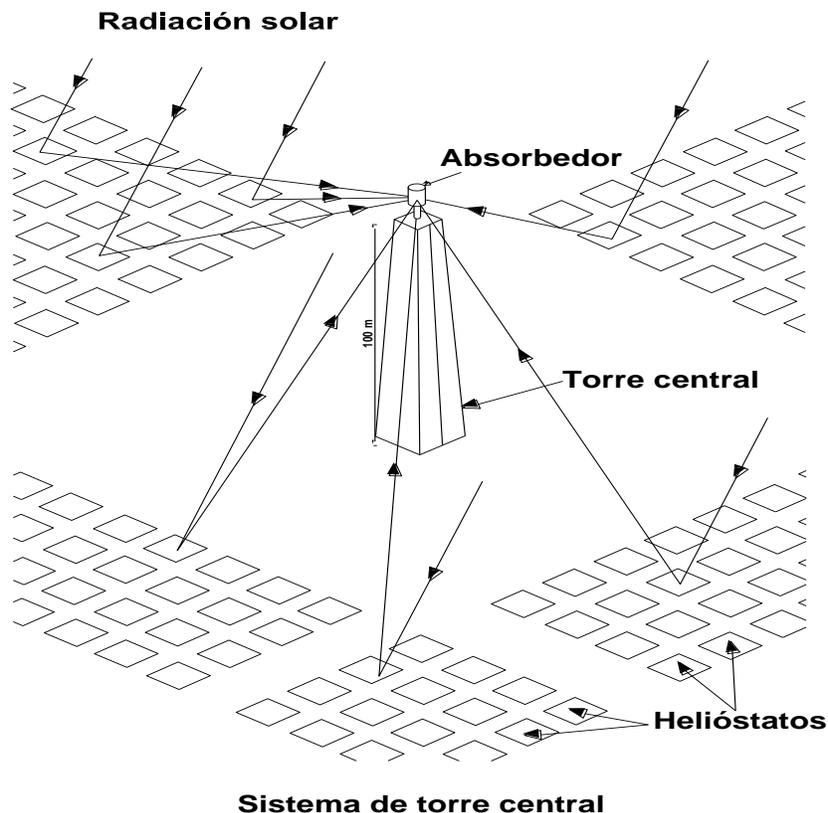


Figura 2.27 Sistema de torre central.

Para el analizar la factibilidad de utilizar este tipo de tecnología en este proyecto, una de las variables a considerar es el costo de instalación, de operación y mantenimiento; por las características del sistema requiere de una alta inversión, que probablemente no se justificaría.

A partir de este modelo se concibe una de las alternativas de solución al problema planteado en este proyecto, que consiste en exponer la cámara de reacción para tratamientos térmicos a la radiación reflejada por un cuerpo de helióstatos, los cuales cuentan con sistemas de seguidores solares, como se grafica en la figura 2.28.

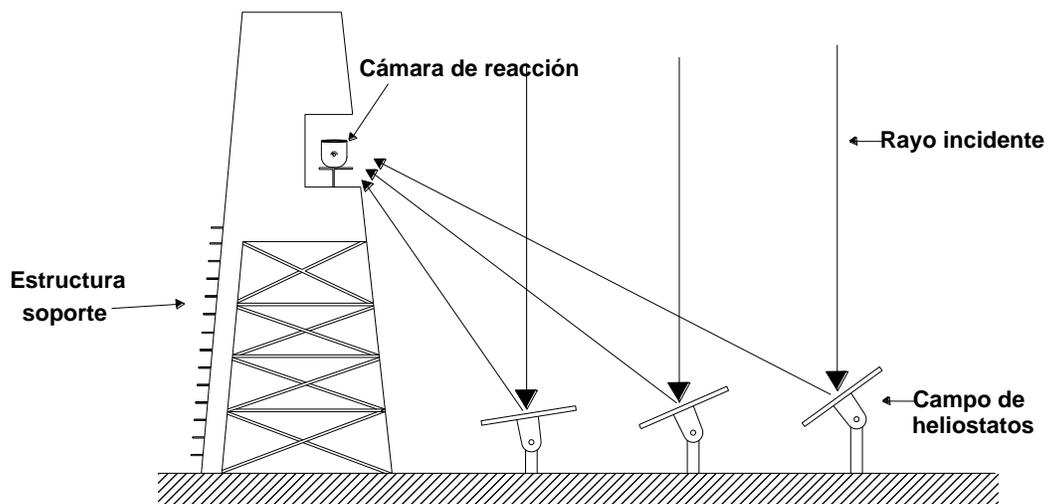


Figura 2.28 Horno para TTM utilizando una Torre de potencia

Estos sistemas son muy costosos; y además su operatividad es más compleja y requieren de otros sistemas adicionales para su mejor aprovechamiento. Una muestra de estos sistemas se encuentra en la plataforma solar de Almería, España.

2.1. Matriz de decisión

Realizado el análisis de los diferentes tipos de concentradores de media y alta temperatura, se propone 3 alternativas de diseño para un horno de tratamientos térmicos para metales utilizando energía solar.

Estos diseños se los propone en primera aproximación, y a partir de la matriz de decisión se procederá al diseño definitivo.

Alternativa A: De acuerdo a la figura 2.29, el esquema propone un concentrador cilíndrico parabólico, helióstato, más la cámara de reacción.

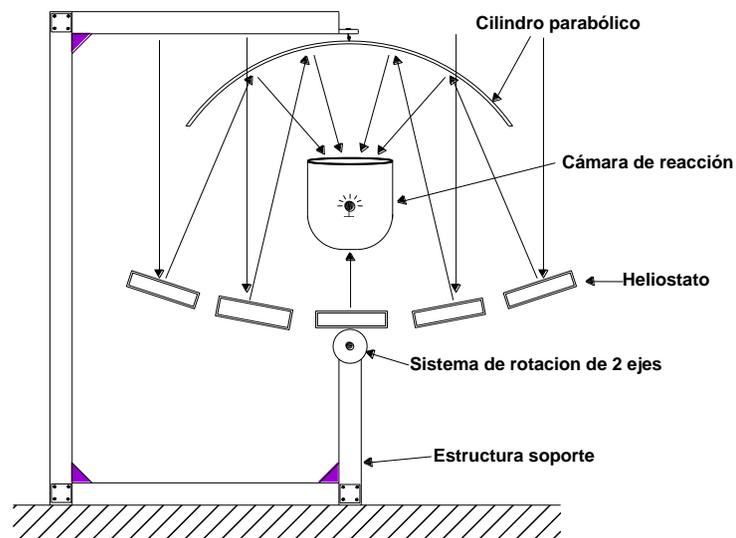


Figura 2.29 Alternativa A. Campo de helióstatos y paraboloides.

Alternativa B: De acuerdo a la figura 2.30, el esquema propone un sistema solar para tratamientos térmicos utilizando lente de Fresnell, cámara de reacción, y un sistema de seguidor solar en dos ejes.

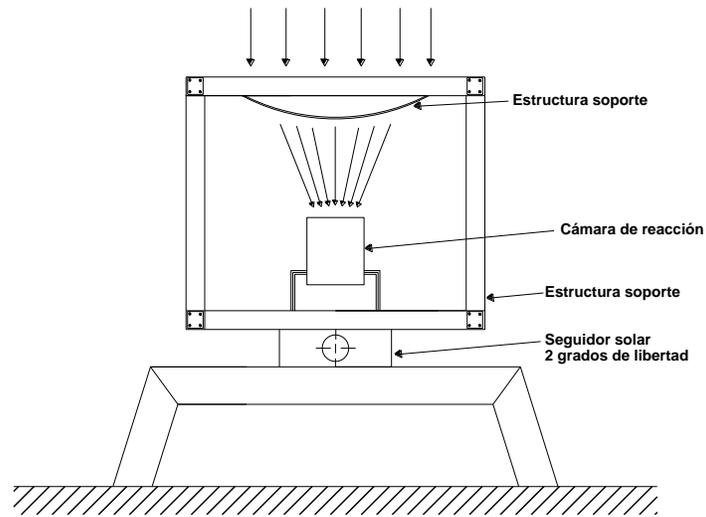


Figura 2.30 Alternativa B de solución al problema planteado en este proyecto.

Alternativa C: De acuerdo a la figura 2.31, el esquema propone captar la energía solar utilizando una torre de potencia, y un horno en donde se podría realizar el tratamiento térmico.

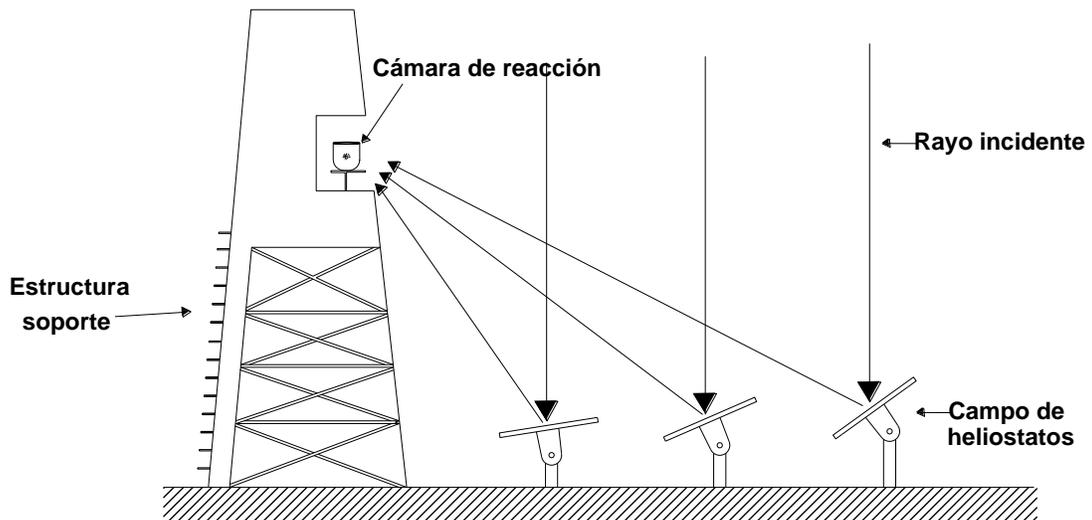


Figura 2.31 Alternativa C. Campo de helióstatos y torre central.

Tabla 2.1 Matriz elemental de selección de alternativas

		A	B	C
ASPECTOS	PONDERACIÓN	CALIFICACIÓN		
TÉCNICOS	50	35	40	36
disponibilidad de materiales	15	13	10	8
facilidad de fabricación	15	10	13	8
grado de dificultad	12	7	9	12
confiabilidad	8	5	8	8
ECONÓMICOS	30	23	23	22
inversión inicial	20	16	15	12
operación y mantenimiento	10	7	8	10
COMPLEMENTARIOS	20	5	17	12
operabilidad	8	2	8	8
facilidad de transporte	3	1	2	3
flexibilidad del equipo	5	1	4	0
seguridad	4	1	3	1

		A	B	C
PARÁMETROS-ASPECTOS	PONDERACIÓN	CALIFICACIÓN		
TÉCNICA	50	35	40	36
ECONÓMICA	30	23	23	22
COMPLEMENTARIA	20	5	17	12
PUNTUACIÓN TOTAL	100	63	80	70

Alternativa A: Concentrador cilíndrico parabólico, más helióstato, más la cámara de reacción.

Alternativa B: Lente de Fresnell, cámara de reacción, y un sistema de seguidor solar en dos ejes.

Alternativa C: Torre de potencia, sistema de helióstatos, cámara de reacción.

De acuerdo con los datos obtenidos en la matriz elemental de decisión tabla 2.1, podemos indicar que la alternativa más viable corresponde al desarrollo del sistema solar para tratamientos térmicos utilizando lente de Fresnell, cámara de reacción y los dos sistemas de seguimiento que corresponde a la alternativa B.

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE METALES

Antes de definir los tratamientos térmicos como temple, revenido, y recocido, es necesario mencionar determinados conceptos y consideraciones que nos permitirán entender de una mejor manera los procesos de mejoramiento superficial de los metales.

3.1. Materiales y su clasificación

Los materiales son las sustancias que componen cualquier cosa o producto.

Desde el comienzo de la civilización, los materiales junto con la energía han sido utilizados por el hombre para mejorar su nivel de vida. Como los productos están fabricados a base de materiales, estos se encuentran en cualquier parte, alrededor nuestro..Los más comúnmente encontrados son: la madera, hormigón, ladrillo, acero, plástico, vidrio, caucho, aluminio, cobre y papel. Existen muchos más tipos de materiales y sólo se tiene que mirar al alrededor para darse cuenta de ello. Debido al progreso de los programas de investigación y desarrollo, se están creando continuamente nuevos materiales.

La producción de nuevos materiales y su procesamiento hasta convertirlos en productos terminados, constituyen una parte importante de nuestra economía actual. Los ingenieros diseñan la mayoría de los procesos necesarios para su fabricación. Puesto que la producción necesita materiales, se debe conocer la estructura interna y sus características, de modo que se pueda seleccionar el mas adecuado para cada aplicación y también capaces de desarrollar los mejores métodos de transformación.

La incorporación de nuevas tecnologías a los procesos industriales ha hecho que los especialistas pongan todas sus capacidades en la creación de nuevos materiales o el mejoramiento de las propiedades de los ya existentes, para poder ofrecer alternativas en el uso de materiales a procesos industriales y tecnológicos de última generación.

3.1.1. Tipos de materiales

Por conveniencia, la mayoría de los materiales de la ingeniería se encuentran divididos en tres grupos principales: materiales metálicos, polímeros, y cerámicos.

a) Materiales metálicos.- Estos materiales son sustancias inorgánicas que están compuestos por uno o más elementos metálicos como: hierro, cobre, aluminio, níquel y titanio; pudiendo contener también algunos elementos no metálicos como el carbono.

Los metales son electropositivos (tienden a perder electrones), son buenos conductores del calor y la electricidad. En estado sólido, los metales tienen estructura cristalina (los átomos están situados en los nudos de una red regular y definida). Los metales son isotrópicos (tienen iguales propiedades en todas las direcciones).

Los defectos de la red, que provocan una disminución de la resistencia son:
Vacancia: falta de átomos dentro de su distribución normal.
Dislocaciones: se produce la falta o discontinuidad en la línea de átomos (alteraciones en el paralelismo de la estructura).

Átomos intersticiales: aparecen átomos de elementos de aleaciones con distinta estructura interna.

b) Polímeros.- En estos se incluyen el caucho (hule), los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Se producen creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas del petróleo o productos agrícolas.

c) Cerámicos.- Los materiales de cerámica, como los ladrillos, el vidrio, la loza, los aislantes y los abrasivos, tienen escasa conductividad tanto eléctrica como

térmica y aunque pueden tener buena resistencia y dureza, son deficientes en ductilidad, conformabilidad y resistencia al impacto.

3.1.2 Enlaces atómicos para la configuración de materiales.

Los enlaces atómicos se producen siempre en dirección de las condiciones energéticas más estables. Es decir frente a un desequilibrio en la energía potencial de determinado átomo, se produce un enlace atómico.

Existen dos tipos de enlaces:

a) Primarios o fuertes: iónico, covalente y metálico.

b) Secundarios o débiles: de dipolo permanente y de dipolo oscilante.

a) Enlaces Primarios o Fuertes

- Enlaces metálicos:

Se presenta en metales en estado sólido, los átomos se encuentran empaquetados relativamente juntos en una ordenación sistemática o estructura cristalina. Por ejemplo la disposición de los átomos de cobre en el cobre cristalino figura 3.1 (a), en este caso los átomos están tan juntos que sus electrones externos de valencia son atraídos por los núcleos de sus numerosos vecinos. En el caso del cobre sólido cada átomo está rodeado por otros 12 átomos más próximos. Los electrones de valencia no están por lo tanto asociados férreamente a un núcleo en particular y así es posible que se extiendan entre los átomos en forma de una nube electrónica de carga de baja densidad o gas electrónico figura 3.1 (b). Los átomos en un enlace metálico sólido se mantienen juntos para lograr un estado de baja energía (o más estable). Para el enlace metálico no hay restricciones sobre pares electrónicos como en el enlace covalente o sobre la neutralidad de carga como en el enlace iónico. En el enlace metálico los electrones de valencia más externos de los átomos son compartidos por muchos átomos circundantes y de este modo, en general, el enlace metálico no resulta direccional. Los metales resultan buenos conductores del calor y de la electricidad porque tiene un electrón libre, adicionalmente la capacidad de sufrir

deformaciones sin fracturas se debe a que los átomos pueden deslizarse unos sobre otros sin distorsionar completamente la estructura del enlace metálico.

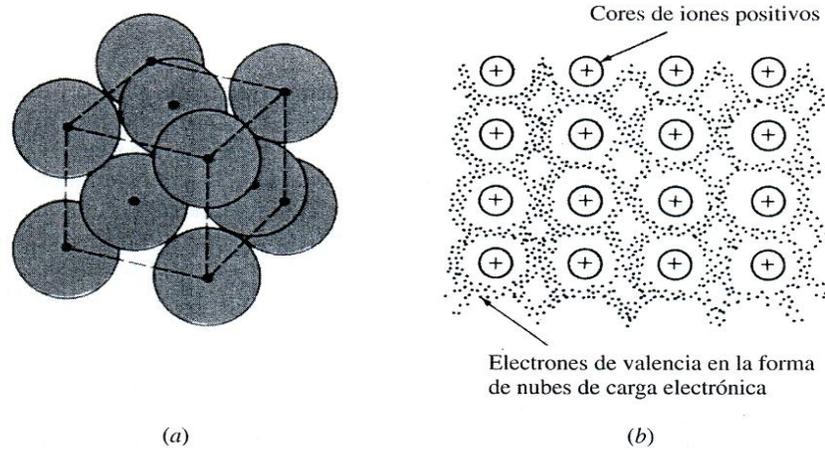


Figura 3.1 (a) Disposición atómica en un cristal de cobre (b) Diagrama esquemático bidimensional de átomos enlazados metálicamente.

- Enlace iónico:

Los enlaces iónicos se pueden formar entre elementos muy electropositivos (metálicos) y elementos muy electronegativos (no metales). En el proceso de ionización los electrones son transferidos desde los átomos de los elementos electropositivos a los átomos de los elementos electronegativos, produciendo cationes cargados positivamente y aniones cargados negativamente. Las fuerzas de enlace son debidas a la fuerza de atracción electrostática o Coulomb entre iones con carga opuesta. Los enlaces iónicos se forman entre iones opuestamente cargados por que se produce una disminución neta de la energía potencial para los iones enlazados (figura 3.2).

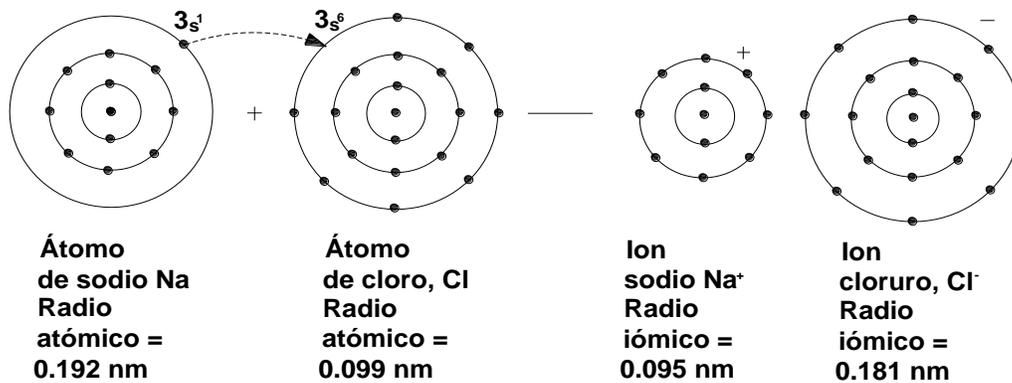


Figura 3.2 Formación de un par iónico ion sodio-ion cloro a partir de átomos de sodio y cloro.

- **Enlace Covalente:**

Un segundo tipo de enlace atómico primario es el enlace covalente. Mientras el enlace iónico involucra átomos muy electropositivos y electronegativos, el enlace covalente se forma entre átomos con pequeñas diferencias de electronegatividad y ubicados muy próximos en la tabla periódica. En el enlace covalente los átomos generalmente comparten sus electrones externos s y p como otros átomos, de modo que cada átomo alcanza la configuración de gas noble. En un enlace covalente sencillo cada uno de los átomos contribuye con un electrón a la formación del par de electrones de enlace, y las energías de los dos átomos asociadas con el enlace covalente son menores (más estables) como consecuencia de la interacción de los electrones. En el enlace covalente, se pueden formar enlaces múltiples de pares de electrones por un átomo consigo mismo o con otros átomos (figura 3.3).

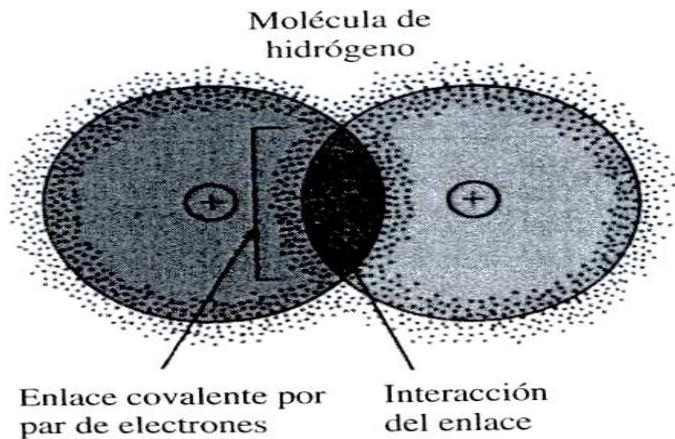


Figura 3.3 Enlace covalente en la molécula de hidrógeno.

- b)** Enlaces secundarios o débiles
- Enlaces de dipolo permanente:

Son enlaces intermoleculares, formados entre moléculas que poseen dipolos permanentes. Un dipolo existe en una molécula debido a su asimetría en la distribución de densidad electrónica.

- Enlaces de dipolo oscilante:

Enlaces de dipolo electrónico, se producen en átomos debido a la distribución asimétrica de densidades electrónicas en un átomo entorno a su núcleo. Se denomina oscilante puesto que la densidad electrónica es continuamente cambiando con el tiempo.

3.1.3 Redes cristalográficas existentes

1) Sistemas cristalográficos

Los cristalógrafos han demostrado que son necesarias sólo siete tipos diferentes de celda unidad para crear todas las redes puntuales tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación de retículos espaciales en sistemas cristalino.

Sistema cristalino	Longitudes axiales y ángulos interaxiales	Retículos espaciales
Cúbico	Ejes iguales en ángulos rectos $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cúbico sencillo Cúbico centrado en el cuerpo Cúbico centrado en las caras
Tetragonal	Ejes en ángulos rectos, dos de ellos iguales $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Tetragonal sencillo Tetragonal centrado en el cuerpo
Ortorrómbico	Ejes distintos en ángulos rectos $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Ortorrómbico sencillo Ortorrómbico centrado en el cuerpo Ortorrómbico centrado en las bases Ortorrómbico centrado en las caras
Romboédrico	Ejes iguales, inclinados por igual $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Romboédrico sencillo
Hexagonal	Ejes iguales a 120° y a 90° con el tercero $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Hexagonal sencillo
Monoclínico	Ejes distintos, dos de ellos no forman ángulo recto $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Monoclínico sencillo Monoclínico centrado en la base
Triclínico	Ejes distintos con distinta inclinación, y ninguno en ángulo recto $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Triclínico sencillo

La mayor parte de estos siete sistemas cristalinos presentan variaciones de la celda unida básica. A. J. Bravais mostró que catorce celdas unidad estándar podían describir todas las estructuras reticulares posibles. En el sistema cúbico hay tres tipos de celdas unidad: cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras. En el sistema ortorrómbico están representados los cuatro tipos. En el sistema tetragonal hay solo dos: sencilla y centrada en el cuerpo. En el sistema monoclínico tiene celdas unidad sencilla y centrada en la base, y los sistemas romboédricos hexagonales y triclínicos, tienen solo una celda unidad (figura 3.4).

- Sencilla.
- Centrada en el cuerpo.
- Centrada en las caras.
- Centrada en la base

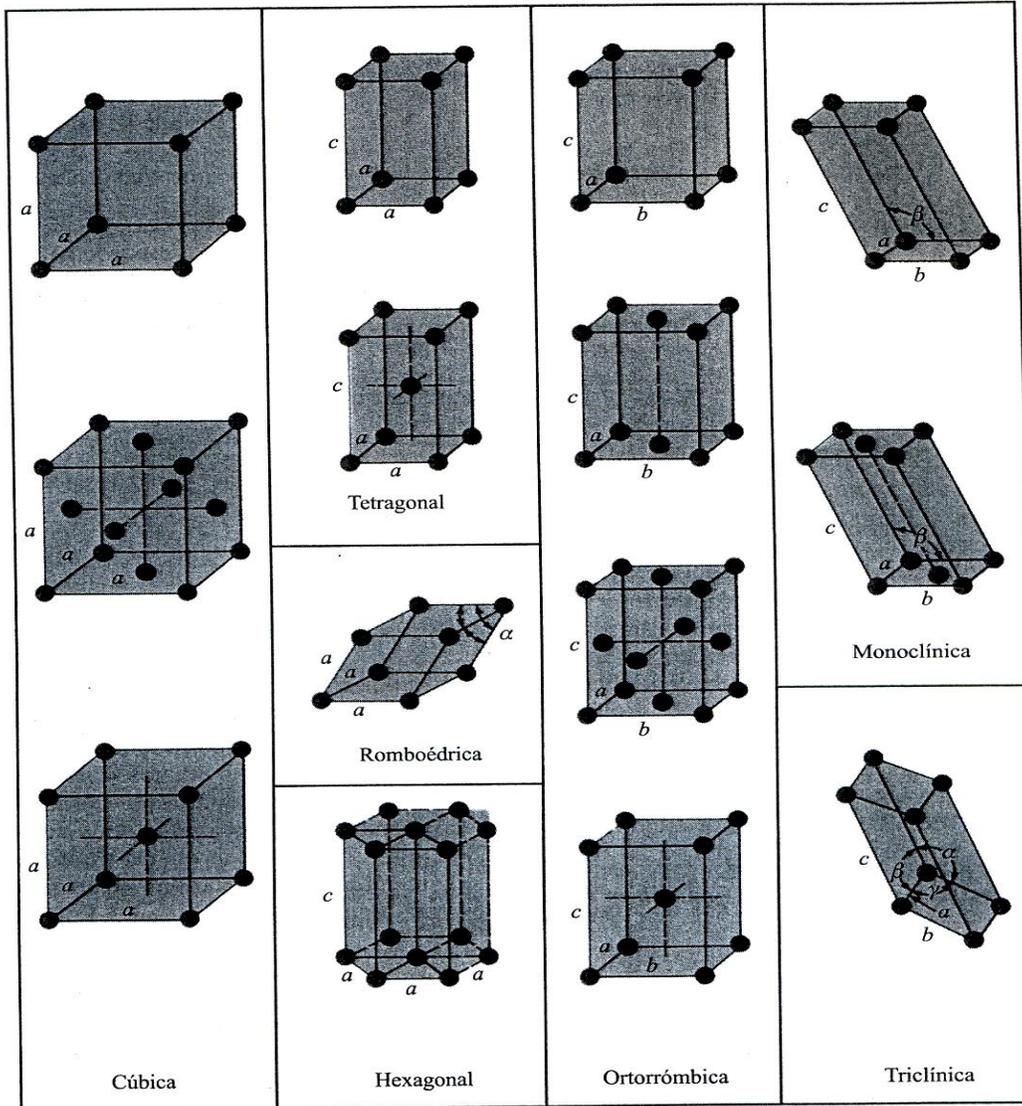


Figura 3.4 Las 14 celdillas unidades convencionales de Bravais agrupadas por sistemas cristalinos.

2) Estructuras cristalográficas

La mayoría de los metales elementales alrededor del 90 % cristalizan en tres estructuras cristalinas densamente empaquetadas: cúbica centrada en el cuerpo (BCC) figura 3.5 (a), cúbica centrada en las caras (FCC) figura 3.5 (b) y hexagonal compacta (HCP) figura 3.5(c). La estructura HCP es una modificación más densa de la estructura cristalina hexagonal sencilla. La mayor parte de los metales

cristalizados en esas estructuras densamente empaquetadas debido a que se libera energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan cada vez más estrechamente entre sí. De este modo, dichas estructuras densamente empaquetadas se encuentran en disposiciones u ordenamientos de energía cada vez más baja y estable las celdillas unidad de las principales estructuras cristalinas de los metales se muestran en la figura 3.5.

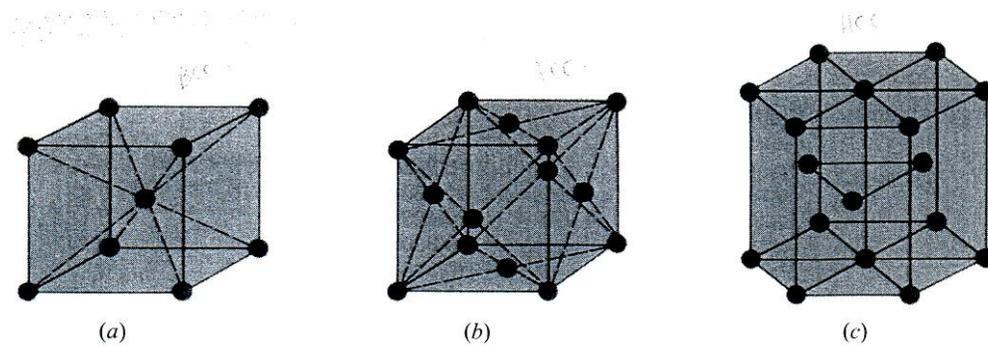


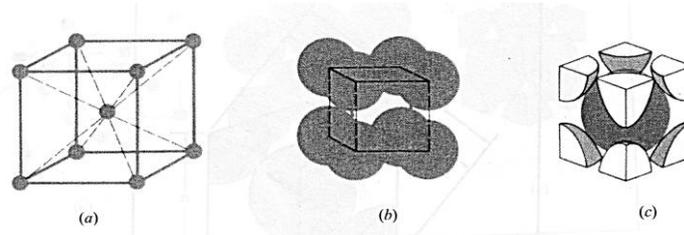
Figura 3.5 Celdillas unidad de las principales estructuras cristalinas metálicas (a) cúbica centrada en el cuerpo; (b) cúbica centrada en las caras; (c) hexagonal compacta.

Aunque solo sea una aproximación consideremos a los átomos de estas estructuras como esferas rígidas. La distancia entre los átomos en las estructuras cristalinas puede ser determinada experimentalmente por análisis de rayos X. Por ejemplo, la distancia interatómica entre dos átomos de aluminio en un fragmento de aluminio puro a 20 ° C es 0.2862 nm. Se considera que el radio del aluminio es la mitad de la distancia interatómica, o 0.143 nm.

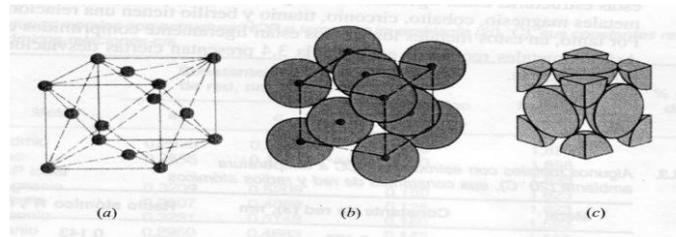
Con estas consideraciones podemos determinar el Factor de empaquetamiento APF, para los tres tipos de celdillas de la figura 3.5.

$$\text{Factor de empaquetamiento APF} = \frac{\text{volumen de átomos en la celdilla unidad}}{\text{volumen de la celdilla unidad}} \quad (3.1)$$

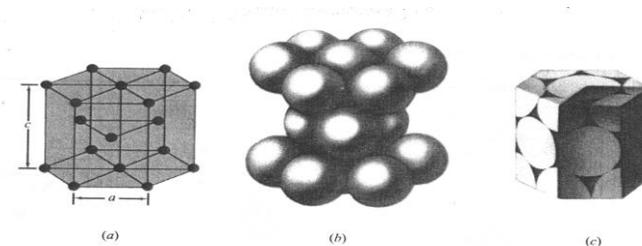
Que no es más que el volumen ocupado por los átomos en una celdilla unidad., como se puede observar en la figura 3.6, en donde: (a) Representa celdilla unidad de posiciones atómicas.; (b) Modelo de esferas sólidas.; (c) Celdilla unidad aislada.



Factor de empaquetamiento estructura BCC 0.68



Factor de empaquetamiento estructura FCC 0.74



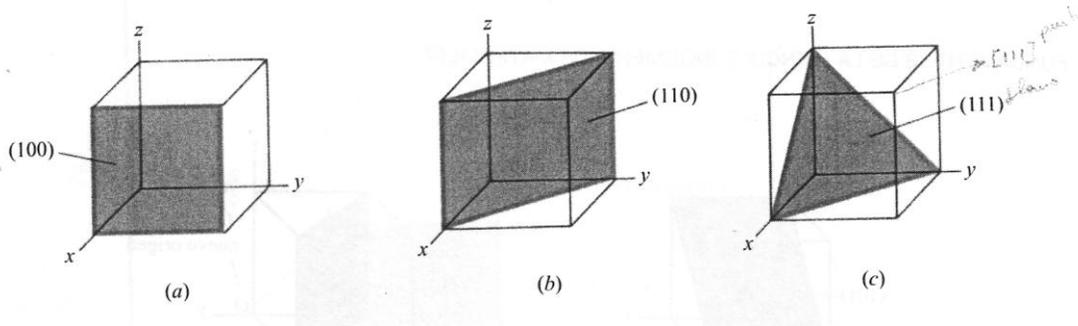
Factor de empaquetamiento estructura HCP 0.74

Figura 3.6 Factor de empaquetamiento de las principales estructuras cristalinas metálicas.

Adicionalmente podemos calcular las densidades atómicas volumétrica, plana y lineal en la celdilla unidad.

Las posiciones atómicas son las coordenadas en las que se encuentran cada uno de los átomos en una determinada celdilla unidad, estos átomos tienen cierta dirección determinada por el vector desde el origen a la posición del átomo, es importante para metales y aleaciones que tienen propiedades que varían con la orientación cristalográfica.

Los Índices de Miller se refieren a planos reticulares específicos de átomos dentro de una estructura cristalina, en la figura 3.7 podemos observar algunos planos cristalinos con sus Índices de Miller.



Fi

Figura 3.7 Algunos planos cristalográficos con sus Índices de Miller

Con esto se ha realizado una síntesis de los enlaces atómicos y las estructuras cristalinas que forman los distintos tipos de materiales, incluyendo los aceros. Las estructuras cristalinas de los sólidos se pueden determinar mediante técnicas de análisis de difracción de rayos X, utilizando difractores de rayos X (figura 3.7), y por el método de muestra en polvo (figura 3.8).

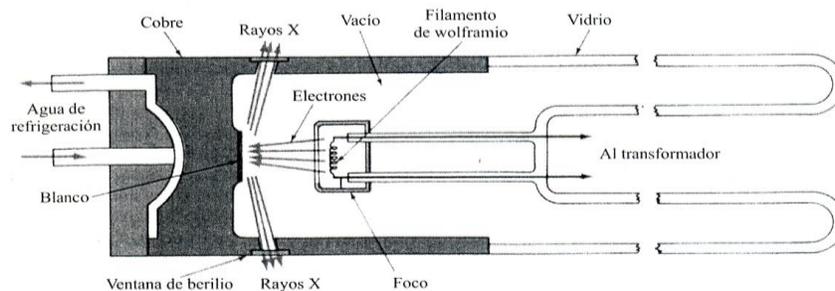


Figura 3.8 Diagrama esquemático de la sección transversal de un tubo de rayos X de filamento sellado.

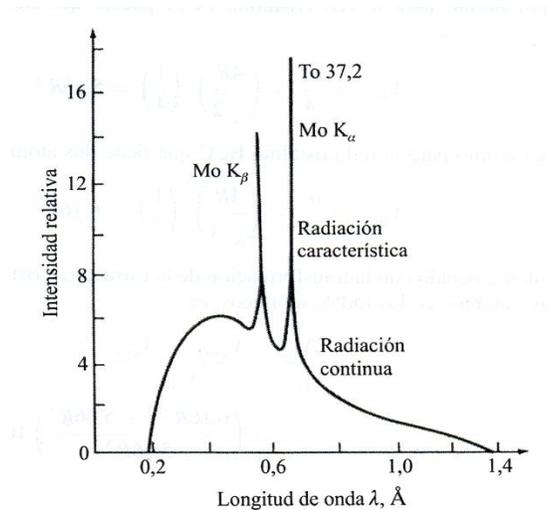


Figura 3.9 Espectro de emisión de rayos X cuando se utiliza molibdeno metal como blanco en un tubo de rayos X.

3.1.4 Diagramas de fase.- Sirven para conocer en todo momento el estado de la aleación partiendo de la temperatura y la composición. Se construye a partir de las curvas de enfriamiento, y la información que nos suministran es:

- Fases presentes a una determinada temperatura.
- Composición de cada fase (sólido o líquido).
- Cantidad relativa de fases existentes en el campo bifásico (sólido + líquido).

El diagrama de fases en equilibrio (PT) se puede construir también para otras sustancias puras. Por ejemplo, el diagrama de fases de equilibrio PT del hierro puro se muestra en la figura 3.10.

A partir de estas consideraciones J.W. Gibbs obtuvo una ecuación que permite calcular el número de fases que coexisten en equilibrio para cualquier sistema:

$$P + F = C + 2 \quad (3.2)$$

En donde:

P = número de fases que coexisten en el sistema dado.

C = número de componentes del sistema.

F = grados de libertad.

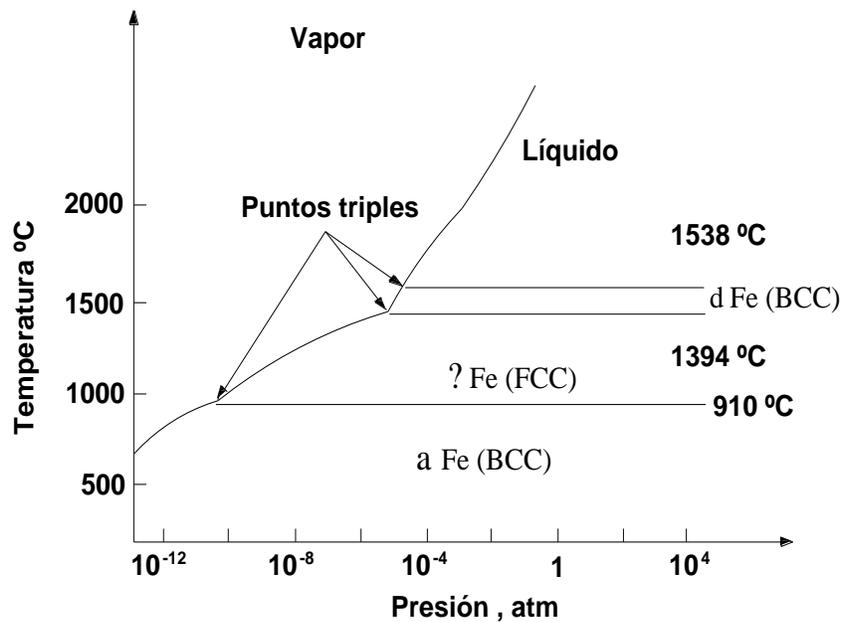
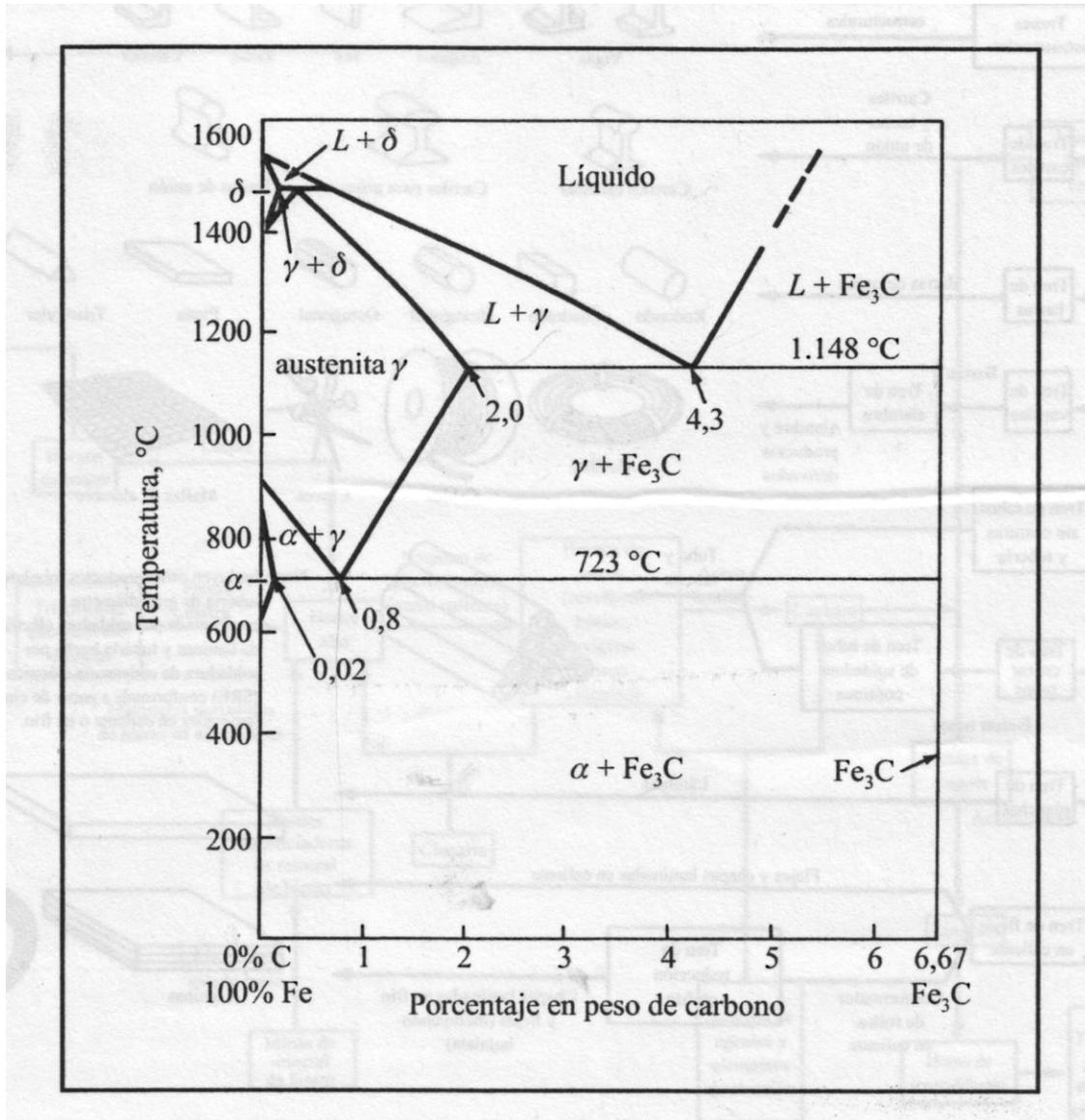


Figura 3.10 Diagrama de equilibrio de fases aproximado presión-temperatura (PT) para el hierro puro.

Una diferencia fundamental de este diagrama de fases es que tiene tres fases sólidas distintas y separadas: Fe alfa (α), Fe gamma (γ) y Fe delta (δ). El hierro α , δ tiene estructuras cristalinas BCC, mientras el hierro γ tiene una estructura FCC. Las fases límite en el estado sólido tienen las mismas propiedades que entre líquido y sólido. Por ejemplo, bajo condiciones de equilibrio, el hierro alfa como el gamma puede existir a una temperatura de 910⁰C y una atmósfera de presión. Por encima de 910⁰C sólo existe la fase gamma, y por debajo de 910⁰C sólo existe la fase alfa. Encontramos también tres puntos triple en el diagrama PT del hierro en donde las tres fases diferentes coexisten: (1) líquido, vapor Fe delta; (2) vapor, Fe delta y Fe gamma; y (3) vapor, Fe gamma Fe alfa.

Hay que señalar la división que hay entre los aceros y el hierro fundido que es en el punto 2.11% C, en este punto es en donde se realiza la reacción eutéctica, que lo podemos observar en el diagrama de equilibrio Diagrama Fe-C de la figura 3.11



Fi

gura 3.11 Diagrama de equilibrio Fe-C

3.1.5 Aceros

No se conoce con exactitud la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir el metal para ser utilizado. Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3.000 a.c., y

se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro; los griegos ya conocían hacia el 1.000 a.c, la técnica de cierta complejidad para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.c.) se clasifican en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico lleno de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y dejar el hierro. El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0,1% de otras impurezas. En ocasiones esta técnica de fabricación producía accidentalmente auténtico acero en lugar de hierro forjado. Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio: una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

La producción moderna de arrabio emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. El proceso de refinado del arrabio para la producción de acero mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su

nombre. Desde la década de 1960 funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra.

Las aleaciones de hierro y carbono -aceros y fundiciones- son las aleaciones metálicas más importantes de la civilización actual. Por su volumen, la producción de fundición y de acero supera en más de diez veces la producción de todos los demás metales juntos.

Corrientemente se da el nombre de acero y fundición, a las aleaciones hierro - carbono (si tienen más del 2% de C son fundiciones y si tienen menos del 2% de C son aceros).

El hierro forma soluciones con muchos elementos: con los metales, soluciones por sustitución; con el carbono, nitrógeno e hidrógeno, soluciones por inserción.

La solubilidad del carbono en el hierro depende de la forma cristalográfica en que se encuentra el hierro. La solubilidad del carbono en el hierro (cúbica de cuerpo centrado) es menor que el 0,02% y en el hierro (cúbica de caras centradas) es hasta el 2%.

Los aceros pueden adquirir propiedades muy diferentes mediante tratamientos térmicos (templado, recocido), fisicoquímicos (cementación, nitruración) y mecánicos (forjado, laminado, estirado, embutido).

Principales aceros y sus aplicaciones:

Aceros al carbono.- Aceros ordinarios, cuya composición, es modificada ligeramente (sobre todo la proporción de carbono) para obtener:

- Acero extradulce (clavos, tornillos, chapa para embutido, piezas de forja)
- Acero dulce (armazones metálicos, barras perfiladas, pernos, alambres).
- Acero semidulce (vaciado, maquinaria, forja).
- Acero semiduro (vaciado, árboles de transmisión, herramientas).
- Aceros duros (vaciado, armas, herramientas, rieles, resortes, cuchillos).
- Aceros extraduros (cables, cuerdas de piano, resortes, herramientas para trabajar materiales).

Los aceros aleados o aceros especiales.- Modificados por adición de un solo elemento especial se denominan aceros binarios. Se llaman ternarios, cuaternarios o complejos, cuando los elementos son varios.

Los aceros especiales más empleados son los que contienen níquel y cromo (aceros al cromoníquel). Llámense aceros perlíticos cuando predomina el níquel y aceros austeníticos cuando éste entra en menores proporciones que el cromo.

La mayoría de construcciones mecánicas utilizan aceros al carbono, pues su facilidad de manejar sus condiciones mecánicas de acuerdo a la necesidad permite cubrir los requerimientos específicos de diferentes construcciones mecánicas.

Los aceros aleados o especiales, son aceros especiales con menos de 2.11% de carbono, y constituyen los aceros inoxidables.

Ventajas del acero:

- Bajo costo de elaboración.
- Elevadas propiedades mecánicas.
- Gran resistencia estática, dinámica, rigidez y duración.
- Posibilidad de modificar las propiedades mecánicas con:
- Tratamientos térmicos.
- Termoquímicos.
- Agregado de aleantes.

Clasificación de los aceros:

Por el % de carbono se clasifican en:

Aceros Hipoeutectoides: % < 0.8

Aceros Hipereutectoides: % > 0.8

De bajo carbono: % < 0.3

De medio carbono: 0.3 < % < 0.7

De alto carbono: 0.7 < % < 1.7

Con el incremento de carbono se verifica:

- Disminuye la temperatura de fusión del acero.
- Aumentan las características mecánicas.

- Aumenta la fragilidad.
- Mayor resistencia al desgaste.
- Menor solubilidad.
- Dificultad de mecanizado.
- Facilidad para aplicación de tratamientos térmicos.

Microestructuras de los aceros:

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros al carbono son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita, y rara vez austenita, aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos.

El análisis de las microestructuras de los aceros al carbono recocidos y fundiciones blancas deben realizarse en base al diagrama metaestable Hierro-carburo de hierro o Cementita (figura 3.11).

3.1.6 Fundiciones.

Las fundiciones o hierros fundidos son aleaciones hierro-carbono-silicio que típicamente contiene de 2% a 4% de C y de 0.5% a 3% de Si. Existen 5 tipos de fundiciones:

- Fundición gris
- Fundición blanca
- Fundición maleable
- Fundición dúctil o esferoidal
- Fundición de grafito compacto

Si se produce un hierro fundido utilizando solo aleaciones H-C esta reacción produce hierro fundido blanco.

Cuando ocurre la reacción eutéctica estable L y + Grafito A 1146°C se forma la fundición gris, la dúctil o de grafito.

En las aleaciones Fe-C el líquido se sobreenfría fácilmente 6°C formándose hierro blanco. Al agregar aproximadamente 2% de silicio, el grafito eutéctico se nuclea y

crece. Elementos como el cromo y el bismuto tienen un efecto opuesto y promueven la fundición blanca.

El silicio también reduce la cantidad de carbono contenido en el eutéctico.

La reacción eutectoide en los hierros fundidos: Durante la reacción la austenita se transforma, esto determina la estructura de la matriz y las propiedades de cada tipo de hierro fundido, la austenita se transforma en ferrita y cementita, con frecuencia se forma en modo de perlita. El silicio promueve la reacción eutectoide estable.

Características y producción de las fundiciones:

a) Fundición gris.- Tiene celdas eutécticas de grafito en hojuelas interconectadas. La inoculación coopera a crear celdas eutécticas más chicas, para mejorar la resistencia.

Se produce resistencia a la tensión baja, esto es por las grandes hojuelas de grafito. Se pueden conseguir la resistencia mayor reduciendo el equivalente de carbono por medio de la aleación o tratamiento térmico.

Sus propiedades son: alta resistencia a la compresión, resistencia a la fatiga térmica y amortiguamiento contra la vibración.

b) Fundición blanca.- Se utilizan hierros fundidos blancos por su dureza y resistencia al desgaste por abrasión. Se puede producir martensita durante el tratamiento térmico.

c) Fundición maleable.- Se crea al intentar térmicamente la fundición blanca no aleada, a partir de la fundición blanca se producen dos tipos de fundición maleable: Fundición maleable férrica se consigue enfriando la pieza fundida y así se llega a la segunda etapa de grafitización, esta fundición tiene buena tenacidad;

la fundición maleable perlita se crea al enfriar la austenita al aire o en aceite para así formar perlita o martensita.

d) Fundición dúctil o nodular.- Para esta fundición se requiere grafito esferoidal, para crear este metal se siguen los siguientes pasos:

Desulfurización: El azufre provoca que el grafito crezca en forma de hojuelas, al fundir en hornos que en la fusión eliminen el azufre del hierro.

Nodulación: Se aplica magnesio, éste elimina cualquier azufre y oxígeno que haya quedado en el metal. De no ser vaciado el hierro después de la nodulación, el hierro se convierte en fundición gris.

Inoculación: Un estabilizador eficaz de carburos es el magnesio y hace que en la solidificación se forme la fundición blanca. Después de la nodulación se debe inocular el hierro.

e) Hierro de grafito compacto.- La forma de grafito es intermedia entre hojuelas y esferoidal. El grafito compacto da resistencia mecánica y ductilidad y el metal conserva una buena conductividad térmica y propiedades de absorción de la vibración.

3.2 Temple

El proceso de temple consiste primeramente en el calentamiento, luego la permanencia adecuadamente larga de las piezas a la temperatura de temple y finalmente el brusco enfriamiento. El acero adquiere por este tratamiento térmico la estructura llamada martensita, muy dura y frágil.

3.2.1 Calentamiento

El calentamiento debe darse a una temperatura tal que provoque la austenización completa de la estructura. En consecuencia, la temperatura de calentamiento depende del contenido de carbono.

En cuanto a la velocidad de calentamiento, esta debe ser moderada, sobre todo si la pieza a tratar no es de espesor uniforme, para evitar desniveles térmicos, origen

de peligrosas tensiones internas. Como regla general, se requiere una hora de calentamiento por cada 25 mm de espesor o de dimensión transversal de la pieza.

3.2.2 Enfriamiento

El enfriamiento depende básicamente de la velocidad crítica de enfriamiento, mínima velocidad de enfriamiento que permite la formación de martensita, la cual impide la salida de los átomos de carbono del retículo cúbico centrado en las caras del hierro γ , obligándoles a permanecer en el retículo cúbico - centrado del hierro α .

La velocidad crítica de enfriamiento es tanto más alta cuanto menor es la proporción de carbono en el acero, ya que al disminuir la proporción de carbono, disminuye también el número de átomos del mismo, contenidos en la red cristalina del Fe γ , y por tanto no es posible llegar a la estructura martensita ni aun con altas velocidades de enfriamiento.

La velocidad crítica de enfriamiento depende del medio refrigerante y la temperatura del baño de inmersión, medios que varían de acuerdo al tipo de temple que se pretende. Se puede emplear: aceite mineral, agua, soluciones salinas y chorro de aire.

Al aumentar la densidad del medio refrigerante el temple va siendo cada vez más suave.

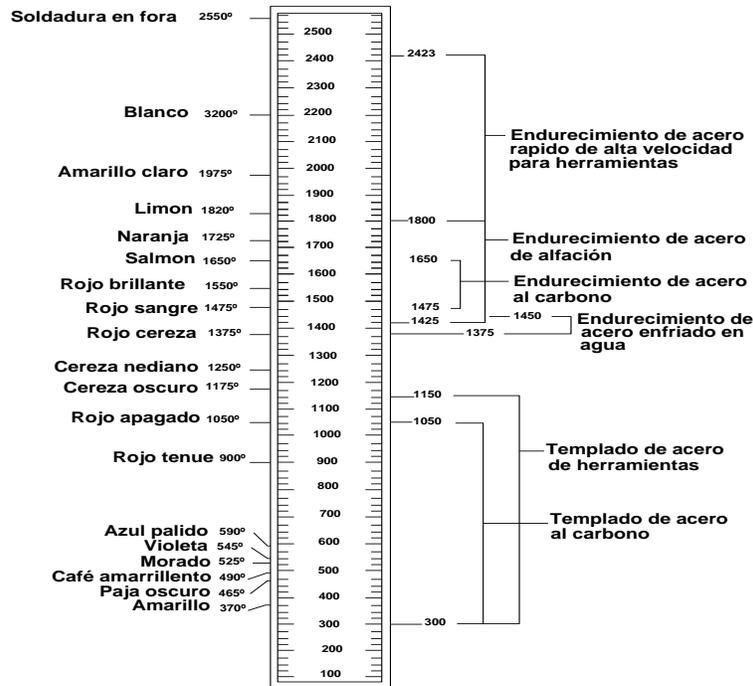


Figura 3.12 Rangos de temperatura (grados Fahrenheit) para tratamientos térmicos colocar en grados centígrados.

3.2.3 Métodos comunes

Las operaciones de temple se derivan de la manera en las cuales estas se ejecuten. Por ejemplo:

-Temple por aspersion.- Consiste en un enfriamiento por aspersion de un líquido, normalmente agua o una mezcla de agua y aire.

-Temple en coquilla.- Enfriamiento al interior de dispositivos especiales denominados coquillas (matrices frías).

-Temple a partir de la temperatura de conformación en caliente.- Temple realizado inmediatamente después de una conformación en caliente sin enfriamiento y recalentamiento intermedios. Requiere el preciso control del proceso de conformado en caliente atendiendo a los niveles y distribución de la temperatura.

-Temple con breve austenización. Realizado a una temperatura relativamente alta y limitada localmente, la cual se obtiene por ejemplo a través de rayos láser o de electrones.

-Temple por inducción. Los aceros normalmente utilizados en temple por inducción tienen un contenido de carbono entre 0,3 % y 0,7 %. El calentamiento por inducción permite tratar una parte determinada de la pieza, con lo que puede conseguirse un temple superficial y localizado en determinadas zonas. Este tratamiento superficial se consigue mediante la gestión de la potencia aplicada, la frecuencia de la corriente inductora y los **tiempos de calentamiento y enfriamiento**.

-Temple local. Es un proceso de temple limitado únicamente a áreas específicas o puntos de una pieza. Esto puede ser alcanzado, por ejemplo, a través del enfriamiento local de la pieza (inmersión parcial en el medio de enfriamiento o recubrimiento parcial de la pieza con pastas etc.)

3.2.4 Efectos del temple

Al modificar la estructura cristalina, el temple provoca notables variaciones en las propiedades mecánicas y tecnológicas del acero; algunas de ellas mejoran, mientras que otras, por el contrario, empeoran.

En general, aumentan la dureza y la resistencia a la tracción mientras los efectos perjudiciales son la fragilidad y las alteraciones de forma y de volumen de la pieza; el temple disminuye la densidad, es decir aumenta el volumen.

3.3 Revenido

Como ya se indicó, la estructura martensítica obtenida con el temple es durísima, pero también frágil: se ha ganado en dureza, pero se ha perdido en tenacidad.

Debemos tener en cuenta, además, que raras veces las piezas son de espesor uniforme, por lo que el enfriamiento no tiene lugar a la misma velocidad en toda la masa: las partes finas se enfrían antes y luego, cuando a su vez lo hagan las partes gruesas y se contraigan, aparecerán tensiones internas que pueden provocar la rotura de la pieza, aun sin someter a ésta a sollicitaciones exteriores.

Entonces para mitigar la excesiva fragilidad, y estas tensiones internas consecuencias del temple, se recurre al revenido.

En general, el revenido conduce a una reducción de la dureza y a un aumento de la tenacidad, y consiste en un calentamiento a fondo o por etapas, a una temperatura comprendida entre la temperatura ambiente y Ac1, seguido de un mantenimiento a ésta misma temperatura y un enfriamiento apropiado, el mismo que puede ser: en horno, al aire en reposo, en aceite o en agua.

A medida que la temperatura crece, pueden observarse los siguientes fenómenos:

- Precipitación de carburos inestables y en consecuencia, reducción de las tensiones de la red (transición de martensita tetragonal a martensita cúbica).
- Transformación de la austenita residual.
- Precipitación de carburos estables.
- Esferoidización de carburos estables.

La permanencia a la temperatura de revenido, para un acero dado, depende de la forma y dimensiones de la pieza. Para aceros con contenido medio de carbono, la duración varía desde 10 a 40 minutos.

3.3.1 Colores del revenido

Para juzgar rápidamente sobre el valor de temperatura alcanzada, puede emplearse un método aproximado basado en los colores de revenido, que aparecen sobre la superficie de un acero templado, al calentar éste.

En los aceros al carbono, la correspondencia aproximada entre colores y temperaturas se indica en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Correspondencia de temperaturas

Color	Temperatura °C	Revenido adecuado para
amarillo pajizo	220	Herramientas de torno.
amarillo vivo	250	Punzones.
rojo oscuro	270	Machos; brocas.
violeta	280	Fresas para madera.

azul	310	Destornilladores, herramientas para madera.
gris verdoso	325	Hoces; guadañas.

3.3.2 Variaciones en las características mecánicas

Con el revenido, las características mecánicas de un acero templado presentan las siguientes variaciones:

- Disminución de la dureza, resistencia a la tracción y límite elástico;
- Considerable aumento de la tenacidad y del alargamiento.

Estas variaciones son tanto más sensibles, cuanto más alta haya sido la temperatura de revenido.

3.4 Recocido

Como resultado del trabajo en frío, aumenta la dureza, la resistencia a la tracción y la resistencia eléctrica, en tanto que disminuye la ductilidad. Hay también ciertos planos en la estructura cristalina que se distorsionan severamente.

El recocido es el proceso mediante el cual la estructura distorsionada de la red trabajada en frío pasa a una estructura libre de tensiones por medio de un calentamiento a una temperatura adecuada, seguido de un mantenimiento durante un tiempo que depende de las propiedades a conseguirse, y un posterior enfriamiento lento en el horno. Este proceso puede dividirse en tres etapas:

- Recuperación,
- Recristalización y
- Crecimiento de grano.

3.4.1 Recuperación

Este es una etapa, en principio, a baja temperatura, con el cual se logra aliviar las tensiones de las aleaciones trabajadas en frío para impedir el agrietamiento por la tensión de corrosión o para hacer mínima la distorsión producida por esfuerzos residuales, sin dar lugar a un cambio apreciable en la microestructura.

Una vez que deja de actuar la carga que ha producido la deformación plástica en un material policristalino, no desaparece toda la deformación elástica. Esto se debe a la diferente orientación de los cristales, que no permitirá que algunos de ellos retrocedan a su estado original cuando se suprime la carga. Conforme la temperatura aumenta, hay algún rápido retroceso de éstos átomos, lo cual alivia la mayor parte de la tensión interna.

Comercialmente, este tratamiento a baja temperatura en la etapa de recuperación se conoce como recocido para aliviar tensiones.

3.4.2 Recristalización

Conforme se alcanza la temperatura superior del intervalo de recuperación, aparecen nuevos cristales en la microestructura, los cuales tienen la misma composición y estructura reticular que los granos originales no deformados y no están alargados, sino que aproximadamente uniformes en sus dimensiones (figura 3.13). Los nuevos cristales aparecen en las zonas del grano más drásticamente deformados, por lo general en los límites de grano y los planos de deslizamiento. El agrupamiento de átomos del que se forman los nuevos granos se llama núcleo. La recristalización tiene lugar mediante la combinación de nucleación de granos libres de deformación y el crecimiento de estos núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío.

La temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora se denomina temperatura de recristalización.

A mayor cantidad de deformación previa menor la temperatura necesaria para iniciar el proceso de recristalización. Además para igual intensidad de trabajado en frío, se introduce más endurecimiento por deformación en los metales que tienen inicialmente granos finos que los metales que tienen inicialmente granos gruesos.

Por lo tanto cuanto más fino sea el tamaño de grano inicial, menor será la temperatura de recristalización.

Al aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización.

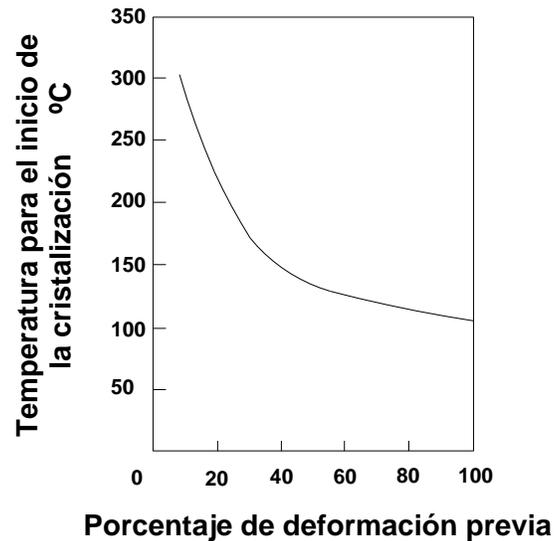


Figura 3.13 Efecto de la deformación previa sobre la temperatura para el inicio de la recristalización.

3.4.3 Crecimiento de grano

Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños. Esto se asocia con la menor cantidad de área de frontera de grano. Esta es la fuerza que impulsa el crecimiento de grano. Oponiéndose a esta fuerza se encuentra la rigidez de la red, conforme la temperatura aumenta la rigidez de la red disminuye y la rapidez del crecimiento de grano es mayor. A cualquier temperatura dada hay un tamaño de grano máximo.

Como el recocido comprende la nucleación y el crecimiento de grano, los factores que favorecen la nucleación rápida y el lento crecimiento darán como resultado un material de grano fino, y aquellos que favorecen la nucleación lenta y el crecimiento rápido darán como resultado material de grano grueso.

Los factores que determinan el tamaño final del grano son:

Grado de deformación previa. Este es el factor más importante. Si se aumenta la cantidad e deformación previa, se favorecerá la nucleación y disminuirá el tamaño final de grano.

Tiempo a la temperatura de recocido. Aumentar el tiempo a cualquier temperatura superior a la recristalización favorece el crecimiento de grano e incrementa el tamaño final de grano.

Temperatura de recocido. Cuando menor es la temperatura por encima de la temperatura de recristalización, más fino será el tamaño final de grano.

Tiempo de calentamiento. Cuanto menor sea el tiempo de calentamiento a la temperatura de recocido, más fino será el tamaño final de grano.

Impurezas insolubles. Cuanto mayor sea la cantidad y más fina la distribución de *impurezas insolubles*, más fino será el tamaño final de grano. No solo aumentan la nucleación, sino que también actúan como barreras que impiden el crecimiento. Como el recocido total devuelve al material a una estructura reticular libre de tensiones internas, es esencialmente un proceso de reblandecimiento. Los cambios en propiedades producidos por la deformación plástica se eliminan y el material vuelve casi a adquirir sus propiedades originales. Por ende, durante el recocido, la dureza y la resistencia a la tracción disminuyen, mientras que la ductilidad aumenta. Este cambio en las propiedades se muestra esquemáticamente en la figura 3.14.

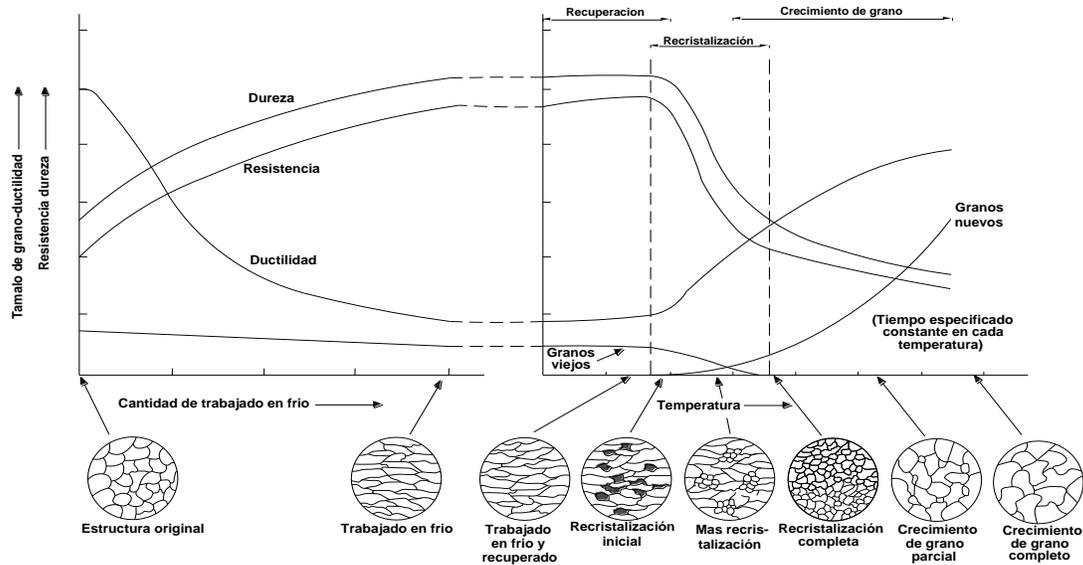


Figura 3.14 Representación esquemática de la variación de las propiedades mecánicas del ciclo de recocido posterior al trabajado en frío.

Para conseguir un buen recocido es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Calentar la pieza de manera uniforme, con una velocidad de calentamiento no mayor de unas pocas decenas de grados por hora, con objeto de evitar diferencias de temperaturas fuertes entre las partes exteriores e interiores, lo que podría crear tensiones internas.
- Mantener la temperatura adecuada durante todo el tiempo necesario para eliminar tensiones internas, regenerar el grano y uniformizar la estructura. Por cada 50 mm de espesor de la pieza, se requiere una hora de permanencia en el horno.
- Enfriar muy lentamente, para permitir la formación de estructuras estables.

3.5 Selección del procedimiento

En el capítulo 2 se ha seleccionado, para el diseño del horno para tratamientos térmicos de metales, la alternativa B, que consta de una cámara de reacción, como concentrador una lente de Fresnell, y un sistema de seguidor solar con dos grados de libertad; con este sistema podemos alcanzar temperaturas de hasta

1200 °C, considerando que los tratamientos térmicos anteriormente definidos solicitan temperaturas de hasta 930 °C, en el caso de aceros austeníticos de baja aleación; por lo tanto se puede realizar los tres procesos sin restricción del rango de temperatura.

Se propone en una primera aproximación realizar el proceso de tratamiento térmico para un juego de matricería como se observa en la figura 3.15

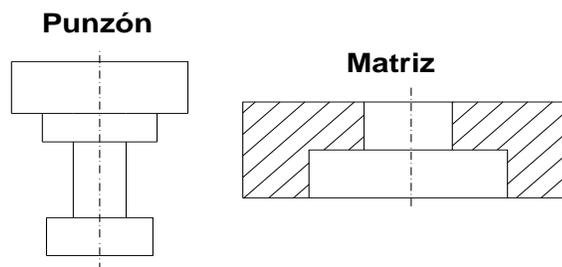


Figura 3.15 Punzón y matriz de corte.

Para seleccionar los elementos mecánicos que requieren tratamientos térmicos, como el temple y revenido, analizaremos ciertos procesos de producción para la obtención recipientes cilíndricos pequeños, en donde se requiere matrices para corte, embutido, estiraje o extrusión.

Para el caso del corte de metales mediante punzonado, se necesita de un punzón de acero y matriz que pueden ser construidos en aceros indeformables para matricería. Es importante dotar a estas herramientas de la geometría, el juego de corte, y el tratamiento térmico adecuado para que resistan el desgaste por efecto de la fricción, así como también la deformación en frío. A continuación podemos observar estos elementos mecánicos.

Matriz de corte

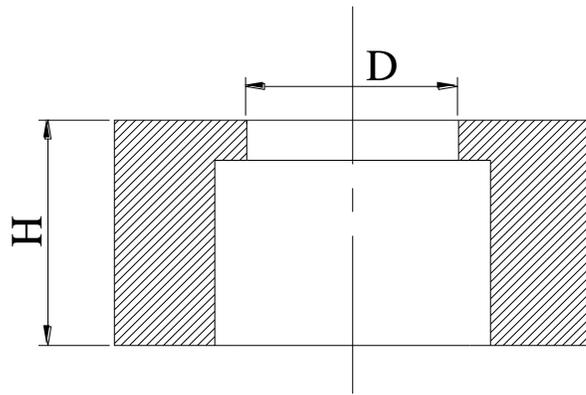


Figura 3.16 Matriz de corte.

Una matriz de corte está sometida a los esfuerzos de cizallamiento, flexión y desgaste por los efectos del rozamiento, por lo que su geometría debe ser tal que asegure el corte, desplazamiento, y expulsión del material conservando las características mecánicas y dimensionales. Por estas consideraciones, se utiliza el acero indeformable K100 marca Bolher, disponible en el mercado nacional.



Fotografía1 Matriz de corte construida en acero K100

Punzón de corte

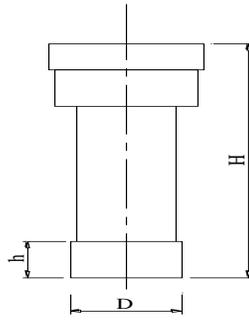


Figura 3.17 Punzón de corte.

El punzón de corte debe ser un acero tratado térmicamente para que soporte los esfuerzos de corte, el desgaste por fricción, así como también los efectos del calentamiento por el rozamiento y la deformación de las fibras. Por lo tanto para satisfacer los requerimientos de resistencia y mantener la características de estabilidad de acuerdo al trabajo que va a realizar, se utiliza el acero DF₂, templado y revenido con una dureza de 58 HRC



Fotografía 2 Punzón de corte en acero DF₂

Para el proceso de embutición se debe tomar en cuenta el radio de embutición que depende del tipo de material de la chapa metálica, del espesor y de la etapa de conformado mecánico.

Punzón de embutición

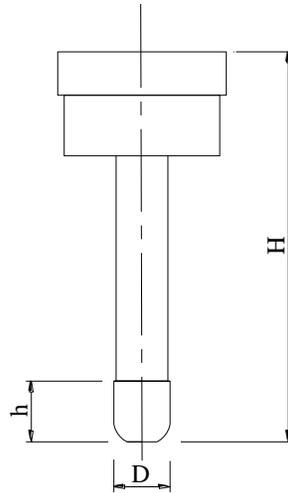


Figura 3.18 Punzón de embutición.

De acuerdo a la experiencia y tomando en cuenta los materiales existentes en el mercado nacional, para la construcción del punzón de embutición, se utiliza el acero ASSAB DF₂, con una dureza de 58 HRC luego del proceso de temple y revenido.

El procedimiento de fabricación de los elementos de matricería, en general cumple con las siguientes actividades:

- Mecanizado en torno.
- Inspección dimensional.
- Tratamiento térmico
- Rectificado

- Acabado de alta calidad



Fotografía 3 Punzón de embutición en acero DF2

Matriz de embutición

De acuerdo a lo que se puede observar en la figura 3.19, la matriz de embutición contiene en la parte superior un alojamiento para el disco, y de una curvatura cuyo radio r_e , se lo conoce como radio de embutición el cual permite el ingreso del material evitando el cizallamiento.

Para este elemento mecánico se utilizará acero indeformable para matricería K460 con dureza de 62 HRC luego del proceso de temple y revenido.

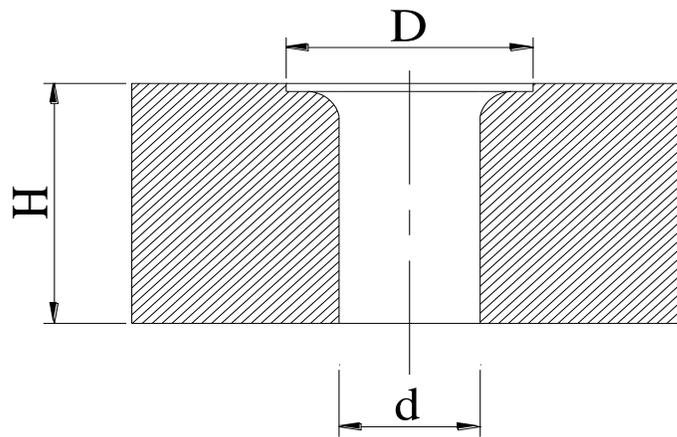


Figura 3.19 Matriz de embutición.



Fotografía 4 Matriz de embutición en acero Bohler K460

Se ha tratado en forma individual cada uno de los elementos mecánicos que requieren tratamiento térmico utilizando sistemas de calentamiento tradicionales como los hornos de resistencias eléctricas. Como una solución a este método, se propone desarrollar el sistema de calentamiento con energía solar concentrada para endurecer las superficies sometidas a severos

desgastes y deformaciones. A continuación se procede a describir el conjunto de herramientas tanto para corte como para embutición.

Herramientas de punzonado



Fotografía 5. Conjunto matriz-punzón para corte.

Las superficies de corte deben ser rectificadas utilizando las siguientes máquinas herramientas:

- Rectificadora de superficies cilíndricas.
- Rectificadora de superficies planas.
- Pulidora.

El filo de corte interno debe tener un espesor mayor a 5 mm para evitar la rotura de la matriz ya que en esta parte la pieza trabaja en forma de una viga en cantiliver sometida a esfuerzos de flexión. Para cortar acero de embutición se recomienda que este espesor sea de 8 mm.

Herramientas de embutición

Para realizar las etapas de embutición o posteriormente las operaciones de estiraje, se debe poner especial énfasis en el radio de curvatura para que el material fluya sin perturbaciones ya que en el ingreso se puede ocasionar serios daños al recipiente por efectos de desgarre, aplastamiento, deformación o por

fragilidad de la chapa aparece la mecánica de fractura. Las superficies deben conservar la dureza, la estabilidad dimensional y la calidad superficial para garantizar la obtención de un recipiente de calidad.



Fotografía 6. Conjunto matriz-punzón para embutición.

Para definir el tipo de tratamiento térmico que requieren estos elementos mecánicos, se debe poner especial énfasis en las características de estabilidad dimensional, resistencia al desgaste, resistencia al corte, especialmente en las áreas críticas.

A continuación se observan imágenes de las herramientas para el corte de chapa de aluminio con especificación AA 1100



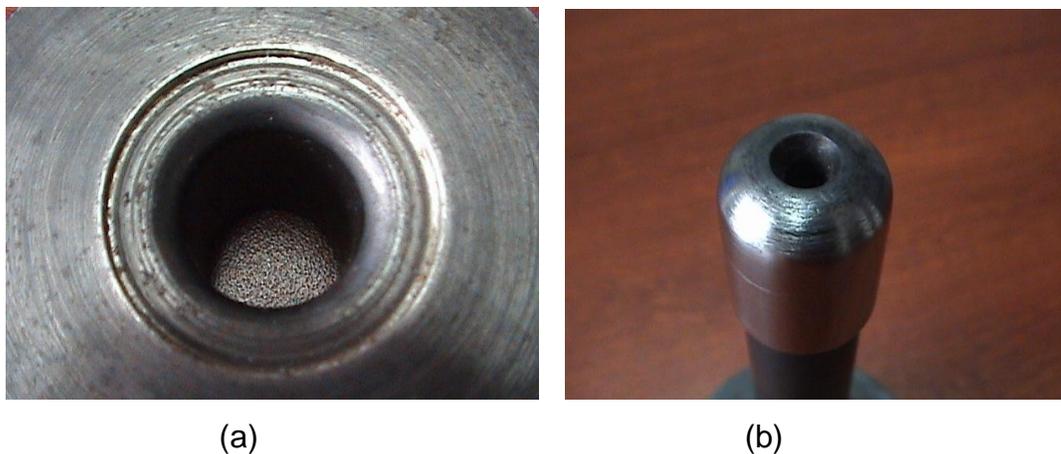
(a)



(b)

Fotografía 7 (a) Pared interior de matriz;(b) vista del área de corte del punzón.

En la fotografía 8 se puede observar en el punzón la cavidad para alivio de presión de gases o del fluido de lubricación, y en la matriz el radio de embutición que permite la deformación en el campo plástico de la chapa de embutición.



Fotografía 8 (a) Visualización del radio de embutición; (b) Cavidad para alivio de presión.

Los materiales utilizados para la fabricación de herramientas de corte, embutición o estiraje se pueden consultar en la en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Características de los aceros indeformables para matricería

Orden	Descripción del material	Código	Fabricante	Procedencia
1	Acero para matrices de corte.	K100	BOHLER	AUSTRIA
2	Acero para punzón de corte.	DF2	ASSAB	SUECIA
3	Acero para matrices de embutición.	K460	BOHLER	AUSTRIA
4	Acero para punzón de embutición.	DF2	ASSAB	SUECIA

Para desarrollar un sistema térmico sustentable para el mejoramiento superficial de metales mediante el uso de energía solar se debe disponer de criterios y procedimientos que permitan una adecuada selección del proceso; por lo que es necesario identificar los siguientes aspectos:

- Materiales.
- Propiedades físicas y químicas.
- Curvas de temple y revenido.
- Aplicaciones.
- Proceso de mecanizado.
- Instrucciones para el tratamiento térmico.
- Acabado superficial.
- Tratamientos termoquímicos.

Las consideraciones anteriormente descritas para los aceros en cuestión se indican en el Anexo B.

Con la información respecto a los aceros indeformables para matricería, que se puede observar en el anexo B, se realiza a continuación un compendio de las especificaciones más importantes de los materiales seleccionados, los mismos que se describen en la tabla 3.4.

Por otra parte, una vez que se ha determinado la forma y se ha dimensionado los elementos, es necesario obtener del peso tanto para punzones como para matrices según se explica a continuación:

Tabla 3.4 Peso de las herramientas de corte y embutición.

Orden	Herramienta	Peso (kg)
1	matriz de embutición	0,380
2	matriz de corte	0,570
3	punzón de embutición	0,265
4	punzón de corte	0,430

Equipo utilizado: Balanza electrónica HAN modelo HS-7600BP.

Apreciación: 1g

Con el propósito de proponer un diseño óptimo para el sistema de tratamientos térmicos de tipo alternativo, y a fin de no incrementar los costos se propone utilizar una masa promedio de 0.5 Kg.

Tabla 3.5 Características de los aceros para punzones y matrices.

orden	descripción del material	
1	<u>Acero para matrices de embutición K460</u>	
	TEMPLE	ΔT (°C) tiempo de enfriamiento dureza recomendada
	REVENIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada
	RECOCIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza
2	<u>Acero para matrices de corte K100</u>	
	TEMPLE	ΔT (°C) tiempo de enfriamiento dureza recomendada
	REVENIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada
	RECOCIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada
3	<u>Acero para punzón de corte DF2</u>	
	TEMPLE	ΔT (°C) tiempo de enfriamiento

		dureza recomendada	58 HRC
	REVENIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada	260 EN EL HORNO 62 HRC
	RECOCIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada	780 EN HORNO 58 HRC
4	Acero para punzón de embutición DF2		
	TEMPLE	ΔT (°C) tiempo de enfriamiento dureza recomendada	790-850 EN ACEITE TÉRMICO 58 HRC
	REVENIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada	260 EN HORNO 62 HRC
	RECOCIDO	ΔT (°C) enfriamiento dureza recomendada	780 EN HORNO 58 HRC

Luego de analizar los datos sobre tratamientos térmicos, de acuerdo a la tabla 3.4, se puede indicar como temperatura de temple la correspondiente a 930°C.

Potencia requerida para tratamientos térmicos de piezas

Tomando en cuenta que el diseño del horno de tratamientos térmicos de tipo solar debe satisfacer requerimientos inherentes a casos prácticos de la industria dedicada al corte, embutición, estiraje o estrucción, se ha propuesto que el proyecto se ajuste a estas necesidades por esta razón se toma como referencia 4 piezas de acero destinadas al proceso de corte y embutición, las mismas que para resistir el desgaste y la resistencia al corte, deben ser sometidas a un mejoramiento superficial. En la tabla 3.6, podemos observar la potencia requerida para diversos tratamientos térmicos en estos elementos específicamente.

Tabla 3.6 Consumo energético para tratamientos térmicos.

orden	elemento	peso (Kg.)	Tratamiento térmico		
			Temple	Revenido	Recocido
			T=930 °C	T=520 °C	T = 600 °C
			Potencia requerida (W)		
1	Matriz de embutición	0,380	70	40	46

2	Matriz de corte	0,570	54	30	35
3	Punzón de embutición	0,265	86	48	55
4	Punzón de corte	0,430	34	19	22

La potencia requerida se calcula con el siguiente procedimiento:

$$Q_s = mC_p(T_{\text{tratamiento termico}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (3.1)$$

En donde :

Q_s : calor sensible en Kcal.

m : masa de las pieza en Kg

C_p : calor específico del acero $0.12 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$

T_c : Temperatura de calentamiento para el tratamiento térmico.

T_∞ : Temperatura inicial o temperatura ambiente.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS TERMICOS CON ENERGIA SOLAR

4.1 Estructura soporte

4.1.1 Calculo de reacciones sobre el espejo.

De acuerdo con los datos obtenidos en el apartado 4.3.3, se determina que el peso del espejo es $P = 84.61 \text{ Kg}f = 829 \text{ N}$, el cual se descompone en dos fuerzas verticales de sentido contrario que soportarán al paraboloide, como se puede observar en el siguiente esquema:

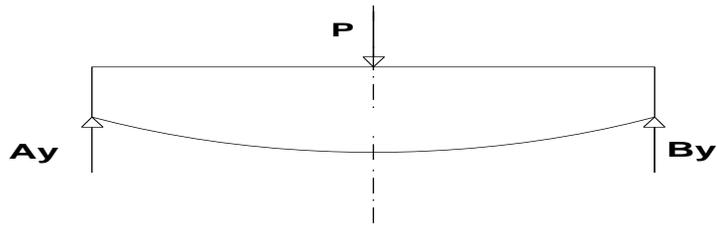


Figura 4.1 Diagrama de fuerzas sobre el espejo.

Para un sistema en equilibrio la sumatoria de fuerzas horizontales y verticales es nula:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y + B_y = 829 \text{ N}$$

Tomando momentos con respecto al punto B

$$\Sigma M_B = 0$$

$$829 * \frac{D}{2} - A_y * D = 0$$

Simplificando D, tenemos:

$$A_y = \frac{829}{2}$$

$$A_y = 414.5 \text{ N}$$

De la ecuación

$$A_y + B_y = 829 \text{ N}$$

Tenemos que:

$$B_y = 414.5 \text{ N}$$

Es decir las dos fuerzas verticales que soportan el peso son iguales

4.1.2 Cálculo de los elementos que soportan el espejo.

Considerando el espesor del espejo así como también la estética del diseño mecánico del sistema de sujeción del lente de Fresnel, se utiliza un perfil cuadrado de 50x50x2 mm para la estructura de acero, con el cual se procede a analizar si el material seleccionado cumple con los requerimientos de resistencia mecánica.

$$e = 2\text{ mm}$$

Utilizando los datos del prontuario de máquinas de Larburu, para el perfil en mención, el área de la sección transversal es:

$$A = 3.70\text{ cm}^2$$

El peso propio de la estructura por metro lineal

$$P_{pf} = 2.99 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}}$$

y su momento de inercia tiene un valor de

$$I_{xx} = 13.9\text{ cm}^4$$

a) Peso propio de la estructura (pp)

Se toma en cuenta el peso del espejo P_e y de las cuatro vigas

P_{est} unidas mediante soldadura donde se acopla y sostiene la lente.

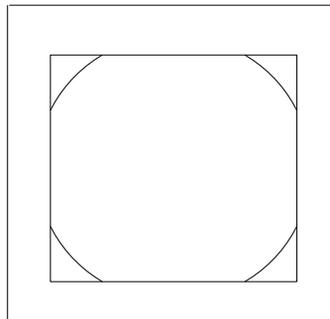


Figura 4.2 Estructura rectangular y espejo

$$P_p = P_e + P_{est}$$

$$P_e = 84.61 \text{ Kgf}$$

$$P_{est} = P_{pf} \times L_t$$

$$P_{est} = 2.99 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}} \times 4.40 \text{ m}$$

$$P_{est} = 13.15 \text{ Kgf}$$

Por lo tanto:

$$P_p = P_e + P_{est}$$

$$P_p = 84.61 + 13.15$$

$$P_p = 97.76 \text{ Kgf}$$

b) Carga de granizo

En vista de que el sistema está diseñado para permanecer en la intemperie, se toma en cuenta que para una posición horizontal de la lente, la carga más importante corresponde a la carga de granizo, por lo que se procede a calcular su valor, tomando en cuenta la altura de 15 cm., como valor crítico para esta carga.

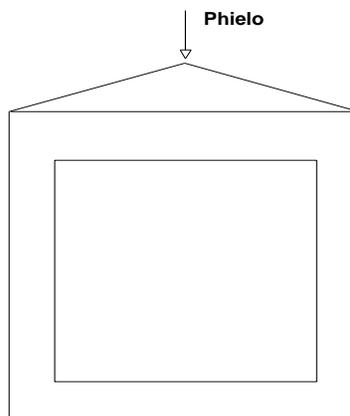


Figura 4.3 Carga de granizo sobre el p3rtico

El volumen de granizo V_g se calcula con la siguiente expresi3n:

$$V_g = \frac{1}{3} A \times h$$

(4.1)

En donde:

A = 3rea horizontal total de la estructura, **h** = altura de granizo, por lo que reemplazando valores se tiene:

$$V_g = \frac{1}{3} (1.1 \times 1.1) \times 0.15$$

$$V_g = 0.06 m^3$$

La densidad del hielo $\delta_{HIELO} = 900 \frac{Kg}{m^3}$

$$m_{HIELO} = \delta_{HIELO} \times V_g$$

$$m_{HIELO} = 0.06 m^3 \times 900 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{HIELO} = 54.45 Kg$$

$$P_{HIELO} = 54.45 Kgf$$

c) Peso total

El peso total P_t es el peso propio de la estructura más la carga de granizo, dado por la siguiente expresión:

$$P_t = P_p + P_{est}$$

Por lo tanto:

$$P_t = 97.76 + 54.45$$

$$P_t = 152.21 \text{ Kgf}$$

Si un Kgf es equivalente a 9.8 N, el valor de P_t es de 1491, 66 N

d) Radio de giro del perfil

El radio de giro de la sección transversal del perfil cuadrado se determina por la siguiente expresión:

$$r = \sqrt{\frac{I_{xx}}{A}}$$

(4.2)

Donde:

I_{xx} Momento de Inercia con respecto al eje x; **A** área de la sección transversal del perfil, por lo que reemplazando los valores ya definidos anteriormente se tiene:

$$r = \sqrt{\frac{13.9}{3.70}}$$

$$r = 1.93 \text{ cm}$$

A continuación se procede a analizar la columna desde el punto de vista de la estabilidad y la resistencia

4.1.3 Análisis por estabilidad

La relación de esbeltez esta dada por:

$$Re = \frac{KL}{r}$$

(4.3)

Donde: L es la longitud de la columna, r el radio de giro.

Reemplazando los respectivos valores numéricos

$$Re = \frac{1.1 \times 1200}{1.93} = 68.3$$

$$Re = 68.3$$

El valor anteriormente calculado nos permite diseñar el soporte como columna de corte. Si se utiliza el perfil estructural de acero ASTM A36, se obtiene que el esfuerzo de fluencia $\sigma_f = 36000 \text{ psi}$, considerando un factor de seguridad de 2, de la siguiente expresión:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{\text{Factor de seguridad}}$$

(4.4)

Se obtiene, que el esfuerzo admisible $\sigma_{adm} = 18000 \text{ psi}$,

El esfuerzo de compresión σ_c se determina por

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

(4.5)

Como se puede observar la columna estará sometida a un esfuerzo total de compresión $\sigma_c = 585,11$ Psi,

La estructura estará compuesta por 4 columnas simples, por lo tanto cada una de ellas soportara una fuerza igual a la cuarta parte del peso total $P_t = 152.21 \text{ Kgf}$, esto es 38.05 Kgf.

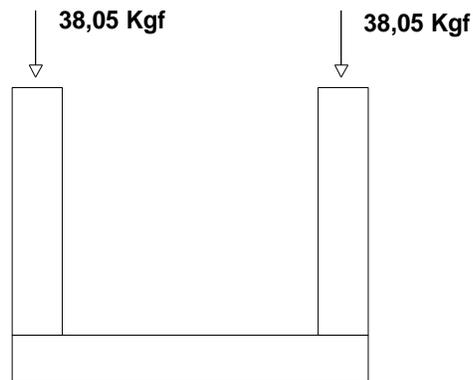


Figura 4.4 Diagrama de fuerzas sobre las columnas.

Por lo tanto cada columna debe resistir un esfuerzo de compresión de $\sigma_c = 146 \text{ psi}$

A continuación se calcula el factor de seguridad, que se lo obtiene con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\sigma_f}{\sigma_c}$$

En consecuencia $\eta = 246$, superior al factor de seguridad elemental, por lo que el pórtico cumple con los requisitos del diseño mecánico.

Otra alternativa podría ser utilizar perfil de Aluminio sin embargo no se lo considera en vista de que este material tiene un valor mayor, el mismo que aumentaría los costos de fabricación.

Se puede verificar la selección adecuada del perfil estructural realizando el análisis por resistencia

4.1.4 Análisis por resistencia

$$P = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_{admisible} = \frac{\sigma_{fluencia}}{\text{Factor de seguridad}}$$

Para el Acero A42 el límite de fluencia es $\sigma_{fluencia} = 2600 \frac{Kgf}{cm^2}$

$$\text{Factor de seguridad} = F_s = 2$$

$$\sigma_{admisible} = \frac{2600 \frac{Kgf}{cm^2}}{2}$$

$$\sigma_{admisible} = 1300 \frac{Kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_D = 1.3 \sigma_{calculado}$$

$$\sigma_D = 13.34 \frac{Kgf}{cm^2}$$

Por lo tanto el material seleccionado para las vigas y columnas es un perfil cuadrado de 50x50x2 mm de espesor.

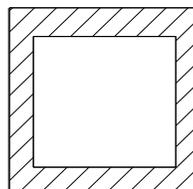


Figura 4.5 Perfil cuadrado para las columnas

4.2 Sistema de seguimiento del concentrador manual según calendario solar

4.2.1 Peso de los elementos estructurales

Barras verticales en perfil cuadrado

Cantidad: 2 U

Dimensión: 2 m

Peso por metro = 4.18 kg/m (Larburu, Pag. 198)

Peso del Puente: 8,36 kgf

Placa de sujeción

$$\text{Peso} = \delta.V = (8400)(0.013)(0.25)(0.25)$$

Peso placa: 6.8 kg

Barra de acople eje estructura

$$\text{Área Exterior} = (0.12)(0.15) = 0.018m^2$$

$$\text{Área Interior} = (0.102)(0.132) = 0.0134m^2$$

$$\text{Arayada} = 4,6x10^{-3}m^2$$

$$\text{Volumen} = A.H$$

$$= (4.6x10^{-3})(0.25) = 1.15x10^{-3}m^3$$

$$\text{Peso} = \delta.V = (8400)(1.15x10^{-3}) = 5.5kg$$

Peso de componentes (Kgf)

Tabla 4.1 Peso de los elementos estructurales

Componente	Cantidad	Peso Unitario	Peso Total (Kgf)
Barras Verticales	2	4.18	8.36
- Placa de sujeción	1	6.8	6.8

- Barra de acoplamiento	1	5.5	5.5
		TOTAL:	20.66

4.2.2 Diseño del eje

Uno de los elementos mecánicos de mayor importancia en el diseño del mecanismo de seguimiento, corresponde al eje horizontal que se observa a continuación.

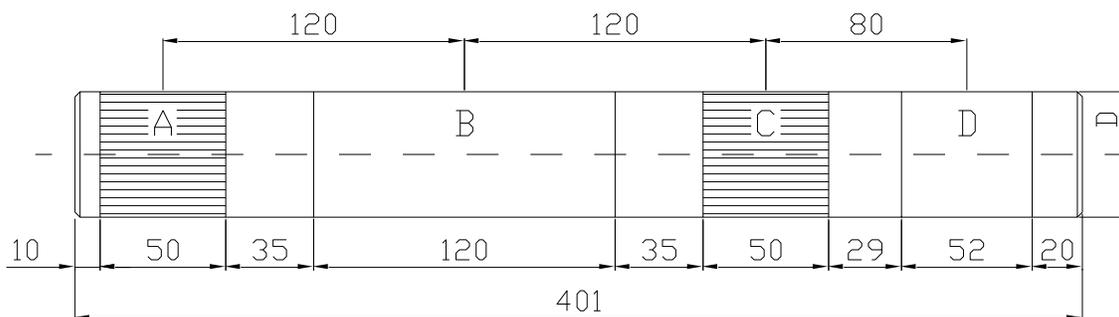


Figura 4.6 Eje horizontal

Denominación:

A: Asiento para rodamiento

B: Acoplamiento rígido para la estructura de acero

C: Asiento para rodamiento

D: Acoplamiento para la corona de hierro fundido

Luego de haber identificado los espacios para el acoplamiento de componentes, y de acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño del tornillo sin fin corona, se

realiza la determinación de las fuerzas que actúan sobre el eje, no sin antes indicar que la longitud del eje es de 401 mm de acuerdo a los requerimientos establecidos para cada tramo.

Para calcular la fuerza que ejerce la carga sobre el mecanismo sin fin corona se propone la siguiente figura:

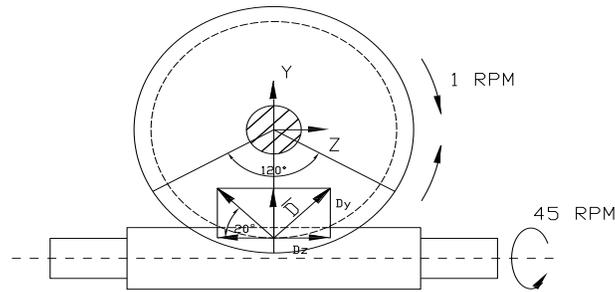


Figura 4.7 Fuerza de empuje en el mecanismo sin fin corona

Para determinar la carga D se es necesario tomar en cuenta los pesos de cada uno de los componentes y además se debe incluir el peso de las uniones soldadas y los pernos de anclaje, por lo que se estima un valor de 180 Kgf.

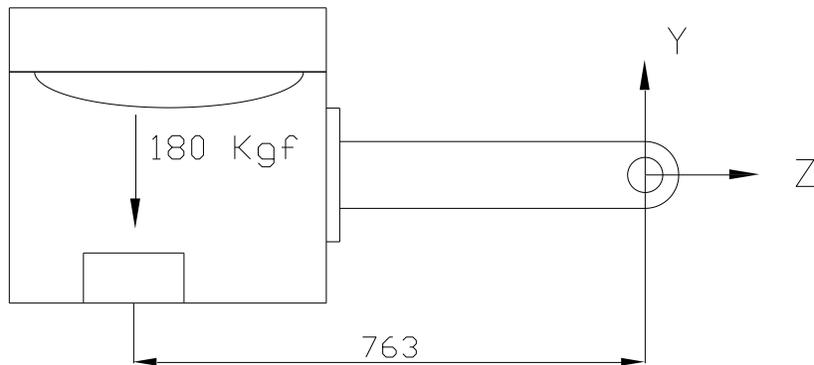


Figura 4.8 Estructura y brazo de rotación

$$P = 180Kgf = 180 \cdot (9,8) = 1764N$$

El torque sobre el eje es:

$$T = (180\text{Kgf})(763)(9,8) = 1\text{345932N.mm}$$

A partir de este resultado y considerando la figura 4.7, la fuerza D se calcula con:

$$D = \frac{\text{Torque}}{\text{radioprimitivo}}$$

$$D = \frac{1\text{345932N.mm}}{360\text{mm}}$$

$$D = 3738.7\text{N}$$

Por lo tanto; las componentes con respecto a los ejes y, z son:

$$D_y = D.\text{sen}\alpha = (3738.7)(\text{sen}(20^\circ)) = 1278.7\text{N}$$

$$D_z = D.\text{cos}\alpha = (3738.7)(\text{cos}(20^\circ)) = 3513.2\text{N}$$

Con el propósito de calcular las componentes de las fuerzas que actúan en cada uno de los espacios de acoplamiento del eje, se realiza el esquema siguiente:

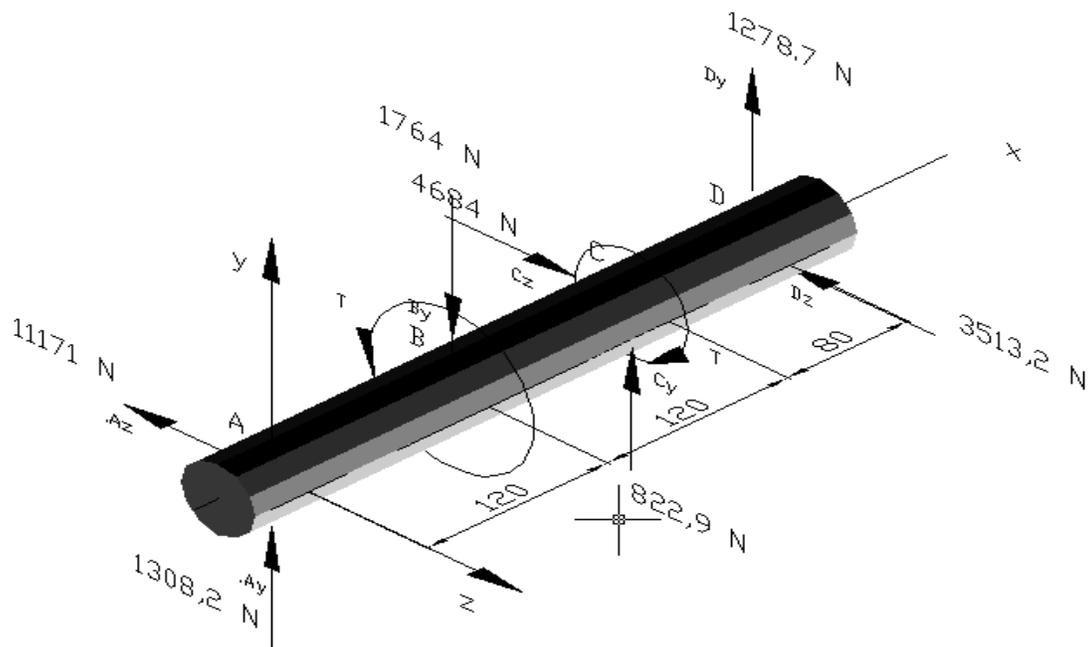


Figura 4.9 Fuerzas espaciales que actúan sobre el eje

Realizando

$$\sum M_z = 0$$

$$-1764(120) + C_y(240) + 1278,7(320) = 0$$

$$C_y = \frac{1764(120) - 1278,7(320)}{240}$$

$$C_y = -822,9N$$

En el eje vertical

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - 1764 - 822,9 + 1278,7 = 0$$

$$A_y = 1764 + 822,9 - 1278,7$$

$$A_y = 1308,2N$$

Tomando momentos con respecto al eje y, con signo positivo el sentido horario

$$\sum M_y = 0$$

$$C_z(240) - 3513,2(320) = 0$$

$$C_z = \frac{3513,2(320)}{240}$$

$$C_z = 4684,26N$$

La sumatoria de fuerzas con respecto al eje z es

$$\sum F_z = 0$$

$$A_z + 4684,26 - 3513,2 = 0$$

$$A_z = 3513,2 - 4684,26$$

$$A_z = -1171N$$

En las figuras 4.10 y 4.11 se realizan los diagramas de Esfuerzo cortante y Momento flector.

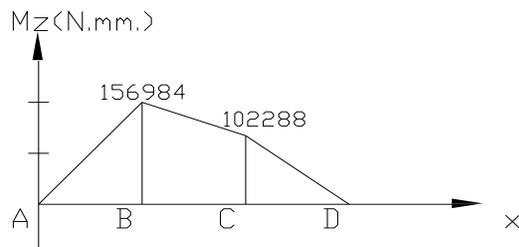
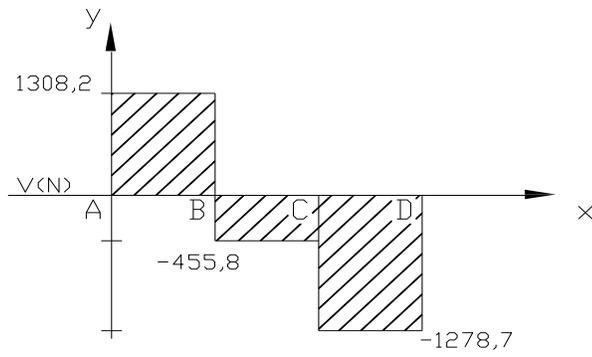


Figura 4.10 Diagrama de cortante con respecto al eje y, momento flector con respecto al eje z

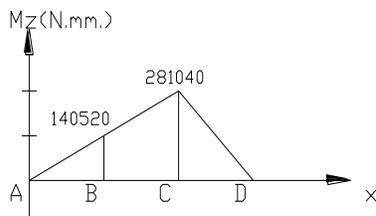
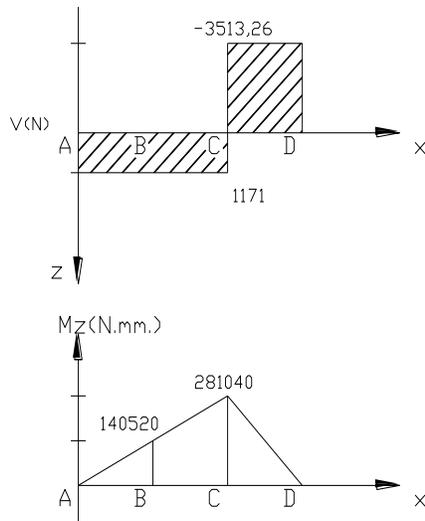


Figura 4.11 Diagrama del cortante con respecto al eje z, y momento flector con respecto al eje y

Momento total máximo

$$M_T = \sqrt{(M_z)^2 + (M_y)^2}$$

$$M_T = \sqrt{(156984)^2 + (281040)^2}$$

$$M_T = \sqrt{1,03627 \cdot 10^{11}}$$

$$M_T = 321912,18 N.mm$$

Esfuerzo de fluencia

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

$$\frac{M}{y} = \frac{321912,18}{32} = \frac{(321912,18)(32)}{\pi \cdot d^3}$$

$$\frac{I}{y} = \frac{\pi \cdot d^4}{64 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$\frac{J}{p} = \frac{\pi \cdot d^4}{32 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$$

El esfuerzo cortante está representado por:

$$\tau = \frac{T}{J} = \frac{1345932}{\frac{\pi d^3}{16}}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{321912 \times 32}{\pi \cdot d^3 \cdot 2}\right)^2 + \left(\frac{1345932 \times 16}{\pi \cdot d^3}\right)^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{16}{\pi \cdot d^3} \sqrt{(321912,18)^2 + (1342932)^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{16}{\pi \cdot d^3} \cdot (1383893,2)$$

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_{fl}}{n}$$

$$\tau_{fl} = 0,5 \cdot \sigma_{fl} = 0,5(483) = 241,5 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante admisible

$$\tau_{adm} = \frac{241,5}{2} = 120,7 \text{ MPa}$$

$$\frac{16}{\pi \cdot d^3} \cdot (1383893,2) = 120,7 \text{ MPa}$$

$$d^3 = \frac{16(1383893,2)}{\pi \cdot (120,7)}$$

$$d = \sqrt[3]{58423,24} = 38,8mm$$

El eje diseñado para soportar la carga dinámica del concentrador es de $\phi = 40mm$, por lo que realizando su esquema se tiene:

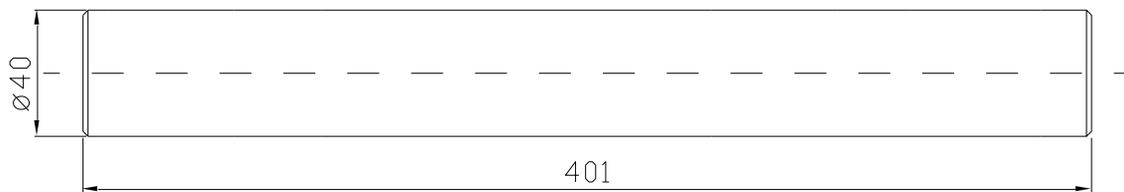


Figura 4.12 Eje horizontal

A partir de esta geometría se debe incrementar el tamaño del eje para lograr acoplar los rodamientos, corona, y barra de acople, donde las dos últimas deben ser sujetadas con chavetas y anillos Zegger.

4.2.3 Cálculo del mecanismo sin fin corona

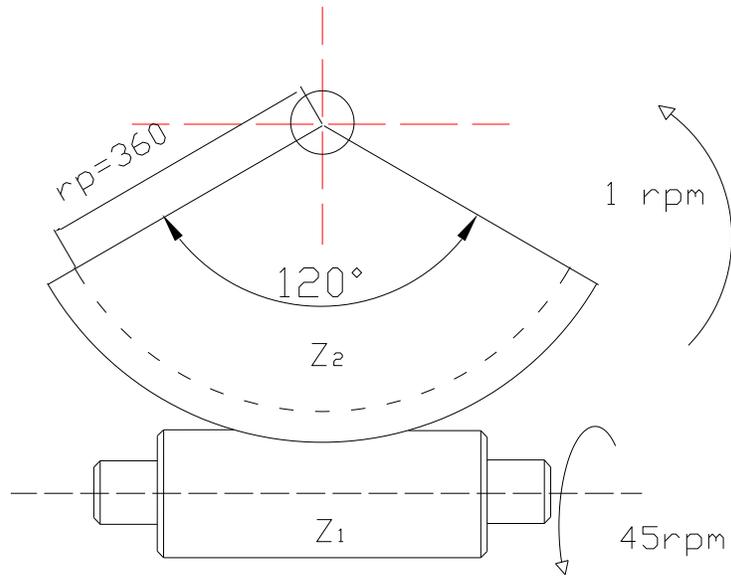


Figura 4.13 Tornillo sin fin corona

Datos:

Modulo

$m=4$

Se recomienda que el diámetro primitivo sea $q=12$ veces el módulo (Larburu, pag. 339)

Por lo que

$d_1=m \cdot q$

Donde d_1 es el diámetro primitivo, reemplazando valores

$d_1= 4 \cdot 12$

$d_1= 48 \text{ mm}$

Diámetro exterior (d_{e1})

$$d_{e1} = d_1 + 2m$$

$$d_{e1} = 48 + 2 \cdot 4$$

$$d_{e1} = 56 \text{ mm.}$$

El ángulo β_1 de inclinación del tornillo sin fin depende del diámetro primitivo d_1 del tornillo y de su paso, este ángulo se suele establecer entre los 50° y 80° y a veces mayor.

El ángulo de inclinación β_2 de los dientes de la rueda, para velocidad normal suele tomarse entre 15° y 25°

Mientras que α es el ángulo de presión, se toma generalmente $\alpha = 20^\circ$

Relación de transmisión

El mecanismo de tornillo sin fin corona admite una reducción, comprendida entre una y cincuenta por lo que:

$$i = \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$i = \frac{1}{50} (\text{Larburu})$$

El número de filetes del tornillo sin fin se hace de 1 a 6 y también hasta 8, y se establecerá de acuerdo con la reducción que se desea obtener, a mayor número mayor velocidad de deslizamiento y menor reducción. Para el presente desarrollo se toma

$$Z_1 = 4 \text{ dientes (SINFIN)}$$

$$i = \frac{1}{45}$$

$$\frac{4}{Z_2} = \frac{1}{45}$$

$$Z_2 = 180$$

El ángulo central de la rueda es de 120° , por lo que el número de dientes de la rueda dentada es de 60

$Z_2=60$ dientes

Paso axial (P_{x1})

$m_{x1}=m$

$P_{x1}= m_{x1} \cdot \pi$

$P_{x1}= 12,56$ mm.

Longitud del sin fin (ℓ)

La longitud del sin fin se establece por

$L=6 \cdot P_{x1}$

$L=6 \cdot 12,56$

$L= 75,36$ mm

Modulo Circunferencial (m_{C2}), rueda:

$$m_{c2} = \frac{m_{n2}}{\cos(\beta_2)}$$

Modulo normal (m_{n2})

Angulo de la hélice

$$\beta_2 = 15^\circ$$

$$m_{n2} = m_{x1} \cdot \cos\beta$$

$$m_{n2} = 4 \cdot \cos(15^\circ) = 3,86 \text{ mm.}$$

$$m_{C2} = \frac{3,86}{\cos(15)}$$

Diámetro primitivo de la rueda

$$d_2 = m_{C2} \cdot Z_2$$

$$d_2 = 4 \cdot 180 = 720 \text{ mm.}$$

Diámetro exterior de la rueda

$$d_{e2} = m \cdot (Z_2 + 2)$$

$$d_{e2} = 4 \cdot (180 + 2)$$

$$d_{e2} = 728 \text{ mm.}$$

Radio (r_{e2}):

$$r_{e2} = \frac{728}{2} = 364 \text{ (mm)}$$

$$r_{i2} = \frac{720}{2} = 360 \text{ (mm)}$$

Ancho de la Corona

$$B=6,75 \cdot m+6$$

$$m=4$$

$$B= 33 \text{ mm}$$

$$B_{\max}= 36$$

Paso axial: (P_{x1})

$$m_{x1} = m$$

$$P_{x1} = m_{x1} \cdot \pi$$

$$P_{x1} = (4)(\pi) = 12,56 \text{ mm}$$

Longitud del sin fin (l)

$$l = 6P_{x1}$$

$$l = 6(12,56) = 75,36 \text{ mm}$$

Módulo circunferencial (m_{c2}) de la Rueda:

$$m_{c2} = \frac{m_{n2}}{\text{Cos } B_2}$$

Módulo normal (m_{n2})

Angulo de la hélice $B_2 = 15^\circ$

$$m_{n2} = m_{x1} \cdot \text{Cos } B_2$$

$$m_{n2} = (4) \text{Cos } 15^\circ = 3.86 \text{ mm}$$

$$m_{c2} = \frac{3.86}{\text{Cos } 15^\circ} = 4$$

Diámetro de la rueda

$$d_2 = m_{c2} * Z_2$$

$$d_2 = (11)(180) = 720mm$$

B₁ ángulo de inclinación del tornillo sin fin con valores entre 50° y 80°

B₂ ángulo de inclinación de los dientes de la rueda

4.2.4 Selección de rodamientos

De acuerdo con la figura 4.6 se observa que en los puntos A y C se acoplan las chumaceras por lo que considerando esta situación se realizan los cálculos para determinar el valor de la fuerza radial.

En el punto A: se tiene la siguiente expresión para la fuerza equivalente.

$$FRD = \sqrt{(Ay)^2 + (Az)^2}$$

$$FRD = \sqrt{(130812)^2 + (1171)^2}$$

Para el punto C se tiene que:

$$FRC = \sqrt{(C4)^2 + (C7)^2}$$

Reemplazando valores :

$$FRC = \sqrt{(822,9)^2 + (4684,26)^2}$$

$$FRC = 4756(N)$$

El rodamiento a localizarse en el punto C va ha estar sometido a una carga radial mínima de 4756 N.

Por lo tanto la selección del elemento mecánico se lo realizará con el valor encontrado para esta fuerza radical que transformada da 465,3 kgf.

Carga radical equivalente

La mayor parte de cojinetes funcionan con una continuación de carga axial y radial.

La AFBMA indica que la carga radial equivalente debe ser el mayor valor de los dos valores F_R , F_a donde $Re = XVFr + YFa$.

Donde Re es la carga radial equivalente (kgf); F_r carga radial aplicada (kgf); F_a carga axial (kgf); V coeficiente de rotación; X coeficiente radial; y Y coeficiente axial.

El valor de V es igual a 1 para anillo interno giratorio, para cojinete de auto alimento de acuerdo con The Bearings Book, cap. 7 Mach Derign, marzo 30, 1961.

El valor de X_1 para cojinetes de bolas de contacto radial en 1.

Dado que el eje no soporta carga axial $F_a = 0$ por lo que:

$$Re = FRe = 485,3 \text{ kgf}$$

$$Re = 4756 \text{ N}$$

$$Re = 4,756 \text{ (KN)}$$

Capacidad de carga

Se define por la siguiente expresión.

$$C_{10} = FD \left(\frac{LD \text{ ND60}}{LR \text{ NR60}} \right)^{\frac{1}{a}}$$

Donde:

C_{10} capacidad de carga o clasificación de catálogo (KN); LR vida nominal en horas; R_R velocidad nominal; F_D carga radial deseada en lb o KN; L_D vida deseada en horas no velocidad deseada RPM para cojinetes de bolas $a = 3$ con esta definición, para el sistema de giro se consideran los siguientes datos, horas de

operación en 8 años; 9600 h velocidad de rotación de 45 RPM de acuerdo con SKF: $60 L_R NR = 10^6$

La carga radial es de: 1069,8 (lb) con fiabilidad del 90% reemplazando valores se tiene:

$$C_{10} = FD \left[\frac{LD \cdot ND^{60}}{LR \cdot NR60} \right]^{\frac{1}{a}} = 1069,8 \left[\frac{(9600)(45)(60)}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{10} = 3166(lbf)$$

$$C_{10} = 14,07(KN)$$

De acuerdo con la tabla 11-2 de Shigley se selecciona un cojinete 02-30mm que tiene un valor de $C_{10}=19,5$ KN y entonces las dimensiones del cojinete son:

$$Di = 30MM$$

$$De = 62MM$$

$$ancho = 16MM$$

Esquema del mecanismo de seguimiento

A continuación se puede observar el esquema del mecanismo de seguimiento, el uso que puede ser de acuerdo por un motor de 2H acoplado a un variador de velocidad o a un reductor de tipo mecánico.

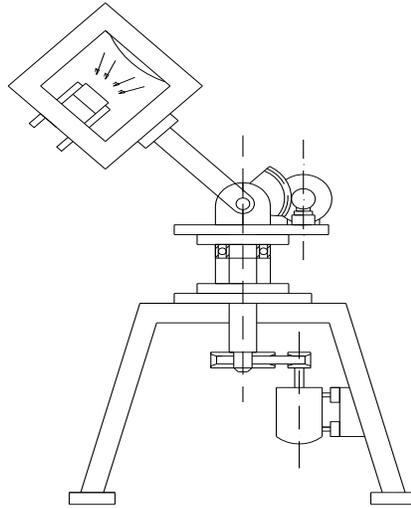


Figura 4.14 Mecanismo de seguimiento en dos ejes

4.3 Cálculo del concentrador

4.3.1 Calculo dimensional del espejo

Entre la cámara de reacción y el espejo se coloca un cristal que actúa como lente plano convexo y que concentra la luz sobre el foco principal de la lente. Con el propósito de determinar su geometría se utiliza la ecuación elemental de la parábola con eje focal el eje y se define por la ecuación fundamental.

$$x^2 = 4fy$$

(4.6)

De tal forma que despejando la variable y se tiene

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

(4.7)

En la boca del espejo parabólico, el valor de x es:

$$x = \frac{D}{2}$$

(4.8)

Y la altura del espejo convexo representada por y y se iguala a:

$$y = c$$

(4.9)

Reemplazando estos dos últimos parámetros en la ecuación (4.1) se puede obtener el valor de la altura de espejo en función del diámetro y del foco inverso.

$$c = \frac{D^2}{16f}$$

(4.10)

Arreglando la expresión anterior, y considerando la relación $\frac{f}{D}$ se obtiene

$$c = \frac{D}{16\left(\frac{f}{D}\right)}$$

(4.11)

En donde: **D** diámetro del espejo; **f** la distancia focal; **c** profundidad del lente en el centro. Por otra parte, para un paraboloide de boca circular el área de la sección transversal está dada por:

$$A_{em} = \frac{\pi D^2}{4}$$

(4.12)

A_{em} Área efectiva máxima de captación electromagnética o de radiación del sistema parabólico. Si el sistema no tiene pérdidas representa el área de la boca del lente de Fresnel.

4.3.2 Relación entre el foco y el diámetro del paraboloide

Un buen compromiso para el diseño de la geometría del lente es

$$0,25 < \frac{f}{D} < 0,6$$

(4.13)

Considerando el peso y la densidad energética del concentrador se toma un diámetro de 1000 mm, y para el diseño se considera $\frac{f}{D} = 0,6$ obteniéndose como resultados los valores para $c = 104$ mm, $f = 600$ mm. Por lo tanto la ecuación de la parábola es

$$x^2 = 2400y$$

(4.14)

Para graficar la curva, se incrementa el valor de x en 50 mm, obteniéndose los datos que se observan en la **Tabla 4.2**

Tabla 4.2: Datos del perfil parabólico

x	y
0	0,0
50	1,0
100	4,2
150	9,4
200	16,7
250	26,0
300	37,5
350	51,0
400	66,7
450	84,4
500	104,2

Considerando como eje focal el eje y, se dibuja el perfil de la lente de Fresnel donde es importante recalcar que el eje inverso se encuentra en la parte inferior, bajo la parte convexa

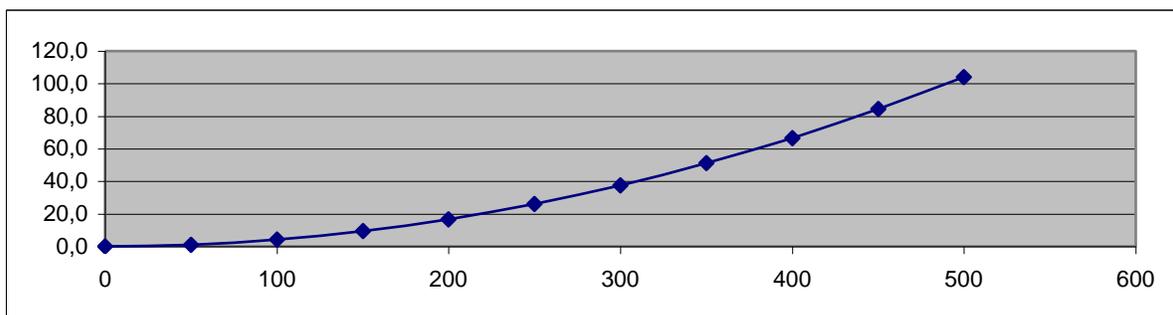


Figura 4.15. Perfil representativo de la lente de Fresnel

4.3.3. Volumen y peso del espejo

Para realizar el diseño térmico, mecánico y estructural de los componentes del horno solar giratorio, es necesario determinar el peso del espejo en vista que es el material que tiene una mayor influencia en el sistema, por lo que para su cálculo se utilizan el diámetro $D = 1\text{ m}$, y el espesor máximo de la lente que tiene un valor de $c = 0.1\text{ m}$.

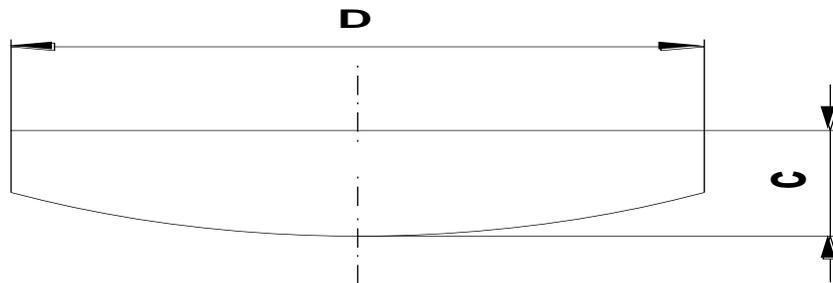


Figura 4.16 Lente de fresnel

De acuerdo con la figura anterior, y utilizando integrales triples, el volumen de un paraboloides esférico se lo calcula con la siguiente expresión:

$$V = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \int_{Z_1}^{Z_2} \rho \, dz \, d\rho \, d\phi$$

(4.15)

Para encontrar el volumen de la región que se encuentra arriba del plano horizontal, y que está limitado por el paraboloides $z = x^2 + y^2$ y el cilindro $x^2 + y^2 = a^2$

El volumen se halla más fácilmente si se utilizan coordenadas cilíndricas. En estas coordenadas las ecuaciones del paraboloides y del cilindro son, respectivamente

$$z = \rho^2 \quad \text{y} \quad \rho = a.$$

En el plano horizontal se cumple que:

$$z = 0$$

$$x^2 + y^2 = a^2$$

$\rho = a$ En la que a representa el radio exterior del cilindro.

Para definir la ecuación del paraboloides esférico, es necesario partir de las siguientes consideraciones:

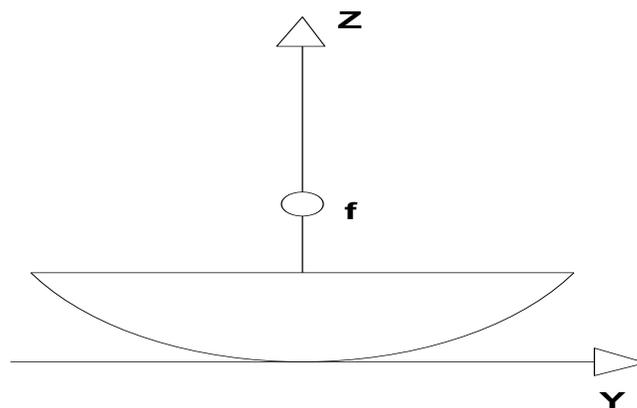


Figura 4.17 Parábola en el plano z-y

De la figura anterior, la ecuación de la parábola con eje focal el eje z se define por la siguiente expresión:

$$y^2 = 4pz$$

p es la altura focal y tiene un valor de 0.6 m, de acuerdo con la apertura y altura del espejo. Reemplazando este dato se tiene:

$$y^2 = 4 * 0.6 * z$$

$$y^2 = 2.4z$$

De la misma manera se grafica la parábola con respecto al plano z - x

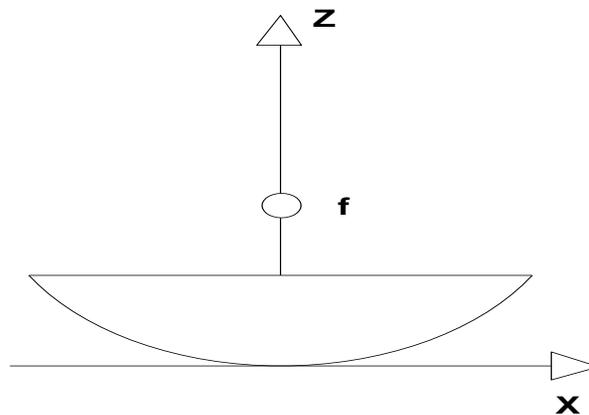


Figura 4.18 Parábola en el plano z - x

La expresión que defina la parábola en el plano z - x , se la puede calcular de la siguiente forma:

$$x^2 = 4pz$$

$$p = f = 0.6m$$

$$x^2 = 4 * 0.6 * z$$

$$x^2 = 2.4z$$

Por lo tanto, la ecuación del paraboloides de revolución es:

$$x^2 + y^2 = 2.4z$$

(4.16)

De allí que por el teorema de Pitágoras para la base cilíndrica

$$x^2 + y^2 = \rho^2$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación del paraboloides se tiene:

$$\rho^2 = 2.4z$$

(4.17)

Despejando z se obtiene:

$$z = \frac{\rho^2}{2.4}$$

Con el análisis realizado en cada uno de los planos de referencia, se procede a colocar los límites de integración, en la expresión de la integral triple, lo que da como resultado:

$$V = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^a \int_0^{\frac{\rho^2}{2.4}} \rho \, dz \, d\rho \, d\phi$$

(4.18)

Resolviendo la integración triple y reemplazando los límites, la expresión para el cálculo del volumen es:

$$V = \frac{a^4 \pi}{4.8}$$

(4.19)

Donde a es el radio máximo del espejo parabólico

A continuación se realiza un procedimiento de cálculo

$$a = r = D * \frac{1}{2} \text{ Siendo } D \text{ el diámetro del lente de fresnel}$$

$$a = r = 1 \text{ m} * \frac{1}{2}$$

$$a = r = 0.5 \text{ m}$$

Por lo tanto el volumen es

$$V = \frac{0.5^4 \pi}{4.8}$$

$$V = 0.04 \text{ m}^3$$

El volumen del cilindro se calcula con la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * c$$

En donde c es la altura del paraboloide de revolución:

$$c = 0.1 \text{ m}$$

Reemplazando el valor de c

$$V = \frac{\pi * 1^2}{4} * 0.1$$

$$V = 0.078 \text{ m}^3$$

La diferencia entre el volumen del cilindro y el de la cuña parabólica da como resultado el volumen del paraboloide.

$$V_{paraboloid} = V_{cilindro} - V_{calculado}$$

$$V_{paraboloid} = 0.078 - 0.04$$

$$V_{paraboloid} = 0.038 \text{ m}^3$$

La masa de la lente se calcula multiplicando la densidad por el volumen por lo que se tiene $m = \delta * V$. Si la densidad del vidrio es

$$\delta = 2226.7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Entonces

$$m = 2226.7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.038 \text{ m}^3$$

$$m = 84.61 \text{ Kg}$$

Por lo tanto el peso de la lente de fresnel es:

$$Pe = 84.61 \text{ Kgf} = 829 \text{ N}$$

De todo este procedimiento de cálculo se puede indicar que el peso del espejo es de 829 N.

4.3.4. Diseño térmico de la cámara de reacción

La temperatura que se debe alcanzar para realizar un tratamiento térmico de temple debe alcanzar los 930 °C por lo que el uso de los concentradores cilíndrico parabólicos o parabólicos esféricos no sería factible en vista de que se pueden alcanzar con estos sistemas temperaturas de 100 hasta 400 °C, por lo que es necesario utilizar concentradores con reflector de espejos múltiples o el concentrador por refracción de Fresnel. A continuación para identificar el flujo de energía térmica se presenta un modelo donde se puede observar el concentrador y el absorbedor.

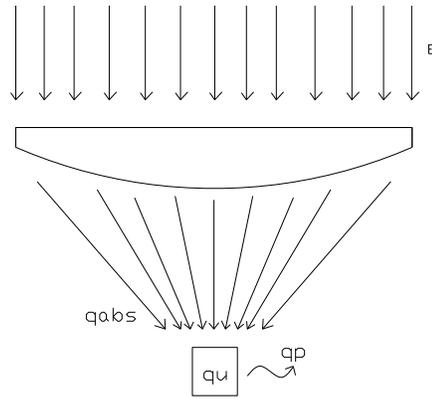


Figura 4.19. Modelo térmico de la cámara de reacción

Haciendo un balance de energía en la cámara, para el estado estable se tiene la siguiente expresión:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c (T_c - T_a) A_r$$

(4.20)

q_u Incluye el calor necesario para calentar la carga q_a y la cámara de reacción q_h . q_{abs} Corresponde al calor suministrado por el concentrador, q_p las pérdidas por conducción, convección y radiación hacia el ambiente.

Luego de estas indicaciones, se procede a analizar cada uno de los elementos que forman parte de la ecuación fundamental que gobierna el intercambio de energía desde el espejo y la cámara.

El calor sensible absorbido por las matrices de aceros especiales se calcula con:

$$q_a = m_a C p_a (T_2 - T_1)$$

(4.21)

Donde:

q_a calor suministrado a los elementos mecánicos a ser sometidos a tratamiento térmico en Kcal, m_a masa de acero en Kg, $C p_a$ calor específico del acero en $\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$, T_2 temperatura de temple en $^{\circ}C$, T_1 temperatura ambiente en $^{\circ}C$.

El calor acumulado en las paredes del horno se encuentra con la expresión:

$$q_h = m_h C p_h (T_2 - T_1)$$

(4.22)

De allí que q_h calor absorbido por el horno, m_h masa de la cámara en Kg, $C p_h$ calor específico del material refractario.

Calor perdido

Por las características del proceso de calentamiento se pierde calor por los tres fenómenos de transferencia que son conducción, convección y radiación, estos valores se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$q_p = q_d + q_c + q_r$$

(4.23)

q_d Transferencia de calor por conducción, q_c pérdida por convección y q_r pérdida de calor por radiación.

De acuerdo con la ley de Fourier para la conducción del calor se tiene:

$$q_d = \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{e}{kA_p}}$$

(4.24)

De la expresión anteriormente indicada e es el espesor de la pared del horno, k conductividad térmica del material, A_p área de pared cilíndrica del horno.

La ley de enfriamiento de Newton establece que la transferencia de calor por convección se define por la expresión:

$$q_c = hA_p(T_2 - T_1)$$

(4.25)

Para moderadas velocidades del viento, el coeficiente h que viene dado en

$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ se encuentra con:

$$h = 5.7 + 3.8V$$

(4.26)

V Velocidad del viento en $\frac{m}{s}$

A alta temperatura el fenómeno de transferencia de calor por radiación es muy representativo y se encuentra de con la siguiente ecuación:

$$q_r = h_r A_p (T_2 - T_1)$$

(4.27)

El coeficiente h_r se calcula con:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3$$

(4.28)

Donde T_m es la temperatura media entre T_1 y T_2

Considerando lo anteriormente indicado, se procede a determinar la expresión para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

Coeficiente de transferencia de calor U

En vista de que el horno tiene paredes compuestas, el U se debe analizar considerando la pared interior o exterior del mismo

Considerando la geometría y las características de cada material se propone el modelo que se observa en la figura 4.3.

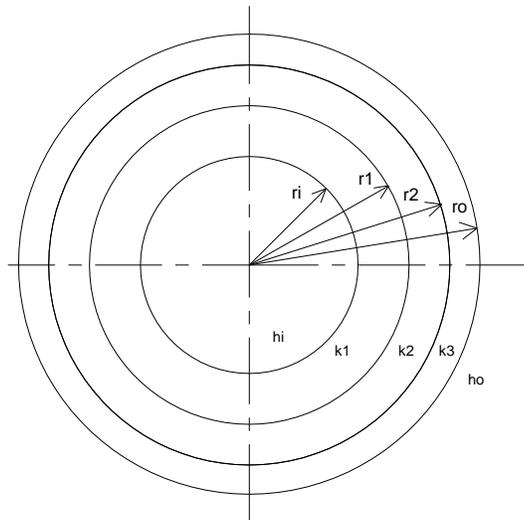


Figura 4.20. Cámara de reacción con paredes cilíndricas compuestas

Las paredes del horno están conformadas por el ladrillo refractario, arena diatomácea para absorber la expansión debido a la dilatación térmica, pared exterior de chapa de acero al carbono.

Para el caso de pared exterior se tiene que el valor de U_o se puede calcular con la siguiente expresión:

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_o}{k_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right) + \frac{r_o}{k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{r_o}{k_3} \ln\left(\frac{r_o}{r_2}\right) + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_r}}$$

(4.29)

Donde:

r_0 Radio interior del horno en mm; r_1 , r_2 radios de las paredes intermedias y r_o radio exterior del horno, h_i , h_o coeficientes de transferencia de calor por convección, h_r coeficiente de transferencia de calor por radiación, k_1 , k_2 , k_3 conductividades térmicas de los materiales del horno.

Determinación del área del absorbedor

El sol se ve bajo un ángulo de 32 minutos, en consecuencia no puede tratarse como una imagen rigurosamente puntual, y para una superficie situada en el foco de la parábola, la imagen del sol tendrá aproximadamente el tamaño (Wilson, Pág.-63).

$$d = 2f \tan(16') \quad (4.30)$$

El área del absorbedor se calcula con:

$$A_r = \frac{\pi d^2}{4}$$

(4.31)

Por otra parte, de acuerdo con investigaciones realizadas, para el caso de hornos solares se propone que el área del absorbedor puede variar desde 10 hasta 100 cm².

Razón de concentración

Definimos como relación de concentración (RC) de un sistema especular al cociente entre el área de apertura y el área del absorbente suponiendo que esta intercepta todos los rayos reflejados.

$$RC = \frac{A_a}{A_r}$$

(4.32)

Para colectores planos $C = 1$, y para concentradores $C > 1$

Ganancia de energía del absorbedor

La energía recibida por el absorbedor está dada por

$$q_{abs} = \eta_o A_a G_d$$

(4.33)

Siendo: A_a área de apertura del espejo, A_r área del absorbedor, G_d radiación solar directa incidente sobre la lente de Fresnel.

Si la eficiencia instantánea del colector es

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_d A_a}$$

(4.34)

Entonces

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c(T_c - T_a)}{G_d} \frac{1}{RC}$$

(4.35)

T_a Temperatura ambiente en °C, T_c temperatura del absorbedor en °C, U_c coeficiente global de transferencia de calor que involucra la conducción, convección y radiación desde el interior del horno y η_o es la eficiencia óptica

Eficiencia del concentrador

Los concentradores parabólicos son los únicos que mantienen una distancia focal constante desde el vértice del propio espejo. El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje óptico.

La eficiencia óptica de un canal parabólico es muy semejante al de un paraboloide de revolución y está dada por

$$\eta_o = \rho_R \tau \alpha \gamma F f_t$$

(4.36)

Donde: f_t fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor; F error en el seguimiento; α absortancia del absorbedor; γ factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar directa incidente; ρ_R reflejancia del espejo y τ transmitancia de la envolvente del absorbedor.

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0,90 a 0,95 con excepción de ρ_R cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 según la calidad del reflector. Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiativas; para limitar los efectos convectivos no se necesita instalar una cubierta en el absorbedor.

Angulo de visualización del borde del espejo

Se determina por la siguiente expresión:

$$\theta_0 = a \tan\left(\frac{\frac{1}{2}\left(\frac{f}{D}\right)}{\left(\frac{f}{D}\right)^2 - \frac{1}{16}}\right)$$

(4.37)

Para el diseño propuesto la relación $\frac{f}{D}$ es igual a 0.6

Eficiencia de la apertura del espejo

$$\eta_a = 24 \frac{\left[\left(\sin \frac{\theta_o}{2} \right)^2 + \ln \left(\cos \frac{\theta_o}{2} \right) \right]^2}{\tan\left(\frac{\theta_o}{2}\right)^2}$$

(4.38)

Resultados

Con los fundamentos teóricos expuestos anteriormente y mediante el uso de Matcad 2001, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.3: Resultados de calculo del sistema térmico

ORDEN	PARAMETROS	CANTIDAD	UNIDAD
1	Diámetro de apertura	1	m
2	Profundidad del espejo	0.104	m
3	Distancia focal	0.6	m
4	Relación f/D	0.6	m
5	Área de apertura	0.785	m^2
6	Área del absorbedor	7.854×10^{-3}	m^2
7	Irradiancia media	834	$\frac{W}{m^2}$
8	Temperatura del absorbedor	1203	$^{\circ}K$
9	Temperatura ambiente	291	$^{\circ}K$
10	Eficiencia óptica	0.605	
11	Calor absorbido	396.27	W
12	Calor perdido por convección	30.63	W
13	Calor perdido por radiación	162.52	W
14	Calor útil	233.75	W

4.4 Diseño del soporte de la pieza a ser tratada térmicamente

De acuerdo con las consideraciones para el diseño de cámaras de reacción mediante el uso de energía solar concentrada, el área transversal debería estar comprendida entre 10 y 100 cm^2 .

Para ubicarnos dentro de este rango, se establece un área de 90 cm^2 . Por otra parte, para la determinación del recurso solar se toma en cuenta las horas de máxima insolación que estará comprendida desde las 9 AM hasta las 2 PM, lo que da como resultado 5 horas de sol pico. En cuanto a los aceros indeformables para matricería matricería, que requieren ser tratados térmicamente se pueden indicar los siguientes:

- Acero K460 en marca BOHLER
- Acero K 100

El peso de referencia es de 0,5 Kg., por lo que para el diseño térmico y la determinación de la potencia requerida se tomará en cuenta esta situación.

Con los datos anteriormente definidos se puede calcular el diámetro de la cámara de reacción. Sin embargo, también se debe considerar la altura de las paredes para evitar la presencia de sombras laterales que se desplacen a lo largo del elemento mecánico. Para la cámara se propone un diámetro de 10 cm que corresponde a un área equivalente de 90 cm^2 .

Para definir la altura de la cámara es necesario establecer comparaciones dimensionales con respecto al diámetro de boca, por lo que para una configuración cuadrática $H=D$ del recipiente, se afectaría el calentamiento por la presencia de sombras en la parte inferior. A continuación se presentan alternativas para la determinación adecuada de las dimensiones del horno.

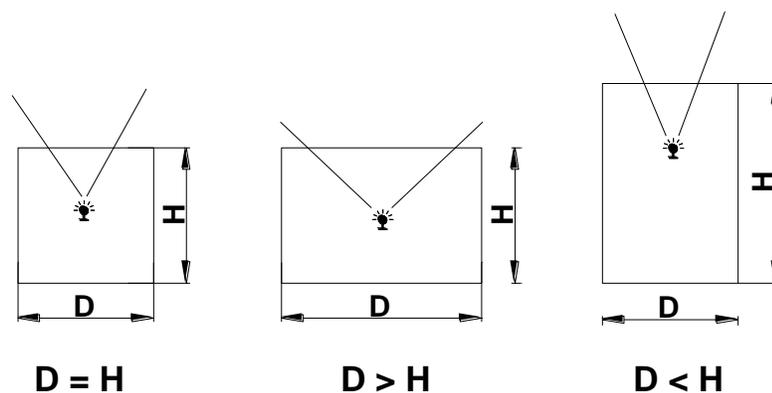


Figura 4.21 Alternativas para el dimensionamiento de la cámara de reacción

Estos esquemas nos indican que la diferencia entre la altura y el ancho de la cámara de reacción influye en la eficiencia que va a tener el horno para tratamientos térmicos en su conjunto, como lo demuestra el ejemplo práctico que podemos observar en las siguientes fotografías.



Fotografía 9 Montaje adecuado para el tratamiento térmico de punzones y matrices



Fotografía 10: Se producen aberraciones y dispersiones por la ubicación de la matriz en el fondo del recipiente



Fotografía 11: En este montaje matriz-recipiente, producen pérdidas por de calor por convección y radiación

Sin embargo es inevitable pensar en las características geométricas específicas que tendrá el horno, lo que nos indica que debemos dimensionar primero la cámara de reacción, que esta relacionado directamente con la geometría y características de la lente de Fresnell.

Debemos considerar que una de las relaciones importantes para dimensionar la cámara de reacción y la lente de Fresnell, esta dada por las recomendaciones de fabricantes.

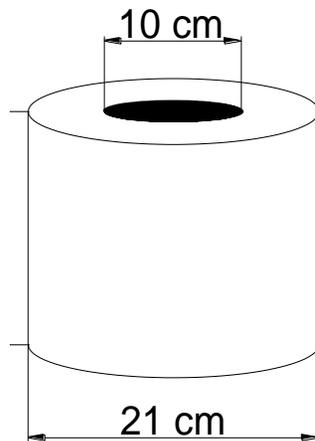


Figura 4.22 Cilindros concéntricos de la cámara

De allí que realizando el diseño de la cámara de reacción. Es necesario colocar el refractario y algunos otros materiales que garanticen la eficiencia de esta parte del horno como se muestra en la figura 4.22.

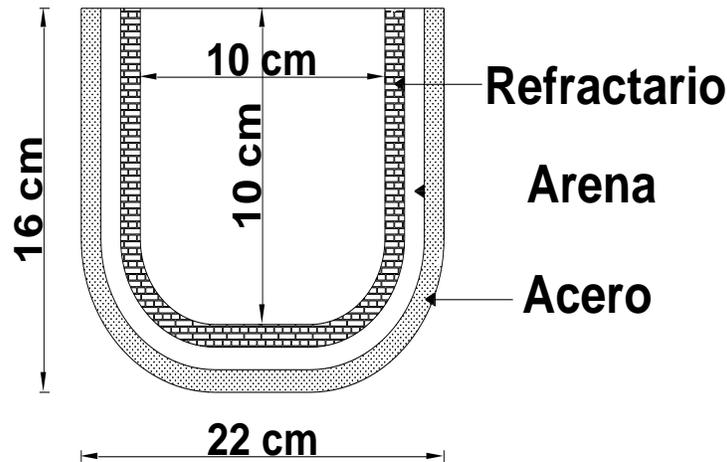


Figura 4.23 Cámara de reacción

Alternativa 1. $H = D$ mejor distribución de la radiación, sin embargo se generarían partes frías en la parte inferior.

Alternativa 2. $H < D$ mejor distribución de la radiación en el interior de la cámara.

Alternativa 3. $H > D$ mayores temperaturas de proceso en la parte superior de la cámara, originando superficies frías en la parte inferior.

Tomando como válida la alternativa 1, procedemos dimensionar la forma del soporte de la muestra a la que se le realizará tratamiento térmico.

$$V_{TOTAL} = V_{CILINDRO} + V_{BASE}$$

$$V_{TOTAL} = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) \times H + \frac{\pi}{4} D_2^2 h$$

$$V_{TOTAL} = 0.005 m^3$$

Con el proposito de optimizar el procedimiento de cálculo, el peso de la cámara de reacción se determinar considerando que todo el material esta compuesto de ladrillo refractario cuya densidad¹es

$$\delta = 2200 \frac{Kg}{m^3}$$

Partiendo de la expresión de la densidad, obtenemos la siguiente expresión para encontrar la masa de la camara de reacción:

$$m = \delta \times V_{TOTAL}$$

Realizando el cálculo obtenemos:

$$m = 11 Kg$$

$$P = 11 Kgf$$

Este componente mecánico debe permitir el desplazamiento de la cámara de reacción, por lo tanto se propone el siguiente diseño

4.5 Selección de materiales

Para la construcción del dispositivo se requiere una gama de materiales que pueden ser: Acero estructural, acero al carbono, hierro fundido, aceros especiales, aceros bonificados, materiales cerámicos, materiales sintéticos los cuales se indican en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Materiales para el horno solar

ORDEN	COMPONENTE	MATERIAL	ESPECIFICACION
1	Estructura cúbica giratoria	Perfil cuadrado de acero estructural de 2"	ASTM A36
2	Lente de fresnel	Vidrio de 1000x100	

		escalonado	
3	Cámara de calentamiento	Refractario Masilla refractaria Acero al carbono	Dolomita Arena Diatomácea ASTM A 36
4	Brazo oscilante	Acero al Carbono	ASTM A36
5	Eje horizontal	Acero Bonificado	V320 BOHLER 709 ASSAB
6	Rueda dentada	Hierro fundido	
7	Tornillo sin fin	Acero de cementación	
8	Eje vertical	Acero bonificado	V320 BOHLER 709 ASSAB
9	Chumaceras de piso	Aceros especiales	
10	Rodamientos de empuje radial	Aceros especiales	
11	Rodamientos de empuje axial	Aceros especiales	
12	Bancada	Acero al carbono	ASTM A36
13	Bases	Acero al carbono	ASTM A36
14	Pernos de anclaje	Acero de transmisión	V945 BOHLER

4.6 Diagramas de fabricación

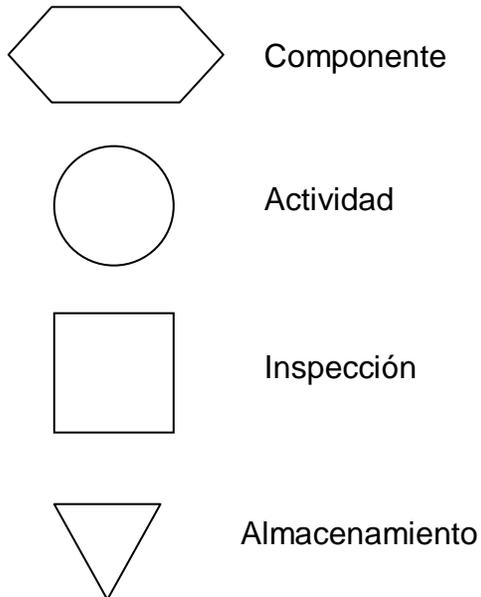
Para la construcción del sistema de tratamientos térmicos de materiales mediante energía solar concentrada es necesario disponer de un procedimiento tecnológico

que permita construir cada componente considerando las actividades y los tiempos necesarios para su fabricación.

Los principales componentes a construir son los siguientes:

- Cámara de calentamiento
- Estructura giratoria
- Estructura fija o bastidor
- Eje horizontal y vertical
- Tornillo sin fin
- Rueda dentada
- Bases de motores
- Carcasas para alojamiento de rodamientos
- Brazo de accionamiento
- Bases de rotación
- Bases del bastidor
- Uniones para pernos de sujeción

Para la elaboración de los diagramas de procesos de fabricación se utiliza la siguiente simbología:



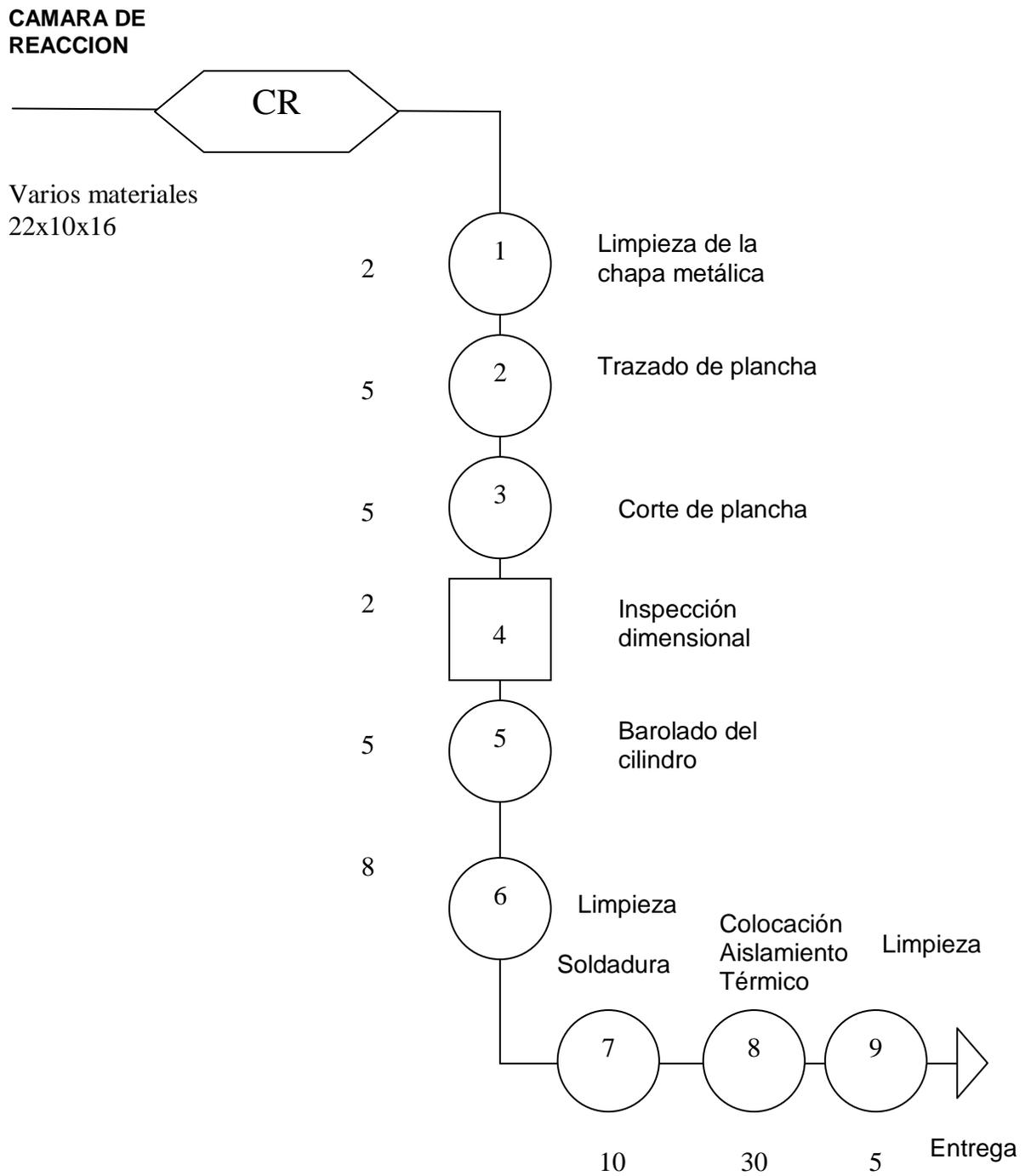


Diagrama 1 Proceso de fabricación de la cámara de reacción

EJE HORIZONTAL

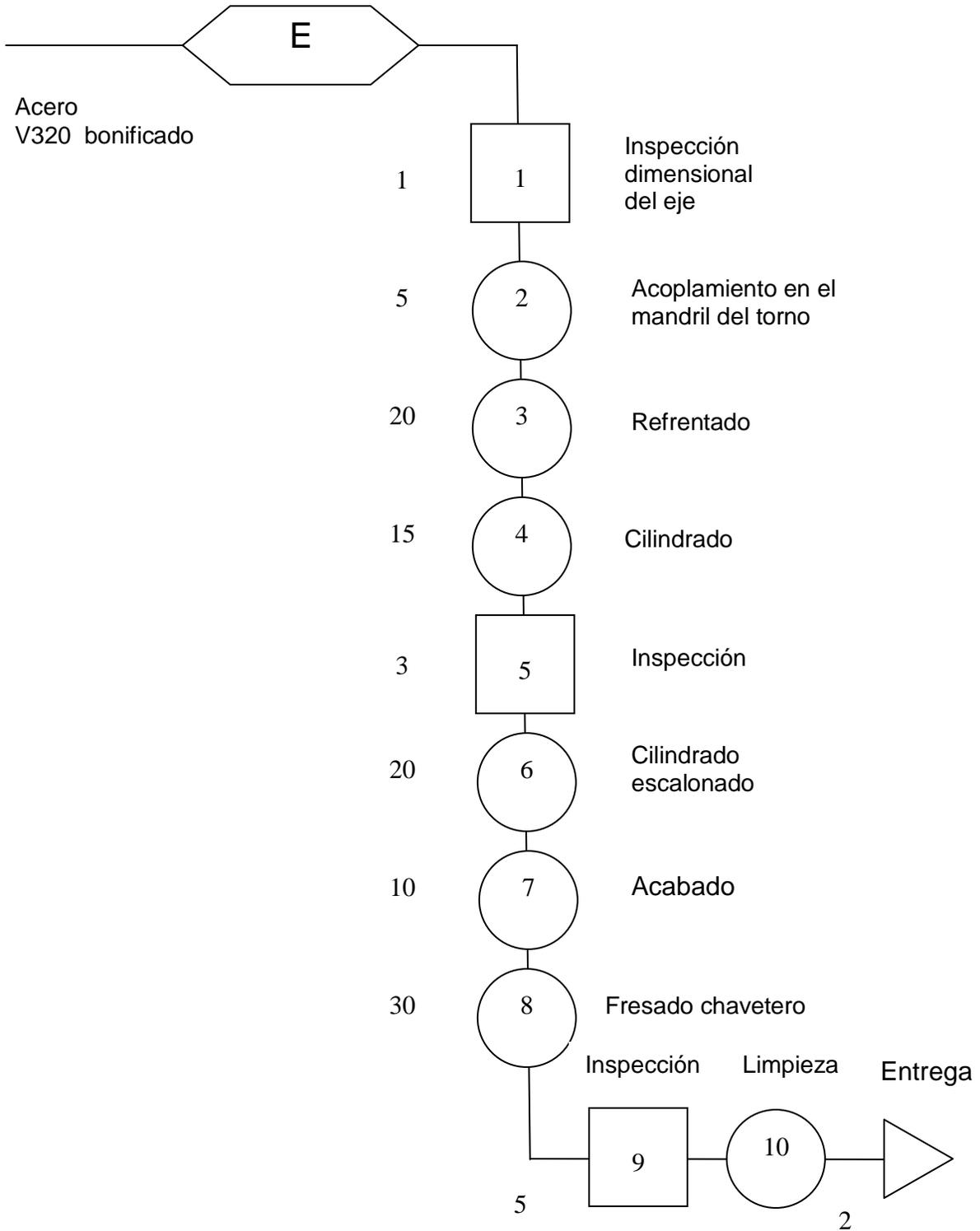


Diagrama 2 Proceso de fabricación del eje horizontal

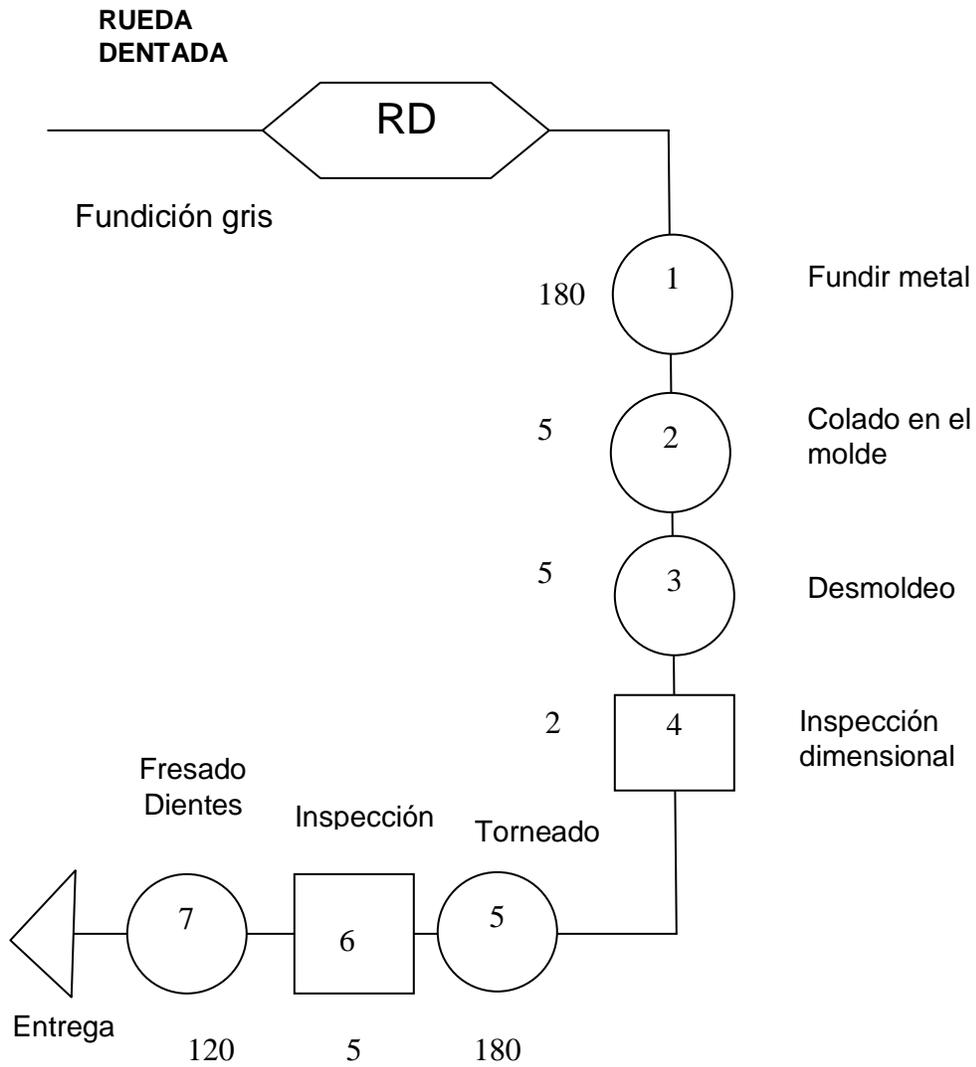
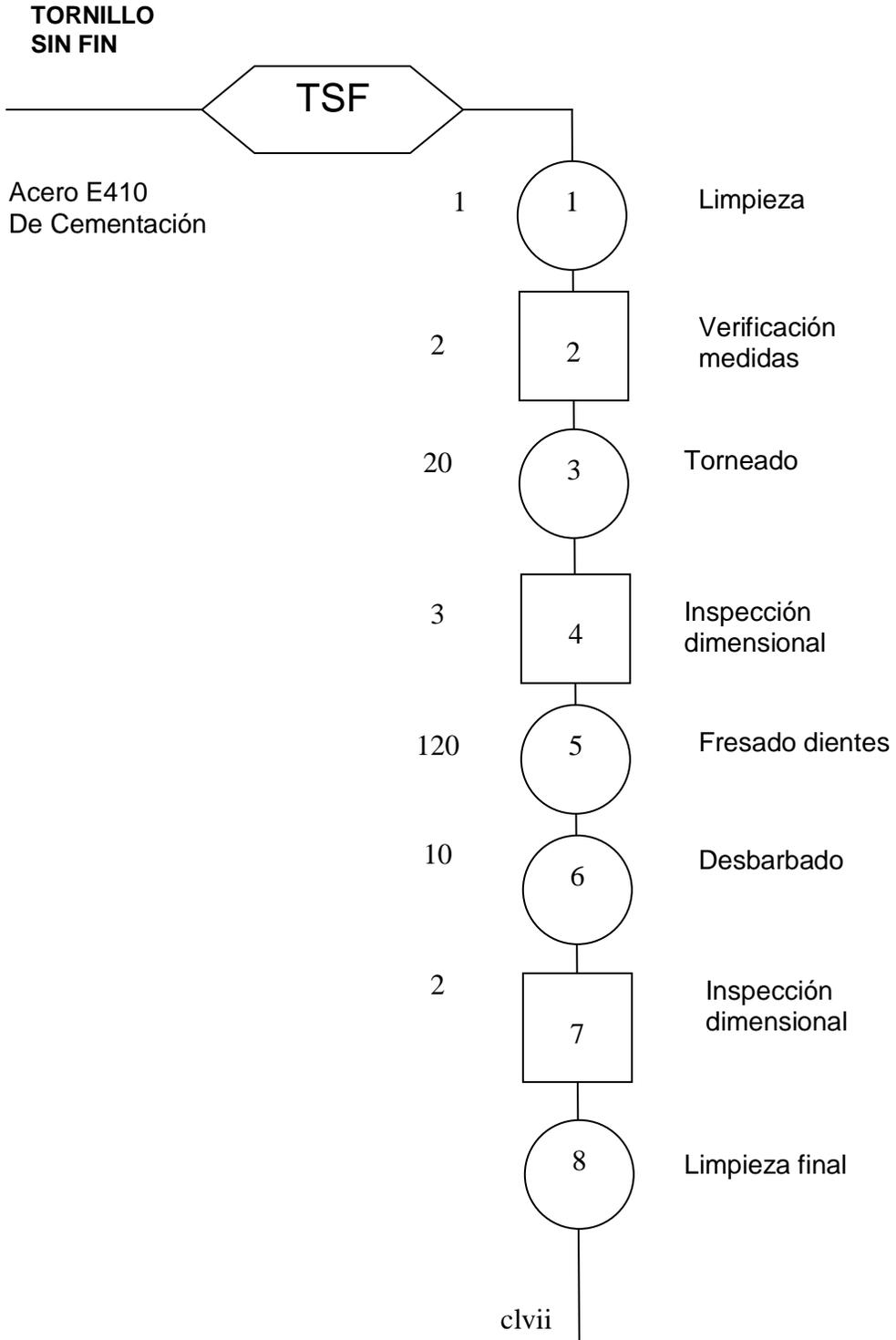
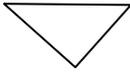


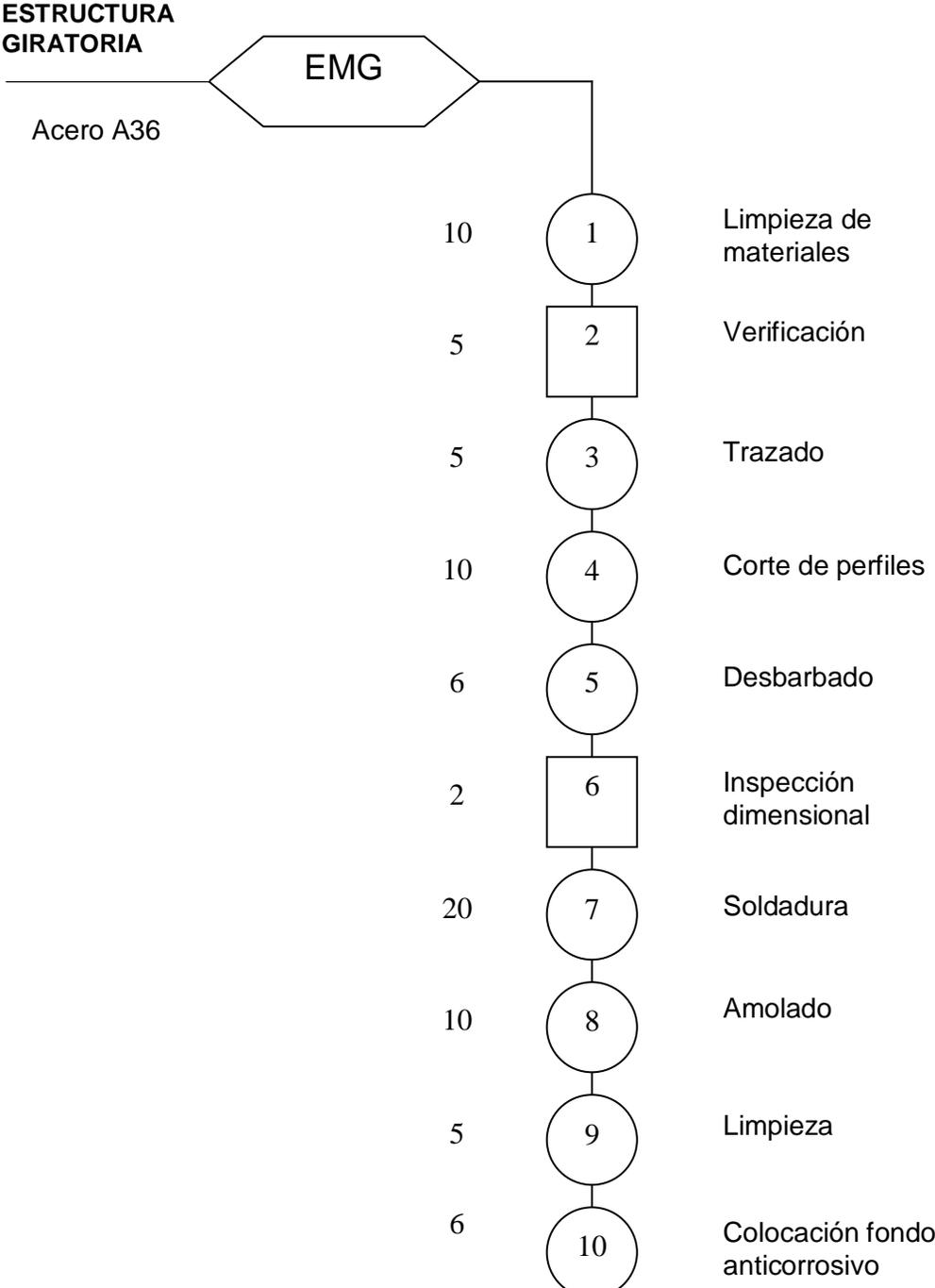
Diagrama 3 Proceso de fabricación de la Rueda dentada





Entrega

Diagrama 4 Proceso de fabricación del tornillo sin fin



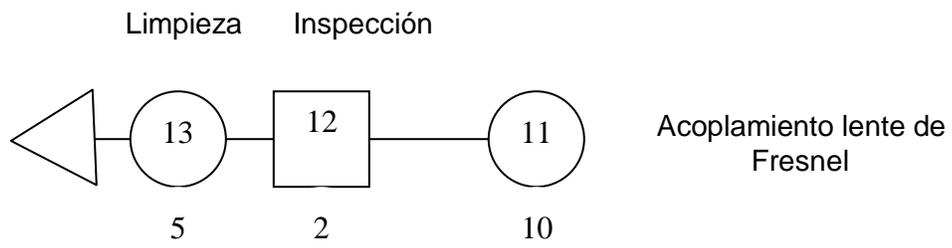
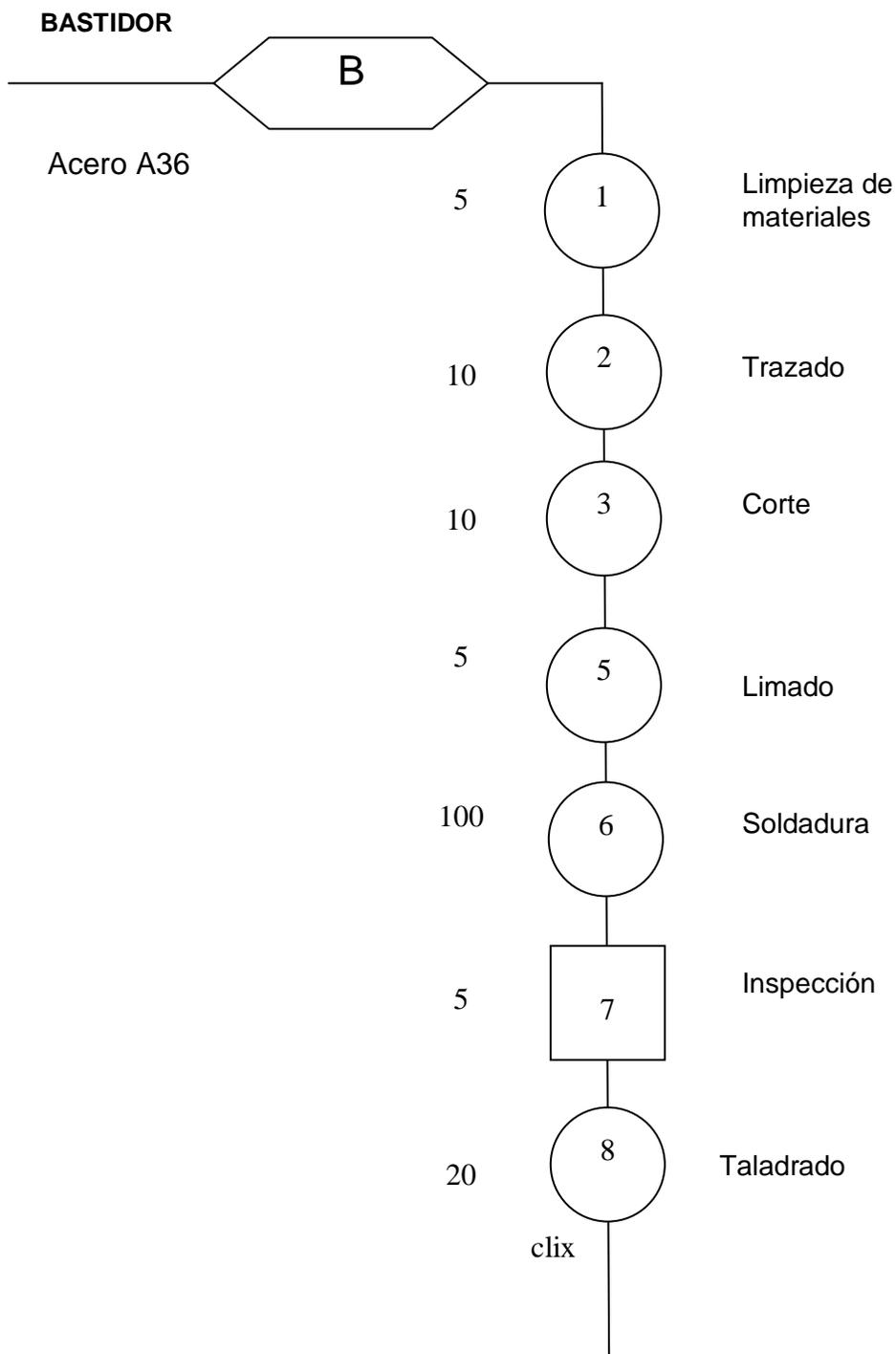


Diagrama 5 Proceso de fabricación de la estructura móvil



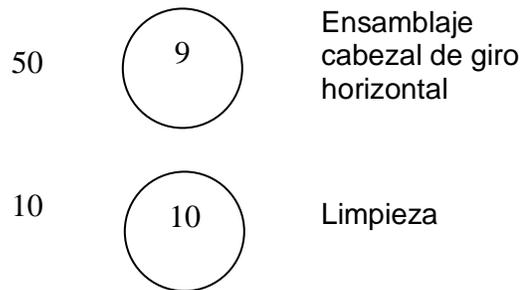


Diagrama 6 Proceso de Fabricación estructura fija (bastidor)

4.7 Montaje

Para el montaje de la máquina térmica se debe tener en cuenta los siguientes aspectos que se detallan a continuación:

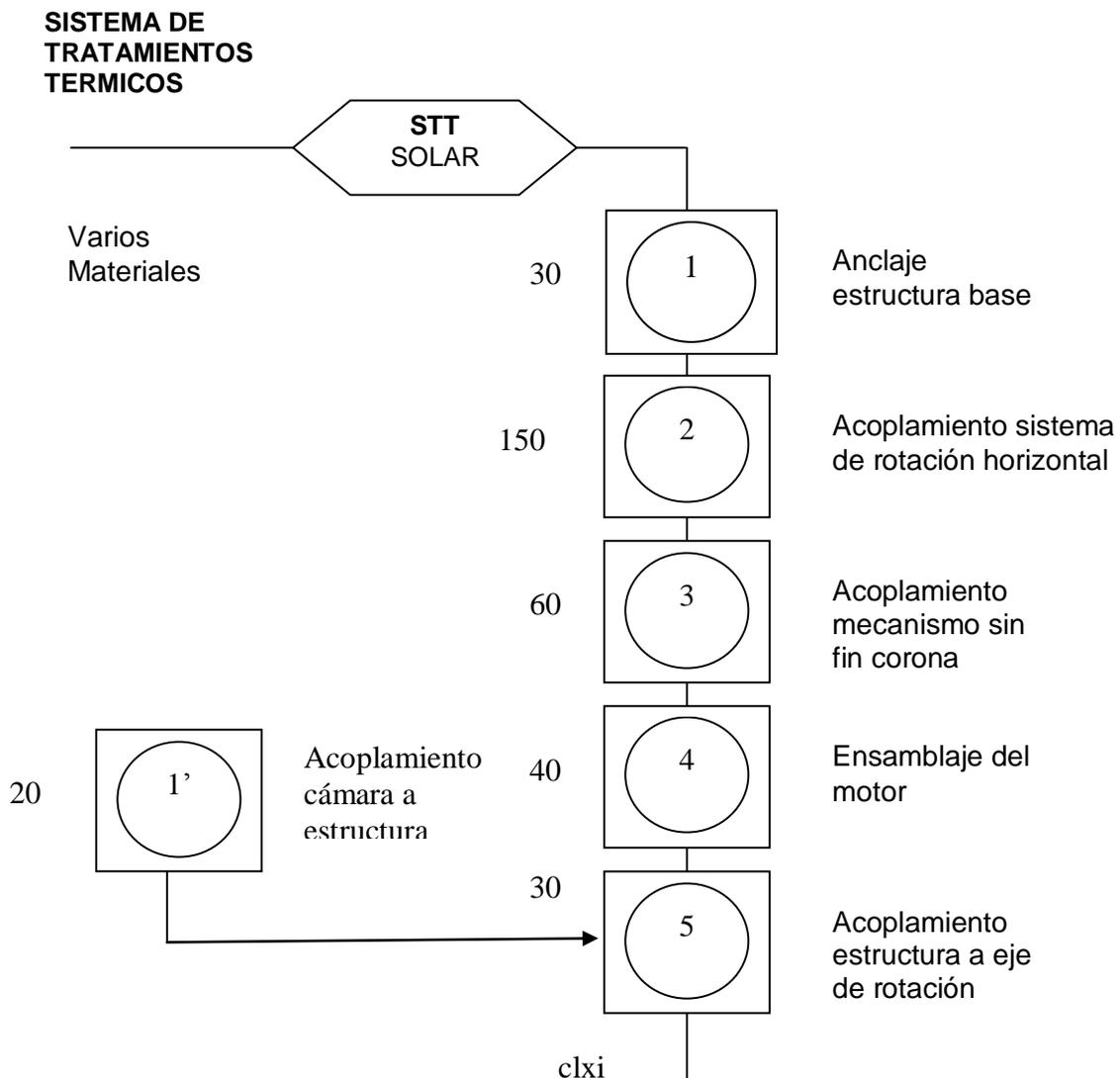
- Listado de componentes
- Partes y piezas debidamente terminadas
- Herramientas manuales y de potencia
- Planos de fabricación y montaje
- Guía de ensamblaje
- Criterios de seguridad industrial
- Implementos de seguridad
- Espacio físico adecuado

Se propone este procedimiento de trabajo en vista de que la máquina para el mejoramiento de superficies utilizando la energía solar concentrada está compuesta por los siguientes subsistemas:

- Cámara de reacción
- Estructura metálica giratoria

- Lente de fresnel
- Mecanismo de giro con eje horizontal
- Mecanismo de giro con eje vertical
- Motores de eléctricos
- Bancada
- Sistema de control para rotación en dos ejes

El montaje consiste en el acoplamiento de las partes, conjuntos y subconjuntos mediante uniones empernadas, remachadas, soldadura, acoples mecánicos, para los cuales se propone seguir el organigrama de procesos tecnológicos que se describe a continuación:



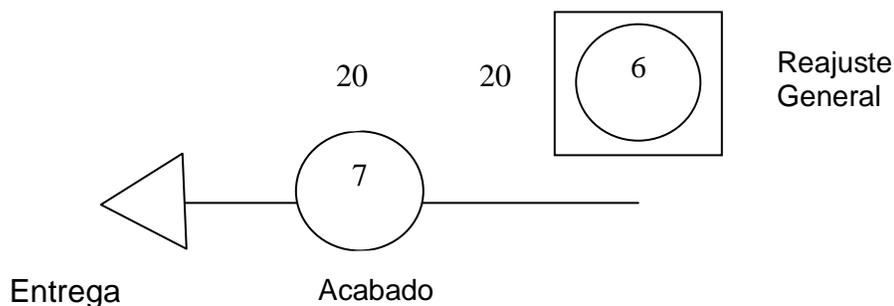


Diagrama 7 Proceso de ensamblaje de subsistemas

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

5.1 Gastos directos.

Estos rubros corresponden a todos los recursos necesarios tanto para la fabricación, montaje, y puesta en marcha del proyecto, por lo que es necesario identificar los valores para definir con mayor certeza el presupuesto de inversión. Entre los aspectos más representativos podemos indicar los siguientes: Materiales directos, Mano de obra directa

Tabla 5.1 Materiales directos para la construcción del horno solar

ORDEN	DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	V.UNITARIO	V.TOTAL
1	Perfil Acero estructural 2" x2"	Perfil	6	22	132
2	Lente de Fresnell $\phi 1000 \times 100$	Unid.	1	3800	3800
3	Placa de sujeción del lente de Fresnell	Unid.	1	250	250

4	Acero ASTM A36 $e = 1/2''$	Plancha	1	30	30
5	Cámara de reacción $\phi 220 \times 160$	Unid.	1	420	420
6	Soporte de la cámara de reacción	Unid.	2	25	50
7	Estructura soporte del Horno	Unid.	1	800	800
8	Mecanismo de rotación horizontal:	Unid.	1	1300	1300
9	Mecanismo de rotación vertical	Unid.	1	1125	1125
10	Motores eléctricos de 2 HP	Unid.	2	176	352
11	Sistema de control automático	Unida	1	1500	1500
SUB TOTAL MATERIALES DIRECTOS					9759

Otro rubro muy importante en el desarrollo del proyecto corresponde al de la mano de obra directa, la misma que está constituida por el valor del trabajo realizado por: Mecánicos, soldadores, personal de apoyo técnico.

Tabla 5.2. Mano de obra directa

ORDEN	MANO DE OBRA DIRECTA	HORAS	V.UNITARIO	V.TOTAL
1	Mecánico de montaje	160	8	1280
2	Soldador	40	12	480
3	Ayudante de montaje	120	6	720
SUBTOTAL MANO DE OBRA DIRECTA				2480

5.2 Gastos indirectos.

Son aquellos que no se incluyen como parte constitutiva de la máquina. Sin embargo, permiten transformar determinado bien o servicio requerido dentro de la fabricación. De allí que lo conforman la mano de obra directa, los materiales indirectos, los insumos y suministros que se caracterizan a continuación.

Tabla 5.3 Mano de obra indirecta

ORDEN	MANO DE OBRA INDIRECTA	HORAS	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Secretaria	160	2	320
2	Ingeniero	250	10	2500

3	Ayudante	60	6	360
SUBTOTAL MANO DE OBRA INDIRECTA				3180

En cuanto a los requerimientos de materiales indirectos, se puede definirlos como aquellos que sirven para transformar un producto, una pieza o componente sin que llegue a constituirse en parte de la máquina.

Tabla 5.4 Materiales indirectos

ORDEN	RUBROS	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Gratas para amoladora	Unid.	1	12	12
2	Disco de corte	Unid.	1	4	4
3	Disco de amolar	Unid.	2	6	12
4	Lijas de hierro	Pliego	6	0,8	4,8
5	Lijas de agua	Pliego	4	0,3	1,2
6	Broca de cobalto	Unid.	1	6	6
7	Implementos de seguridad industrial	Juego	3	15	45
MATERIALES INDIRECTOS					85

5.3 Costos de fabricación y montaje.

En cuanto al costo de tarifas de agua, luz, teléfono, se toma en cuenta las tarifas referenciales de estos servicios a nivel empresas de construcción metalmeccánica, donde en promedio se puede establecer un valor de USD 220,00 (dos cientos veinte dólares con 00/100), para la fabricación y montaje de la máquina, la misma que requiere un tiempo de construcción estimado de 30 días laborables.

Para evaluar el costo de uso de maquinaria de taller constituida por: cizalla, dobladora, soldadora eléctrica, torno, fresa, rectificadora, amoladora, esmeril, taladro de banco, de acuerdo con la experiencia se establece un tiempo base de 238 mismas que se ven afectadas por un coeficiente de rendimiento humano del

90%, y un factor de utilización de las máquinas del 70%, lo cual da como resultado 150 horas reales de producción. En la industria nacional el costo horario por el uso de instalación fluctúa entre 6 y 12 USD por hora. En vista de la complejidad de construcción de este sistema térmico se considera el valor máximo de 12 USD, por lo que se tiene un costo de fabricación de 1800 USD.

5.4 Logística de materiales.

En este costo se presentan los siguientes rubros:

- Transporte
- Desaduanización
- Comunicaciones. (nacionales, internacionales, Internet.)

5.5 Servicios especializados

Para la construcción de componentes de esta máquina termo solar se requiere la participación de empresas especializadas en mecanizado de alta precisión, así como también de profesionales expertos en el ámbito del control electrónico. Para este rubro se define un costo de USD 860.

5.6 Imprevistos

Dentro de la economía el valor de imprevistos depende del grado de incertidumbre que tiene el proyecto así su valor puede fluctuar entre el 5 al 10 % del subtotal de la suma entre los costos directos e indirectos.

5.7 Presupuesto de inversión

A continuación en la tabla 5.5 se presenta el listado de los rubros más representativos y sus respectivos valores

Tabla 5.5 Resumen del presupuesto para la fabricación del horno solar

ORDEN	RUBROS	VALOR
1	Materiales directos	9759
2	Mano de obra directa	2480

3	Mano de obra indirecta	3180
4	Materiales indirectos	85
5	Costos de fabricación y montaje	2200
6	Logística de materiales	400
7	Servicios especializados	860
8	SUBTOTAL	18964
	Imprevistos (5%)	948.20
	TOTAL PRESUPUESTO	19912.20

5.8 Ingresos anuales

5.8.1 Servicio de tratamientos térmicos

Tabla 5.6 Ingreso anual por el servicio de TT

NTT Por año	Valor unitario	Ingreso Anual (USD)
144	30	4320

NTT: Número de tratamientos térmicos por día

TT: Tratamientos térmicos

Horas de sol pico: 4.2 horas

5.8.2 Capacitación energética a la comunidad

Tabla 5.7 Ingreso por capacitación a profesionales y técnicos de la industria

NAP	Valor del Curso	Porcentaje De utilidad (15%)	Número de Cursos por año	Ingreso Anual (USD)
-----	--------------------	------------------------------------	-----------------------------	---------------------------

10	450	112,50	4	2700
----	-----	--------	---	------

NAP: Número de alumnos asistentes

5.8.3 Servicio académico para alumnos DECEM

Tabla 5.8 Ingresos por uso del equipo de laboratorio

No. De alumnos	Valor Individual	Número de Prácticas por año	Ingreso anual
22	6	8	1056

5.9 Costos de operación

Para establecer el costo anual de operación se considera el costo de un operario calificado por el cual hay que pagar USD 3000 al año y para gastos de operación y mantenimiento se establece un valor de USD 780 que da un egreso total de USD 4780.

5.10 Datos para el análisis financiero

Tomando en cuenta el análisis anterior tenemos los siguientes rubros:

Ingresos anuales por prestación de servicios: USD 8076

Costo anual de operación del equipo: USD 4780

Valor de salvamento al término del sexto año, considerando un 10% del valor inicial de la máquina: USD 1991,22

Período de recuperación de la inversión: 6 años

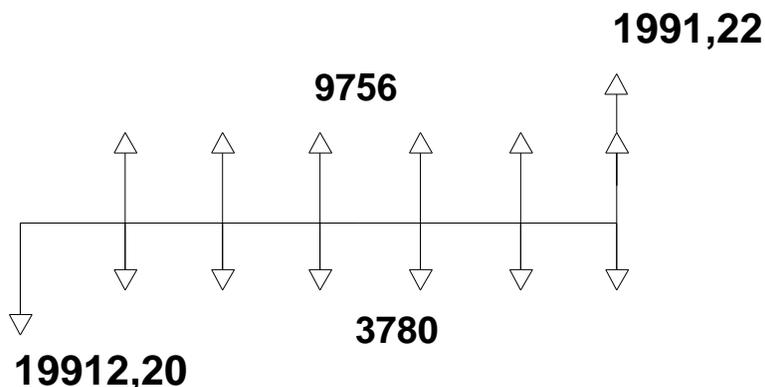


Figura 5.1 Ingresos y egresos del proyecto

5.11 Valor presente neto (VAN)

Aunque es instintivamente inmediata la comprensión del significado de la rentabilidad, pero no es evidente el sentido que tiene el VAN (VALOR ACTUAL NETO), se presenta este índice por considerarlo uno de los más adecuados y en cierta forma uno de los más seguros de los existentes para la determinación de la rentabilidad de un proyecto.

El VAN de un proyecto de inversión, no es otra cosa que su valor medido en moneda actual, o dicho de otra manera es el equivalente de USD actuales de todos los ingresos y egresos, presentes y futuros involucrados en el desarrollo del proyecto destinado al tratamiento térmico de metales.

Por otra si en la siguiente fórmula:

$$VPN := -19912.20 + RI \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] + SF \left(\frac{1}{1+i} \right)^n - RE \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] \quad (6.1)$$

Donde:

RI: corresponde a los ingresos anuales por prestación de servicios

SF: Valor de salvamento

RE: Egresos por operación y mantenimiento de la máquina

i: Tasa de interés de oportunidad

n: Número de años

VPN: Valor presente neto

Si para una tasa de interés de oportunidad $i\%$ el valor presente neto es $VAN(i\%) = 0$ entonces el $i\%$ corresponde a la tasa interna de rentabilidad (TIR)

En vista de que esta tecnología tiene gran repercusión en los aspectos de carácter ambiental, si se lo compara con otros convencionales en el tratamiento térmico de metales, se puede indicar que el costo energético en la utilización del equipo es cero, en vista de que se utiliza una energía renovable, sin embargo su fabricación, montaje y operación involucra costos importantes dada la compleja concepción del dispositivo.

Tomando en cuenta proyectos de inversión de esta naturaleza, el análisis financiero se establece para un plazo de 6 años dentro de términos contables, muy a pesar de que la vida útil de estas instalaciones podría superar los 20 años.

Con estas aclaraciones se procede a realizara la determinación del valor presente neto (VAN) utilizando el programa MATHCAD.

CO:= -19912.20 Inversión inicial

SF:= 1991.22 Valor de salvamento al final de los 6 años

n := 6

RI:= 9756 Ingresos anuales por servicios

RE:= 3780 Costo de operación anual

i:= 0.21224 Tasa de interés de oportunidad

$$VPN := -19912.20 + RI \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] + SF \cdot \left(\frac{1}{1+i} \right)^n - RE \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right]$$

VPN= -0.55 Valor presente neto

La tasa del 14 % da como resultado un VAN con valor de cero por lo que es equivalente a la tasa interna de rentabilidad. De esta manera se puede afirmar que el proyecto en términos financieros es rentable.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En el presente estudio se ha determinado la factibilidad técnica y económica para la implementación de un horno solar destinado a los procesos metalúrgicos de temple, revenido y recocido, para el mejoramiento de matrices y punzones de aceros especiales tales como el K100, K460, Df2, X210Cr12, que no deben exceder de 0,5 Kg. en peso debido a que el calentamiento se produce con luz solar concentrada. Estos componentes pueden ser aplicados en procesos de corte, embutido, extrusión y estiraje de recipientes cilíndricos de pared delgada.

- El diseño comprende el uso de una lente de Fresnell de 1000 mm con una altura del espejo de 10 cm. con el cual se pueden alcanzar RC de 100 y temperatura de proceso sobre los 930 °C, para trabajar durante 4.2 horas de Sol pico.

- El valor promedio de la irradiación solar local, considerada para el diseño térmico del concentrador es de 834 W/m² en el Valle de los Chillos, y corresponde a los datos tomados en determinadas épocas del año, bajo la influencia de radiación solar directa, con la cual debe funcionar la cámara de reacción.

- El costo del proyecto es de USD 19912,20 y ofrece una tasa interna de rentabilidad del 14% dentro de un período de recuperación de la inversión de 6 años.

- Para el análisis financiero se considera un ingreso anual de USD 8076 representado por los rubros de capacitación, servicios de tratamientos térmicos y actividades académicas de laboratorio para alumnos del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Los egresos anuales corresponden a gastos de operación del equipo y a costos de mantenimiento por un valor de USD 4780; para el final del período se considera un valor de salvamento equivalente al 10% de la inversión inicial que es de USD 19912,20.

- A parte de la rentabilidad económica del presente proyecto, se debe considerar el valor agregado en el aspecto ambiental así como tecnológico, ya que con su implementación se puede conseguir importantes avances para la concepción y ejecución de proyectos de mayor alcance que beneficien a la industria nacional.

6.2 Recomendaciones

- En nuestro país se dispone de una variedad de recursos renovables tales como la hidráulica, eólica, solar, biomasa, mareomotriz, los cuales deben ser

debidamente explotados mediante el uso de tecnologías cada vez más eficientes, así como sustentables.

- El uso extensivo de la energía proveniente de los combustibles fósiles han originado el deterioro del medio ambiente, calentamiento global, extinción de las especies, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas energéticas que permitan mejorar las condiciones de vida de la comunidad dentro de un entorno saludable, en favor de ecología, así como también en beneficio de las presentes y futuras generaciones.

- Un proyecto de esta naturaleza no sólo debe quedar en estudio; al contrario, el próximo paso sería la de su ejecución y puesta en marcha para poder comprobar en tiempo real las valiosas prestaciones energéticas que nos ofrece este tipo de tecnologías limpias.

- Al trabajar en espacios reducidos utilizando luz concentrada es indispensable utilizar los implementos de seguridad industrial adecuados para prevenir graves enfermedades profesionales.

- Se debe impulsar el desarrollo de esta tecnología para el mejoramiento superficial de materiales, fundición localizada, foto catálisis, ya que este proceso que utiliza energía solar concentrada es el único que no emite sustancias radiactivas.

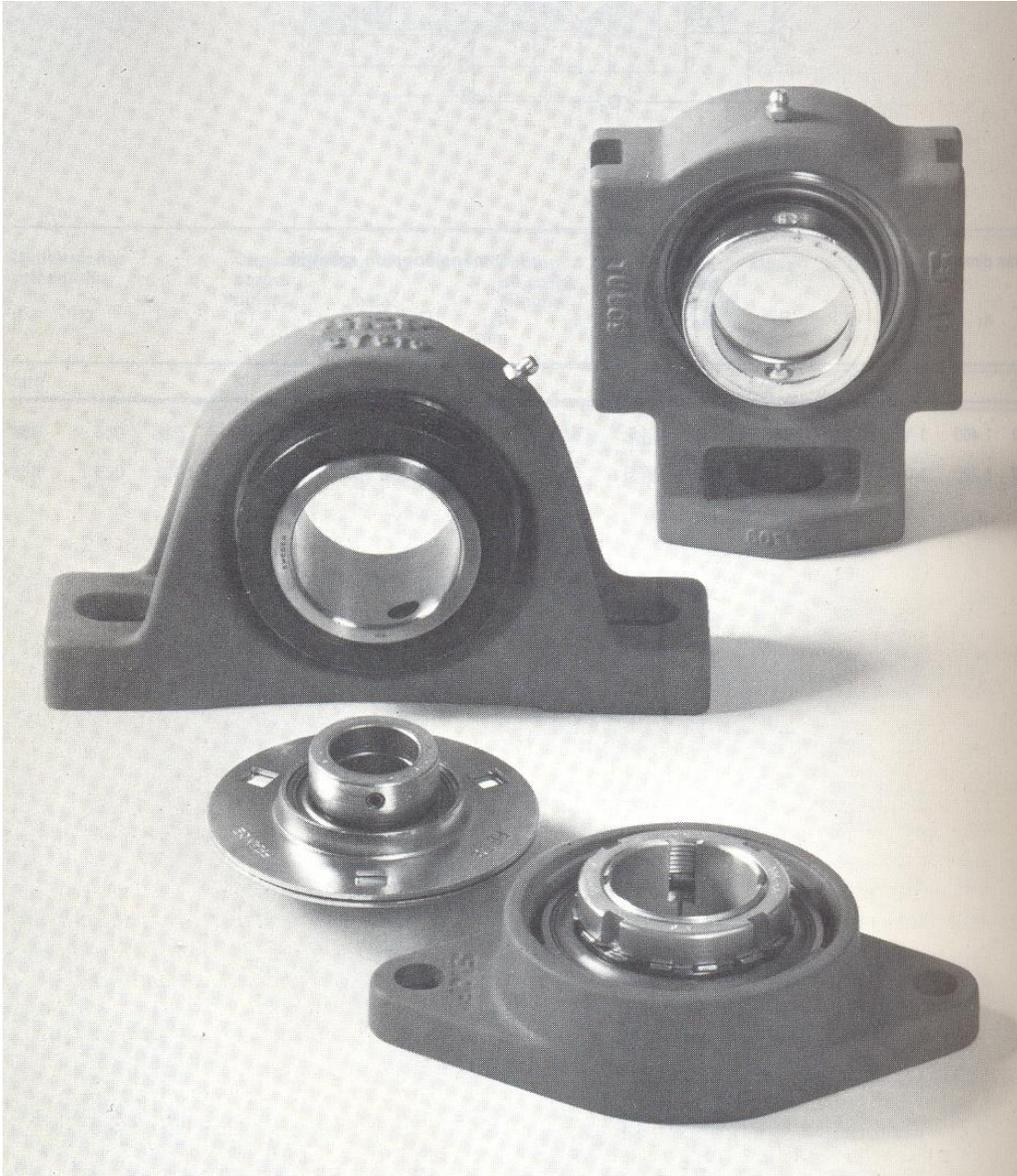
BIBLIOGRAFÍA

- Almanza, R., *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, México, 1994.

- Curso de Cálculo, Diseño, **Montaje y Mantenimiento de Instalaciones de Energía Solar Térmica.**
- Colmenar Castro, **Energía Solar Térmica de Baja Temperatura,** Progensa, Sevilla, 2000.
- Era Solar, **Energías Renovables,** España.
- Bourges, B., **European Simplified Methods for Active Solar System Design,** Kluwer Academic Publishers, 1991.
- Sevilla, A., **Arquitectura Solar para Climas Cálidos,** Geohabitat, 2000.
- López de Asiain, J., **Vivienda Solar Bioclimática,** Sevilla, 1996.
- **Energías Renovables,** revista, 2003.
- Manual de CENSOLAR.
- Duffie, J., **Solar Energy Thermal Processes,** Jhon Wiley and Sons, New York, 1974.
- Incropera, **Fundamentals of Heat and Mass Transfer,** Wiley and Sons, 1996.
- Wilson, J., **La Energía Solar,** Editorial Alambra, Madrid, 198.
- Sapag, N., **Preparación y Evaluación de Proyectos,** Mc Graw-Hill, México, 1994.
- Larburu, N., **Prontuario de Máquinas Herramientas,** Décima Edición, Paraninfo, Madrid, 1998.
- Villarreal, A., **Evaluación Financiera de Proyectos de Inversión,** Novena reimpresión, Bogotá, 1993.
- Spiegel, M., **Matemáticas Superiores para Ingenieros y Científicos,** McGraw Hill, Primera Edición, Bogota, 1975.

- Shigley, J., ***Diseño en Ingeniería Mecánica***, McGraw Hill, Sexta Edición, México D.F., 2002.
- Gieck, K., ***Manual de Fórmulas Técnicas***, 19ª. Edición, Alfaomega, México, D.F., 1993.
- SKF, ***Catálogo General***, Impreso en Alemania por Carl Gerber, 1987.
- Bohman, I., ***Aceros Especiales***, Guayaquil, 2004.

ANEXO B: CHUMACERAS DE PISO Y DE PARED PARA ANCLAJE DE EJES



Fuente: Catálogo general SKF

ANEXO C: RECURSO SOLAR EXISTENTE EN LA LOCALIDAD