



**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

---

---

**CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**“Diseño Conceptual y Análisis Estructural de  
Concentrador Tipo Fresnel-SATCF”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**RAÚL PÉREZ MATA**

**DIRECTOR:**

**DR. ALEJANDRO ZALETA AGUILAR**



---

---

Con dedicatoria muy especial a mi hijo,  
esposa, padres y hermanos.

---

---



---

*“Si lo puedo soñar, lo puedo lograr”*

Walt Disney



---

## **AGRADECIMIENTOS.**

A mis padres y hermanos, quienes me brindaron su apoyo en todos los sentidos y todo momento.

Especialmente a mi esposa Claudia y a mi hijo Raulito, quienes me ofrecieron todo su amor y apoyo incondicional no solo en esta etapa sino en todo momento.

A mi asesor Dr. Alejandro Zaleta Aguilar por la guía y apoyo que me brindaron para lograr terminar la maestría.

Al mis compañeros de clase y de trabajo del grupo INVERCOST, que con su apoyo y dedicación hicieron posible finalizar este trabajo.

A mis compañeros de generación que siempre me apoyaron de forma incondicional.

A todos los catedráticos con los que tuve el placer de tomar sus clases.

Al programa de becas por parte de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que me ofreció el recurso económico para lograr realizar la maestría.

## **PREFACIO**

El mundo está a punto de sufrir un cambio climático irreversible. Si suben más de 2° C las temperaturas medias anuales, tanto los países empobrecidos como los ricos tendrán que hacer frente a un aumento de los desastres naturales, con sequías más intensas y más prolongadas, pérdida de cosechas y una pérdida masiva de especies. Dado que la causa del cambio climático es la quema de combustibles fósiles, necesitamos urgentemente una revolución energética que cambie el mix energético mundial por fuentes no contaminantes. Si queremos evitar un cambio climático peligroso, las emisiones globales deben comenzar a bajar, acercándose a cero lo más pronto posible.

Este trabajo se enfoca en el diseño conceptual y mecánico de un sistema de concentración Termosolar FRESNEL-SATCF que esté acoplado a una tecnología de Almacenamiento térmico con Cambio de Fase (SATCF), con la finalidad de extender los ciclos de trabajo del equipo. En el capítulo I se realiza un estudio del estado del



---

arte, con el fin de obtener información de lo que se está realizando a nivel mundial en cuanto a este tipo de tecnología. En el capítulo II se realiza un estudio de diseño conceptual, utilizando técnicas de creatividad para obtener un modelo funcional, con la finalidad de llevar a cabo la realización del producto desde su concepción y diseño de detalle, su fabricación, hasta el fin de su vida útil, su desmontaje y reciclaje. En el capítulo III se realiza un análisis de selección de materiales con el objetivo de elegir un material que cumpla con las especificaciones de diseño y funcionalidad de la estructura del Solar Fresnel-SATCF. En el capítulo IV se realiza una introducción del Método de Elemento Finito, el cual fue utilizado para analizar los campos de esfuerzo y deformación de la estructura propuesta. Y en el capítulo V se realiza el proceso de modelado en elemento finito y la propuesta de las variantes necesarias para que el modelo funcione de manera segura y adecuada, en este capítulo se genera la propuesta definitiva del equipo de concentración con almacenamiento térmico.



## SIMBOLOGÍA

$\rho$	Densidad
$C_p$	Capacidad calorífica específica
$h$	Calor latente de cambio de fase
$T$	Temperatura
$S$	Constante del resorte
$E$	Módulo de Young
$\nu$	Razón de Poisson
$\sigma$	Esfuerzo de cedencia
$\sigma_{VM}$	Esfuerzo de Von Misses
$\sigma_Y$	Esfuerzo de fluencia
$G$	Módulo de corte
$\gamma$	Energía de Superficie
$K_{1c}$	Tenacidad a la fractura
$C_{R\rho}$	Costo relativo por unidad de volumen
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Deformaciones unitarias normales
$\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$	Deformaciones angulares unitarias cortantes
$\alpha$	Coefficiente de expansión térmica
$S_y$	Esfuerzo de cedencia
$S_u$	Esfuerzo último
$q_v$	Carga distribuida generada por efecto del viento
$F_c$	Carga del concentrado
$F_r$	Carga de los reflectores
$P_d$	Presión dinámica por el viento
$C_e$	Coefficiente de exposición
$C_p$	Coefficiente eólico de presión
$n$	Factor de seguridad



## NOMENCLATURA

SATCF	Sistema de Almacenamiento Térmico con cambio de Fase
CSP	Sistema Solar de Poder de concentración
CLFR	Por sus siglas en inglés (Compact Linear Fresnel Reflector).
PCM	Por sus siglas en inglés (Phase change Material).
MEF	Método de Elemento Finito
PTR	Perfil Tubular Rectangular



## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
PREFACIO.....	4
SIMBOLOGÍA.....	6
NOMENCLATURA.....	7
CONTENIDO.....	8
INDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Objetivo.....	17
1.2 Justificación.....	17
1.3 Antecedentes.....	19
1.3.1. Concentradores Solares tipo Fresnel.....	20
1.3.2 Almacenamiento térmico (PCM).....	31
CAPÍTULO II.....	40
DISEÑO CONCEPTUAL DEL SOLAR FRESNEL-SATCF.....	40
Introducción.....	41
2.1 Base teórica aplicada de diseño conceptual.....	42
2.1.1 Técnicas de creatividad.....	42
2.2 Metodología de diseño conceptual.....	48
2.2.1 Identificación del problema.....	49
2.2.2 Ideas preliminares.....	52
2.2.3 Perfeccionamiento del modelo.....	55
2.2.4 Mecanismos para movimiento del seguidor solar del Fresnel-SATCF.....	57
CAPÍTULO III.....	61
SELECCIÓN DE MATERIALES.....	61





---

3.1 Objetivo general del Capítulo .....	62
3.2 Introducción .....	62
3.3 Justificación.....	63
3.4 Metodología de selección de materiales.....	67
3.4.1 Definición del problema.....	67
3.4.2 Selección de Materiales .....	68
3.4.3 Elección del Material Final .....	88
CAPÍTULO IV .....	90
ANÁLISIS TERMO-ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTO FINITO .....	90
4.1 Bases teóricas aplicadas de elementos finitos.....	91
4.1.1 introducción .....	91
4.1.2 Esfuerzos y equilibrios. ....	92
4.1.3 Condiciones de frontera. ....	94
4.1.4 Relaciones desplazamiento-deformación unitaria.....	95
4.1.5 Relaciones esfuerzo-deformación unitaria.....	96
4.1.6 Efectos por temperatura.....	99
4.1.7 Esfuerzo de Von Misses .....	99
4.2 Análisis de Campos Acoplados con el MEF .....	100
4.2.1 Tipos de campos acoplados .....	102
4.3 Aplicación del método de los elementos finitos (MEF).....	103
4.3.1 Esfuerzos y equilibrio del caso de estudio .....	104
4.3.2 Condiciones de Frontera del caso de estudio.....	109
CAPÍTULO V .....	110
DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y MECANISMOS.....	110
5.1 Objetivo .....	111
5.2 Diseño de la estructura del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF" .....	111
5.3 Modelado en elemento finito del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF .....	113
5.3.1 Análisis sin considerar cargas de viento. ....	114
5.3.2 Análisis considerando cargas de viento.....	118



---

5.4 Modelado en elemento finito de la estructura soporte del reflector .....	121
5.4.1 Análisis de la estructura .....	122
5.5 Diseño y modelado en elemento finito de la Tercer propuesta. ....	126
5.5.1 Modelado de la estructura del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF.....	129
CAPÍTULO VI .....	133
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA .....	133
6.1 Conclusión del Capítulo I. ....	134
6.2 Conclusión del Capítulo II. ....	135
6.3 Conclusión del Capítulo III. ....	136
6.4 Conclusión del Capítulo IV. ....	137
6.5 Conclusión del Capítulo V. ....	138
6.5.1 Resultados del modelo en elemento finito.....	138
6.5.2 Modelo propuesto.....	140
6.5.3 Conclusiones .....	143
6.6. Perspectiva.....	144
REFERENCIAS .....	146
ANEXO 1 .....	151
CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR TERMOSOLAR TIPO FRESNEL-SATCF .....	151
ANEXO 2 .....	156
PLANOS DE FABRICACION .....	156



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Concentrador de radiación solar de Wally Szulmayer [9].....	21
Figura 1. 2. Lente curvado prismático tipo Fresnel de Mark J. O'Neill [10]. ....	22
Figura 1. 3 Concentrador solar de Andrew and Murrysville [11], .....	22
Figura 1. 4 Corte transversal del reflector Fresnel en espiral [12].....	23
Figura 1. 5 Vista de planta del reflector Fresnel en espiral [12]. ....	23
Figura 1. 6 Sistema de concentración solar de Eduardo A. Sampayo [13].....	24
Figura 1. 7 Seguidor solar tipo Fresnel de Huang Zhong y Li Xiangyang [14].....	25
Figura 1. 8 Reflector Fresnel lineal compacto de Peter Feher [15]. ....	25
Figura 1. 9. Lentes utilizados por William James Todd y Baton Rouge en sus experimentos [16]. ....	26
Figura 1. 10. Estructura para un colector solar de multi-tubos por Peter Le Lievre [18]. ....	27
Figura 1. 11 Mecanismo de seguimiento solar de Hoermann Alexander y Ray Forest [19].....	28
Figura 1. 12 Concentrador cilindro parabólico [6].....	29
Figura 1. 13. Reflector linear fresnel [6]. ....	29
Figura 1. 14. Diagrama que muestra intercalación de espejos sin sombra entre espejos [20].....	30
Figura 1. 15 Vista del Concentrador Fresnel con almacenamiento térmico [22].....	32
Figura 1. 16. Intercambiador de Calor y colado del hormigón [22].....	33
Figura 1. 17. Materiales de cambio de fase comerciales disponibles [25].....	38
Figura 2. 1 Diagrama representativo de la base de la metodología TRIZ [31].....	45
Figura 2. 2 Descomposición funcional del Solar Fresnel-SATCF .....	51
Figura 2. 3 Primer modelo .....	52
Figura 2. 4 Segundo modelo .....	52
Figura 2. 5 Tercer modelo .....	53
Figura 2. 6 Cuarto modelo.....	53
Figura 2. 7 Quinto modelo.....	54
Figura 2. 8 Sexto modelo .....	54
Figura 2. 9 Séptimo modelo .....	55
Figura 2. 10 Primera propuesta del Modelo perfeccionado. ....	55
Figura 2. 11 Segunda propuesta del Modelo perfeccionado.....	56
Figura 2. 12 Propuesta 1 utilizando un sistema de engrane y cadena metálica.....	57
Figura 2. 13 utilizando un mecanismo de barras.....	58
Figura 2. 14 Vista frontal de la propuesta 2 .....	58
Figura 2. 15 Vista de detalle de la propuesta 2.....	58
Figura 2. 16 Propuesta 3 utilizando eje de la superficie reflejante.....	59
Figura 2. 17 Acercamiento al ensamble de los ejes con la barra unión de la propuesta 3.....	60
Figura 3. 1. Mapa de materiales Módulo de Young vs Densidad [37] .....	70
Figura 3. 2. Mapa de materiales Carga vs Densidad [37].....	71
Figura 3. 3. Mapa de materiales Módulo de elasticidad vs Esfuerzo [37].....	73
Figura 3. 4. Tenacidad a la fractura, $K_{1c}$ , contra módulo de young's, $E$ [37] .....	75
Figura 3. 5. Tenacidad a la fractura, $K_{Ic}$ , contra límite elástico, $\sigma_f$ [37].....	76
Figura 3. 6. Diagrama esfuerzo, $\sigma_f$ contra temperatura, $K$ .....	78
Figura 3. 7. Módulo de Young, $E$ , contra costo por unidad de volumen, $C_{Rp}$ [37].....	79
Figura 3. 8. Esfuerzo, $\sigma_f$ , contra costo relativo, $C_{Rp}$ [37] .....	80



---

Figura 3. 9. Diagrama de ataque ambiental .....	87
Figura 3. 10 Diagrama Costo aproximado por unidad de masa vs Clase de materia. [37] .....	89
Figura 4. 1 Cuerpo Tridimensional [38].....	92
Figura 4.2 Equilibrio de un volumen elemental [38].....	94
Figura 4.3 Volumen elemental en la superficie [38].....	95
Figura 4.4 Superficie elemental deformada [38].....	96
Figura 4.5 Cargas aplicadas a la estructura.....	105
Figura 4.6 Estructura soporte de reflector.....	108
Figura 5. 1 Principales componentes del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF.....	111
Figura 5. 2 Principales elementos estructurales utilizados en la estructura del modelo. ....	112
Figura 5. 3 Modelado de la segunda propuesta del modelo perfeccionado .....	114
Figura 5. 4 Restricciones para el modelo sin cargas de viento.....	115
Figura 5. 5 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF .....	115
Figura 5. 6 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF.....	116
Figura 5. 7 Acercamiento al área de concentración de esfuerzo máximo. ....	117
Figura 5. 8 Ubicación de cargas y restricciones aplicadas al modelo del Solar Fresnel-SATCF .....	118
Figura 5. 9 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF .....	119
Figura 5. 10 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura .....	120
Figura 5. 11 Acercamiento del área de concentración de esfuerzo máximo .....	121
Figura 5. 12 Principales elementos estructurales utilizados en la estructura del reflector .....	122
Figura 5. 13 Modelado estructura de soporte del reflector .....	122
Figura 5. 14 Restricciones y cargas aplicadas al modelo.....	123
Figura 5. 15 Deformación máxima de la estructura que soporta los reflectores.....	124
Figura 5. 16 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF.....	125
Figura 5. 17 Tercer propuesta del Modelo perfeccionado. ....	127
Figura 5. 18 Tercer propuesta del Modelo perfeccionado. ....	128
Figura 5. 19 Tercera propuesta del modelo perfeccionado del Concentrador Solar.....	129
Figura 5. 20 Restricciones aplicadas sobre el modelo .....	130
Figura 5. 21 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF .....	130
Figura 5. 22 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF.....	131
Figura 5. 23 Acercamiento al área de concentración de esfuerzo máximo. ....	132
Figura 6. 1 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF .....	138
Figura 6. 2 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF.....	138
Figura 6. 3 Propuesta final del SOLAR FRESNEL-SATCF .....	140
Figura 6. 4Vista de detalle del concentrador Solar.....	141
Figura 6. 5Vista de detalle del sistema de alimentación y mecanismo de seguidor solar.....	141
Figura 6. 6. Concentrador Fresnel de Industrial Solar.....	144
Figura 7. 1 Construcción del equipo en taller.....	152
Figura 7. 2 Proceso de pintura de la estructura. ....	152
Figura 7. 3 Proceso de pintura de la estructura, parte central .....	152
Figura 7. 4 Proceso de pintura de los soportes de los reflectores .....	152
Figura 7. 5 Proceso de secado de estructura base. ....	152
Figura 7. 6 Proceso de secado de estructura reflectores. ....	152



Figura 7. 7 Proceso de construcción del sistema PCM .....	153
Figura 7. 8 Proceso de construcción del sistema PCM .....	153
Figura 7. 9 Proceso de construcción de la estructura del concentrador solar. ....	153
Figura 7. 10 Proceso de construcción de la estructura del concentrador solar. ....	153
Figura 7. 11 Preparación de la superficie para la instalación del equipo.....	153
Figura 7. 12 Instalación de estructura base sobre dados de concreto. ....	153
Figura 7. 13 Vista del sistema de ensamble de la estructura del equipo.....	154
Figura 7. 14 Armado de la estructura de soporte del concentrador solar.....	154
Figura 7. 15 Armado de la estructura de soporte del concentrador solar.....	154
Figura 7. 16 Instalación del concentrador solar sobre la estructura de soporte.....	154
Figura 7. 17 Instalación de estructura de reflectores.....	154
Figura 7. 18 Instalación de estructura de reflectores.....	154
Figura 7. 19 Instalación de superficie reflectora y sistemas de rodamiento. ....	155
Figura 7. 20 Vista general del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF .....	155
Figura 7. 21 Instalación de líneas de alimentación y de servicio del equipo. ....	155
Figura 7. 22 Instalación del sistema PCM.....	155



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Comparación concentrador solar parabólico y concentrador lineal Fresnel [6].	30
Tabla 1. 2. Características de los PCM inorgánico [23].	34
Tabla 1. 3. Características de PCM orgánico [23].	34
Tabla 1. 4. Propiedades de Sólidos y líquidos	35
Tabla 1. 5. Parámetros de caracterización de materiales de Almacenamiento de Energía Térmica sensible y latente [25].	36
Tabla 1. 6. Requerimientos y restricciones en la selección de materiales de Almacenamiento de Energía Térmica [25].	37
Tabla 1. 7. Principales compañías proveedoras de materiales de cambio de fase en el mundo [25].	38
Tabla 2. 1. Parámetros técnicos de TRIZ [31].	46
Tabla 2. 2. Principios inventivos de TRIZ.	47
Tabla 2. 3. Matriz de contradicciones	48
Tabla 3. 1. Tipos de propiedades	64
Tabla 3. 2. Tipos de materiales	65
Tabla 3. 3. Subconjunto de materiales de los diagramas	81
Tabla 3. 4. Puntuación de subconjunto de materiales	82
Tabla 3. 5. Características y aplicaciones de los metales	83
Tabla 3. 6. Comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones ambientales.	88
Tabla 4. 1 Tipos de elementos a través de ambientes físicos [39].	103
Tabla 4. 2 Propiedades mecánicas del Acero Estructura AISI 304.	104
Tabla 4. 3 Valores del coeficiente de exposición Ce	106
Tabla 4. 4 Valores del coeficiente eólico o de presión.	107
Tabla 4. 5 Tabla de materiales de la estructura soporte de reflector.	108
Tabla 4. 6 Esfuerzos y equilibrios del modelo.	109
Tabla 5. 1. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF	112
Tabla 5. 2. Perfiles utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF	113
Tabla 5. 3. Comparación del campo de esfuerzos con y sin cargas de viento	120
Tabla 5. 4. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF	121
Tabla 5. 5. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF	128
Tabla 6. 1 Propiedades mecánicas del Acero Estructura AISI 304.	138
Tabla 6. 2 Elementos y restricciones utilizadas en el modelo.	139
Tabla 6. 3 Resultados del modelo propuesto	139
Tabla 6. 4 Material utilizado.	142
Tabla 6. 5 Lista productores de Concentradores Lineales Fresnel en el mundo [42].	145



# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN



Actualmente en el sector industrial **a nivel mundial** existen múltiples actividades que requieren de algún fluido de trabajo a temperaturas entre **80 y 250 °C** y que para lograrlo están empleando un **90 % de combustibles fósiles**, por mencionar algunas de estas actividades se tiene la esterilización, pasteurización, secado, hidrolizado, limpieza en general, polimerización, destilación y evaporación.

Hoy en día con la llegada de empresas extranjeras al país, se espera una gran demanda de energía eléctrica y un aumento en la concentración de habitantes en los corredores industriales del estado, como la ciudad de Salamanca, Irapuato, Silao, León, lo cual ocasionará una mayor competencia por los recursos de la región como la energía eléctrica y térmica, por lo que, esto crea un nicho de oportunidad comercial en la mayoría de las regiones del estado y de nuestro país ya que representa una alternativa a los sistemas tradicionales de generación de energía eléctrica y térmica.

La producción de electricidad a partir de la radiación solar es un proceso directo. Debido a que la energía solar no es muy densa, es necesario concentrar para producir temperaturas explotables utilizables para la producción de electricidad. La radiación puede concentrarse en un punto o en una línea, donde la energía térmica se transfiere al fluido de transferencia de calor. La intensidad de la concentración se define por el factor de concentración, entre más alto sea éste, será mayor la temperatura alcanzada.

Actualmente existen varios sistemas de concentración solar sin embargo éstos sistemas continúan dependiendo totalmente de la disponibilidad solar para su operación, es por esto que la mayoría de las veces se genera un desfase entre los periodos de disponibilidad de la energía solar y los periodos de consumo de energía que se requieren para determinadas actividades en la industria.

Con el interés de atender el problema de la disponibilidad solar en la Universidad de Guanajuato se han realizado prototipos experimentales de calentadores solares, algunos con sistemas de almacenamiento térmico con cambio de fase (SATCF) e incluso se han realizado análisis estructurales [1] y procesos de optimización a dichos equipos [2]. Se han realizado procesos de certificación [3] bajo norma [4] a los equipos experimentales y se han obtenido resultados muy ambiciosos, además se han realizado pruebas de captación solar las cuales muestran que Guanajuato tiene una ubicación que le garantiza un área con excelente percepción solar.

En este trabajo se pretende desarrollar un diseño de un acoplamiento de equipos térmicos, que consta de un subsistema de captación de energía solar térmica de alta concentración tipo "FRESNEL" con un sub-sistema con tecnología de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase (SATCF), conocido en el mundo científico como Phase Change Material [5], que permitirá aumentar la disponibilidad de la energía térmica para múltiples actividades que requieran calor a temperaturas en un rango de 80-250





°C; el diseño conceptual del sistema se denomina **SOLAR FRESNEL-SATCF**, contempla la implementación de un sistema de alta concentración solar utilizando la tecnología Fresnel [6], y un sistema de almacenamiento térmico para prolongar el tiempo de trabajo del equipo.

Este trabajo consta básicamente del diseño de un Sistema de Concentración solar, las principales actividades a desarrollar son el diseño de un modelo óptimo y funcional, posteriormente se realizará un análisis de selección de materiales el cual tiene la finalidad de seleccionar los materiales que mejor se adapten a las necesidades del modelo. Una vez seleccionado el material se realizará el desarrollo del modelo en CAD que tiene por objetivo garantizar el buen funcionamiento del equipo, posteriormente se realizará el modelado en elemento finito con la finalidad de visualizar el comportamiento del mismo bajo cargas estructurales y térmicas. Una vez que se tiene el modelo final que soporta las cargas establecidas, se procede a la realización de los planos de fabricación. El punto final es un estudio económico financiero para visualizar la proyección económica del equipo de concentración solar.

## 1.1 Objetivo

Diseñar, analizar estructuralmente y desarrollar un sistema de captación de energía solar térmica de alta concentración tipo “FRESNEL”, integrado con un sub-sistema con tecnología de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase (SATCF) que permita aumentar la disponibilidad de la energía térmica para múltiples actividades que requieran calor a temperatura en un rango de 80-250 °C. El arreglo tipo: **FRESNEL-SATCF** será un sistema compacto, ligero y sobre todo con precio accesible al público, además tendrá el valor agregado de permitir a las empresas utilizar como fuente primaria de energía la radiación solar.

## 1.2 Justificación

La energía solar térmica ofrece una alternativa limpia y económicamente rentable para suministrar las necesidades de calor de la industria en comparación con los combustibles tradicionales, favoreciendo la competitividad y sustentabilidad del sector.

La implementación de esta tecnología permite mejorar la calidad de vida de la población disminuyendo la incidencia de enfermedades respiratorias, principalmente en centros urbanos, ya que permite reducir la emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes fijas basados en combustibles fósiles.

Además, contribuye a la lucha contra el cambio climático a nivel global, al evitar la emisión de dióxido de carbono a la atmosfera.



Aproximadamente 50% del consumo energético del sector industrial es utilizado para proporcionar energía térmica por debajo de los 400°C [7]. Esto significa un gran potencial para el despliegue de dispositivos solares térmicos.

La mayoría de los procesos industriales requieren el calentamiento de una corriente de fluido (agua, vapor, aceites térmicos) y el calentamiento de depósitos o reactores. Los sistemas de calentamiento convencionales para suministrar el calor necesario se basan en el vapor o el agua caliente de una caldera; como se ha observado para este fin se utilizan principalmente combustibles fósiles como derivados del petróleo, el gas natural y el carbón.

En este contexto, los principales impulsores para la implementación de tecnologías solares térmicas en los procesos industriales son:

1. Reducción de los riesgos asociados con los precios cada vez más volátiles y en aumento en el precio de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural;
2. Aumento de la competitividad de la industria a través de la reducción de los costos de combustible;  
Reducción de las emisiones de dióxido de carbono; y
3. Cobertura de las necesidades energéticas específicas en los procesos de producción.

La energía solar térmica puede satisfacer una cantidad significativa de la demanda de calor en la industria y en el procesamiento de alimentos del sector agrícola en cualquier país y con independencia de la ubicación geográfica. En las economías desarrolladas, la energía solar térmica puede proporcionar técnicamente, aproximadamente la mitad de este consumo de energía mediante el suministro de agua caliente y vapor en un rango de temperatura de hasta 400°C [7]. En los países en desarrollo, especialmente en aquellos en los que la agricultura, la industria textil, la industria de fabricación de ladrillos y la industria alimentaria son importantes subsectores, la energía solar térmica puede proporcionar aire caliente y agua caliente para curar, secar, teñir, lavar, hervir, pasteurizar y esterilizar.

México es un país con un recurso solar importante ya que en promedio cuenta con [8]:

- 5 kWh/m<sup>2</sup>/día, esto indica que las tecnologías solares tienen gran potencial de aplicación en nuestro país en comparación con otros países con menos insolación.
- En el mapa mundial se encuentra como de los de mayor promedio de radiación solar anual, con índices que van de los 4.4 kWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro a los 6.3 kWh/m<sup>2</sup> por día en el norte del país.



- Tiene 100 kilómetros cuadrados en el desierto que podrían generar suficiente energía para todo el país.
- 1er lugar en fabricación de paneles solares basados en tecnología extranjera.
- 150 millones de dólares es el valor actual del mercado de energía solar, 100 millones corresponden a calentadores de agua y 50 millones, a celdas fotovoltaicas.

Con lo mencionado anteriormente se observa el enorme potencial que existe en nuestro país en cuanto a energía solar, por lo que es importante hacer estudios e investigaciones que conlleven todo lo relacionado con el almacenamiento de energías alternas principalmente solar así como la producción de energía térmica.

Durante las últimas décadas se ha dado a nivel mundial un proceso de transición hacia una mayor participación de las energías renovables, impulsado por una serie de factores, entre los cuales se encuentran:

- Las preocupaciones de soberanía y de seguridad en el abasto de energía en países importadores de energía, sobre todo a partir de las crisis petroleras, y la cada vez mayor volatilidad de los precios de los combustibles.
- Las preocupaciones por los impactos ambientales de los sistemas energéticos: en particular la lluvia ácida y, más recientemente, el cambio climático.

Actualmente existen varios sistemas de concentración solar como lo son los parabólicos, cilíndrico parabólicos, de torre y de arreglo tipo Fresnel los cuales van mejorando en cuanto a eficiencia energética se refiere y con temperaturas de operación cada vez más altas. Ahora bien, los sistemas mencionados anteriormente continúan dependiendo totalmente de la disponibilidad solar para su operación, es por esto que la mayoría de las veces se genera un desfase entre los periodos de disponibilidad de la energía solar y los periodos de consumo de energía que se requieren para determinadas actividades en la industria.

### **1.3 Antecedentes**

Desde hace 20 años se han ido instalando en el mundo un gran número de plantas solares termoeléctricas que utilizan las distintas tecnologías de concentración solar.

Actualmente la matriz energética en México depende de Energías convencionales. A nivel mundial existe una dependencia del petróleo, el cual es la base del modelo económico mundial. El pico de producción de este combustible ya se estaría alcanzando según predicciones basadas en el modelo de Hubbert [9], después de esto la producción declinará tan rápido como creció, resaltando el hecho de que el factor limitante en la extracción de petróleo es la energía requerida y no su costo económico, puesto que en cuanto la energía requerida para la extracción de un barril de petróleo



sea mayor que la energía que se puede extraer de este, dejará de ser negocio para las empresas petroleras, viéndose necesaria la búsqueda de otras fuentes de energía. Dentro de las fuentes energéticas existentes se pueden identificar cuatro grandes tipos: otros Combustibles Fósiles, Energía Nuclear, Energía Hidráulica y las Energías Renovables. Los Combustibles Fósiles como el Petróleo, el carbón y el gas natural se usan actualmente de forma masiva alrededor del mundo (incluido nuestro país), pero éstos se encuentran restringidos por su cantidad finita, debido a que no son energías renovables en el corto plazo y por ende alcanzarán su pico de producción, además éstos se encuentran sometidos al clima político del país distribuidor, pudiendo traer problemas en el suministro. La Energía Nuclear, si bien tiene la ventaja de no emitir gases contaminantes a la atmósfera, posee un alto riesgo de contaminación en caso de accidente, además se producen residuos radiactivos que son difíciles de almacenar y su costo de implementación y mantención es muy alto, además existe el riesgo que sea usada para fines bélicos. La energía Hídrica tiene bajos costos de explotación y no produce contaminación, pero los costos económicos, ambientales y sociales en su construcción son altos, necesitando inundar áreas geográficas extensas, debiendo así, trasladar comunidades enteras y causar un impacto ambiental en casos irreversible, además, necesita lluvias constantes y cauces naturales para poder explotarlos, limitando así su capacidad de producción a escala Nacional y mundial.

Por esto resulta imprescindible la investigación e implementación de las energías renovables no convencionales, puesto que la diversificación de la matriz energética evitaría la dependencia de una sola fuente de energía, disminuyendo así el impacto que tienen las crisis mundiales sobre el precio y la disponibilidad de las fuentes de energía.

Muchos trabajos e investigaciones se han realizado a lo largo de los últimos años en lo que corresponde al diseño de concentradores solares del tipo Fresnel, por mencionar algunos de los más relevantes:

### **1.3.1. Concentradores Solares tipo Fresnel**

En 1976 Wally Szulmayer, de Burwood Australia desarrolló un concentrador de radiación solar que consiste de un refractor en forma de pista lineal, de un material transparente con un modelo de ranura prismática con un arreglo para reflejar la radiación incidente solar a través de un reflector que se abra, el cual está cerrado por dicha banda, la pista y el concentrador tienen propiedades ópticas que en combinación concentran la radiación solar de la tarjeta que es maximizada para permitir operaciones estacionarias del concentrador sin seguimiento solar de la orientación estacional [10].

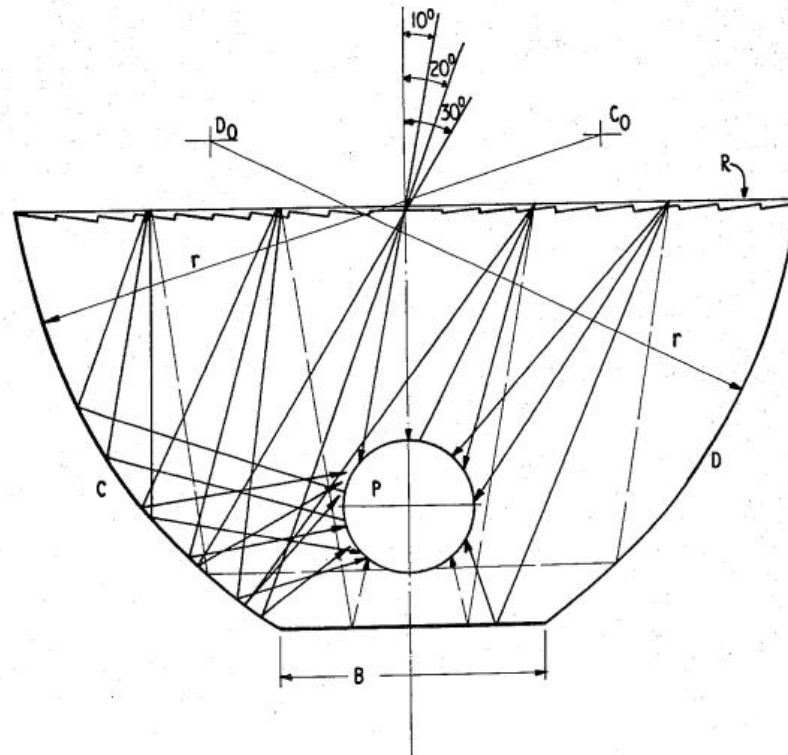


Figura 1. 1 Concentrador de radiación solar de Wally Szulmayer [10].

En 1976 Mark J. O'Neill, de Dallas Texas, desarrolló un lente curvado prismático tipo Fresnel que fue primeramente usado para concentrar la luz del sol en un colector de energía solar. El lente comprende una superficie superior lisa convexa y un arreglo de varios prismas a lo largo de la superficie interna para direccionar la luz que entra a un área en común. Cada uno de los prismas individuales tiene una cara frontal y una trasera unidas por una cara inferior. La cara frontal y trasera del prisma están orientadas justo al ángulo de incidencia de la luz de entrada con la cara frontal que es igual al ángulo de incidencia de la luz que sale con la cara trasera. Además, cada uno de los prismas es acomodado a lo largo de la concavidad como si no obstruyeran la luz que atraviesa a través de algún prisma adyacente. La cara inferior de cada prisma está extendida más allá del sendero de la luz pasando a través del prisma a prevenir pérdidas de luz debido a la obstrucción por la cara inferior. El lente mejorado es usado en combinación con un colector de energía solar que comprende el concentrador mejorado y la energía recibida disponible para convertir la luz del sol incidente en energía de salida útil [11].

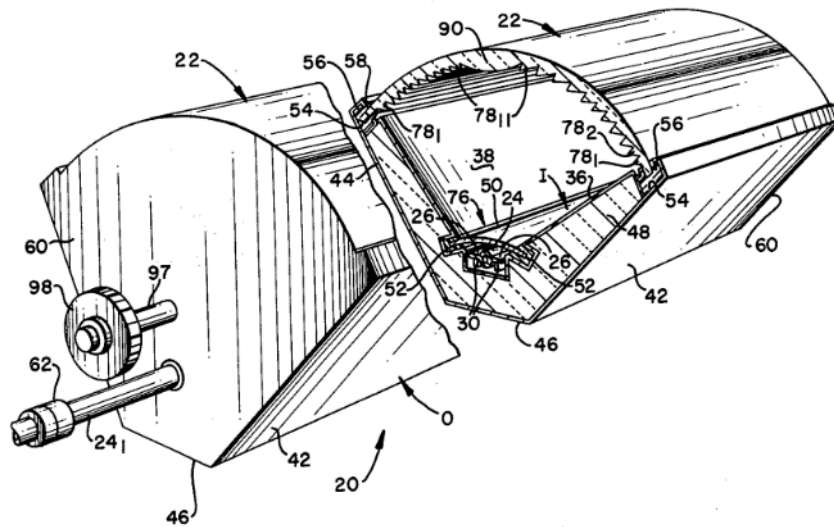


Figura 1. 2. Lente curvado prismático tipo Fresnel de Mark J. O'Neill [11].

En 1981 Andrew R. Jones and Murrysville, Pa, ambos de U.S. desarrollaron un concentrador solar de energía que incluye espejos curvos individuales, tablillas arregladas en un soporte de tipo estructural que conjuntamente forman una superficie sustancial arqueada para concentración de radiación incidente hacia un absorvedor alargado. El reflector y absorvedor están fijados a otro miembro de la estructura, y el ensamble combinado rota recíprocamente por un actuador lineal para el seguimiento de la posición del sol. El absorvedor incluye tubos de transferencia de fluidos encerrados en un vacío sellado por un ensamble de tubos de múltiples cristales [12].

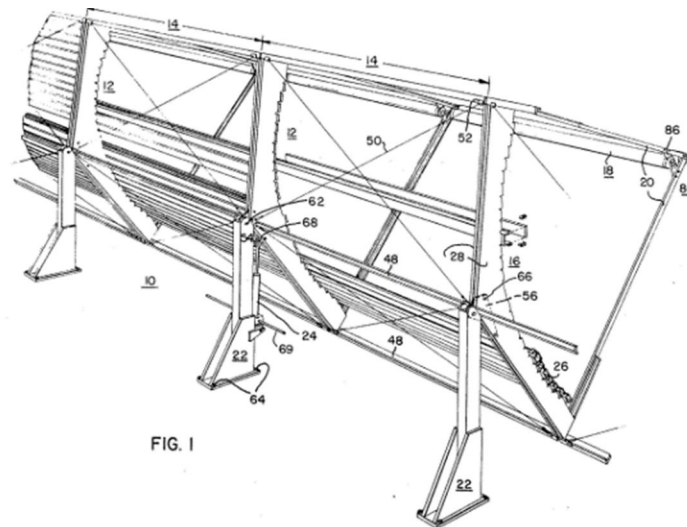


Figura 1. 3 Concentrador solar de Andrew and Murrysville [12],



En 1982 Richard A. Steenblik y Dar-Veig Ho, ambos de Georgia Tech Research Institute en Atlanta, Ga, desarrollaron un reflector Fresnel en espiral. Está formado por un espiral de una placa delgada de un material reflector [13], cortando la placa delgada del material a lo largo del espiral previamente desarrollado. El espiral tiene una superficie determinada y se extiende a lo largo de un brazo de soporte con la finalidad de reflejar la luz hacia un área focal, y además puede tener una longitud focal positiva o negativa.

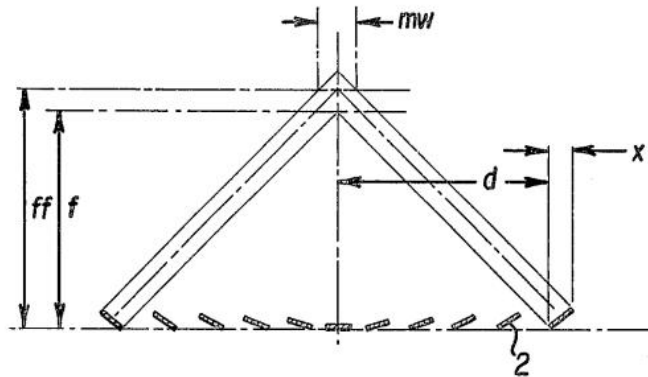


Figura 1. 4 Corte transversal del reflector Fresnel en espiral [13].

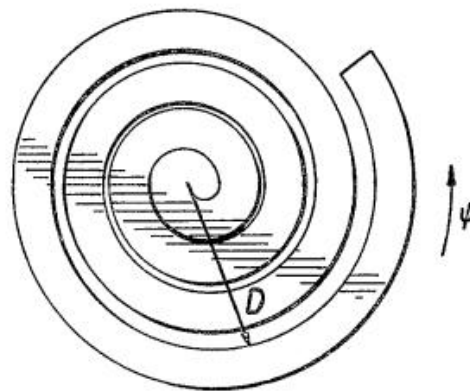


Figura 1. 5 Vista de planta del reflector Fresnel en espiral [13].

En 1996 Eduardo A. Sampayo de Lakewood California, desarrolló un sistema de concentración solar, que comprende varias láminas de metal delgadas con una superficie reflectiva longitudinalmente tensionada de ambos extremos libres, ocasionando movimiento del marco, y soportada por una variedad de barras con movimiento intermedias, espaciadas uniformemente [14].

Cada marco de movimiento tiene respectivamente un seguidor, montado en una flecha horizontal, la cual está anclada a un pedestal de soporte, una variedad de pedestales son anclados a una viga común transversal, formando una estructura común de soporte.

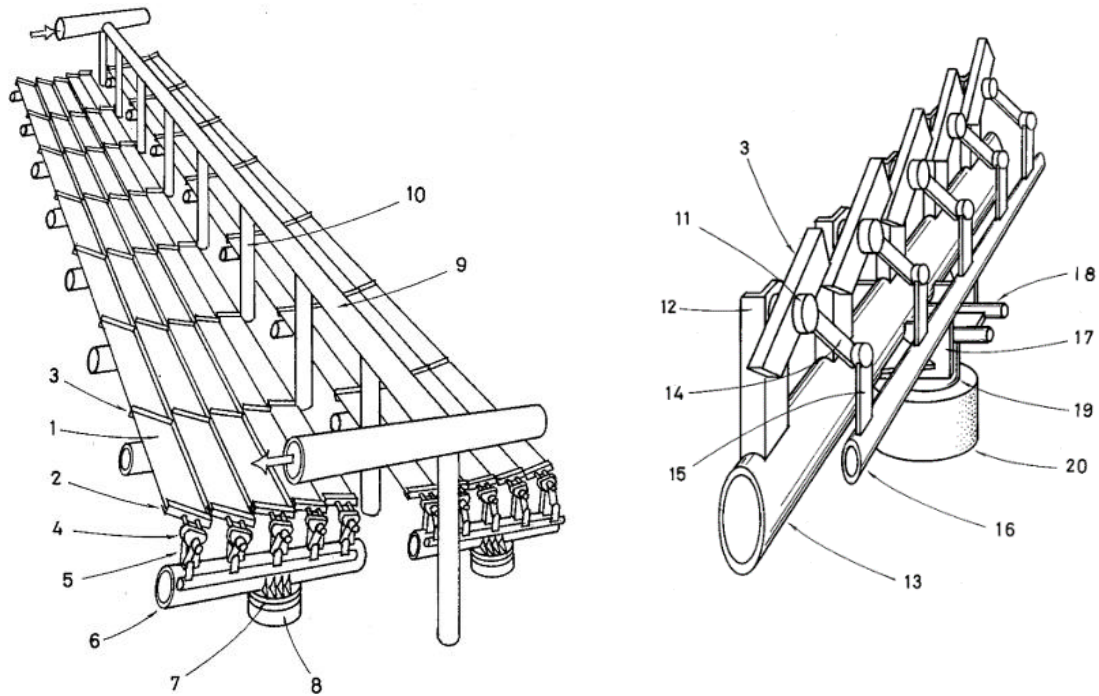


Figura 1. 6 Sistema de concentración solar de Eduardo A. Sampayo [14].

En 2010 Huang Zhong y Li Xiangyang desarrollaron una invención de un seguidor solar tipo Fresnel, el sistema solar de concentración de energía consta de un cuerpo o marco cuadrado, una matriz de lentes Fresnel con su respectivo punto focal, un cristal reflectivo de baja emisividad, un componente fotovoltaico, un acumulador de calor de alta temperatura y un seguidor solar. El punto focal, los lentes Fresnel, el cristal reflectivo de baja emisividad y el componente fotovoltaico tienen un arreglo secuencial de arriba hacia abajo en el orden mencionado, y un arreglo respectivo en la parte superior, la parte media y la parte inferior del cuerpo de la caja. La invención relata una técnica de transmisión de luz solar selectiva, la cual es un método de alta eficiencia fotoeléctrica y fototérmica [15].



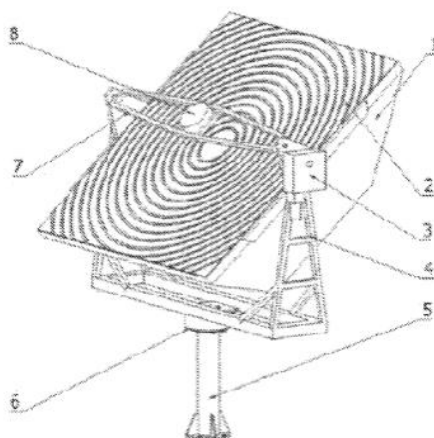


Figura 1. 7 Seguidor solar tipo Fresnel de Huang Zhong y Li Xiangyang [15].

En abril del 2010 Peter Feher de Suwanee, GA U.S. desarrolló un generador de vapor utilizando energía solar térmica, utilizó un reflector Fresnel lineal muy compacto que tiene la capacidad de que sus reflectores giren y se trasladen por medio de movimiento lineal y rotacional independiente para cada uno. El método de posicionamiento y orientación de los reflectores es con la finalidad de que la energía reflejada sea maximizada en cada momento [16].

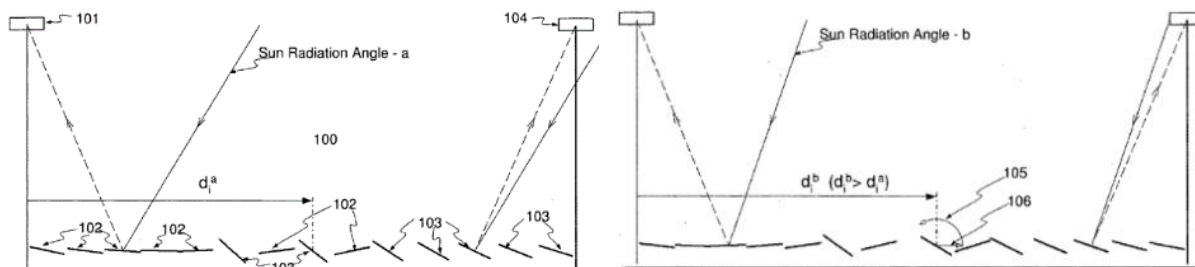


Figura 1. 8 Reflector Fresnel lineal compacto de Peter Feher [16].

En 2011 William James Todd y Baton Rouge, ambos de Los Angeles U.S. desarrollaron captación de radiación solar usando diferentes lentes Fresnel. Ellos se enfocaron principalmente en concentrar la radiación solar antes de cualquier aplicación. Enfocándose directamente en logros típicos usando lentes de transmisión de luz incluyendo lentes convexos y lentes Fresnel, lentes reflexivos como varias estructuras parabólicas reflexivas, o radiación solar reflectiva usando bancos de pequeños espejos. Concluyeron que la tecnología basada en espejos es difícil de manufacturar y mantener mientras que el enfoque tecnológico es limitado principalmente por su construcción de su longitud focal [17].

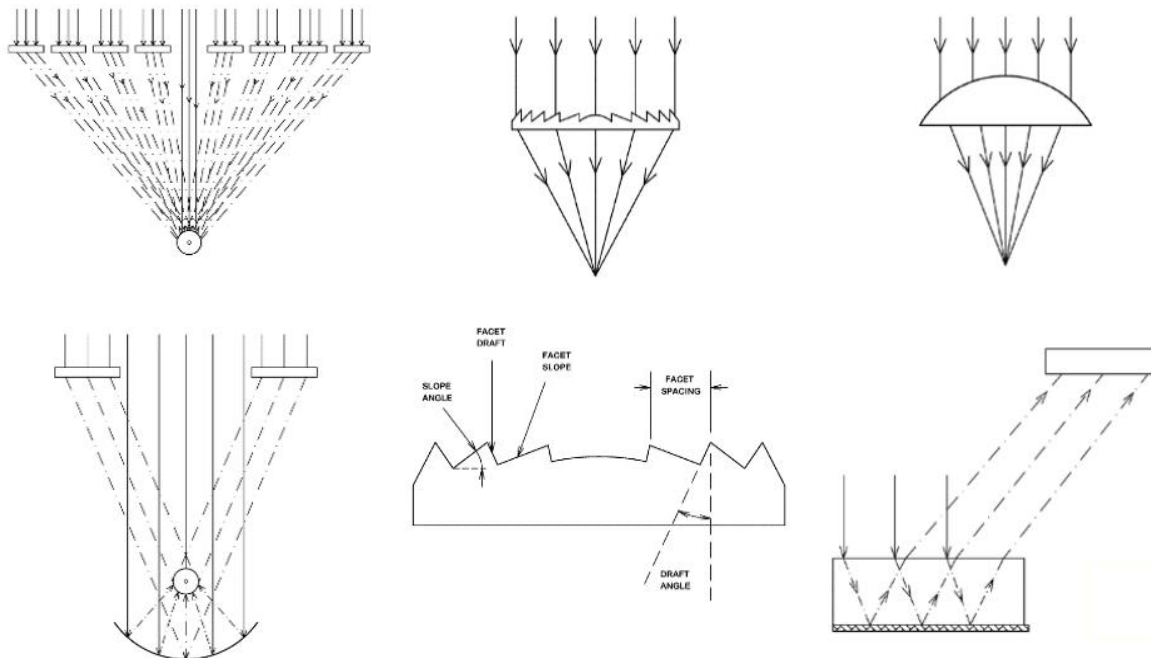


Figura 1. 9. Lentes utilizados por William James Todd y Baton Rouge en sus experimentos [17].

En 2011 E. G. Najla, D. Halima, entre otros colegas realizaron una comparación de dos tecnologías ópticas las cuales mostraron resultados prometedores, el primero es el espejo Fresnel y el segundo son los colectores cilindro-parabólicos. Estas dos tecnologías se basan en la concentración de energía solar lineal. El principal objetivo de este trabajo fue reportar el rendimiento de estas tecnologías por medio de análisis numérico. Se ha realizado un análisis metodológico para diseñar y evaluar la viabilidad técnica para el uso del espejo Fresnel o del cilíndrico-parabólico con un Sistema Solar de Poder de Concentración (CSP). Se analizan también la influencia de las condiciones ambientales y el porcentaje de los diferentes tipos de pérdida de energía. Además se lleva a cabo una aplicación in-situ, en el sur de Argelia (Hassi Rmel), en este sitio, se inaugura antes de 2011 un proyecto de la planta híbrida de gas natural / solar de potencia con tecnología de colectores cilindro-parabólicos [18].

En 2011 Peter Le Lievre de North Sydney U.S. desarrolló una estructura (12) para un colector solar de multi-tubos. Tomó en cuenta un sistema de colector solar que comprende una hilera de estructuras linealmente conjugadas (13). El sistema del colector es un arreglo localizado a un nivel sobre el campo de reflectores (10) y recibe la radiación solar reflejada del reflector en el campo. La estructura del colector (13) comprende una canaleta invertida y se localiza a través de esta un conjunto de tubos absorbentes, que están diseñados para facilitar el intercambio de calor en el fluido. El tubo absorbente está soportado de lado a lado con la canaleta. La razón del diámetro de cada tubo absorbente al diámetro de apertura de la canaleta es del orden



de 0.01:1.00 a 0.10:1.00 y, así el conjunto de tubos absorbedores funciona en el límite efectivo para simular una placa plana absorbedora [19].

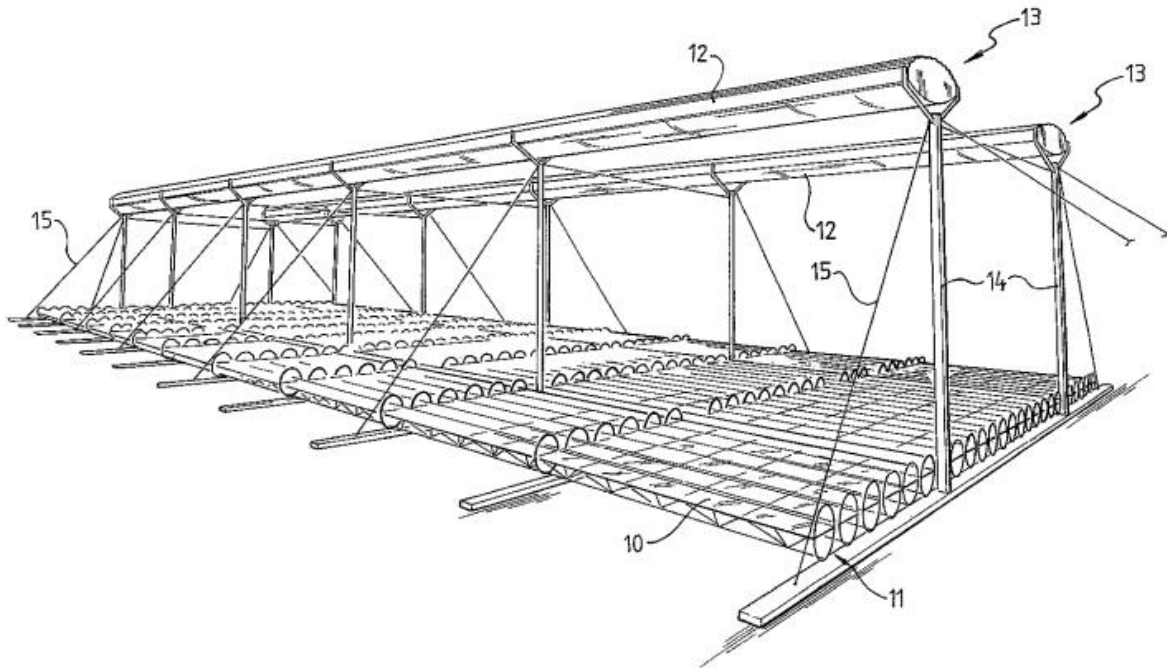


Figura 1. 10. Estructura para un colector solar de multi-tubos por Peter Le Lievre [19].

En 2012 Hoermann Alexander de Menlo Park California y Domenego Bertrand de Cabinet Lavoix, desarrollaron un mecanismo para seguimiento solar. El sistema comprende de un reflector lineal, a lo largo de una dirección longitudinal (L) y cuenta con un soporte de pivote sobre la base en el eje A-A y un sistema de seguimiento (38) para guiar el movimiento. El sistema de seguimiento consta principalmente de un miembro en forma de aro (50) que tiene una superficie de periferia extendida alrededor del eje del punto de pivote, un motor (54), un miembro guía rotatorio acoplado al motor (56), un miembro flexible largo de transmisión (58) anclado en la superficie de la periferia y al miembro conductor de potencia (56).

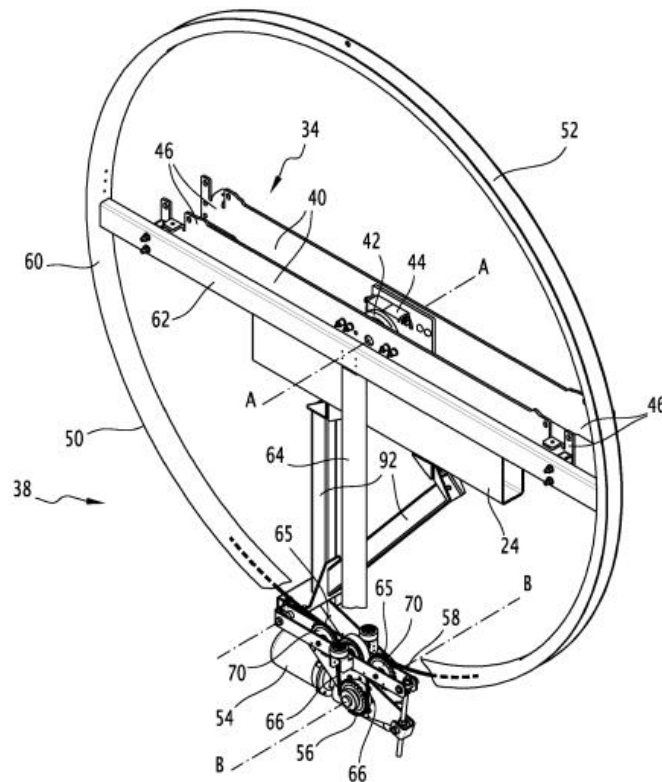


Figura 1. 11 Mecanismo de seguimiento solar de Hoermann Alexander y Ray Forest [20]

Se han realizado muchas investigaciones con el propósito de mejorar y a la vez optimizar el desempeño de los concentradores solares.

E. G. Najla, D. Halima, B. Sofiane y S. Noureddine [6] compararon dos tecnologías ópticas que mostraron resultados prometedores, el primero es el espejo Fresnel y el segundo son los colectores cilindro-parabólicos. Estas dos tecnologías se basan en la concentración de energía solar lineal.

Su objetivo fue reportar el rendimiento de estas tecnologías por medio de análisis numérico. Realizaron un análisis metodológico para diseñar y evaluar la viabilidad técnica para el uso del espejo Fresnel o del cilíndrico-parabólico con un Sistema Solar de Poder de Concentración (CSP). Analizaron también la influencia de las condiciones ambientales y el porcentaje de los diferentes tipos de pérdida de energía. Además se llevó a cabo una aplicación in-situ, en el sur de Argelia (Hassi Rmel), en este sitio, se inaugura antes de 2011 un proyecto de la planta híbrida de gas natural/solar de potencia con tecnología de colectores cilindro-parabólicos [6].



Figura 1. 12 Concentrador cilindro parabólico [6].



Figura 1. 13. Reflector lineal fresnel [6].

En lo que corresponde a la tecnología del concentrador cilíndrico parabólico se requiere hacer un cristal de forma parabólica. Para reducir estos costos, muchos grupos de investigación están trabajando en prototipos de colector Fresnel lineal. La idea es aproximar la forma parabólica al colector por una sucesión de espejos planos. La elección puede ser hecha sacrificando una parte de enfoque parabólico adoptando el sistema de espejos Fresnel. La parábola es reconstruida utilizando espejos planos que serán regulados y enfocados acorde a la posición del sol. Una segunda etapa de reflexión fija, re-direcciona la radiación hacia el tubo receptor. Este enfoque es más simple que utilizando la parábola, fácil de instalar, más barato, pero la eficiencia es un poco más reducida. En la Tabla 1. 1 se muestra la comparación entre las dos tecnologías.



Tabla 1. 1. Comparación concentrador solar parabólico y concentrador lineal Fresnel [6].

	Capacidad [MW]	Concentración	Eficiencia en pico solar [%]	Eficiencia solar Anual [%]	Temperatura [C]	Terreno utilizado por MWh/m2
Parabólico	10-200	70-80	21	17-18	300-550	6-8
Lineal Fresnel	10-200	25-100	20	9-11	250-500	4-6

David R. Mills y Graham L. Morrison [21] evalúan un reflector Fresnel lineal compacto (CLFR por sus siglas en inglés, Compact Linear Fresnel Reflector) para plantas de generación de electricidad a gran escala. El CLFR contará con muchos reflectores lineales paralelos elevados en una torre estructural cercana lo suficientemente a un espejo lineal que tenga la opción de dirigir la radiación solar reflejada a dos absorbedores lineales alternativos en torres separadas (Ver Figura 1. 14). Esta variable adicional en la orientación del reflector provee principalmente mucha más densidad de rayos captados, por la razón de que un espejo no le da sombra al que tiene en su lado debido a que está enfocado en otra dirección. Los diseños deberían usar también óptica aplicada la cual reduciría los requerimientos de altura, la eliminación de los espejos largos y por consecuencia recibidores largos, lo que genera una importante disminución en costos, de preparación de terreno, de estructuras, perdidas de temperatura en líneas de vapor y costo de las líneas de vapor. La mejora de las habilidades del Fresnel enfoca los beneficios de solo un sistema nombrado reflector de tamaño pequeño, bajo costo estructural, de ensamble sencillo, a un sistema de amplia utilidad en plantas de generación de potencia.

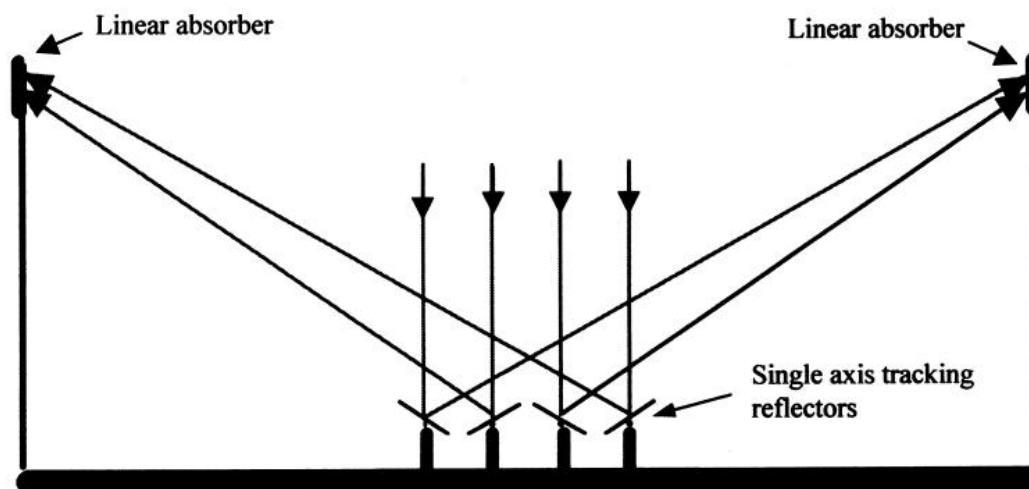


Figura 1. 14. Diagrama que muestra intercalación de espejos sin sombra entre espejos [21].



### 1.3.2 Almacenamiento térmico (PCM)

En lo que se refiere a la aplicación de materiales con cambio de fase a sistemas de concentración solar se tienen muchas investigaciones en la literatura, por mencionar algunas:

A. Hoshi, R. M. David, A. Bittar y T. S. Saitoh, han estado investigado el área de materiales cambio de fase de alto punto de fusión para su uso en nuevas centrales eléctricas de energía solar térmica a gran escala. En su trabajo se identifican materiales candidatos para el almacenamiento de energía térmica de calor latente y sus parámetros de funcionamiento modelados y analizados. Además se discuten las características matemáticas de carga y descarga de estos materiales de almacenamiento. Varios materiales con alto punto de fusión y alta conductividad se espera que sean ventajosos y adecuados para su uso en centrales eléctricas termosolares [22].

Gea et al. [23], construyeron y analizaron un acumulador térmico el cual está constituido por un bloque de hormigón de  $0.20 \text{ m}^3$  ( $0.32 \text{ m} \times 0.32 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ) constituido por una serie de tubos que los atraviesa por medio de los cuales circula el vapor generado por un colector de espejos Fresnel lineal de  $43 \text{ m}^2$ . En la fabricación del hormigón se utilizaron agregados pétreos con la finalidad de obtener una buena respuesta dinámica para la acumulación de calor.



Figura 1. 15 Vista del Concentrador Fresnel con almacenamiento térmico [23]

Se midieron las propiedades térmicas del material y se realizó un estudio experimental de la carga del acumulador midiendo la evolución de las temperaturas en distintos puntos. Se elaboró un modelo teórico y un programa de simulación, cuyos resultados fueron contrastados con los datos experimentales. Además, se confirmó la sencillez constructiva del sistema y un buen comportamiento térmico dinámico para la acumulación del calor. De las conclusiones del citado proyecto surgió el hormigón como uno de los materiales sólidos con características apropiadas para la acumulación térmica, en particular por su bajo costo relativo, su alta resistencia mecánica y la sencillez del manejo de la pre-mezcla. El intercambiador de calor está compuesto por una grilla de 16 tuberías de hierro de 27mm de diámetro exterior y 20.5 mm de diámetro interior, colocados en paralelo, distribuidos en un arreglo cuadrado de 4 por 4 tubos con una separación entre ejes de 80 mm.





Figura 1. 16. Intercambiador de Calor y colado del hormigón [23].

Los agregados pétreos que se usaron para fabricar el hormigón tienen un gran contenido de cuarcita (el agregado fino tiene más de un 95% de este mineral). Esta tiene una alta conductividad y permite obtener un material con elevada difusividad térmica, generando así una mejor respuesta dinámica para la acumulación de calor. El hormigón fue recubierto por una aislamiento térmico compuesto por una capa de 2 pulgadas de lana de vidrio, esperando obtener temperaturas de hasta 200°C.

En otro trabajo encontrado se estudian diferentes materiales de cambio de fase, clasificándolos en diferentes grupos y analizando sus características físicas, químicas, propiedades mecánicas, térmicas, así como su compatibilidad con otros materiales, disponibilidad, precios, durabilidad, etc. [24], También se analizaron sus usos y aplicaciones más interesantes en general. Se menciona las ventajas de la utilización de la más reciente tecnología de almacenamiento térmico por medio de calor latente, como lo son su gran densidad de almacenamiento, eliminando con ello la construcción de grandes instalaciones, su reducción de pérdidas energéticas derivadas de la variación de la temperatura y la posibilidad de selección de la temperatura de trabajo según las necesidades.

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg) es sólo la mitad del de las sales hidratadas. Las sales hidratadas son más baratas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero



tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales.

En la Tabla siguiente se permite conocer las ventajas o inconvenientes de la utilización de materiales orgánicos e inorgánicos:

Tabla 1. 2. Características de los PCM inorgánico [24].

Ventajas	Inconvenientes
Generalmente baratos	El encapsulado y preparación para su uso ocasionan algunos problemas*
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Su uso prolongado necesita de aditivos
Elevada conductividad térmica	Son susceptibles de subenfriamiento
Temperatura de cambio de fase claramente definida	Los aditivos utilizados para evitar una fusión incongruente reducen su capacidad de almacenamiento latente por unidad de volumen en más de un 25%
No inflamables	Potencialmente corrosivos con algunos metales
Reciclables y biodegradables	

Tabla 1. 3. Características de PCM orgánico [24]

Ventajas	Inconvenientes
Fáciles de usar	Calor latente y entalpía más bajos
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
No sufren subenfriamiento	Amplio rango de fusión*
No necesitan agente nucleador para solidificar	Grandes cambios de volumen durante el cambio de fase
No corrosivos	Reacción potencial con hormigón
Reciclables y ecológicamente inocuos	Potencialmente combustibles
	Más caros

En el trabajo de Sharma [25] se resume la investigación y el análisis de la disposición de materiales con cambio de fase para sistemas de almacenamiento de energía térmica para diversas aplicaciones, se analizó el almacenamiento de calor sensible considerando el calor del medio, cambio de temperatura y cantidad de material de almacenamiento. La capacidad de almacenamiento de calor sensible de algunos sólidos y líquidos se muestra en la siguiente Tabla.



Tabla 1. 4. Propiedades de Sólidos y líquidos

Medio	Tipo de fluido	Rango de temp. [°C]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/kg K]
Roca		20	2560	879
Ladrillo		20	1600	840
Concreto		20	1900-2300	880
Agua		0-100	1000	4190
Caloria HT43	Oil	12-260	867	2200
Aceite de motor	Oil	Hasta 160	888	1880
Etanol	Líquido orgánico	Hasta 78	790	2400
Propanol	Líquido orgánico	Hasta 97	800	2500
Butanol	Líquido orgánico	Hasta 118	809	2400
Isotunaol	Líquido orgánico	Hasta 100	808	3000
Isopentanol	Líquido orgánico	Hasta 148	831	2200
Octano	Líquido orgánico	Hasta 126	704	2400

Se concluyó que el agua es el mejor líquido disponible por su bajo costo y su alto calor específico. Sin embargo, por encima de los 100°C se utilizan aceites, sales fundidas y metales líquidos. Para aplicaciones de calefacción se suele utilizar materiales como la roca. Con respecto a materiales empleados para almacenamiento por calor latente, además de tomar en cuenta su deseable termodinámica, se deben considerar cuestiones económicas y su fácil disponibilidad. A continuación se mencionan una serie de propiedades:

- a) Propiedades termodinámicas
  - Temperatura de cambio de fase adecuada
  - Alto calor latente de fusión
  - Buena transferencia de calor
- b) Propiedades físicas
  - Equilibrio de cambio de fase favorable
  - Alta densidad (menor tamaño de recipiente)
  - Cambio de volumen pequeño
  - Baja presión de vapor
- c) Propiedades químicas
  - Estabilidad química a largo plazo
  - Compatibilidad con materiales de construcción
  - No toxicidad
  - No exista peligro de incendio
- d) Económicas
  - Abundante
  - Disponible



➤ Eficacia rentable

Los materiales de cambio de fase muchas veces no cumplen los requerimientos para un almacenamiento térmico adecuado, por lo que es necesario tomar otras medidas como el aditamento de aletas mecánicas con la finalidad de aumentar la conductividad térmica o el uso de un agente de nucleación.

Entre los compuestos orgánicos se encuentran las parafinas, su utilización como PCM en sistemas de almacenamiento se debe a su amplia gama de temperaturas, su costo, son seguras, fiables y no corrosivas, esta sustancia es estable por debajo de los 500°C y baja presión de vapor. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran la baja conductividad térmica y hasta cierto grado inflamable.

Los parámetros de caracterización de los materiales de almacenamiento de energía térmica sensible y latente, y sus influencias en las soluciones de almacenamiento térmico se enumeran en la siguiente Tabla [26]

Tabla 1. 5. Parámetros de caracterización de materiales de Almacenamiento de Energía Térmica sensible y latente [26].

Propiedad	Medida	Influencia
Densidad ( $\rho$ )	Kg/m <sup>3</sup>	
Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	kJ/kg·K	Capacidad de almacenamiento térmico
Calor latente de cambio de fase ( $h$ )	kJ/kg	
Temperatura de cambio de fase	°C	Aplicación térmica
Conductividad térmica ( $\lambda$ )	W/m·°C	Tiempo de carga/descarga
Difusividad térmica	mm <sup>2</sup> /s	Capacidad de estratificación
Efusividad térmica	$W\sqrt{s} / m^2 K$	Habilidad para intercambiar energía térmica con su entorno (Stáhl, 2009)
Coefficiente de expansión térmica	%	Cambio de volumen (Requerimientos para el contenedor)
Fiabilidad térmica <sup>a</sup> (Eficiencia después de ciclos térmicos)	%	Comportamiento después de varios ciclos térmicos
Estabilidad química <sup>a</sup> (después de ciclos térmicos)	Cambios en el espectro	Descomposición del material
Estabilidad térmica <sup>b</sup> (Degradación a alta temperatura)	Pérdida de peso %	Degradación del material con el incremento de temperatura

<sup>a</sup> 5000 ciclos son requeridos para aproximadamente 13-14 años de operación

<sup>b</sup> Comúnmente no importante para aplicaciones de edificación debido a la baja temperatura de operación

Otros requerimientos y restricciones en la selección de materiales de almacenamiento de energía térmica sensible y latente se basan en aspectos de seguridad, impacto medioambiental y compatibilidad, los cuales son definidos en la siguiente Tabla:



Tabla 1. 6. Requerimientos y restricciones en la selección de materiales de Almacenamiento de Energía Térmica [26].

Requerimientos y restricciones	Medida	Razones
Pequeño cambio de volumen	%	Menos requisitos mecánicos del contenedor
No tóxico, no inflamable, no explosivo y no reactivo	-	Seguridad
Reciclable	%	Impacto medioambiental
No contaminante		
Baja huella ambiental	CO <sub>2</sub> -eq/kg	
No corrosivo	-	Compatibilidad con otros materiales
Disponibilidad y bajo coste	€/m <sup>3</sup> o €/kg	Competitividad y coste rentable
Fusión congruente No sub-enfriamiento <sup>a</sup>	ΔT <sup>a</sup> (°C)	La fusión y la solidificación se producen en un estrecho intervalo de temperatura
No segregación o separación de fases <sup>b</sup>	-	Asegurar una larga vida útil

<sup>a</sup> El sub-enfriamiento se refiere a un líquido existente a una temperatura por debajo de su temperatura de fusión normal. Si no se alcanza esta temperatura, el PCM no se solidificará en absoluto y el calor almacenado no será liberado

<sup>b</sup> La segregación o separación de fases se refiere a la conversión de un sistema de una sola fase en un sistema de múltiples fases (separación de componentes de una solución).

En la actualidad, numerosos materiales de cambio de fase están disponibles en el mercado para el rango de temperatura entre -10 y +120°C [26]. La siguiente Figura ilustra la capacidad volumétrica de calor latente y la temperatura de fusión de 250 materiales disponibles, pertenecientes a las principales empresas existentes (Tabla 6). Ellos se basan principalmente en parafinas, sales hidratadas y aleaciones eutécticas. El almacenamiento sensible en agua es también ilustrado como valor de referencia.

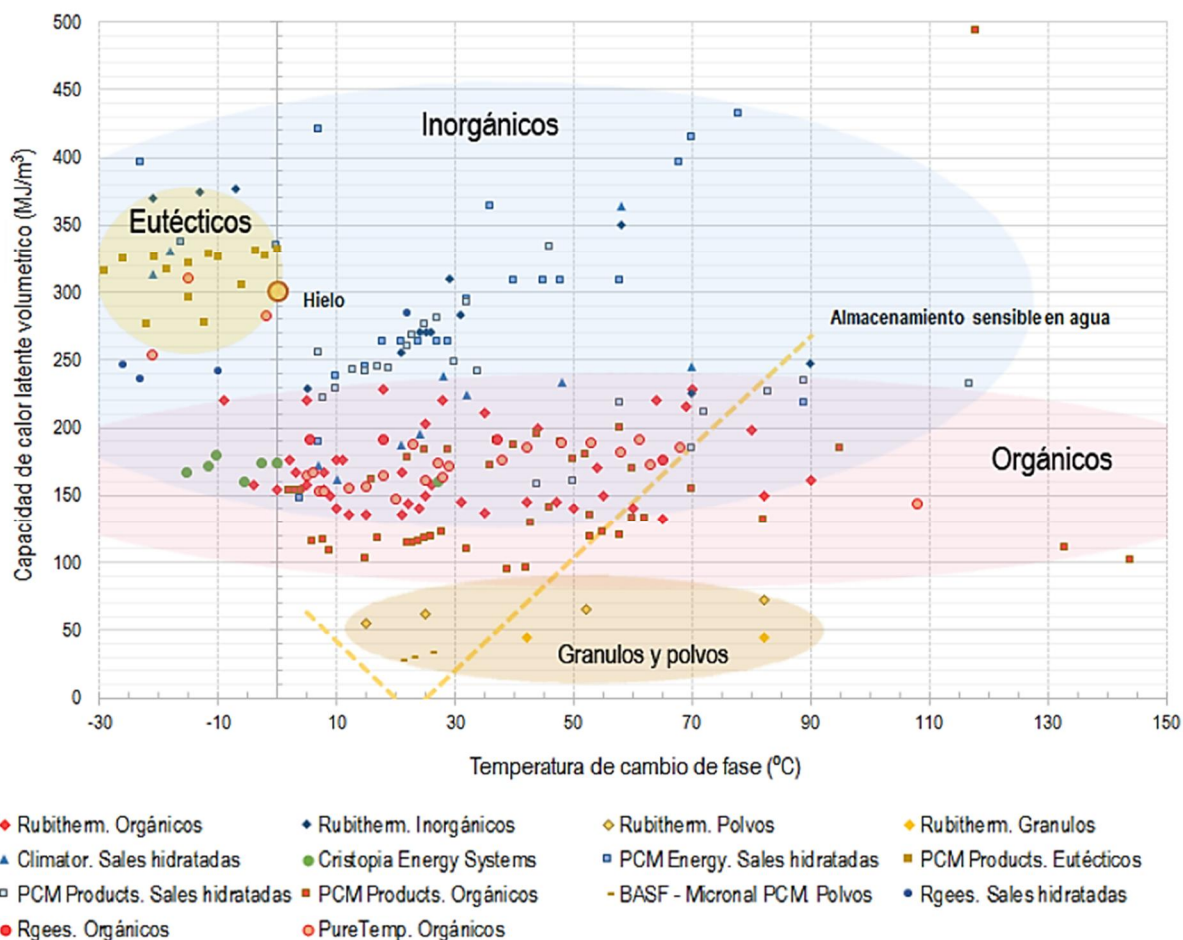


Figura 1. 17. Materiales de cambio de fase comerciales disponibles [26].

Tabla 1. 7. Principales compañías proveedoras de materiales de cambio de fase en el mundo [26].

Empresa	País de origen	Materiales disponibles
Rubitherm GmbH	Alemania	Orgánicos, inorgánicos, polvos y gránulos
Climator	Suecia	Sales hidratadas
Cristopia Energy Systems	India y Francia	-
PCM Energy	India	Sales hidratadas
PCM Products Ltd	Reino Unido	Eutéticos, sales hidratadas y orgánicos
BASF - Micronal PCM	Alemania	Polvos
RGees. savENRG™	EEUU	Orgánicos e inorgánicos
Entropy solutions. PureTemp	EEUU	Orgánicos

Es muy importante la forma física en que se introducirá el PCM (Phase Change Material por sus siglas en inglés) al sistema, porque de esto depende la eficiencia de su comportamiento. La encapsulación de los PCM ha desarrollado interés en un gran número de investigaciones. Lane [9] discutió ventajas y desventajas de diferentes geometrías de encapsulación de PCM con diferentes materiales y su compatibilidad.



En este proyecto se pretende Diseñar un sistema de captación de energía solar térmica de alta concentración tipo “FRESNEL”, integrado con un sub-sistema con tecnología de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase (SATCF), que permitirá aumentar la disponibilidad de la energía térmica para múltiples actividades que requieran calor a temperaturas en un rango de 80-250 °C; el diseño conceptual del sistema se denomina **SOLAR FRESNEL-SATCF**, contempla la implementación de un sistema de alta concentración solar utilizando la tecnología Fresnel [6], y un sistema de almacenamiento térmico para prolongar el tiempo de trabajo del equipo. El arreglo tipo: FRESNEL-SATCF será un sistema compacto, ligero y sobre todo con precio accesible al público.



# **CAPÍTULO II**

# **DISEÑO**

# **CONCEPTUAL**

# **DEL SOLAR**

# **FRESNEL-SATCF.**





## Introducción.

El diseño de ingeniería de un producto es el conjunto de estudios, trabajos y planeación, que suele realizar un equipo multidisciplinar, que sirve para llevar a cabo la realización de un producto desde su concepción y diseño de detalle, su fabricación, hasta el fin de su vida útil, su desmontaje y reciclaje. Se enfoca principalmente en las funciones que ha de satisfacer dicho objeto, pero también tiene en cuenta su compleja interrelación con los usuarios, sus deseos e incluso al placer emocional que pueden experimentar.

El “diseño conceptual” se refiere a los productos novedosos que las grandes marcas comerciales presentan antes de producirlos en serie. Solo algunos de los “diseños conceptuales” se llevan a fabricación en grandes series, pero en su concepción y realización se ensayan métodos, técnicas y formas que sirven para adelantar tecnologías y para captar la respuesta del mercado. Pero el “diseño conceptual de ingeniería de producto” se refiere a la parte más creativa en el desarrollo de producto. Tiene que ver con la ingeniería del objeto, con las funciones, los elementos que lo conforman y sus características.

Siempre ha existido una necesidad por desarrollar nuevas cosas, con excelente relación costo-efectivo y una alta calidad de los productos. Sin embargo los clientes juzgan un producto principalmente por dos razones: 1) como trabaja o funciona y 2) por la estética del mismo (como luce).

El costo de diseño es usualmente solo una pequeña parte del costo de manufactura del producto, y principalmente toma en cuenta los siguientes casos:

- La calidad del diseño tiene un gran efecto en el costo de manufactura  
Si el diseño es de buena calidad es posible simplificar el proceso de producción, lograr ensambles más sencillos y disminuir el número de piezas.
- Decisiones hechas durante el proceso de diseño tienen un gran efecto en el costo final del producto.  
Cada decisión tomada durante el proceso de diseño se refleja alarmantemente en el costo de producción del producto, por ejemplo una simple soldadura en un ensamble que no tenga ninguna utilidad y que por accidente permanezca en el producto generará costos excesivos del mismo porque esto influye directamente en costo de mano de obra, costo de consumibles (soldadura), tiempo de producción, costo de electricidad, estética, etc.
- El proceso de diseño afecta el tiempo que toma producir un nuevo producto.



Mientras más sencillas son las piezas y ensambles que componen un producto, su tiempo de producción es más corto, por tal motivo es conveniente desarrollar un proceso de diseño bien estructurado y completo que permita obtener diseños con las funciones requeridas con el menor número de piezas fácilmente manufacturables.

La finalidad del diseño mecánico es descomponer el problema general en pequeños sub-problemas de diseño que faciliten su manejo y culmina con una revisión del diseño. La meta es entender el problema y sentar las bases para el resto del proyecto de diseño.

La competencia global genera la necesidad de desarrollar nuevos productos a un ritmo rápido y acelerado, lo que provoca que cada vez se desarrollen mejores procesos de diseño (diseño mecánico) y el interés de las empresas por la aplicación de este tipo de análisis para ser ampliamente competentes.

## 2.1 Base teórica aplicada de diseño conceptual

El diseño conceptual de ingeniería de producto se refiere a la primera fase de un proyecto de producto. En esta fase se requiere la aportación de nuevas ideas para obtener nuevas funciones o prestaciones, por tanto es la fase creativa de todo el proceso de ingeniería de innovación de producto. La calidad de las ideas dadas en la fase creativa, hará posible la calidad innovativa del producto final.

En estos diseños conceptuales de ingeniería, la propia experiencia del producto que tenga el equipo de diseño tiene mucho que ver con lo que puedan idear. El ingeniero diseñador debe apoyarse en su experiencia y también, en obtener información variada, especialmente en captar los deseos de los futuros usuarios del producto. Algunas técnicas que se pueden usar para desarrollar las ideas más plenamente son las técnicas de creatividad [27], por la teoría de resolución de problemas inventivos (TRIZ), por la técnica de SCAMPER, y por la captación de deseos u opiniones de los usuarios, o diseño centrado en los usuarios.

### 2.1.1 Técnicas de creatividad

Se conocen muchas definiciones de creatividad. Gardner [28] sugiere que la creatividad es “la generación imaginativa de nuevas ideas”, Majaro [29] define la creatividad como “el proceso mental que nos ayuda a generar nuevas ideas”, por su parte Escorsa y Valls [30] proponen que una solución creativa puede integrar sencillamente conocimientos existentes de manera diversa. Por otro lado, hay un grupo de enunciados que definen la **creatividad como la oposición a la inteligencia convergente o capacidad de razonar lógicamente** [31]. En cualquier caso la creatividad implica la generación de nuevas ideas o la combinación de elementos conocidos, con el objetivo de proporcionar soluciones valiosas en la resolución de un



problema. Entonces implica aspectos psicológicos como las emociones o la propia inteligencia. Por lo tanto, no sólo la educación la experiencia individuales o el conocimiento tienen un efecto sobre la creatividad de una persona, sino que también se ha de tener en cuenta sus sensaciones, su vida personal o incluso su estado de humor.

A continuación se mencionan algunas técnicas para desarrollar la creatividad.

### **2.1.1.1 SCAMPER**

SCAMPER es una técnica para un pensamiento creativo que consiste en un check-list (lista de verificación) muy útil para la creación de nuevas ideas sobre mejoras o nuevos productos/servicios, que da soporte a brainstorming (Lluvia de ideas) o reflexiones para no dejarse conceptos que pueden ser interesantes. Esta técnica de creatividad fue elaborada por Bob Eberle a mediados del siglo XX.

El ejercicio mental de pensar en los cambios que te sugiere esta lista, puede dar lugar a nuevas ideas.

- **SUSTITUIR** (Substitute).
- **COMBINAR** (Combine). Thinking
- **ADAPTAR** (Adapt).
- **MODIFICAR** (Modify), **MAGNIFICAR** (Magnify).
- **PONERLO EN OTROS USOS** (Put to other uses).
- **ELIMINAR** (Eliminate), **Minimizar** (Minify).
- **REORDENAR** (Rearrange), **Invertir** (Reverse).

### **2.1.1.2 TRIZ**

TRIZ es un método sistemático para incrementar la creatividad y la innovación, basado en el estudio de los modelos de evolución de patentes y en otros tipos de soluciones a problemas. TRIZ es una abreviación internacional Rusa [32] “Teorija Resenija Isobretatelkih Zadac” que puede ser traducida como Teoría para resolver Problemas de Inventiva.

La mayoría de las metodologías existentes utilizan una alteración del “razonamiento habitual” por un procedimiento propio. Para la generación de ideas, no se requiere ser un experto en el tema sobre el que se razona, aunque en el proceso de resolución de un problema hay fases de análisis de las ideas aportadas y de construcción de la solución, que deben ser realizadas por especialistas.



Este amplio grupo de metodologías y técnicas, que podemos calificar de basadas en la psicología, prescinde voluntariamente de conocimientos previos.

TRIZ es la primer metodología que se ha definido como “basada en el conocimiento”, pero no es la única, ya que a partir de ella se han construido otras, ejemplos de ellas son SIT, ASIT y USIT [33].

### **Condiciones del TRIZ**

Geinrich Altshuller, creador del TRIZ, construyó una teoría con las siguientes condiciones:

1. Ser un procedimiento sistemático paso a paso.
2. Ser una guía a través de amplios espacios de solución para dirigir los pasos hacia la solución ideal.
3. Ser repetible y confiable y no dependiente de las herramientas psicológicas.
4. Permitir el acceso al cuerpo del conocimiento inventivo.
5. Permitir agregar elementos al cuerpo de conocimiento inventivo.
6. Ser lo suficientemente amigable para los diseñadores siguiendo la aproximación general para la resolución de los problemas inventivos.

### **Bases de la metodología TRIZ**

La esencia del TRIZ es el “principio de abstracción”, que se representa de forma muy esquemática y con un ejemplo matemático sencillo en la Figura 1.

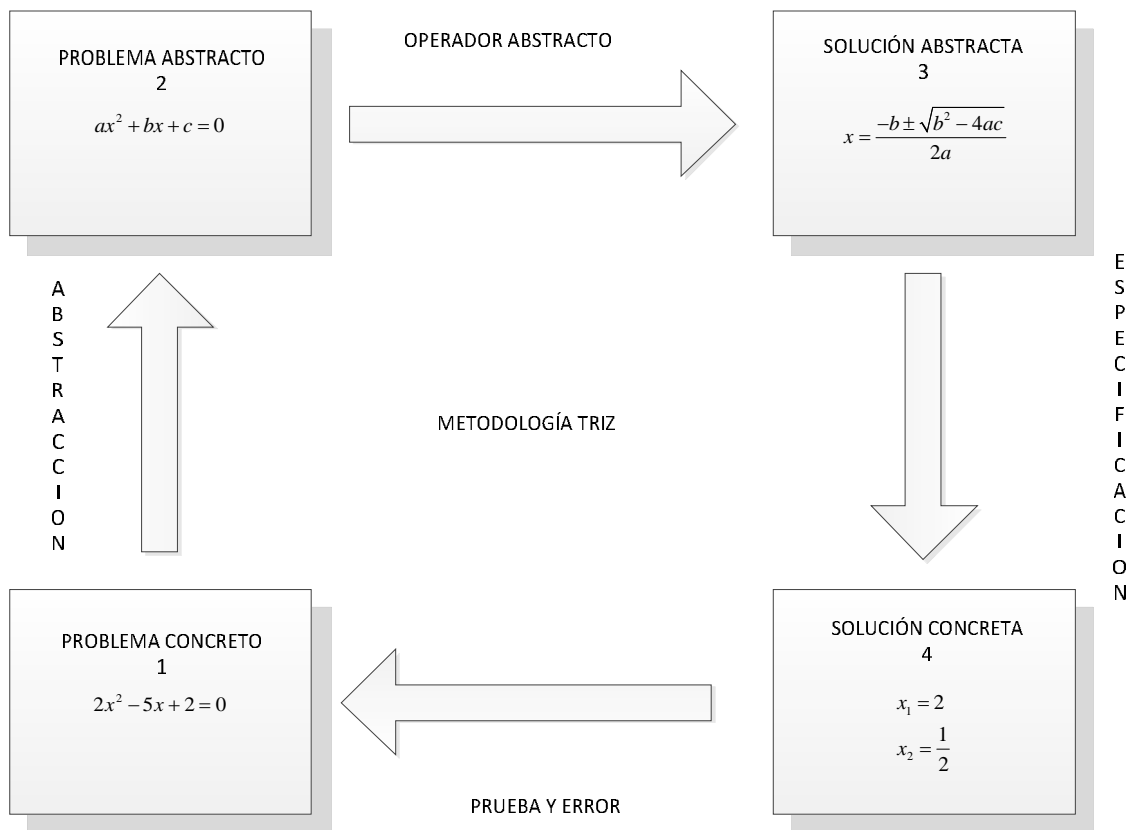


Figura 2. 1 Diagrama representativo de la base de la metodología TRIZ [32].

Donde:

1. Problema concreto. Se debe plantear en un problema genérico, y para ello se deben utilizar los 39 parámetros técnicos de TRIZ (Ver Tabla 2. 1)
2. Problema abstracto. En esta etapa se utiliza una matriz de contradicciones, cuya función es mostrar cómo otros problemas generales análogos al que se plantea han sido resueltos.
3. Solución abstracta. Se determina con la ayuda de algunos de los 40 principios inventivos TRIZ (Ver Tabla 2. 2).
4. Solución concreta. Finalmente, al usar estas soluciones generales, se plantea una posible solución para el problema específico planteado. Un método práctico para encontrar las soluciones es utilizar la matriz de contradicciones (Ver Tabla 2. 3).



Tabla 2. 1. Parámetros técnicos de TRIZ [32].

Parámetros técnicos de TRIZ			
1	Peso de un objeto	21	Potencia
2	Peso de un objeto estacionario	22	Pérdida de energía
3	Longitud de un objeto móvil	23	Pérdida de materia
4	Longitud de un objeto estacionario	24	Pérdida de Información
5	Área de un objeto móvil	25	Pérdida de tiempo
6	Área de un objeto estacionario	26	Cantidad de sustancia o materia
7	Volumen de un objeto móvil	27	Confiabilidad
8	Volumen de un objeto estacionario	28	Precisión en la medida
9	Velocidad	29	Precisión en la manufactura
10	Fuerza	30	Daño externo que afecta a un objeto
11	Tensión, Presión	31	Efectos de danos colaterales
12	Forma	32	Manufacturabilidad o facilidad para la fabricación
13	Estabilidad del objeto	33	Conveniencia de uso
14	Resistencia	34	Facilidad en reparación
15	Durabilidad de un objeto móvil	35	Adaptabilidad
16	Durabilidad de un objeto estacionario	36	Complejidad del dispositivo u objeto
17	Temperatura	37	Complejidad de control
18	Brillantez	38	Nivel de automatización
19	Energía gastada por el objeto móvil	39	Productividad
20	Energía gastada por el objeto estacionario		



Tabla 2. 2.Principios inventivos de TRIZ

Principios inventivos de TRIZ			
1	Segmentación	21	Pasar rápidamente
2	Extracción	22	Convertir el daño en beneficio
3	Calidad local	23	Retroalimentación
4	Asimetría	24	Mediador
5	Combinación	25	Autoservicio
6	Universalidad	26	Copiar
7	Anidación	27	Vida corta barata
8	Contrapeso	28	Reemplazar un sistema mecánico
9	Acción contraria anticipada	29	Uso de sistemas hidráulicos o neumáticos
10	Acción anticipada	30	Membrana flexibles o películas delgadas
11	Precaución previa	31	Uso de materiales porosos
12	Equipotencialidad	32	Cambios de color
13	Inversión	33	Homogeneidad
14	Esfericidad	34	Rechazo y regeneración de partes
15	Dinamicidad	35	Transformación de estados químicos y físicos
16	Acciones parciales o excesivas	36	Transiciones de fase
17	Mover a una nueva dimensión	37	Expansión térmica
18	Vibraciones mecánicas	38	Oxidación acelerada
19	Acción Periódica	39	Ambiente inerte
20	Continuidad de la acción útil	40	Materiales compuestos

### Matriz de contradicciones

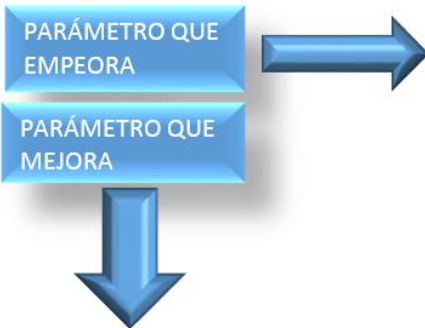
La Matriz de Contradicciones es parte de la metodología TRIZ que permite determinar los principios de inventiva cuando se identifica una contradicción técnica en el problema.

Geinrich Altshuller no buscó reproducir la mente del Innovador sino más bien sintetizar una metodología que al seguirla cualquier persona es capaz de llegar a la misma solución que hubiera llegado el Inventor. TRIZ simplifica su estudio de patentes en 40 principios de inventiva y se llega a ellos por medio de 39 parámetros técnicos [34]. En cualquier invención, solución o innovación se han aplicado dos o tres de estos principios.

Identificado el problema se utilizan a modo de prisma los 39 parámetros técnicos los que nos van a indicar que dimensiones están vinculados con el problema, estos parámetros técnicos permiten desarrollar una matriz en función al principio de las contradicciones, así en la intersección encontramos uno o más de los 40 principios de Altshuller que permitirán el acceso a la solución del problema.



Tabla 2. 3. Matriz de contradicciones

					
	1. Peso de un objeto		21. Potencia		39. Capacidad/Productividad
1. Peso de un objeto Movil	+		12, 36, 18, 31		35, 3, 24, 37
		+			
14. Resistencia	1, 8, 40, 15		10, 26, 28, 35		29, 35, 10, 14
				+	
39. Capacidad/Productividad	35, 26, 24, 37		35, 20, 10		-

## 2.2 Metodología de diseño conceptual

El diseño conceptual es la fase inicial del desarrollo de un producto. Esta es considerada como la etapa donde la creatividad juega un papel determinante y, dados los objetivos de esta investigación, conviene precisar algunos elementos que ayuden a comprenderla mejor.

En primer lugar es necesario decir que hay un acuerdo general en los investigadores que el diseño conceptual es una fase crucial en el desarrollo de productos, en particular cuando se trata de diseñar productos innovadores o cuando se quiere generar un diseño completamente nuevo de un producto ya existente. El impacto de las decisiones tomadas en esta fase son determinantes para el resto del proceso, hasta el punto que un pobre concepto de un producto es prácticamente imposible de mejorar en etapas posteriores.

Desde el punto de vista metodológico, se entiende como la fase más temprana de desarrollo de un producto en tal que se obtienen soluciones abstractas, generalmente incompletas, pero que se espera que satisfagan los requerimientos y especificaciones iniciales del problema. Su objeto, por lo tanto, es explorar las mejores alternativas para obtener uno o más conceptos de diseño que puedan utilizarse como base para desarrollar el producto en las subsiguientes fases.





El término diseño conceptual hace referencia a la etapa donde se conciben o donde nacen las ideas del sistema o elemento que solucionará un problema identificado.

En el diseño conceptual se inicia con las especificaciones que circunscriben al producto deseado, los requerimientos técnicos, las condiciones de realización u las restricciones. Todo ello se transforma en ideas funcionales, primeros principios físicos y de trabajo, organizaciones estructurales y representación de las formas materiales para contrastarlas contra los requerimientos y efectuar pre-selecciones.

### 2.2.1 Identificación del problema

Para identificar el problema Se analizan las siguientes preguntas.

1. ¿Qué es un concentrador solar Fresnel-SATCF?

El sistema Fresnel es una tecnología que está clasificada dentro de los llamados “concentradores solares” es un equipo que direcciona los rayos solares en un sistema de captación solar, mediante un sistema de superficies reflectoras distribuidas en áreas muy grandes comparadas con el área de captación.

La energía solar térmica captada durante el día por el sub-sistema SOLAR FRESNEL, puede ser también almacenada en sales fundidas, materiales cerámicos o en mezclas de sales mediante, todos estos materiales cambio de fase (PCM'S).

La unión de las dos tecnologías anteriores representa un proyecto ingeniosos y con buenas bases para ser un sistema con alto valor agregado y desempeño debido a que la producción de energía térmica será continua y aprovechada justo en el momento en que sea requerida gracias al sistema SATCF, lo que los convierte en un sistema funcional que se reflejará en incrementos en la eficiencia de los procesos donde sean empleados estos sistemas.

2. ¿Qué se busca del diseño del concentrador solar Fresnel-SATCF?

- Aumento de temperatura de un fluido
- Almacenamiento de energía térmica
- Control de flujo de fluido y de temperatura
- Autosustentable
- Utilidad de fuentes alternas de energía
- Resistencia a condiciones ambientales a la intemperie
- Económico
- Ligero
- Ergonómico
- No tóxico



- Pequeño.
- Desmontable
- Reutilizable
- Manufactura sencilla
- Pequeño número de partes o piezas
- Que alcance rangos de temperatura de 80 °C a 250 °C en su fluido de trabajo.

Una vez que se tiene el total de funciones que debe realizar y con las que debe contar el sistema se realiza una descomposición funcional del modelo sin tomar en cuenta la forma del mismo.

En la descomposición funcional, las funciones del sistema son descritas como la transformación entre un estado inicial y el estado deseado. El enfoque de generación de ideas mediante una descomposición funcional describe el problema de diseño en términos de flujo de energía, material e información.

La función es lo que debe de hacer el objeto desarrollado, los pasos fundamentales para plantear claramente las especificaciones son definir las funciones globales o primarias, las cuales son el trabajo o procedimiento para lo cual es diseñado a cumplir; así como las subfunciones necesarias para realizar las funciones primarias o globales.

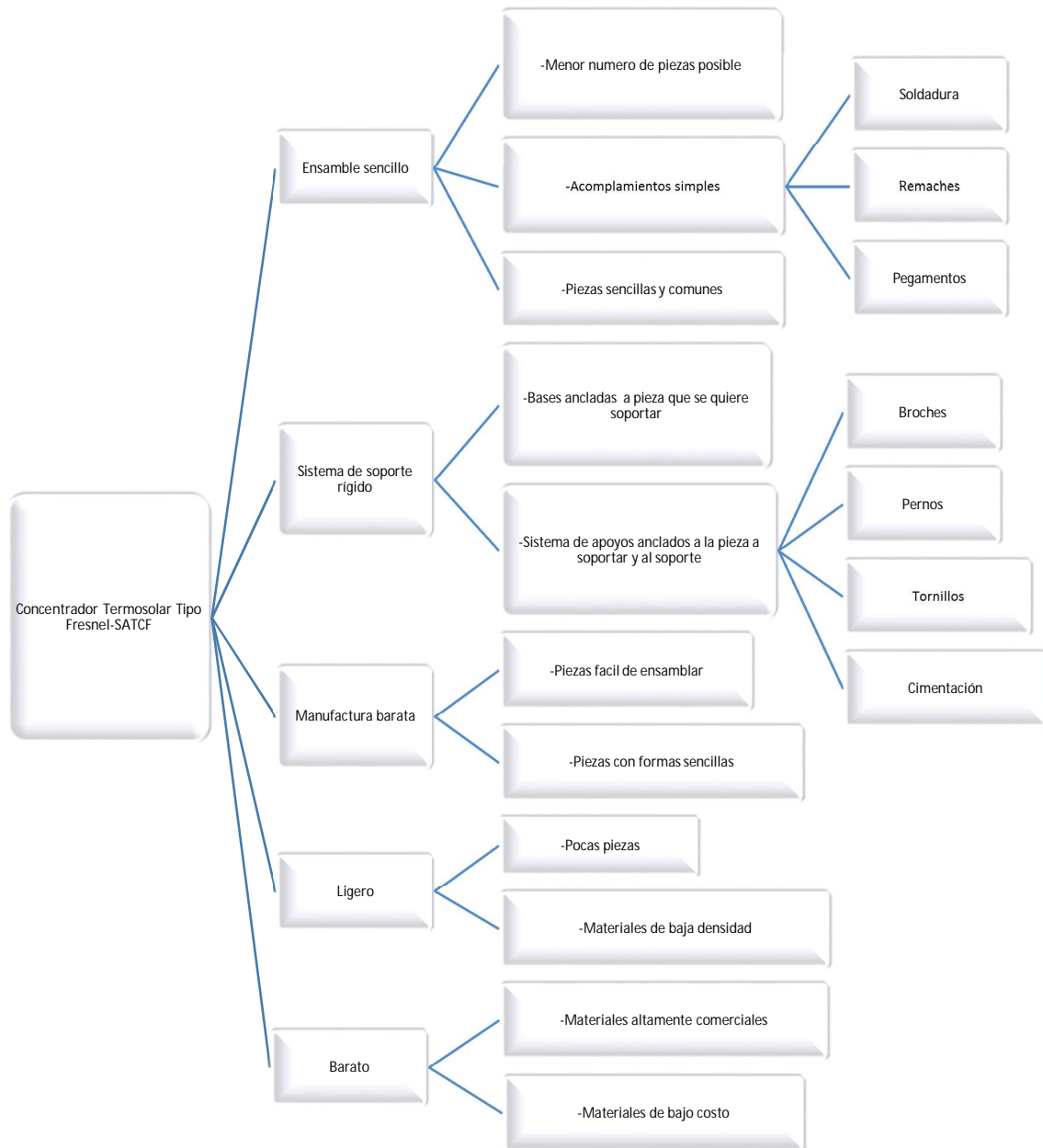


Figura 2. 2 Descomposición funcional del Solar Fresnel-SATCF



### 2.2.2 Ideas preliminares

Se realizaron varios modelos preliminares antes de llegar a las primeras propuestas

La Figura 2. 3 muestra un diseño que consta de un concentrador con un espejo parabólico y 4 espejos planos, la imagen del lado izquierdo de la figura muestra la proyección de las superficies reflejantes y la trayectoria que siguen los rayos del sol al incidir sobre dichas superficies (direcciona los rayos solares en un tubo superior que forma una línea de concentración), éste modelo se utiliza para optimizar espacio, y es muy simple en función de que el concentrador es una sola pieza que gira siguiendo la dirección de incidencia perpendicular de los rayos del sol.

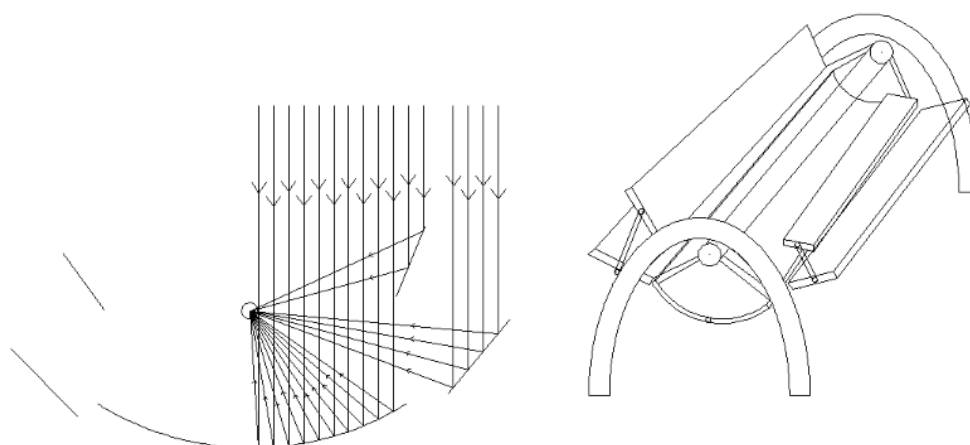


Figura 2. 3 Primer modelo

La Figura 2. 4 muestra un concentrador plano del tipo espiral, consta de una lámina reflejante inclinada un cierto ángulo que permite direccional los rayos del sol incidentes hacia una superficie focal, este equipo concentra la energía solar en un área focal [15] que es parte de una sola pieza unida con las superficies reflejantes y que se mueve siguiendo la posición del sol.

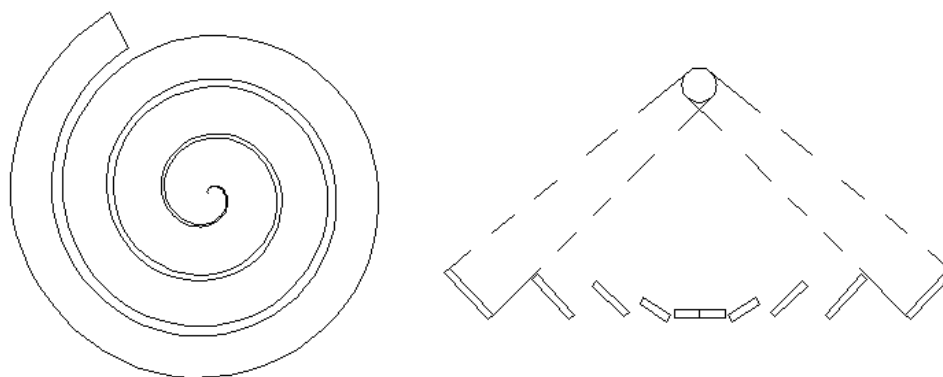


Figura 2. 4 Segundo modelo



La Figura 2. 5 muestra un concentrador solar que consta de unas superficies reflejantes que direccionan la energía solar a una línea de concentración (un tubo) que se encuentra abajo de las superficies reflejantes [13]. En este modelo las láminas reflejantes son independientes al área de captación, de esta manera solo las lámina se mueven (giran sobre un eje longitudinal) para direccionar los rayos solares a un captador fijo.

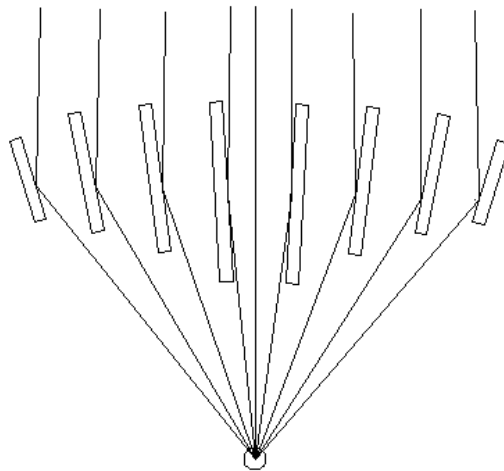


Figura 2. 5 Tercer modelo

La Figura 2. 6 muestra un concentrador lineal con superficies reflejantes parabólicas. Este tipo de equipos pueden alcanzar mayor concentración de calor con una menor cantidad de área disponible comparado con uno del mismo tipo con superficies reflejantes planas [18]. En este modelo nuevamente el área de captación es fija, mientras que las superficies reflejantes giran sobre un eje longitudinal para direccionar los rayos solares incidentes hacia el área de concentración.

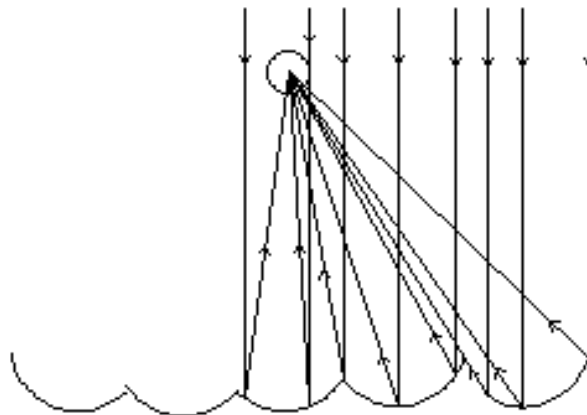


Figura 2. 6 Cuarto modelo



La Figura 2. 7 muestra un concentrador lineal con una combinación de superficies reflejantes, al centro tiene una superficie parabólica y en los extremos superficies planas. La finalidad de este modelo es generar un prototipo con superficies reflejantes más sencillas (planas) sin perder superficie de captación.

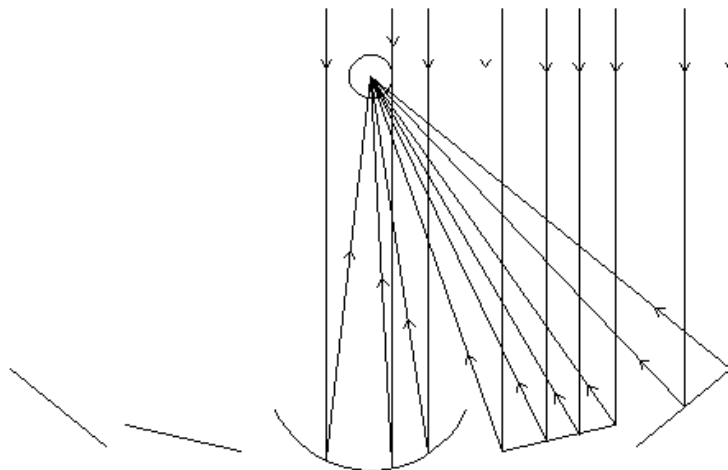


Figura 2. 7 Quinto modelo

La Figura 2. 8 muestra un bosquejo de una sección de un concentrador lineal (en la parte superior), el concentrador lineal a su vez está unido a toda la estructura del equipo, la cual tiene forma de círculo incompleto y se mueve en una sola pieza para seguir la dirección de los rayos del sol que inciden en los espejos planos ubicados en la parte inferior de la estructura y que a su vez se reflejan al concentrador lineal. Al lado derecho de la figura se observa una representación esquemática de la incidencia y reflexión de los rayos solares, los cuales se concentran en el concentrador superior.

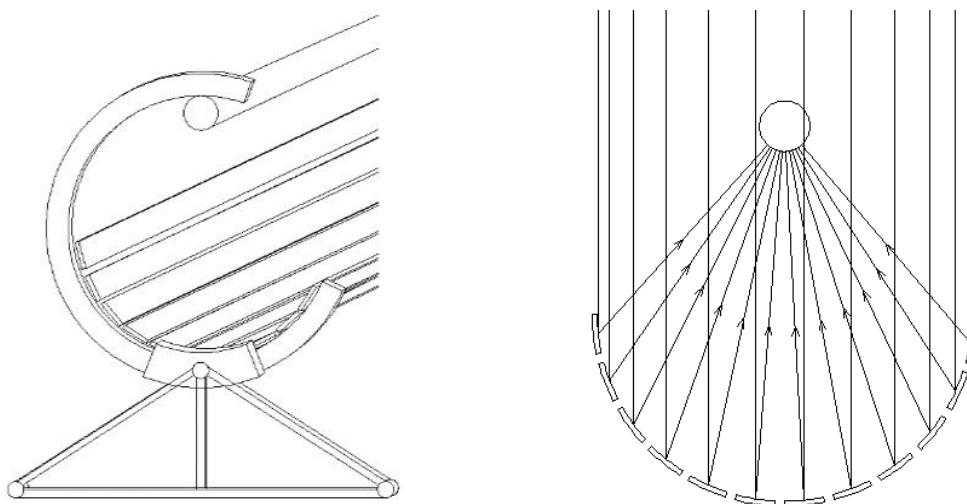


Figura 2. 8 Sexto modelo



La Figura 2. 9 muestra un bosquejo de una sección de un concentrador lineal (en la parte superior) con superficies reflejantes planas (en la parte inferior) soportadas por un arreglo estructural muy sencillo en cada extremo del equipo.

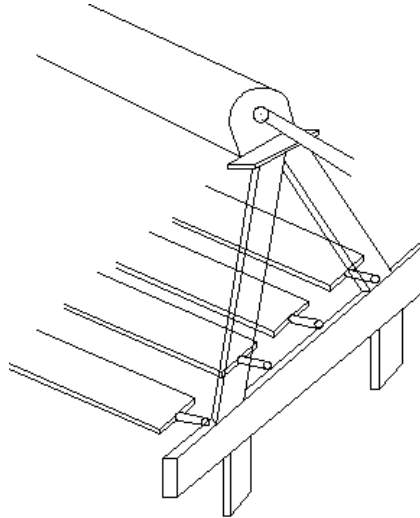


Figura 2. 9 Séptimo modelo

### 2.2.3 Perfeccionamiento del modelo

De las ideas preliminares antes descritas se seleccionan las mejores características en función a los requerimientos del equipo y a la identificación del problema.

Primera propuesta del modelo perfeccionado,

En la Figura 2. 10, se observa un módulo de 4 equipos conectados en serie.

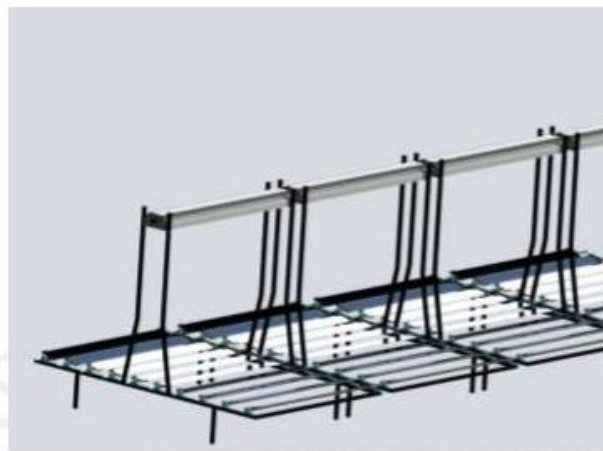


Figura 2. 10 Primera propuesta del Modelo perfeccionado.



La primera propuesta consta de equipos independientes pequeños y robustos con un área de captación total de 12 m<sup>2</sup>, estos equipos pueden conectarse en serie para formar módulos de “n” equipos y de esta manera garantizar el abastecimiento de energía necesario.

Las tres partes principales en que se divide el equipo son: el área de reflexión que se encuentra en la parte inferior (los espejos que reflejan la luz hacia el concentrador), el área de concentración que es el elemento que se observa en la parte superior y la estructura que le da soporte al modelo.

Segunda propuesta del modelo perfeccionado.

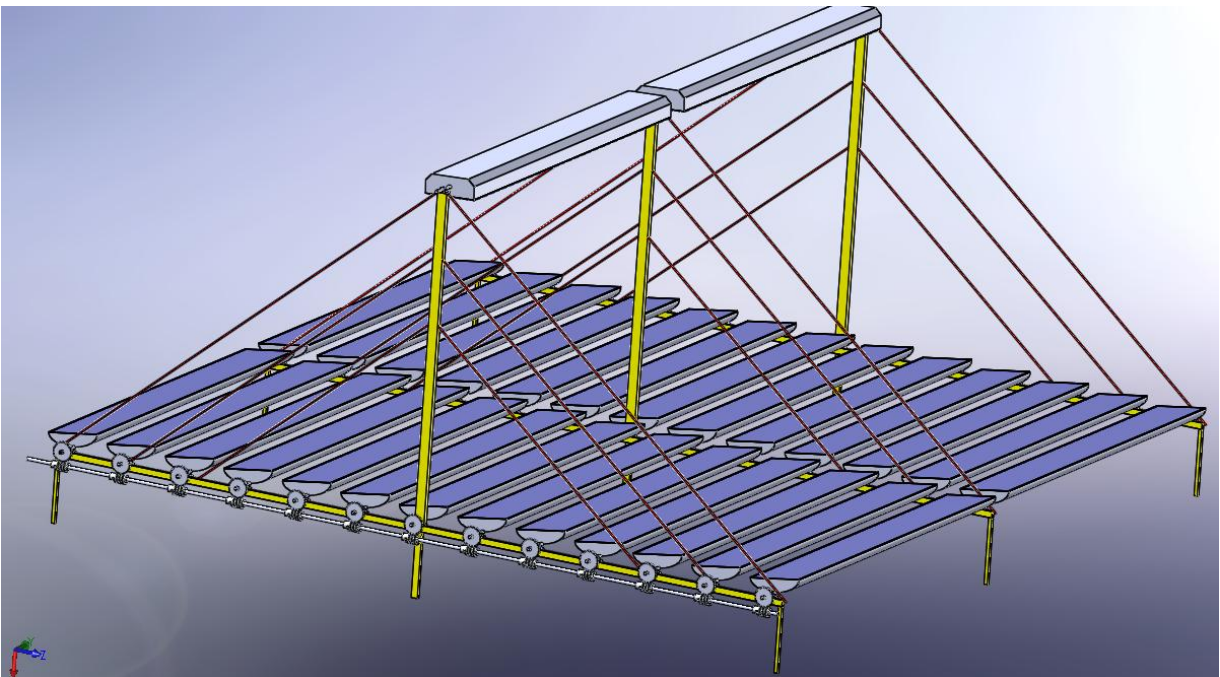


Figura 2. 11 Segunda propuesta del Modelo perfeccionado.

La propuesta número dos se muestra en la Figura 2. 11 y cuenta además con un arreglo de tensores laterales que ayudan a soportar las cargas del viento que se generan en el sistema de concentración.

Este modelo cuenta con un tamaño de superficie reflejante de 36 m<sup>2</sup>, se pretende que la superficie reflejante sea una película la cual pueda ser adherida a la base para disminuir peso, riesgo de fractura por granizada o algún proyectil, y también se puede conectar en serie para alcanzar los requerimientos de energía necesarios.





## 2.2.4 Mecanismos para movimiento del seguidor solar del Fresnel-SATCF

Con la finalidad de mantener siempre la reflexión de los rayos solares dirigida al concentrador solar, es necesario diseñar un mecanismo que permita mover cada uno de los reflectores (superficies reflejantes), de tal forma que dicho reflector redirija el rayo de luz incidente hacia el área de captación solar (concentrador) desde el amanecer hasta el anochecer.

### 2.2.4.1 Propuesta 1, Utilizando sistema de engranes y cadena

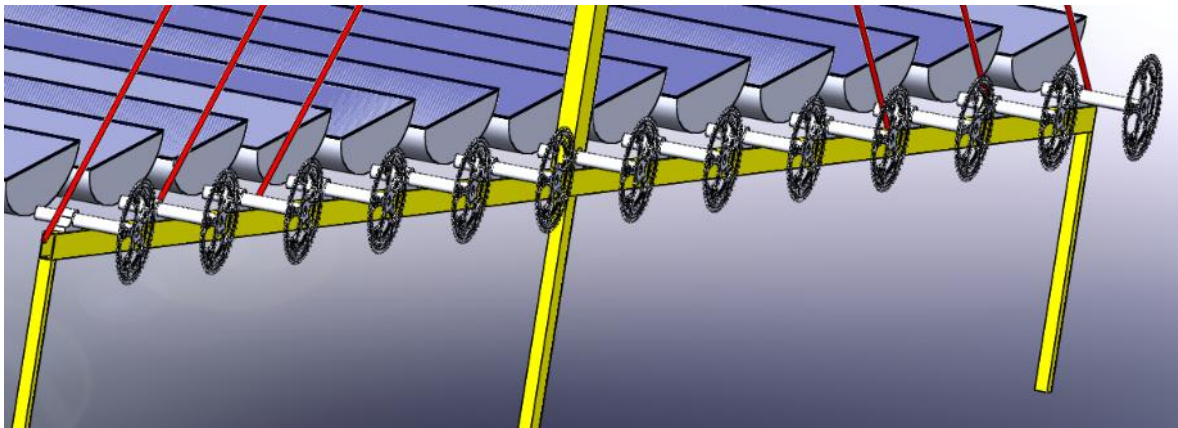


Figura 2. 12 Propuesta 1 utilizando un sistema de engrane y cadena metálica

Se propone utilizar un engrane (como el de bicicleta) y una cadena metálica para generar la tracción y rotación en el eje de las superficies reflejantes. Para esta propuesta se necesita un engrane por cada eje de superficie reflejante y un único engrane conductor.

### 2.2.4.2 Propuesta 2 Utilizando mecanismo de barras.

En la propuesta dos se propone utilizar un mecanismo de barras para generar el giro de los ejes de las superficies reflejantes.

En esta propuesta una de las barras se adhiere al eje de las superficies reflejantes de forma perpendicular, mientras que la segunda barra (barra unión) se ensambla uniendo todas las barras de los ejes de cada superficie reflejante con un perno para generar así dos grados de libertad de la barra unión y permitir de esta manera el giro de los ejes de cada superficie reflejante.

Se pretende utilizar barras de sección angular para dar soporte y estabilidad cuando se genere la tracción y movimiento.

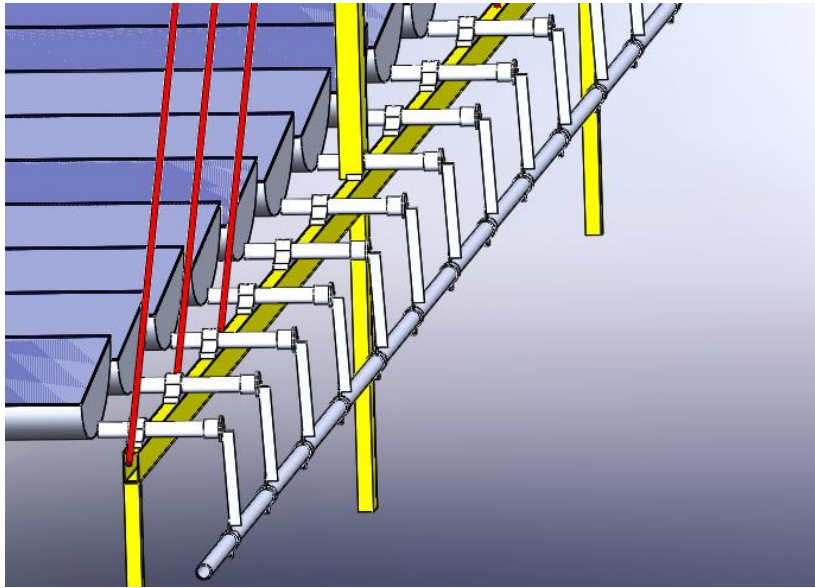


Figura 2. 13 utilizando un mecanismo de barras.

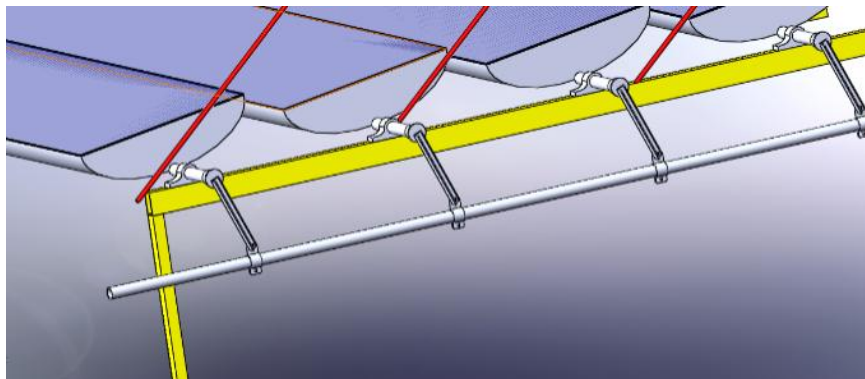


Figura 2. 14 Vista frontal de la propuesta 2

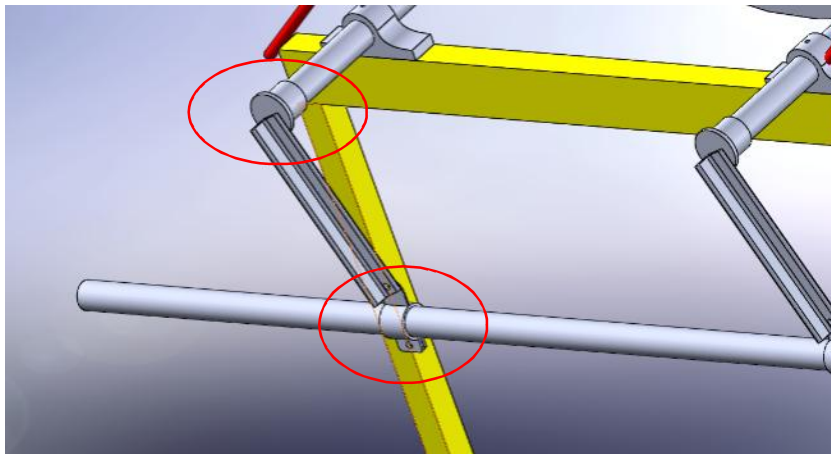


Figura 2. 15 Vista de detalle de la propuesta 2



En la parte que se encierra con el círculo rojo superior se pretende soldar la barra Angular a un cople metálico que se ensambla al eje de la superficie reflejante (Ver Figura 2. 15).

En la parte que se encierra con el círculo rojo inferior se pretende acoplar la barra angular mediante un perno que permita movimiento rotacional con una abrazadera metálica que sujeta a la barra unión para garantizar que no se tenga deslizamiento de abrazadera con la barra unión (Ver Figura 2. 15).

### Propuesta 3.

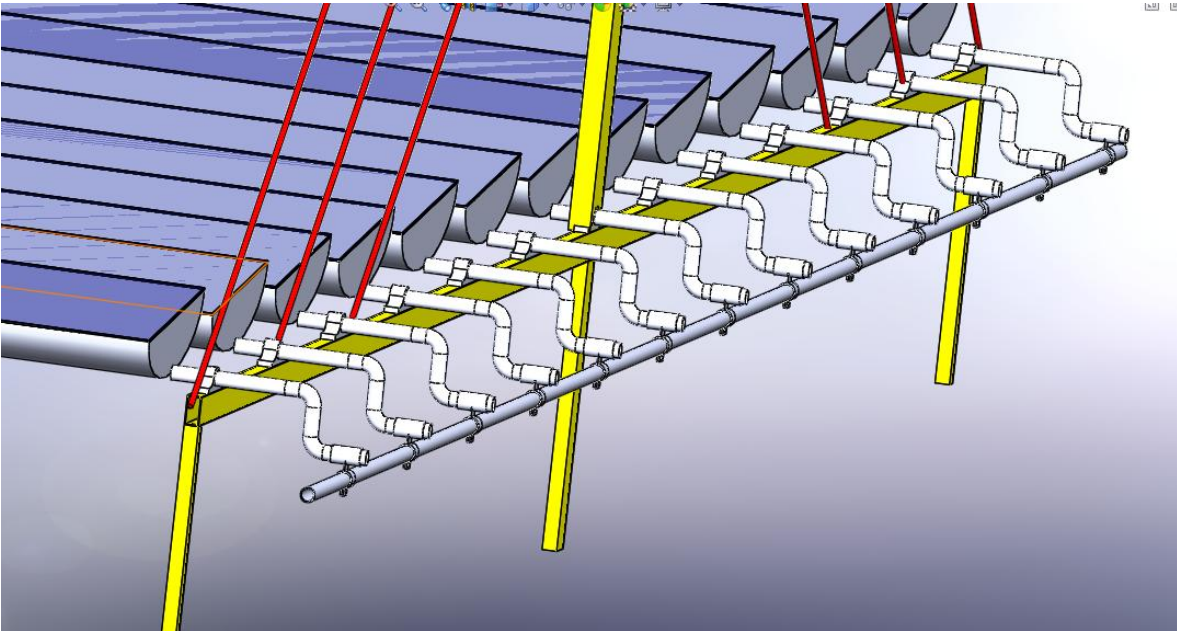


Figura 2. 16 Propuesta 3 utilizando eje de la superficie reflejante

En la propuesta 3 se utiliza el eje con dos conexiones en forma de codo roscado de 90 grados para generar un doblez rígido del eje, que se une a una barra unión, que a su vez une todos los ejes mediante una conexión en forma de cople que permite el libre giro del eje.

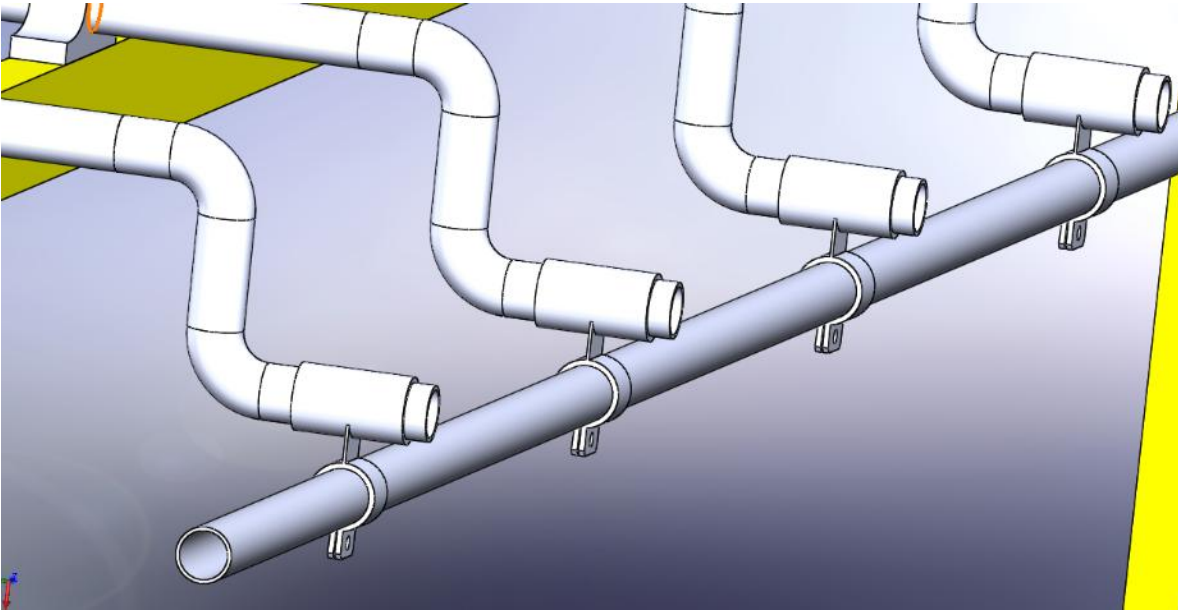


Figura 2. 17 Acercamiento al ensamble de los ejes con la barra unión de la propuesta 3.

Como puede verse en la vista de detalle, este mecanismo consta de un solo elemento conducido por un solo eje motriz, dicho elemento se acopla al eje mediante una abrazadera que tiene por la parte superior una especie de cople (con la finalidad de disminuir la fricción cuando se presenta giro) y por la parte de abajo una abrazadera de alta presión por efecto de un tornillo.



# CAPÍTULO III

# SELECCIÓN DE

# MATERIALES



### 3.1 Objetivo general del Capítulo

Desarrollar la **selección** de un **material** con ayuda de mapas de materiales para producir la estructura del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATC que cumpla con las especificaciones del diseño y funcionalidad.

### 3.2 Introducción

Los Materiales son las sustancias que componen cualquier cosa o producto. Madera, vidrio, hormigón, acero, plástico, papel, etc. Son sólo algunos ejemplos evidentes de los materiales que nos rodean y que, junto con la Energía, son utilizados para el hombre para mejorar su calidad de vida. La importancia de la utilización de los diferentes materiales a lo largo de la Historia se hace patente si se tienen en cuenta que las primeras civilizaciones se conocen con el nombre del material que alcanzó mayor grado de desarrollo (Edad de Piedra, Edad de Bronce, etc.)

Los primeros hombres se limitaron a utilizar materiales naturales que estaban a su alcance: piedra, madera, arcilla, cuero, etc. sin embargo, con el tiempo el hombre descubrió técnicas que le permitían producir materiales con mejores propiedades: cerámicas, metales. Y finalmente descubrió que determinados tratamientos (mezclas, calor, presión, luz) permitían mejorar las propiedades finales del material. La utilización de un material u otro fue siempre un proceso de selección, entre los materiales conocidos, se aplicaba el más idóneo para el objetivo perseguido.

La gran mayoría de avances tecnológicos logrados en la sociedad moderna, se han apoyado en el descubrimiento y desarrollo de materiales de ingeniería y procesos de fabricación usados en su obtención [35]. Una adecuada selección de materiales y procesos, garantiza a los diseñadores de partes mecánicas su correcto funcionamiento (performance) de los componentes diseñados. Desde el punto de vista práctico, la posibilidad de usar varios métodos y poderlos confrontar, garantiza una mayor eficiencia en la selección correcta del material y un fin específico.

La mayoría de los métodos parten de la disponibilidad de una amplia gama de materiales, los cuales se debe entrar a analizar y refinar, ya sea con ayuda de recomendaciones (métodos tradicionales), mapas de materiales (métodos gráficos) o información escrita que se encuentra en fuentes bibliográficas o en forma de software en base de datos virtuales. En general, el refinamiento se hace de acuerdo con las propiedades exigidas por el componente a diseñar y sustentado con criterios como: disponibilidad, facilidad de obtención, vida de servicio, factores ambientales



y costos, entre otros. De esta forma, se llega a la selección de un único tipo de material, el cual debe resultar en el más apropiado para el fin pretendido.

### 3.3 Justificación

La innovación en ingeniería a menudo significa el uso inteligente de un nuevo material –nuevo para una aplicación determinada, pero no necesariamente nuevo (aunque sí algunas veces) en el sentido de desarrollado recientemente. Los clips de plástico y los álabes cerámicos de las turbinas representan intentos de mejorar con polímeros y con cerámicos lo que previamente se hacía con metales, y los desastres en ingeniería con frecuencia están causados por un mal uso de los materiales. Cuando una cucharilla de plástico se dobla mientras se remueve el té, o cuando un avión cae al suelo porque aparecen fisuras en su cola, se debe a que los ingenieros que los diseñaron emplearon materiales equivocados o no entendieron las propiedades de éstos. Por ello es vital que el ingeniero profesional conozca cómo se seleccionan los materiales y sepa cuál se ajusta a las demandas del diseño – demandas económicas y estéticas, así como de resistencia y durabilidad. El diseñador debe comprender las propiedades de los materiales y sus limitaciones.

Se dice que existen más de 50 000 materiales disponibles para el ingeniero. En el diseño de una estructura o dispositivo [36], ¿cómo elegirá el ingeniero entre un menú tan amplio el material más adecuado? Los errores pueden causar desastres. Durante la Segunda Guerra Mundial, un tipo de barco mercante fabricado por soldadura sufrió grandes pérdidas pero no causadas por el enemigo, sino a causa de que se partió por la mitad en el mar: la tenacidad a la fractura del acero, en particular de las soldaduras 1-1, era muy pequeña. Más recientemente, tres aviones Comet se perdieron antes de que se cayera en la cuenta de que el valor de diseño de la resistencia a la fatiga -para los marcos de las ventanillas- era superior a la del material elegido. Otro fenómeno importante es el que se presenta en el diseño de aparatos de plástico, sus frecuentes fallos se deben a que el que los diseñó probablemente no consideró el bajo módulo de elasticidad que tienen los polímeros.

En la Tabla 3. 1 se listan algunas propiedades de los materiales junto con otras que debe considerar el diseñador a la hora de elegir un material.



Tabla 3. 1. Tipos de propiedades

Económicas	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Precio y disponibilidad</li><li>➤ Reciclabilidad</li></ul>
Físicas	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Densidad</li></ul>
Mecánicas	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Módulos</li><li>➤ Límite elástico y resistencia a la tracción</li><li>➤ Dureza</li><li>➤ Tenacidad a la fractura</li><li>➤ Resistencia a la fatiga</li><li>➤ Resistencia a la fluencia</li><li>➤ Amortiguamiento de vibraciones</li></ul>
Térmicas	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Conductividad térmica</li><li>➤ Calor específico</li><li>➤ Coeficiente de expansión térmica</li></ul>
Eléctricas y magnéticas	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Resistividad</li><li>➤ Constante dieléctrica</li><li>➤ Permeabilidad magnética</li></ul>
Interacción con el entorno	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Oxidación</li><li>➤ Corrosión</li><li>➤ Desgaste</li></ul>
Producción	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Facilidad de fabricación</li><li>➤ Unión</li><li>➤ Acabado</li></ul>
Estética	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Color</li><li>➤ Textura</li><li>➤ Aspecto</li></ul>

La mayoría de los componentes de ingeniería están fabricados con metales y aleaciones, más que con ningún otro tipo de material. Pero, de forma creciente, los polímeros son cada vez más atractivos para el diseñador a causa de que ofrecen una buena combinación de propiedades. Y basta con leer un periódico para cerciorarse de que las cerámicas, aún en desarrollo en el mundo, son un tipo de material de ingeniería emergente que permite fabricar motores más eficientes, desde el punto de vista térmico, cuchillos más afilados y cojinetes con menor fricción. El ingeniero puede combinar las mejores de estas propiedades para producir materiales compuestos (el más típico es la fibra de vidrio), que también ofrece un atractivo conjunto de propiedades. Y finalmente no podemos ignorar los materiales naturales, como la madera o la piel, que poseen propiedades que – incluso con los desarrollos científicos actuales en ciencia de materiales- son difíciles de superar. En la Tabla 3. 2 se muestran los distintos tipos de materiales.





Tabla 3. 2. Tipos de materiales

<b>Tipo de Material Propiedades comunes</b>	
<b>Metales</b>	Los metales y sus aleaciones, incluyendo el acero, aluminio, magnesio, zinc, hierro fundido, titanio, cobre y níquel, generalmente tienen como característica una buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, una alta rigidez, ductilidad o conformabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades.
<b>Cerámicos</b>	El ladrillo, el vidrio, la porcelana, los refractarios y los abrasivos tienen baja conductividad eléctrica y térmica y a menudo son utilizados como aislantes. Los cerámicos son fuertes y duros, aunque también muy frágiles o quebradizos. Las nuevas técnicas de procesamiento han conseguido que los cerámicos sean lo suficientemente resistentes a la fractura para que puedan ser utilizados en aplicaciones de carga.
<b>Polímeros</b>	Producidos mediante un proceso conocido como polimerización, es decir, creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas, los polímeros incluyen el hule, los plásticos y muchos tipos de adhesivos. Los polímeros tienen baja conductividad eléctrica y térmica, reducida resistencia y no son adecuados para utilizarse a temperaturas elevadas. Los polímeros termoplásticos, en los cuales las largas cadenas moleculares no están conectadas de manera rígida, tienen buena ductilidad y conformabilidad; los polímeros termoestables son más resistentes, aunque más frágiles porque las cadenas moleculares están fuertemente enlazadas. Los polímeros se utilizan en muchas y variadas aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos.
<b>Materiales compuestos (Composites)</b>	Los materiales compuestos se forman a partir de dos o más materiales, produciendo propiedades que no se encuentran en ninguno de los materiales de manera individual. El concreto, la madera contrachapada y la fibra de vidrio son ejemplos típicos, aunque algo burdos, de materiales compuestos. Con materiales compuestos es posible producir materiales ligeros, fuertes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, o bien, se pueden producir herramientas de corte duras y a la vez resistentes al impacto, que de otra manera se harían añicos. Los vehículos aéreos y aeroespaciales modernos dependen de manera



importante de materiales compuestos como los polímeros reforzados de fibra de carbono (CFRP).

**Materiales naturales**

Los materiales naturales se forman por sí solos en la naturaleza, son autosustentables, tienen propiedades muy especiales dependiendo del caso de estudio. La madera por ejemplo es un material con propiedades mecánicas muy interesantes, soporta esfuerzos de tensión, de compresión, resiste ambientes altamente oxidantes, es un buen aislante tanto térmico como eléctrico, incluso puede trabajar a temperaturas relativamente elevadas. Otros materiales son el algodón, la lana, la seda, todos utilizados en la industria textil y uno más, es hueso utilizado para generar recubrimientos de piezas cerámicas de alta calidad.

\*Las cerámicas son cristalinas, inorgánicas, no metálicas. Los vidrios son sólidos no cristalinos (o amorfos). La mayoría de los vidrios para ingeniería son no metálicos, pero hoy existe un gran número de vidrios metálicos con propiedades útiles.

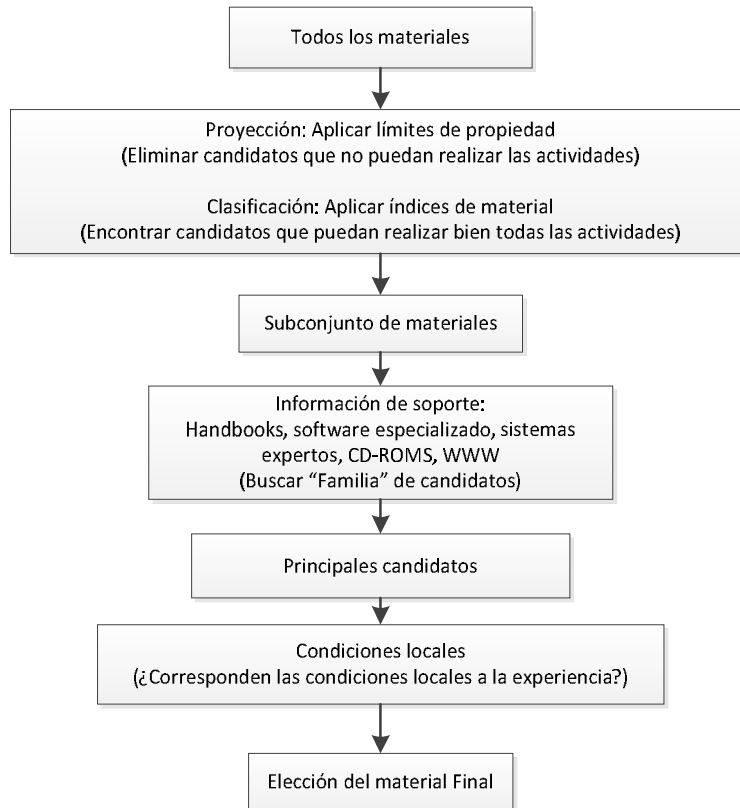
Para este análisis en particular se utilizará el **método gráfico** de selección de materiales.

El método gráfico se apoya en gráficas (conocidas como mapas de materiales), en las que se relacionan por pares ciertas propiedades de los materiales [37]. El método fue diseñado exclusivamente para ser utilizado durante la etapa conceptual de la selección de materiales. En estos mapas se puede hacer una aproximación del material más adecuado (perteneciente a una determinada familia de materiales), con base en la relación de las propiedades más importantes que debe poseer el componente.

Como es de esperarse, rara vez el comportamiento de un componente depende sólo de una propiedad. De igual manera, diagramas como los de Ashby [37], muestran que las propiedades de las diferentes clases de materiales pueden variar en amplios intervalos (dependiendo del estado de estos), formando grupos que se ubican en áreas cerradas, zonas o campos en tales diagramas. Eso significa, que una misma familia de materiales puede tener un campo o zona en los mapas. En estos mapas se relacionan entre otras, propiedades como resistencia, módulo de elasticidad, densidad, tenacidad, conductividad térmica, difusividad y expansión, y costos.



### 3.4 Metodología de selección de materiales



#### 3.4.1 Definición del problema

Seleccionar un material adecuado para utilizarlo en la estructura que soporte el sistema Fresnel-SATC tomando en cuenta las siguientes características y parámetros de diseño:

- Fácil fabricación
- Estabilidad dimensional
- Compatibilidad con otros materiales como accesorios
- Reciclabilidad
- Bajo impacto ambiental durante su fabricación y desecho
- Bajo costo de fabricación

#### **Restricciones**

- Resistencia al esfuerzo de pandeo
- Resistencia en ambientes corrosivos
- Resistencia a esfuerzos tanto de tensión como compresión



- Resistencia al desgaste
- Resistencia al impacto
- Alta rigidez
- Baja Conductividad térmica
- Baja transferencia de calor
- Ligero tanto en masa como en volumen
- No tóxico
- Buen aspecto estético
- Que sea difícil de ensuciar y fácil de limpiar
- Buena estabilidad

De las restricciones ya mencionadas se procede a realizar la selección del material con apoyo de los mapas de materiales y los tipos de propiedades de clases comunes de materiales.

### 3.4.2 Selección de Materiales

El funcionamiento de un componente depende de una combinación de propiedades de la materia. Los gráficos mostrados en este apartado condensan una gran cantidad de información en una forma compacta, pero accesible, revelando las correlaciones entre las propiedades del material que proporcionan una técnica de optimización en funcionamiento.

Los parámetros de optimización y diseño, llamados índices del material, son graficados como contornos sobre los gráficos. Asimismo, entre las propiedades mecánicas y térmicas, existen 18 que son de importancia primaria tanto en la caracterización del material y el diseño ingenieril; entre las más representativas están la densidad, módulo de elasticidad, esfuerzo, tenacidad, conductividad térmica, difusividad y expansión.

Así pues, los gráficos muestran datos de estas propiedades, para las nueve clases de materiales.

Dentro de cada clase, los datos son graficados para un conjunto de materiales representativos, ambos elegidos para un amplio rango del comportamiento, y para incluir los miembros más comunes y más ampliamente usados.

También, los diagramas de materiales muestran un rango de valores para cada propiedad de cada material. Algunas veces el rango es estrecho: el módulo del cobre, varía por solamente un pequeño porcentaje alrededor de su valor medio influenciado por su pureza, textura, entre otros. Y, algunas veces éste es amplio: el



esfuerzo de alúmina cerámica pueden variar hasta por un factor de 100 o más, influenciadas por la porosidad y la medida de grano principalmente.

Además, es importante conocer que el tratamiento térmico y el trabajo mecánico tienen un efecto profundo sobre el esfuerzo de cedencia y tenacidad de metales; así como la cristalinidad y el grado de reticulación influyen fuertemente el módulo de los polímeros.

### **3.4.2.1 Mapas de materiales**

#### *Diagrama Módulo de Young-Densidad*

Tanto el Módulo como la densidad son propiedades familiares ampliamente utilizadas. La densidad de un sólido depende de tres factores: el peso atómico de sus átomos o iones, su medida, y la forma en que son empacados.

Los metales son densos debido a que están formados por átomos pesados, empaquetados densamente, a diferencia de los polímeros, que tienen bajas densidades debido a que están compuestos en gran parte de Carbono, cuyo peso atómico es 12, y de Hidrogeno en una red bi o tri-dimensional.

Las cerámicas tienen densidades menores que los metales, debido que contienen átomos ligeros de O, N o C. Materiales con densidades menores que los cerámicos, son las espumas, que son materiales hechos de células que contienen una gran fracción de espacios porosos.

Por otra parte, el módulo de muchos materiales dependen de dos factores: enlaces de rigidez y la densidad de enlaces por unidad de área.

Un enlace es como un resorte, tiene una constante del resorte,  $S$  (N/m). El enlace covalente es fuerte ( $S=20-200\text{N/m}$ ), el metálico y el iónico un poco menor a ( $S=15-100\text{ N/m}$ )

En lo referente al módulo, el Diamante tiene un muy alto módulo debido a que el átomo de carbono es pequeño (dando una alta densidad de enlace) y sus átomos son enlazados por resortes muy fuertes ( $S=200\text{ N/m}$ ). Mientras que los metales tienen altos módulos debido a que tienen un empaquetado cerrado, dando altas densidades de enlace.

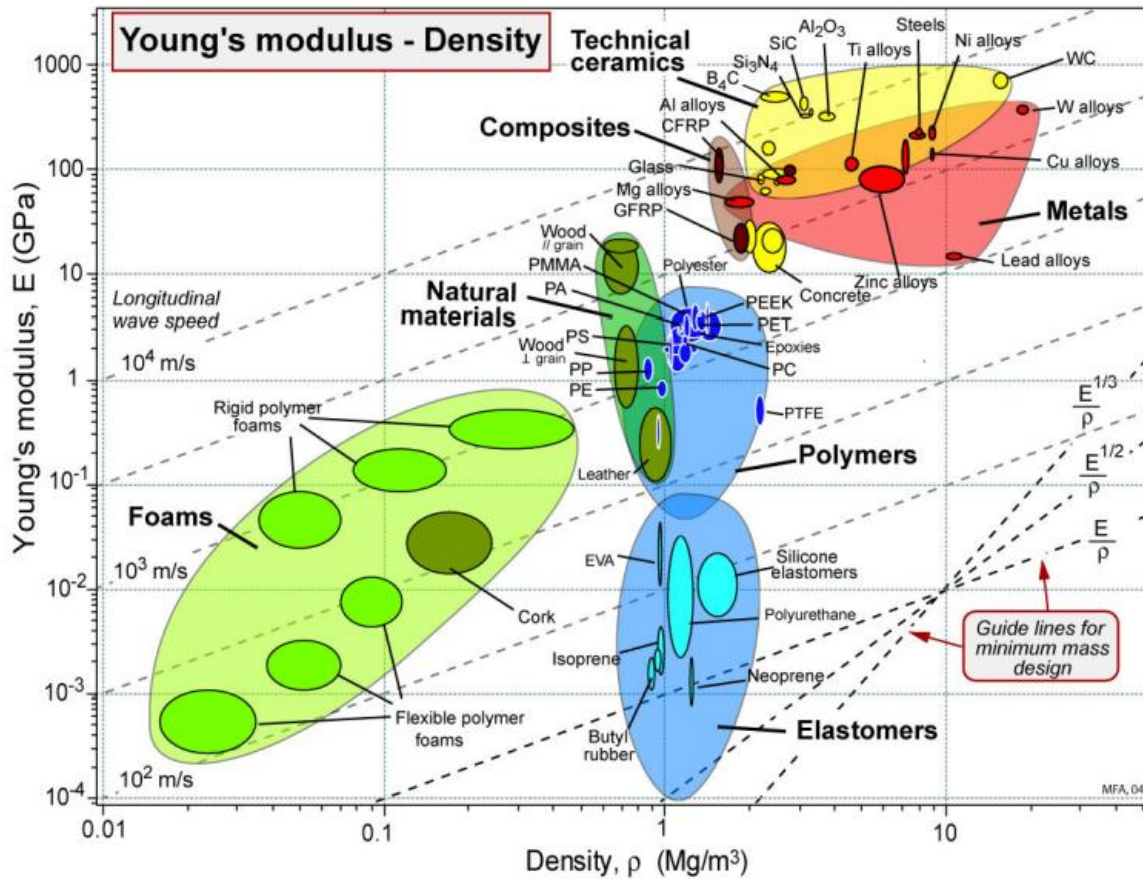


Figura 3. 1. Mapa de materiales Módulo de Young vs Densidad [38]

De la Figura 3. 1 es claro identificar que los materiales con más alto módulo de Young son las cerámicas técnicas y los metales, los materiales compuestos también tienen un alto módulo de Young. Es importante señalar que los materiales naturales tienen módulos muy aceptables y la ventaja de que son menos densos, contrario de los metales y las cerámicas, que son materiales muy densos.

De este mapa se pueden rescatar de manera general cuatro tipos de materiales que cumplen con las restricciones del modelo.

- Cerámicas técnicas
- Metales
- Materiales compuestos
- Materiales naturales



### Diagrama Esfuerzo-Densidad

La palabra esfuerzo requiere una definición, para metales y polímeros se trata del esfuerzo de cedencia, el rango abarca desde la cedencia inicial hasta el esfuerzo último; para muchos propósitos prácticos éste es el mismo en tensión y compresión.

Para cerámicos frágiles, el esfuerzo graficado aquí, es la resistencia al aplastamiento en compresión. Para elastómeros, el esfuerzo se refiere al esfuerzo a tracción (o desgarre).

Y finalmente, para composites es la resistencia a la falla por tensión (el esfuerzo de compresión puede ser menor hasta un 30%, debido al pandeo de las fibras).

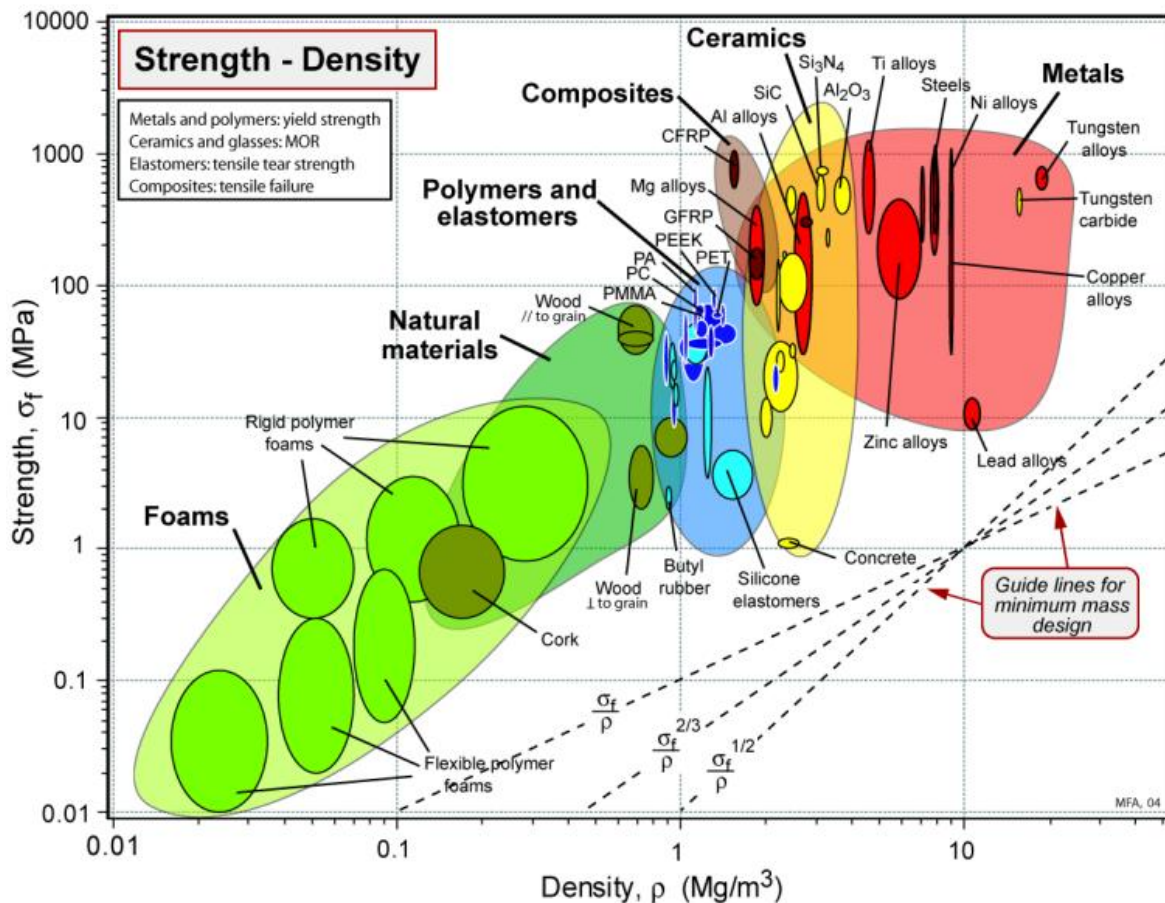


Figura 3. 2. Mapa de materiales Carga vs Densidad [38]



Líneas guía, utilizadas en el diagrama de la Figura 3. 2, para un diseño de peso mínimo son las siguientes:

$$\frac{\sigma_f}{\rho} = C, \quad \frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho} = C, \quad \frac{\sigma_f^{1/2}}{\rho} = C$$

El concepto más importante en el entendimiento de este amplio rango es la resistencia de reticulado o esfuerzo de Peierls: la resistencia intrínseca de la estructura al cizallamiento plástico. El funcionamiento plástico en un cristal involucra el movimiento de las dislocaciones.

Los cerámicos son duros, debido a sus enlaces iónicos y covalentes más localizados (que deben ser rotos y reformados cuando la estructura es cizallada) que bloquean las dislocaciones en un lugar.

Cuando la resistencia de reticulado es baja, el material puede ser fortalecido o reforzado, introduciendo obstáculos al deslizamiento: en metales, añadiendo elementos de aleación, partículas, fronteras de grano, e incluso otras dislocaciones (endurecimiento por deformación); y en polímeros por reticulado o por orientación de las cadenas para fortalecer el enlace covalente, así como el rompimiento de los enlaces débiles de Van der Waals.

De la Figura 3. 2 es posible identificar que los materiales que más carga soportan son los metales, las cerámicas y los materiales compuestos, de los cuales los metales se observan en un rango muy amplio con densidades muy altas pero también con densidades en el campo de las cerámicas y los materiales compuestos.

Los materiales que se pueden seleccionar para el presente diseño de la Figura 3. 2 son:

- Metales
- Cerámicas
- Materiales compuestos
- Polímeros y elastómeros
- Materiales Naturales

#### *Diagrama Módulo de Young –Esfuerzo a la cedencia*

Los contornos de esfuerzo de falla (esfuerzo en el cual el material deja de ser linealmente elástico), aparecen como una familia de líneas rectas paralelas.





Los polímeros de ingeniería tienen altos esfuerzos de falla de entre 0.01 y 0.1, los valores para los metales están en al menos un factor de 10 veces más pequeños.

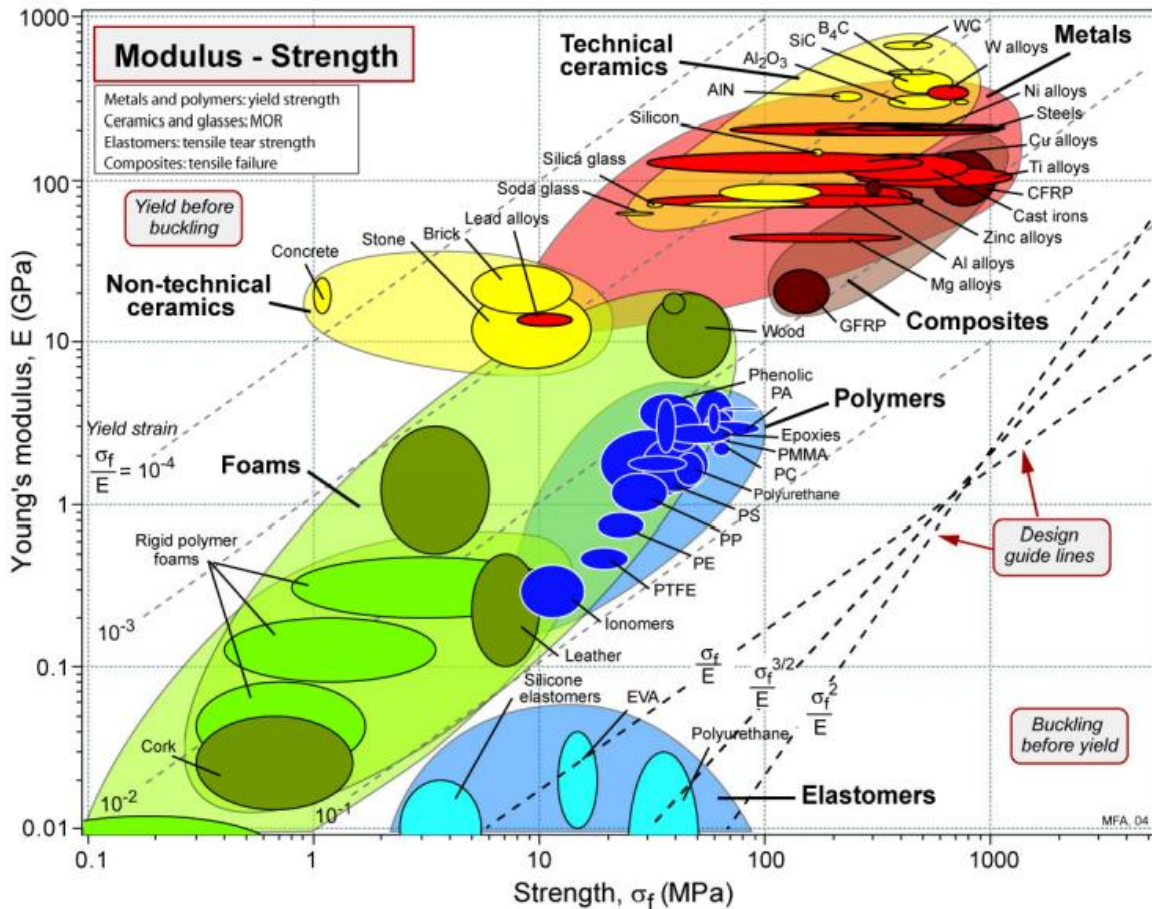


Figura 3. 3. Mapa de materiales Módulo de elasticidad vs Esfuerzo [38]

De la Figura 3. 3. Se puede identificar que los materiales que soportan mayores esfuerzos de falla y que además tienen un mayor módulo de elasticidad son:

- Metales
- Cerámicas técnicas
- Materiales compuestos
- Madera



### Diagrama Tenacidad a la fractura-Módulo de Young

La tenacidad a la fractura de los polímeros es menor que la de los cerámicos. Las restricciones describen las primeras aplicaciones a los valores de  $K_{Ic}$ : cuando es pequeño, ellos están bien definidos, cuando son grandes, ellos son útiles solamente como una clasificación para la selección del material.

La Condición necesaria para fractura se define como el trabajo externo suficiente, o la energía elástica liberada, para suministrar energía de superficie,  $\gamma$  por unidad de área, de las dos nuevas superficies que son creadas.

$$G \geq 2\gamma$$

Donde G es la razón de energía liberada.

La energía de superficie,  $\gamma$ , de materiales sólidos escalan con su módulo, para una aproximación adecuada  $\gamma = Er_0 / 20$ , donde  $r_0$  es la medida del átomo.

Se identifica el lado derecho de la siguiente ecuación con un valor límite inferior de  $K_{Ic}$ , cuando, se toma  $r_0$  como  $2 \times 10^{-10}$  m

$$\frac{(K_{Ic})_{\min}}{E} = \left( \frac{r_0}{20} \right)^{1/2} \approx 3 \times 10^{-6} m^{1/2}$$

Este criterio es graficado como una banda diagonal sombreada cerca de la esquina inferior izquierda. Este define un límite inferior sobre los valores de  $K_{Ic}$ : evitando ser menores que éste, al menos de que alguna otra fuente de energía tal como una reacción química, o el desprendimiento de energía elástica almacenada en las dislocaciones especiales de estructuras causadas por cargas de fatiga, esté disponible.

Se puede apreciar que los cerámicos más frágiles se sitúan cerca del límite umbral: cuando estos se fracturan, la energía absorbida es sólo ligeramente mayor que la energía de superficie. Cuando los metales, polímeros y composites se fracturan, la energía absorbida es bastante grande, usualmente debido a la plasticidad asociada con la propagación de la grieta.

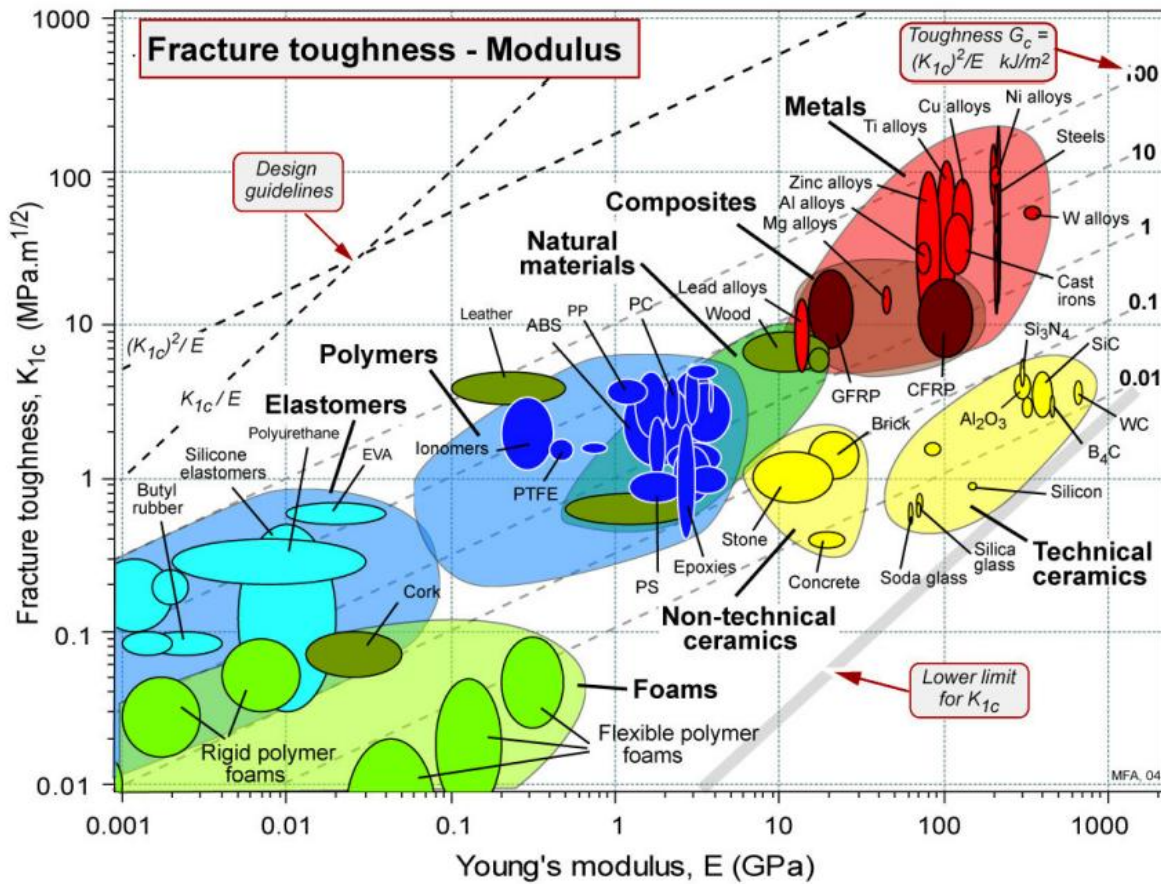


Figura 3. 4. Tenacidad a la fractura,  $K_{1c}$ , contra módulo de young's, E [38]

De la Figura 3. 4. Se puede identificar que los materiales con mayor tenacidad a la fractura son:

- Metales
- Materiales compuestos
- Materiales naturales
- Cerámicas técnicas

### Diagrama Tenacidad a la fractura-esfuerzo

La concentración de esfuerzos en la punta de una grieta, genera una zona de proceso: una zona plástica en sólidos dúctiles, una zona de microgrietas en cerámicos, una zona de delaminado, desunión y desprendimiento de fibras en composites.

La cantidad de energía disipada debe escalar aproximadamente con el esfuerzo del material, dentro de la zona de proceso, y con su medida  $d_y$ . Esta dimensión es



encontrada por la ecuación del campo de esfuerzo de la fractura ,  $\sigma = K/\sqrt{2\pi r}$  , al esfuerzo del material, en  $r = d_y/2$  .

Por lo que  $d_y$  puede ser calculada de la ecuación.

$$d_y = \frac{K_{1c}^2}{\pi\sigma_f^2}$$

La medida de la zona (líneas quebradas), varían enormemente, desde dimensiones atómicas para cerámicos y vítreos muy frágiles hasta casi 1m para los metales más dúctiles. En una medida constante de zona, la tenacidad a la fractura tiende a incrementarse con el esfuerzo.

El diagrama tiene aplicación en selección de materiales para el diseño seguro de rodamientos de estructuras con cargas.

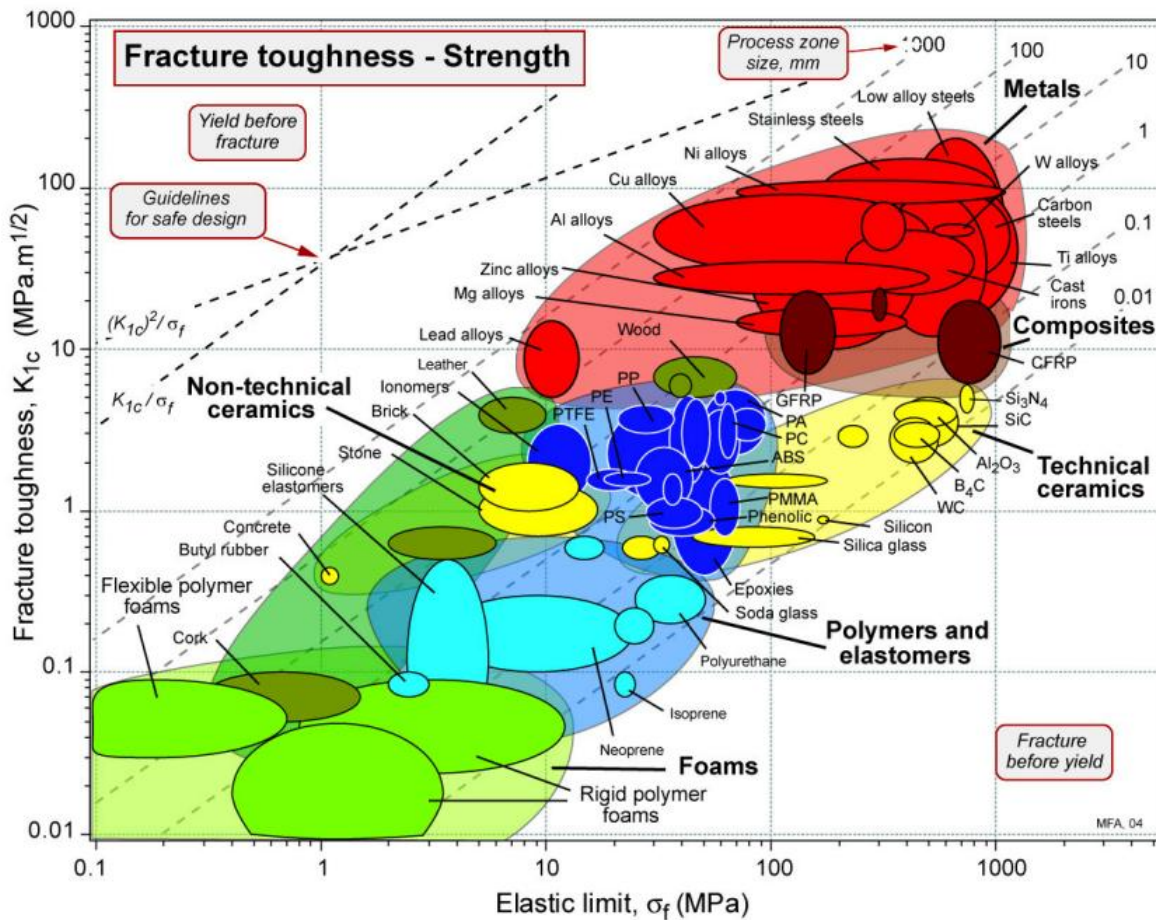


Figura 3. 5. Tenacidad a la fractura,  $K_{1c}$ , contra límite elástico,  $\sigma_f$  [38]



De la Figura 3. 5. Se puede identificar que los materiales con mayor tenacidad a la fractura y mayor límite elástico son:

- Metales
- Materiales compuestos
- Cerámicas técnicas
- Madera

#### *Diagrama Esfuerzo-Temperatura*

Cuando la temperatura de un sólido es elevada, la amplitud de las vibraciones térmicas de sus átomos incrementa y el sólido se expande. Ambas, la expansión y las vibraciones, facilitan el flujo plástico. Las resistencias a esfuerzos de los sólidos caen lentamente en primera instancia y después más rápidamente cuando la temperatura incrementa.

El diagrama muestra el rango de esfuerzos de cedencia de familias de materiales graficados contra la temperatura. La parte cercana a la horizontal de cada segmento muestra el esfuerzo en el régimen en el cual la temperatura tiene poco efecto; la parte con pendiente negativa muestra la caída más precipitada cuando la máxima temperatura de servicio es alcanzada. El diagrama representa los diagramas de esfuerzo y temperatura en la que cada clase de material, y material son usados. Incluso los mejores polímeros tienen poco esfuerzo por arriba de los 200°C, muchos metales se hacen muy suaves alrededor de los 800°C; y solamente cerámicos ofrecen resistencia por arriba de 1500°C.

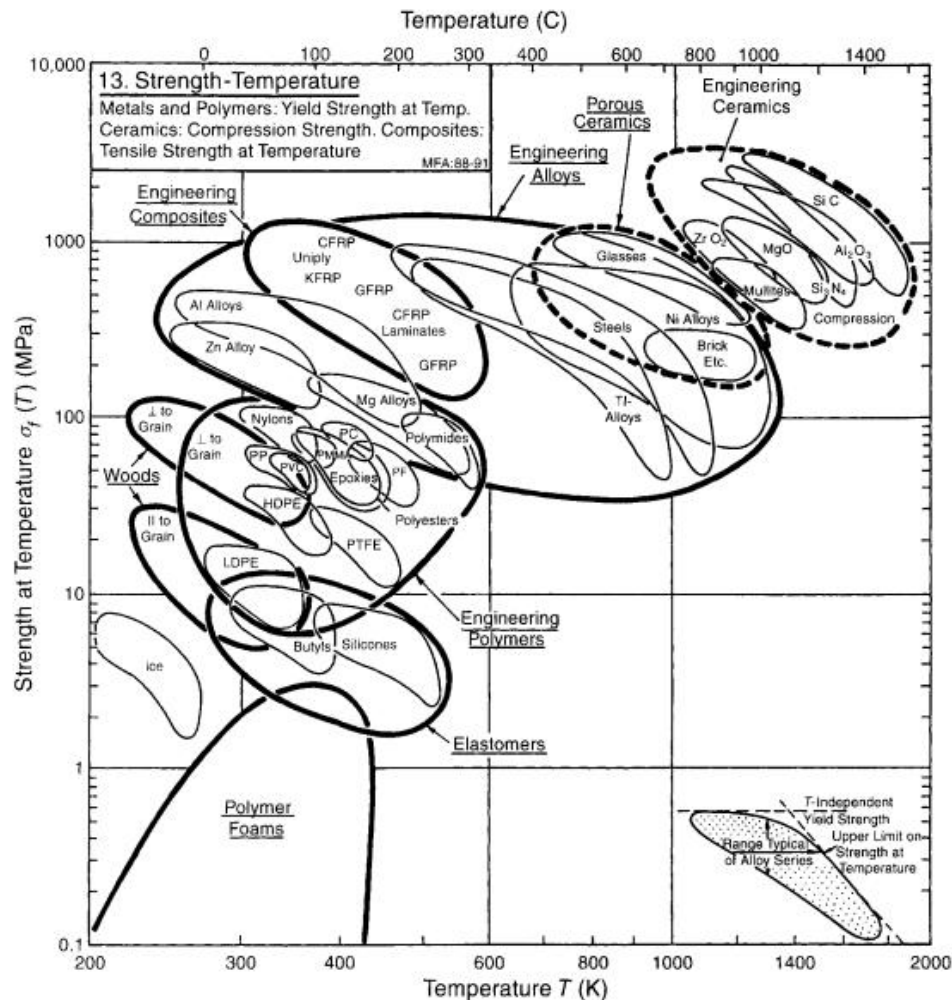


Figura 3. 6. Diagrama esfuerzo,  $\sigma_f$  contra temperatura, K [39].

De la Figura 3. 6. Se puede identificar que los materiales que soportan más esfuerzo a temperaturas más elevadas son:

- Cerámicas
- Metales
- Compuestos de ingeniería
- Polímeros

### Diagrama Módulo de Young- Costo Relativo

Las propiedades como módulo, esfuerzo o conductividad no cambian con el tiempo. Suministro, escasez, especulación e inflación contribuyen a fluctuaciones considerables en el costo por kilogramo de mercancía como el cobre o plata. Datos para costos por kilogramo son tabulados para algunos materiales en daily papers y



trade journals. Para hacer algunas correcciones para la influencia de la inflación y el cambio de moneda en la cual el costo es medido.

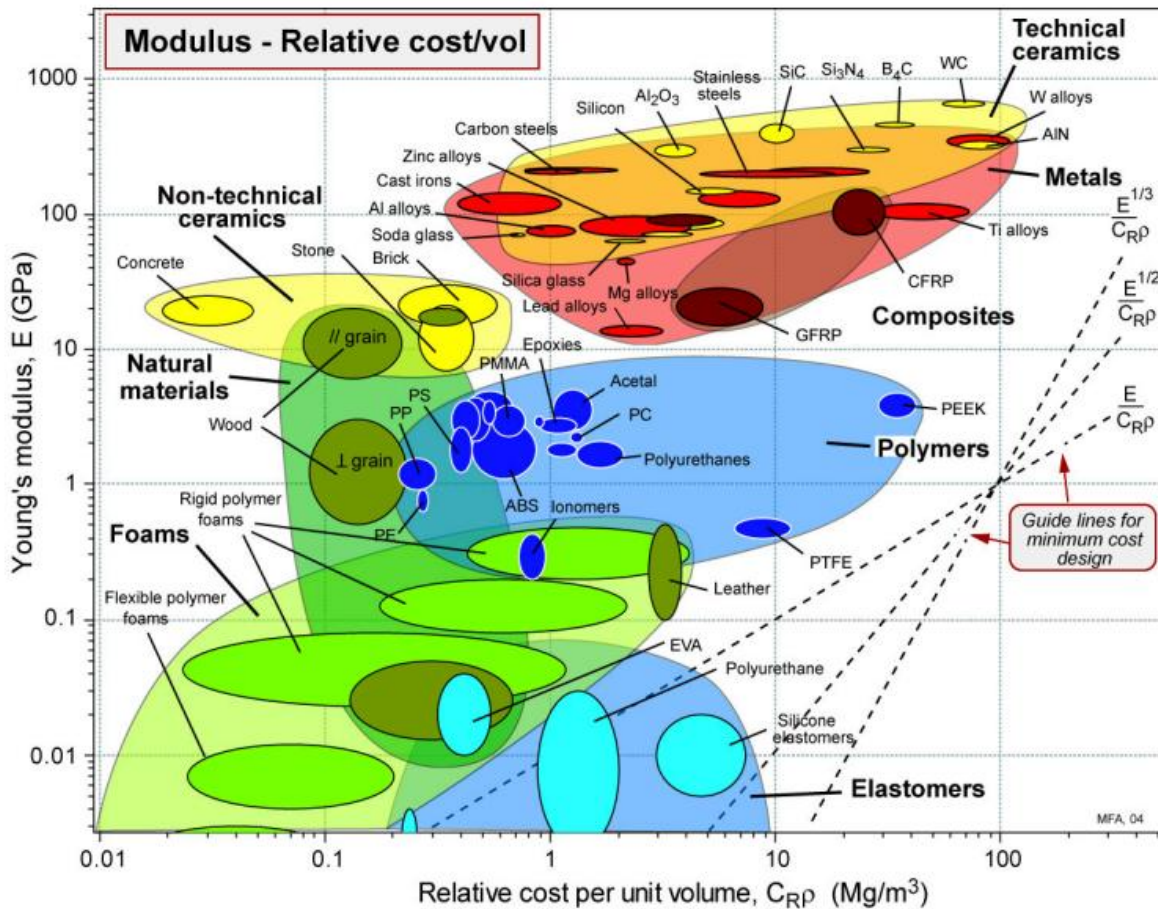


Figura 3. 7. Módulo de Young, E, contra costo por unidad de volumen,  $C_{RP}$  [38]

De la Figura 3. 7. Se puede identificar que los materiales con mayor módulo de elasticidad y en un amplio rango de costos son:

- Cerámicas técnicas
- Metales
- Cerámicas no-técnicas
- Materiales naturales
- Materiales compuestos

El costo relativo,  $C_R$ , se define como



$$C_R = \frac{\text{Costo por kg del material}}{\text{Costo por kg de barra de acero suave}}$$

Diagrama Esfuerzo-Costo relativo

Materiales fuertes y baratos son seleccionados con la ayuda de este diagrama. Permite la selección de materiales, usando el criterio de función por unidad de costo.

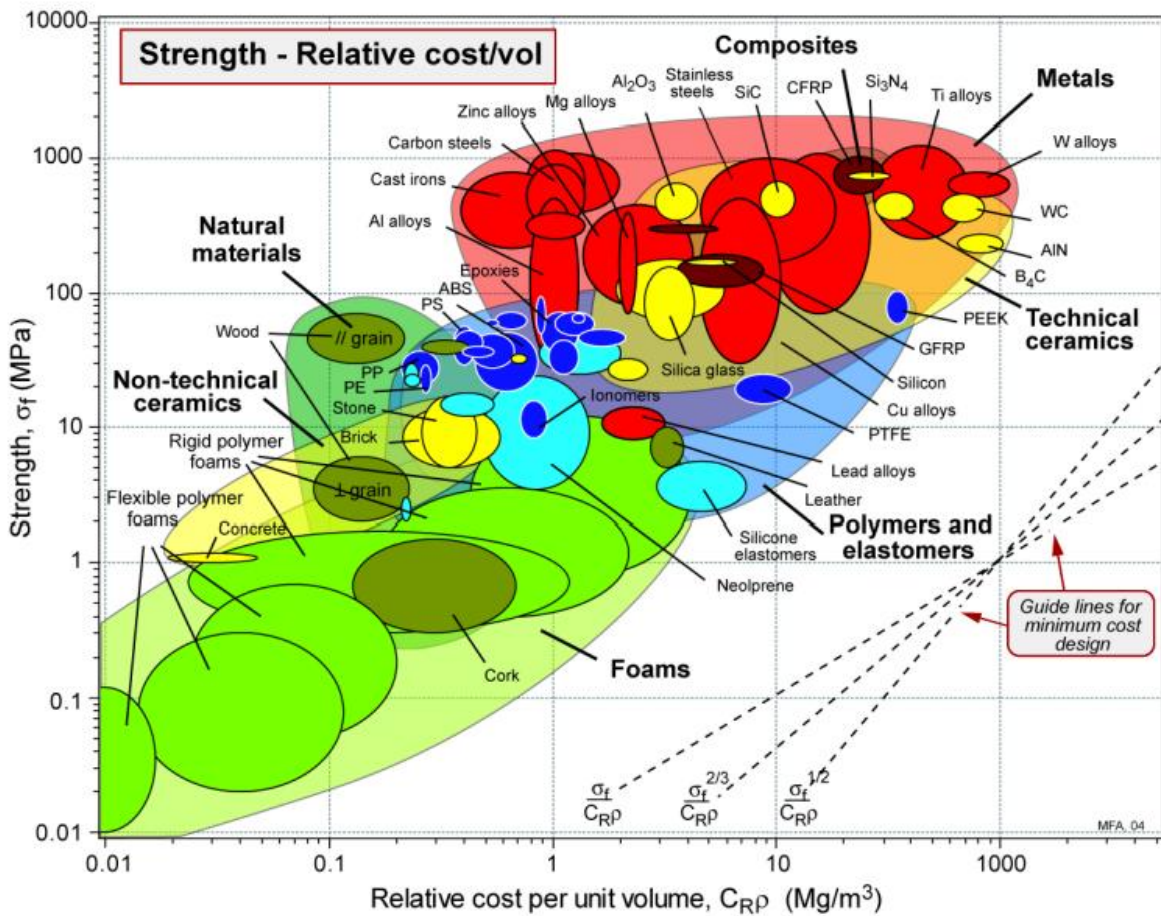


Figura 3. 8. Esfuerzo,  $\sigma_f$ , contra costo relativo,  $C_{RP}$  [38]

De la Figura 3. 8. Se puede identificar que los materiales que soportan mayor esfuerzo con respecto a su precio son:

- Metales
- Cerámicas técnicas
- Materiales naturales





➤ Polímeros y elastómeros

**3.4.2.2 Subconjunto de materiales**

En la Tabla 3. 3 se muestran los materiales que reúnen las propiedades mecánicas requeridas de manera más amplia para el diseño de la estructura de Solar Fresnel-SATCF.

En la columna izquierda se muestra el mapa de materiales analizado, las columnas a la derecha muestran la posición de cada grupo de materiales con respecto sus propiedades. Los materiales posicionados en la columna 1 indican que cumplen con mayor satisfacción las propiedades necesarias para el diseño de la pieza a diseñar.

Por ejemplo para el Diagrama de Módulo vs Esfuerzo (renglón 5, Tabla 3. 3) indica que de todos los materiales existentes, los metales son los materiales que presentan los mejores módulos de elasticidad (en este caso los módulos más altos) y que a su vez pueden soportar cargas mayores antes de llegar a la cedencia del material.

*Tabla 3. 3. Subconjunto de materiales de los diagramas*

Materiales con mejores propiedades de cada diagrama				
Mapa de materiales	1	2	3	4
Diagrama módulo de Young vs Densidad	Cerámicas técnicas	Metales	Materiales compuestos	Materiales naturales
Diagrama Esfuerzo vs Densidad	Materiales compuestos	Metales	Cerámicas	Materiales Naturales
Diagrama Módulo de Young vs Esfuerzo de cedencia	Metales	Cerámicas técnicas	Materiales compuestos	Materiales naturales
Diagrama Tenacidad a la Fractura vs Módulo de Young	Metales	Materiales compuestos	Materiales naturales	Cerámicas técnicas
Diagrama Tenacidad a la Fractura vs Límite elástico	Metales	Materiales compuestos	Cerámicas técnicas	Madera
Diagrama Esfuerzo vs Temperatura	Cerámicos	Metales	Materiales compuestos	Polímeros
Diagrama Módulo de Young vs Costo Relativo	Cerámicas técnicas	Metales	Cerámicas no Técnicas	Materiales Naturales
Diagrama Esfuerzo vs Costo relativo	Metales	Cerámicas técnicas	Materiales naturales	Polímeros y elastómeros



Con los datos de la Tabla 3. 3 se generó una tabla de cálculo que permite dar una valoración cuantitativa de los grupos de materiales. A los materiales que se encuentran en la columna 1 se les asigna un valor de 10, a los materiales que están en la columna 2 se les asigna un valor de 9, a los materiales que están en la columna 3 se les asigna un valor de 8 y a los materiales que están en la columna 4 un valor de 7. Una vez asignados los valores se realiza una suma de puntos acumulados por cada material por cada diagrama obteniéndose la siguiente tabla de puntuación.

*Tabla 3. 4. Puntuación de subconjunto de materiales*

Metales	76
Cerámicas	70
Materiales compuestos	42
Materiales naturales	51
Polímeros y elastómeros	7

De la Tabla 3. 4 se puede verificar que el subconjunto de materiales más adecuado para el diseño de la estructura del modelo Fresnel-SATCF son los metales.



### 3.4.2.3 Información de Soporte:

Los metales son unos materiales de enorme interés. Se usan muchísimo en la industria, pues sus excelentes propiedades de resistencia y conductividad son de gran utilidad en la construcción de máquinas, estructuras, mecanismos, circuitos y herramientas.

En la Tabla 3. 5 se muestran las principales características y aplicaciones de los metales

Tabla 3. 5. Características y aplicaciones de los metales

Metal	Características	Aplicaciones
<b>Acero</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Las propiedades físicas del acero y su comportamiento a distintas temperaturas varían según la cantidad de carbono y su distribución en el hierro.</li><li>-Antes del tratamiento térmico, son una mezcla de tres sustancias: la ferrita, (blanda y dúctil), la cementita, (dura y frágil) y la perlita, (una mezcla de ambas) y de propiedades intermedias.</li><li>-Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está compuesto por perlita.</li><li>-El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita.</li><li>-Al elevar la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en austenita, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal.</li><li>-Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y en perlita, pero si el enfriamiento es repentino, la austenita se convierte en martensita, de dureza similar a la ferrita.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Elaboración de herramientas, instrumentos y elementos para las construcciones civiles, de buques y automóviles.</li><li>-Casas y edificios (Estructuras resistentes fabricadas en acero dan forma a edificios, rascacielos y viviendas unifamiliares).</li><li>-Puentes: modernos, colgantes, de arco, de vigas triangulados,... ...</li><li>-Esculturas contemporáneas.</li><li>-Veleros, buques.</li><li>-Envases</li><li>-Pilotes</li><li>-Apuntaladotes.</li><li>-El acero es más resistente y más duro que el hierro forjado, (que es prácticamente hierro puro).</li><li>-Utensilios de cocina.</li><li>-Barandillas.</li></ul>



<b>Cobre</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Resistencia a la corrosión.</li><li>-Muy dúctil y maleable.</li><li>-Punto de fusión: 1083 °C</li><li>-Punto de ebullición: 2567 °C</li><li>-Densidad: 8,9 g/cm<sup>3</sup>.</li><li>-Masa atómica: 63,546</li><li>-Buena estética.</li><li>-Conductor del calor y la electricidad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Industria: (transformación en cables, maquinaria eléctrica, etc....)</li><li>-Acuñación de monedas.</li><li>-Confección de útiles de cocina y objetos ornamentales.</li><li>-Reforzar la quilla de los barcos de madera.</li><li>-producción de electrotipos.</li></ul>
<b>Estaño</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Nº atómico: 50.</li><li>-Muy dúctil.</li><li>-Maleable a 100°.</li><li>-Atacado por los ácidos fuertes.</li><li>-Metal blanco plateado.</li><li>-Por debajo de 13 °C se transforma en estaño gris (polvo amorfo grisáceo), también llamado peste o enfermedad del estaño.</li><li>-Al doblarlo emite un sonido crepitante (grito del estaño).</li><li>-Punto de fusión: 232 °C</li><li>-Punto de ebullición: 2.260 °C</li><li>-Densidad relativa: 7,28 g/ml</li><li>-Masa atómica: 118,711</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Se utiliza en: centrales de procesos industriales.</li><li>-La hojalata (lámina de hierro o acero recubierta de estaño) se usa como capa protectora.</li><li>-El estaño se alea con: cobre, plomo, antimonio, etc... para: la soldadura, la imprenta, la industria aeroespacial y como ingrediente en algunos insecticidas.</li></ul>
<b>Aluminio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Elemento metálico más abundante en la corteza.</li><li>-Nº atómico: 13</li><li>-Densidad: 2,7 g/ml</li><li>-Color plateado.</li><li>-Muy ligero.</li><li>-Punto de ebullición: 2.467 °C</li><li>-Metal muy electro positivo y altamente reactivo.</li><li>-Al contacto con el aire caliente se corroe.</li><li>-Tiene la propiedad de reducir compuestos metálicos a metales básicos.</li><li>-Es conductor térmico y eléctrico.</li></ul>	<p>Se usa para:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>-Construir aviones, vagones de tren, automóviles, etc.....</li><li>-Utensilios de cocina.</li><li>-Papel aluminio.</li><li>-Pistones de motores de combustión interna.</li><li>-Para hacer alambre.</li><li>-Reactores nucleares.</li><li>-En la construcción.</li><li>-Mecanismos acuáticos.</li><li>-Multitud de usos de sus aleaciones.</li><li>-Envoltorios.</li></ul>
<b>Cinc</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Elemento metálico azulado con aplicaciones industriales</li><li>-Frágil a temperaturas ordinarias</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Actúa como capa protectora para el hierro o el acero</li><li>-las placas de las pilas (baterías)</li></ul>



	<ul style="list-style-type: none"><li>- N° atómico:30</li><li>- El Cinc puro es cristalino, es insoluble en agua, pero soluble en alcohol, ácidos y en álcalis.</li><li>-Maleable entre: 420 °C y 150 °C</li><li>-Punto de fusión: 907 °C</li><li>-Densidad: 7,14 g/ml</li><li>-Masa atómica: 65,409.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-En las fundiciones a troquel</li><li>-El óxido de cinc se utiliza en el pigmento de la pintura</li><li>-Rellenar las llantas de goma</li><li>-Pomadas antisépticas (medicina)</li><li>-Fluidos soldadores.</li></ul>
<b>Magnesio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Elemento metálico plateado no reactivo</li><li>-N° atómico: 12</li><li>-Es maleable y dúctil cuando se calienta</li><li>-2º metal más ligero</li><li>-Reacciona con ácidos y a 800 °C reacciona con oxígeno emitiendo una luz radiante</li><li>-Punto de Fusión: 649 °C</li><li>-Punto de ebullición: 1107 °C</li><li>-Densidad: 1,74 g/ml</li><li>-Masa atómica: 24,305.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Material refractario, aislable</li><li>-Material de relleno</li><li>-Fabricación de papel, cemento, cerámica, en la medicina (productos efervescentes), refinación del azúcar, como materia, refractario y aislante, en cosméticos, fundiciones de piezas de transportes, miembros artificiales, aspiradoras, instrumentos ópticos, esquís, carretillas, cortadoras de césped, muebles de exterior, en falsees fotográficos, bombas incendiarias, señales luminosas, desoxidación de los metales y como afinador de vacío.</li></ul>
<b>Bronce</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Los componentes varían</li><li>-Cuando hay al menos un 10% de estaño tiene un punto de fusión bajo</li><li>-Es más duro y resistente que otras aleaciones (menos el acero).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Se usa: para las herramientas, la acuñación de las monedas, producción de armas, fabricación de objetos sonoros..... etc</li></ul>
<b>Latón</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Muy dúctil.</li><li>-Puede forjarse en planchas finas.</li><li>-Su maleabilidad depende de la composición, la temperatura y la mezcla con otros metales.</li><li>-Se vuelve quebradizo al acercarse a la temperatura de fusión.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Se puede fabricar: alambre.</li><li>-Figuras artísticas.</li><li>-También tiene incontables usos en la metalistería.</li></ul>
<b>Hierro</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Es un elemento metálico, magnético, maleable y de color blanco plateado.</li><li>-N° atómico: 26</li><li>-Dureza: oscila entre 4 y 5.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-El hierro puro, tiene un uso limitado</li><li>-La mayor parte del hierro se utiliza en formas sometidas a un</li></ul>



	<ul style="list-style-type: none"><li>-Es blando, maleable y dúctil.</li><li>-Se magnetiza fácilmente a temperatura ordinaria (es difícil magnetizarlo en caliente)</li><li>-A 790 °C desaparecen las propiedades magnéticas.</li><li>-Punto de fusión: 1.535 °C,</li><li>-Punto de ebullición: 2.750 °C</li><li>-Densidad relativa: 7,86 g/ml</li><li>-Masa atómica: 55,845 u.</li><li>-Es un metal activo.</li><li>-Se combina con (flúor, cloro, bromo, yodo y astato) y con el azufre, fósforo, carbono y silicio.</li><li>-Arde con oxígeno.</li><li>-Expuesto al aire húmedo, se corroe, (una sustancia pardo-rojiza, escamosa, conocida como herrumbre).</li><li>-El hierro reacciona con el oxígeno.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>tratamiento especial, (como el hierro forjado, el hierro colado y el acero).</li><li>-El hierro puro se utiliza para obtener láminas metálicas galvanizadas y electroimanes.</li><li>-Los compuestos de hierro se usan en medicina para el tratamiento de la anemia.</li><li>-En la antigüedad era utilizado como adorno y para fabricar armas.</li></ul>
<b>Aleaciones de Titanio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-El titanio es un metal considerado ligero. Si bien su peso es superior al de otros metales ligeros como el aluminio o el magnesio, su relación peso/resistencia es muy superior.</li><li>-Estado ordinario: Sólido</li><li>-Punto de fusión: 1668 °C,</li><li>-Punto de ebullición: 3287 °C</li><li>-Densidad relativa: 4.507 g/ml</li><li>-Masa atómica: 47.867 u.</li><li>-Es un metal activo.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Aplicaciones biomédicas</li><li>-En la industria energética<ul style="list-style-type: none"><li>*Sistemas de intercambio térmico</li><li>*En unidades de desulfuración</li></ul></li><li>-Industria automovilística</li><li>-Industria militar</li><li>-Industria aeronáutica y espacial</li><li>-Construcción naval</li><li>-Industria relojera</li><li>-Joyería</li><li>-Instrumentos deportivos</li></ul>

### 3.4.2.3.1 Principales candidatos

De la Tabla 3. 5 es posible destacar los siguientes metales principalmente por sus características y aplicaciones, que se refleja directamente en el peso del modelo.

1. Hierro  $\rho=7.874$  g/ml
2. Acero  $\rho=7.86$  g/ml
3. Aluminio  $\rho=2.7$  g/ml



### 3.4.2.3.1 Condiciones locales

Con la finalidad de visualizar el comportamiento del material bajo las condiciones ambientales, se realiza un análisis del material con un diagrama de ataque ambiental, el cual proporcionará información del comportamiento del material en el medio ambiente de trabajo.

#### Diagrama de ataque ambiental

Todos los materiales de ingeniería son reactivos químicos. La reacción puede tomar varias formas, de las más comunes son la corrosión y oxidación.

Algunos de estos producen una delgada capa de adherente estable, con pérdidas despreciables del material base, éstas son, en general de carácter protector.

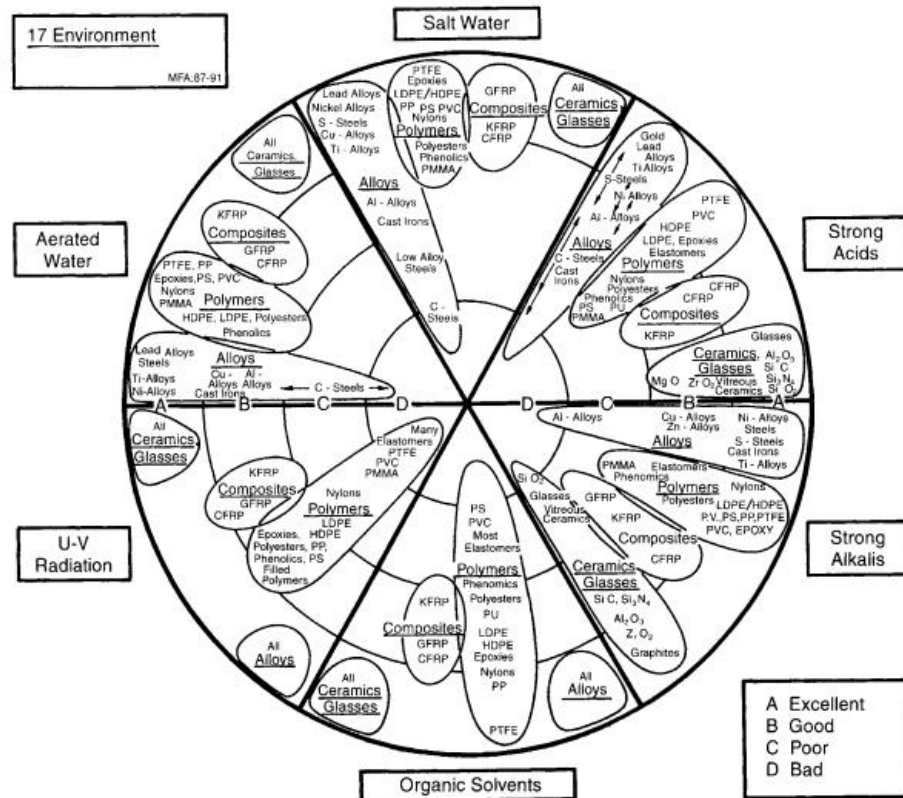


Figura 3. 9. Diagrama de ataque ambiental [39]

Otras son más perjudiciales, pueden reducir la sección por disolución estable o desprendimiento de productos sólidos de corrosión, por penetración (en metales) en las fronteras de granos o induciendo el cambio químico por interdifusión (en polímeros) ellos reducen la capacidad efectiva de carga sin pérdida aparente de sección. Y entre



estos los más perjudiciales son aquellos para los cuales la pérdida de capacidad de carga incrementa linealmente, más que parabólicamente, con el tiempo, esto es, la razón de daño (en una temperatura fija) es constante.

Comúnmente, el rango de resistencia de un material al ataque en un ambiente dado se escala desde A (excelente) a D (malo).

Su utilidad es muy limitada; en el mejor de los casos notifica un ambiente potencialmente peligroso con el uso de un material dado.

Con respecto al diagrama de ataque ambiental (Figura 3. 9) el comportamiento general del material es como se diagnostica a continuación.

Tabla 3. 6. Comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones ambientales

Condiciones ambientales	Acero	Aleaciones de aluminio	Hierro
Fuertemente ácidas	Bueno	Buena	Bueno
Fuertemente alcalinas	Excelente	Pobre	Pobre
Disolventes orgánicos	Excelente	Excelente	Bueno
Radiación U-V	Excelente	Excelente	Excelente
Alta humedad	Excelente	Buena	Bueno
Agua salada	Excelente	Buena	Bueno

De la Tabla 3. 6 se puede visualizar que el acero presenta comportamiento excelente bajo las condiciones ambientales más extremas de funcionamiento. Para el caso del Aluminio se presentan en general buenas condiciones de operación.

### 3.4.3 Elección del Material

El último parámetro a tomar en cuenta antes de seleccionar el material es el costo del mismo. Utilizando el diagrama de costos de la Figura 3. 10 es posible visualizar el rango de precios comerciales de algunos metales.





Diagrama Costo aproximado por unidad de masa vs Clase de material

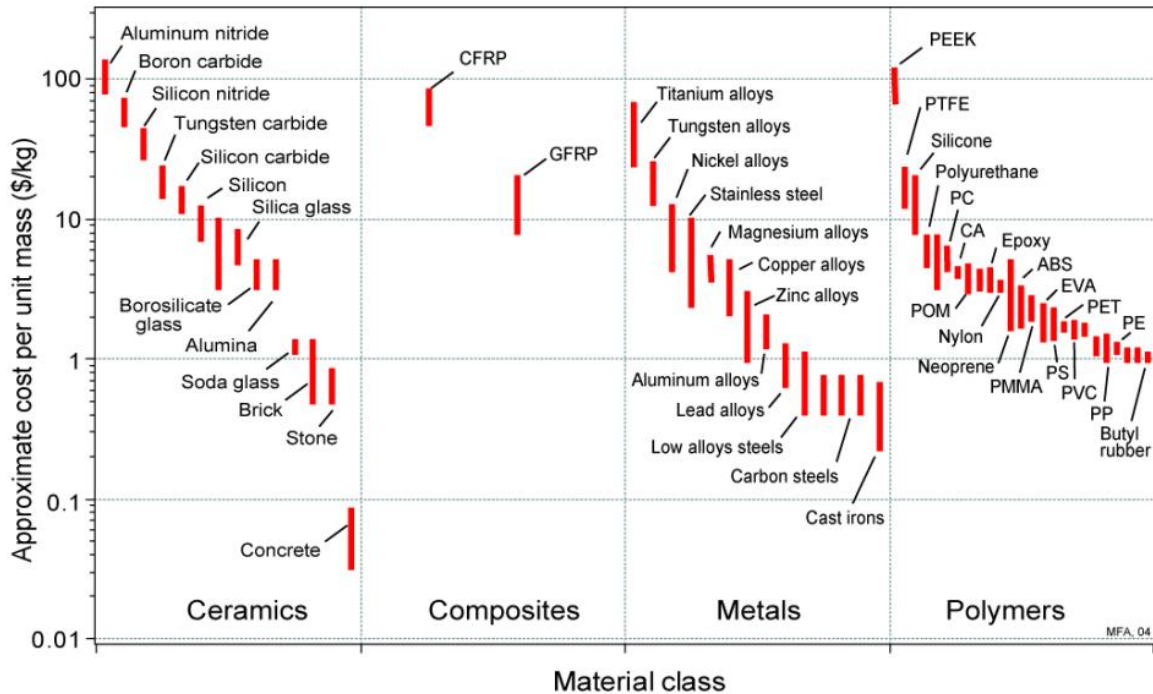


Figura 3. 10 Diagrama Costo aproximado por unidad de masa vs Clase de materia. [38]

De la Figura 3. 10. Se puede identificar claramente el precio de cada material por unidad de masa, analizando el diagrama es posible seleccionar el material de los tres candidatos.

Para el caso del Aluminio, este se observa con costos más elevados que el Hierro y el Acero. Por otro lado el Acero presenta comportamientos excelentes bajo cualquier condición ambiental y éste tiene los precios en el mismo rango que el Hierro (aunque el hierro un rango más amplio hacia abajo en precios), por lo que el material ideal para el presente proyecto es el Acero.



# CAPÍTULO IV

# ANÁLISIS TERMO- ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTO FINITO



## 4.1 Bases teóricas aplicadas de elementos finitos.

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física, pensado para ser usado en computadoras y permitir la resolución de ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas, el MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales.

### 4.1.1 introducción

Las limitaciones de la mente humana son tales que no puede comprender el comportamiento del complejo mundo que lo rodea en una sola operación global. Por ello, una forma natural de proceder de ingenieros, científicos, e incluso economistas, consiste en separar los sistemas en sus componentes individuales, o “elementos”, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, y a continuación reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes.

En muchos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos. A tales problemas se les denomina discretos. En otros, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimo. Lo cual conduce a las ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número finito de elementos implicados. A tales sistemas se les conoce como continuos.

Con la llegada de las computadoras digitales, los sistemas discretos pueden resolverse generalmente sin dificultad, aun cuando el número de elementos sea muy elevado. Como la capacidad de las computadoras es finita, los problemas continuos sólo se pueden resolver de forma exacta mediante manipulaciones matemáticas. En este aspecto, las técnicas matemáticas disponibles suelen limitar las posibilidades a casos extremadamente simplificados.

Para vencer la indocilidad que supone la solución de problemas continuos reales, ingenieros y matemáticos han propuesto a través de los años diversos métodos de discretización.

La discretización de problemas continuos ha sido abordada de manera diferente por matemáticos e ingenieros. Los primeros han desarrollado técnicas directamente aplicables a las ecuaciones diferenciales que rigen el problema, tales como aproximaciones por diferencias finitas, diferentes métodos de residuos ponderados, o



técnicas aproximadas para determinar puntos estacionarios de funcionales definidos en forma apropiada. Los ingenieros, por otra parte, suelen enfrentarse al problema más intuitivamente creando una analogía entre elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo

#### 4.1.2 Esfuerzos y equilibrios.

En la Figura 4. 1 se muestra un cuerpo tridimensional que ocupa un volumen  $V$  y tiene una superficie  $S$ . Los puntos en el cuerpo están identificados por las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . La frontera del cuerpo se restringe a la región donde se especifica el desplazamiento. Sobre una parte de la frontera se aplica una fuerza distribuida por unidad de área  $T$ , llamada tracción. Debido a la acción de la fuerza se deforma el cuerpo. La deformación en un punto  $x(=[x, y, z]^T)$  está dada por las tres componentes de su desplazamiento:

$$u = [u, v, w]^T \quad 4. 1$$

La fuerza distribuida por unidad de volumen, por ejemplo, el peso por unidad de volumen, es el vector  $f$  dado por

$$f = [f_x, f_y, f_z]^T \quad 4. 2$$

En la Figura 4. 1 se muestra la fuerza de cuerpo actuando sobre el volumen elemental  $dV$ . La tracción superficial  $T$  puede darse por el valor de sus componentes en puntos sobre la superficie.

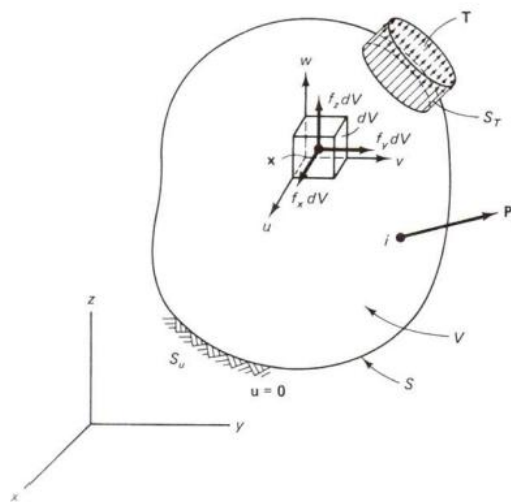


Figura 4. 1 Cuerpo Tridimensional [40].



$$T = [T_x, T_y, T_z]^T \quad 4.3$$

Ejemplos de tracción son las fuerzas de contacto distribuidas y la acción de la presión. Una carga actuando en un punto  $i$  se representa por sus tres componentes:

$$P_i = [P_x, P_y, P_z]^T_i \quad 4.4$$

En la Figura 4.2 se muestran los esfuerzos que actúan sobre el volumen elemental  $dV$ . Cuando el volumen  $dV$  "Se contrae" a un punto, el tensor de esfuerzo se representa colocando sus componentes en una matriz simétrica (3x3). Sin embargo, los esfuerzos se representan por medio de sus seis componentes independientes como sigue:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad 4.5$$

Donde  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  son esfuerzos normales y  $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$  son esfuerzos cortantes. Considere el equilibrio del volumen elemental mostrado en la Figura 4.2. Primero se obtienen las fuerzas sobre las caras multiplicando los esfuerzos por las áreas correspondientes. Escribiendo  $\sum F_x = 0$ ,  $\sum F_y = 0$ ,  $\sum F_z = 0$ , y recordando que  $dV = dx dy dz$ , se obtienen las ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad 4.6$$

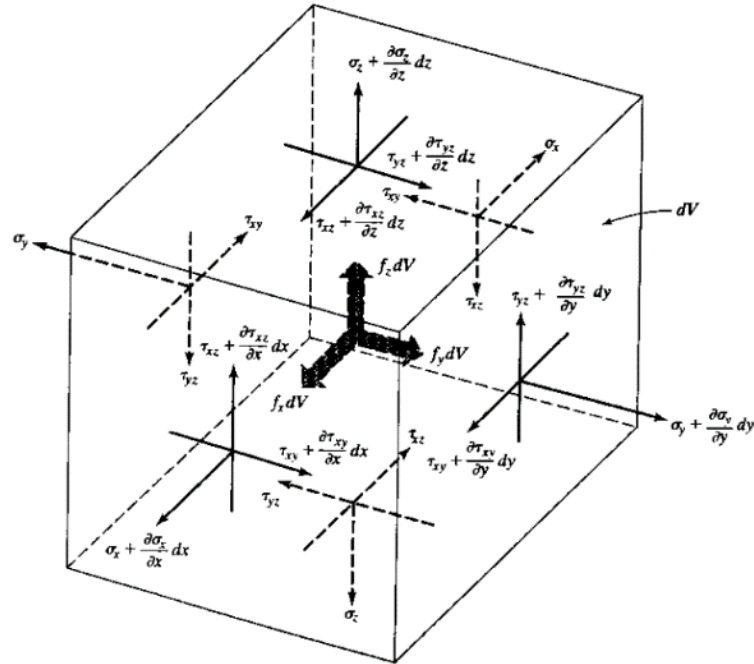


Figura 4.2 Equilibrio de un volumen elemental [40].

### 4.1.3 Condiciones de frontera.

Refiriéndose a la Figura 4. 1, se observa que existen condiciones de desplazamiento en la frontera y condiciones de carga en la superficie. Si  $u$  se especifica sobre la parte de la frontera denotada por  $s_u$  se tiene:

$$u = 0 \quad \text{sobre } S_u \quad 4.7$$

También se pueden considerar condiciones de frontera tales como  $u = a$ , donde "a" es un desplazamiento.

Considerando ahora el equilibrio del tetraedro elemental ABCD, mostrado en la Figura 4.3, donde DA, DB y DC son paralelas a los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente, y  $dA$  es el área definida por los vértices ABC. Si  $n = [n_x, n_y, n_z]^T$  es la normal unitaria a  $dA$ , entonces el área  $BDC = n_x dA$ , el área  $ADC = n_y dA$  y el área  $ADB = n_z dA$ . La consideración del equilibrio a lo largo de los tres ejes coordenados da:

$$\begin{aligned} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z &= T_x \\ \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z &= T_y \\ \tau_{xz} n_x + \tau_{yz} n_y + \sigma_z n_z &= T_z \end{aligned} \quad 4.8$$



Estas condiciones deben satisfacerse sobre la frontera  $S_T$ , donde se aplican las tracciones. En esta descripción, las cargas puntuales deben tratarse como cargas distribuidas sobre áreas pequeñas pero finitas.

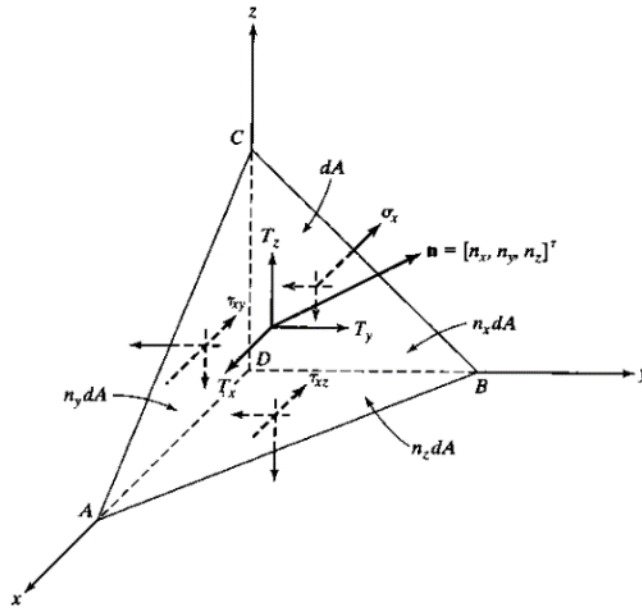


Figura 4.3 Volumen elemental en la superficie [40].

#### 4.1.4 Relaciones desplazamiento-deformación unitaria.

Se representa la deformación unitaria en una forma vectorial que corresponde a los esfuerzos en la Ecuación 4. 5.

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \quad 4. 9$$

Donde  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  son las deformaciones unitarias normales  $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$  son las deformaciones angulares unitarias cortantes.

La Figura 4.4 da las deformaciones de la cara  $dx - dy$  para pequeñas deformaciones, las cuales serán consideraciones aquí. Tomando también las otras caras, es posible escribir.

$$\varepsilon = \left[ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad 4. 10$$



Estas relaciones para deformaciones unitarias se cumplen para pequeñas deformaciones.

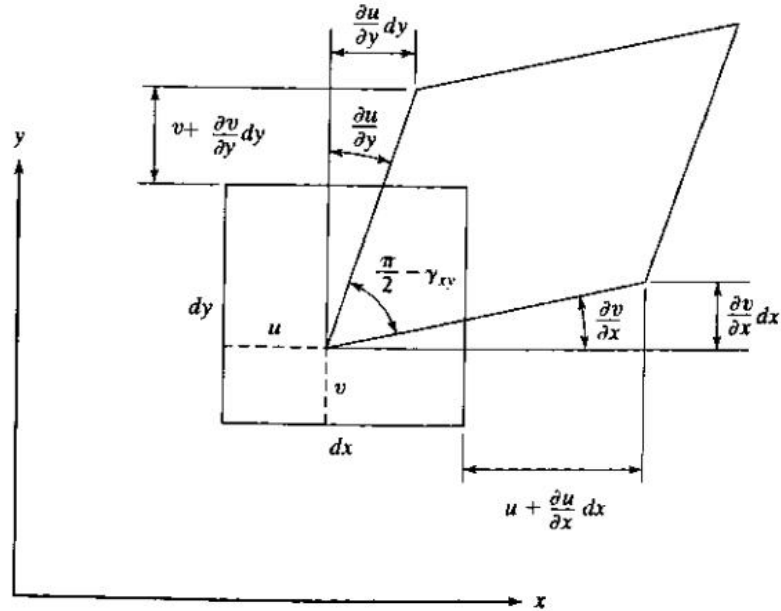


Figura 4.4 Superficie elemental deformada [40].

#### 4.1.5 Relaciones esfuerzo-deformación unitaria.

Para materiales elásticos lineales, las relaciones esfuerzo-deformación unitaria provienen de la ley de Hooke generalizada. Para materiales isotrópicos, las dos propiedades del material son el módulo de Young (o módulo de elasticidad)  $E$  y la relación de Poisson  $\nu$ . Si se considera un cubo elemental dentro de un cuerpo, la ley de Hooke se representa como:





$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad 4. 11$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

El módulo de corte (o módulo de rigidez) G está dado por

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 4. 12$$

De la ley de Hook (Ecuación 4. 11) se nota que

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1-2\nu)}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad 4. 13$$

Sustituyendo para  $(\sigma_y + \sigma_z)$  en ecuación 4. 11 se tiene la relación inversa.

$$\sigma = D\varepsilon \quad 4. 14$$

“D” es la matriz simétrica del material dada por

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad 4. 15$$

#### 4.1.5.1 Casos especiales

**Una dimensión.** En una dimensión, existen esfuerzos normales  $\sigma$  a lo largo de  $x$ , así como la deformación unitaria correspondiente  $\varepsilon$ . La relación esfuerzo deformación unitaria (Ecuación 4. 14) es:

$$\sigma = E\varepsilon \quad 4. 16$$



**Dos dimensiones.** En dos dimensiones, los problemas se modelan como esfuerzo plano y deformación unitaria plana.

**Esfuerzo plano.** Se dice que un cuerpo plano delgado sometido a carga plana sobre su borde está en esfuerzo plano. Un ejemplo de esto es un anillo ajustado a presión sobre una flecha. Aquí los esfuerzos  $\sigma_z, \tau_{xz}$ , y  $\tau_{yz}$  se hacen cero. Las relaciones de la Ley de Hook (Ecuación 4. 11) quedan de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu \sigma_y] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu \sigma_x] \\ \varepsilon_z &= -\nu \frac{1}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \end{aligned} \tag{4. 17}$$

La relación inversa está dada por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4. 18}$$

Que suelen escribirse como  $\sigma = D\varepsilon$

**Deformación unitaria plana.** Si un cuerpo largo plano de sección transversal uniforme está sometido a una carga transversal a lo largo de su longitud, un espesor pequeño en el área cargada, como lo muestra la Figura 4.4 puede tratarse como sometido a deformación unitaria plana. Aquí  $\varepsilon_x, \gamma_{xz}$  y  $\gamma_{yz}$  se consideran iguales a cero. El esfuerzo  $\sigma_z$  puede no ser cero en este caso. Las relaciones esfuerzo-deformación unitaria pueden obtenerse directamente de las Ecuaciones 4. 14 y 4. 15:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{4. 19}$$

Aquí “D” es una matriz de (3x3), que relaciona tres esfuerzos con tres deformaciones unitarias.



Los cuerpos anisotrópicos, con orientación uniforme, pueden considerarse usando la matriz “D” apropiada para el material.

#### 4.1.6 Efectos por temperatura

Si se conoce el aumento de temperatura  $\Delta T(x, y, z)$  con respecto al estado original, entonces se puede obtener la deformación asociada. Para materiales isotrópicos, el aumento de temperatura  $\Delta T$  ocasiona una deformación unitaria uniforme que depende del coeficiente de expansión térmica  $\alpha$  del material.  $\alpha$  representa el cambio en longitud por unidad de temperatura, se asume que es constante dentro del intervalo de variación de la temperatura. Esta deformación unitaria tampoco genera esfuerzo cuando el cuerpo tiene libertad para deformarse. La deformación unitaria por temperatura se representa como una deformación unitaria inicial:

$$\varepsilon_0 = [\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0, 0, 0]^T \quad 4.20$$

Entonces, las relaciones esfuerzo-deformación unitaria son:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad 4.21$$

En el **esfuerzo plano**, se tiene

$$\varepsilon_0 = [\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0]^T \quad 4.22$$

En la **deformación unitaria plana** la restricción de que  $\varepsilon_z = 0$  conduce a una  $\varepsilon_0$  diferente:

$$\varepsilon_0 = (1 + \nu)[\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0]^T \quad 4.23$$

Para el esfuerzo plano y la deformación unitaria plana, note que  $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T$  y

$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}]^T$  y que las matrices D son las de las ecuaciones 4. 18 y 4. 19

#### 4.1.7 Esfuerzo de Von Misses

El esfuerzo de Von Misses se usa como un criterio para determinar la aparición de una falla en materiales dúctiles. El criterio de falla establece que el esfuerzo de Von Misses  $\sigma_{VM}$  debe ser menor que el esfuerzo de fluencia  $\sigma_Y$  del material. En forma de desigualdad, el criterio puede escribirse como



$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y \quad 4.24$$

El esfuerzo de Von Misses  $\sigma_{VM}$  está dado por

$$\sigma_{VM} = \sqrt{U = I_1^2 - 3I_2} \quad 4.25$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son las primeras dos invariantes del tensor de esfuerzo. Para el estado general de esfuerzo, expresado por la ecuación 4. 5,  $I_1$  e  $I_2$  están dados por:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad 4.26$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2$$

En términos de los esfuerzos principales  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ , las dos invariantes pueden escribirse como:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1$$

Es fácil verificar que el esfuerzo de Von Misses dado en la ecuación 4. 25 puede expresarse en la forma:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad 4.27$$

Para el estado de esfuerzo plano, se tiene:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y \quad 4.28$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2$$

Y para la deformación unitaria plana:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad 4.29$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2$$

Donde

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

## 4.2 Análisis de Campos Acoplados con el MEF

Un análisis de campos acoplados es una combinación de análisis de diferentes disciplinas de la ingeniería, que interactúan para resolver un problema global de ingeniería, normalmente cuando se trata este tema, se refiere a un análisis multifísico.



Cuando la entrada de un análisis de un campo depende de los resultados de otro análisis, los análisis se acoplan.

Algunos análisis pueden tener una sola vía de acoplamiento. Por ejemplo, en un problema de esfuerzo térmico, el campo de temperatura introduce deformaciones térmicas en el campo estructural, pero las deformaciones estructurales generalmente no afectan la distribución de temperatura. Por lo tanto, no hay necesidad de alternar entre los dos campos de soluciones. Casos más complicados envuelven dos vías de solución. Un análisis piezoeléctrico, por ejemplo, se encarga de la iteración entre los campos estructural y eléctrico: se resuelve la distribución de tensión debido a los desplazamientos aplicados, o viceversa. En un problema fluido-estructural, la presión del fluido provoca deformación en la estructura, que a su vez hace que la solución del fluido cambie. Este tipo de problemas requiere la iteración entre los dos campos físicos para converger.

El acoplamiento entre los campos se puede realizar ya sea por acoplamiento directo (acoplamiento de la matriz) o el acoplamiento secuencial (vector de acoplamiento de carga). La transferencia de cargas puede tomar lugar a través de superficies o volúmenes. El acoplamiento entre campos puede ser complicado ya que diferentes campos pueden ser resueltos por diferentes tipos de análisis durante una simulación. Por ejemplo, en un problema de calentamiento por inducción, un análisis electromagnético armónico se calcula el efecto Joule, el cual es usado en un análisis térmico transitorio para predecir la solución de la temperatura dependiente del tiempo. El problema de calentamiento por inducción se complica aún más por el hecho de que las propiedades del material, tanto en simulaciones físicas, depende en gran medida de la temperatura.

Algunas de las aplicaciones en las cuales un análisis de campos acoplados puede ser requerido son:

- Recipientes a presión (Análisis de esfuerzos térmicos).
- Flujo de fluidos (Análisis fluido-estructural).
- Calentamiento por inducción (Análisis termo-magnético).
- Transductores ultrasónicos (Análisis piezoeléctrico).
- Formado magnético (Análisis magneto-estructural).
- MEMS (Análisis de sistemas micro-electromecánicos).



## 4.2.1 Tipos de campos acoplados

El procedimiento para realizar un análisis de campos acoplados depende de los campos que sean acoplados, pero dos métodos distintos pueden ser identificados: el secuencial y el directo.

### 4.2.1.1 Método secuencial

El método secuencial envuelve dos o más análisis secuenciales, cada uno perteneciente a un campo diferente.

### 4.2.1.2 Método Directo

El método directo normalmente envuelve sólo un análisis el cual usa un tipo de “elemento de campo acoplado”, dicho elemento contiene todos los grados de libertad necesarios. El acoplamiento se controla mediante el cálculo de matrices de elementos o vectores de cargas de elementos que contienen todos los términos necesarios. Existen varios tipos de elementos que cuentan con estas características.

### 4.2.1.3 Compatibilidad de elementos entre campos acoplados

Son varios los criterios para determinar si los tipos de elementos son compatibles a través de entornos físicos. Por ejemplo:

#### *Geometría base*

La geometría base de un elemento es establecida por la configuración por defecto en la documentación del software utilizado. Para los elementos sólidos, la geometría base incluye triángulos, cuadriláteros, hexaedros (ladrillos), y formas tetraédricas.

#### *Geometría degenerada*

Muchos elementos pueden adquirir una forma degenerada de la geometría base. Por ejemplo, un elemento cuadrilátero puede degenerarse en un elemento triángulo, o un elemento ladrillo en una cuña, un tetraedro en una pirámide.

#### *Orden de los elementos*

Los elementos de ANSYS® (salvo algunos) están disponibles en una forma de orden inferior (de primer orden) o una forma de orden superior (segundo orden). Los elementos de orden superior tienen nodos intermedios, los elementos de orden inferior no. En muchos casos, el diseñador puede generar los elementos de orden superior sin nodos intermedios.

A través de los entornos físicos, los elementos deben mantener una geometría base consistente. Si un tipo de elemento permite una geometría degenerada, el tipo de elemento correspondiente en ambiente físico también deberá permitir la misma geometría degenerada.



En la Tabla 4. 1 se enlistan algunos elementos compatibles a través de los ambientes físicos de interés.

Tabla 4. 1 Tipos de elementos a través de ambientes físicos [41]

AMBIENTE FÍSICO	
Estructural	Térmico
SOLID45	SOLID70
SOLID92	SOLID87
SOLID95	SOLID90
PLANE42	PLANE35
LINK8	LINK33

#### 4.2.1.4 Método directo vs método secuencial

El método directo es ventajoso cuando la interacción entre campos acoplados es altamente no lineal y es mejor resolver en una sola formulación con un solo campo. Ejemplos de acoplamiento directo incluyen el análisis de piezoeléctricos, la transferencia de calor conjugada con el flujo de fluidos, y el análisis de circuitos electromagnéticos.

Para situaciones de acoplamiento en las cuales no se presenta un alto grado de interacción no lineal, el método secuencial es más eficiente y flexible, ya que puede realizar los dos análisis de forma independiente unos de otros. El acoplamiento puede ser recursivo donde las iteraciones entre diferentes campos físicos se realizan hasta lograr un nivel de convergencia deseado. En un análisis termo-estructural, por ejemplo, se puede realizar un análisis térmico transitorio no lineal seguido de un análisis de esfuerzo estático lineal. Posteriormente se puede usar la temperatura nodal de cualquier paso de carga en el análisis térmico como cargas para el análisis de esfuerzos.

### 4.3 Aplicación del método de los elementos finitos (MEF)

Un análisis de campos acoplados es la combinación de análisis de diferentes disciplinas de la ingeniería, las cuales interactúan para resolver un problema global. Por conveniencia la solución y el procedimiento de una disciplina de ingeniería en particular se asocian con un análisis físico. Donde la entrada del análisis físico depende de los resultados de otro análisis, el análisis es acoplado.



De esta manera, cada medio físico diferente tiene que construirse de manera separada para que pueda ser utilizado para determinar la solución física acoplada. Es importante notar que un solo paso de nodos existirá para el modelo entero. Para crear la geometría en el primer medio físico, y utilizar esta con el siguiente medio acoplado, la geometría debe mantenerse libre de restricciones.

En el presente trabajo solo se realizará el modelado estructural, en el sentido de que no se tienen cargas térmicas significativas que puedan afectar el comportamiento del modelo, dado que la zona donde se concentra el calor es un arreglo de tubos ubicados dentro de un dispositivo que se encuentra aislado térmicamente y esta acoplado a la estructura mediante un sistema de cuatro pernos atornillados.

Durante un día de trabajo los valores de temperatura en la estructura no presentan variación significativa más allá de la temperatura ambiental, razón por la cual se propone realizar únicamente un análisis estructural con la ayuda de un software de elemento finito

El análisis se realizará con el Método de Elemento Finito (MEF). El MEF es una técnica muy poderosa que consta de un procedimiento numérico para analizar problemas de ingeniería y física. El procedimiento del MEF es generar sistemas de ecuaciones algebraicas simultáneas, las cuales son ejecutadas y resueltas en una computadora.

Una vez que se tiene la propuesta de la estructura del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF se realiza el modelado en elemento Finito.

Del estudio de materiales se seleccionó el Acero Estructural AISI 304, la siguiente tabla muestra las propiedades mecánicas de este Acero.

Tabla 4. 2 Propiedades mecánicas del Acero Estructura AISI 304

Módulo de elasticidad E (MPa)	$2 \times 10^5$
Densidad $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	7850
Razón de Poisson $\nu$	0.3
Sy (MPa)	215
Su (Mpa)	505

#### 4.3.1 Esfuerzos y equilibrio del caso de estudio

Los esfuerzos y equilibrios a los que estará sometido el modelo se representan principalmente por la acción de la gravedad y las cargas por el peso de los





componentes, como son el peso del concentrador solar, el peso de la base de los espejos y las cargas por efecto del viento.

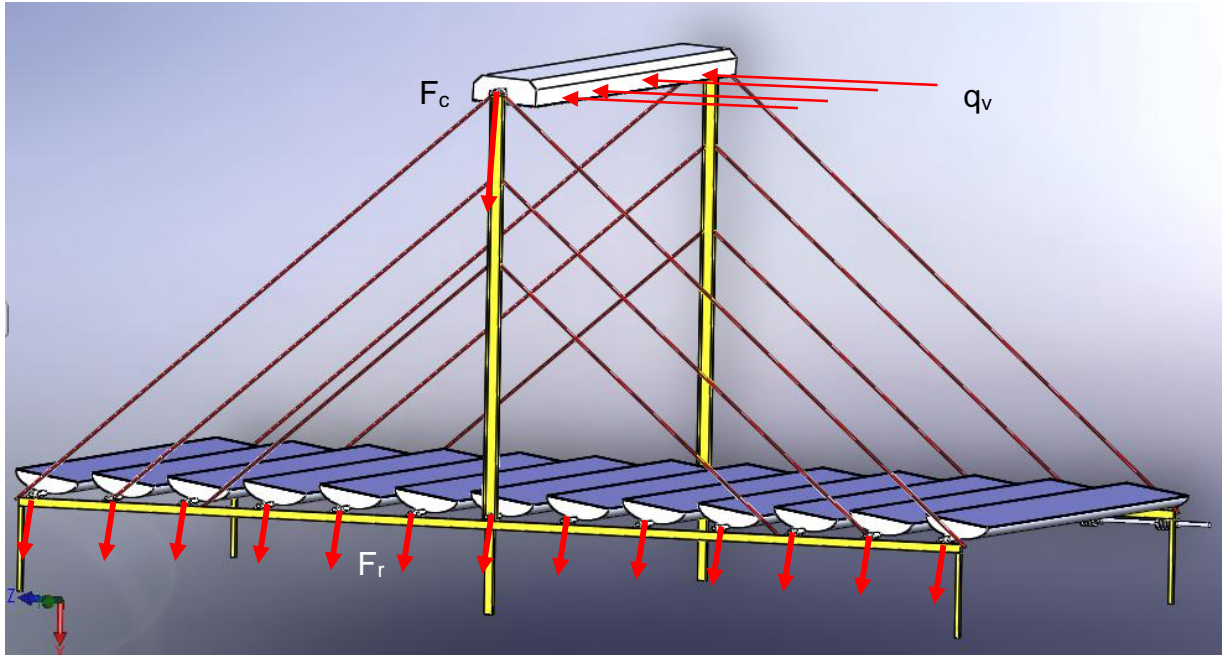


Figura 4.5 Cargas aplicadas a la estructura

Donde:

$q_v$  Es la carga distribuida generada por efecto del viento.

$F_c$  Es la carga del concentrador.

$F_r$  Es la carga de los reflectores.

Donde  $q_v$  se transmite por efecto del viento como una carga distribuida sobre el concentrador solar.

Para este caso se calcula una Fuerza Máxima del viento ejercida sobre la cavidad del concentrador solar.

Para la realización de este cálculo se consideró una velocidad de viento en condiciones extremas, según datos registrados en el municipio de Salamanca, Gto; la velocidad de viento máxima registrada fue de **50.4 km/h** el día 5 de Febrero del 2011 [42]. Por tanto se consideró dicho dato, como punto crítico de referencia.



La acción del viento se considera como una fuerza perpendicular a la superficie de interés, la cual queda expresada como:

$$q_v = P_d \times C_e \times C_p \quad 4.1$$

Donde:

$q_v$  = Fuerza maxima ejercida por el viento

$P_d$  = Presion dinamica del viento

$C_e$  = Coeficiente de Exposicion.

Este coeficiente varía con la altura del punto de interés considerado así como la ubicación de la pared de interés. Se puede obtener de la siguiente tabla.

Tabla 4. 3 Valores del coeficiente de exposición  $C_e$

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I. Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2.2	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.3	3.5
II. Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia.	2.1	2.5	2.7	2.9	3.0	3.1	3.3	3.5
III. Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas.	1.6	2.0	2.3	2.5	2.6	2.7	2.9	3.1
IV. Zona urbana en general, industrial o forestal	1.3	1.4	1.7	1.9	2.1	2.2	2.4	2.6
V. Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura.	1.2	1.2	1.2	1.4	1.5	1.6	1.9	2.0

Se consideró zona urbana en general, industrial o forestal, y como nuestra altura aproximada es de 3.5 m el coeficiente de exposición tomado fue de 1.31.

$C_p$  = Coeficiente eólico o de presión

Depende de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, obtenido de la siguiente tabla



Tabla 4. 4 Valores del coeficiente eólico o de presión.

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	<0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	<5.00
Coeficiente eólico de presión, $C_p$	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
Coeficiente eólico de succión, $C_s$	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.6	0.7

Para el análisis correspondiente, se tomó un valor de 0.7 por ser una superficie que no presenta huecos, orificios o ventanas que generen cargas producidas por el viento al interior del concentrador.

Con respecto a la Presión dinámica del viento, ésta se encuentra en función de la densidad y velocidad del viento, por medio de la siguiente correlación:

$$P_d = 0.5 \times \delta \times V_v^2$$

Donde

$$\delta = \text{densidad del aire} = 1.25 \frac{Kg}{m^3}$$

Sustituyendo...

$$P_d = 0.5 \left( 1.25 \frac{Kg}{m^3} \right) \left( 14 \frac{m}{s} \right)^2 = 122.5 \frac{N}{m^2}$$

Finalmente.

$$q_v = P_d \times C_e \times C_p = 122.5 \frac{N}{m^2} (1.31)(0.7) = 112.3325 \frac{N}{m^2}$$

Considerando un largo de cavidad de 5.5 m y una altura de 0.25 m, se tiene un área lateral efectiva de: 5.75 m<sup>2</sup>

Por lo tanto:

$$F_v = 112.3325 \frac{N}{m^2} (5.75m^2) = \mathbf{645.912 N}$$



$F_c$  corresponde a la carga del concentrador, el dato es proporcionado por personal que se encargó del diseño del equipo referido, el cual tiene una masa de **120 kg**.

$F_r$  Corresponde a la carga de los reflectores, el dato es obtenido del cálculo de masa de la estructura que soportará los reflectores el cual tiene una masa de **120 kg**.

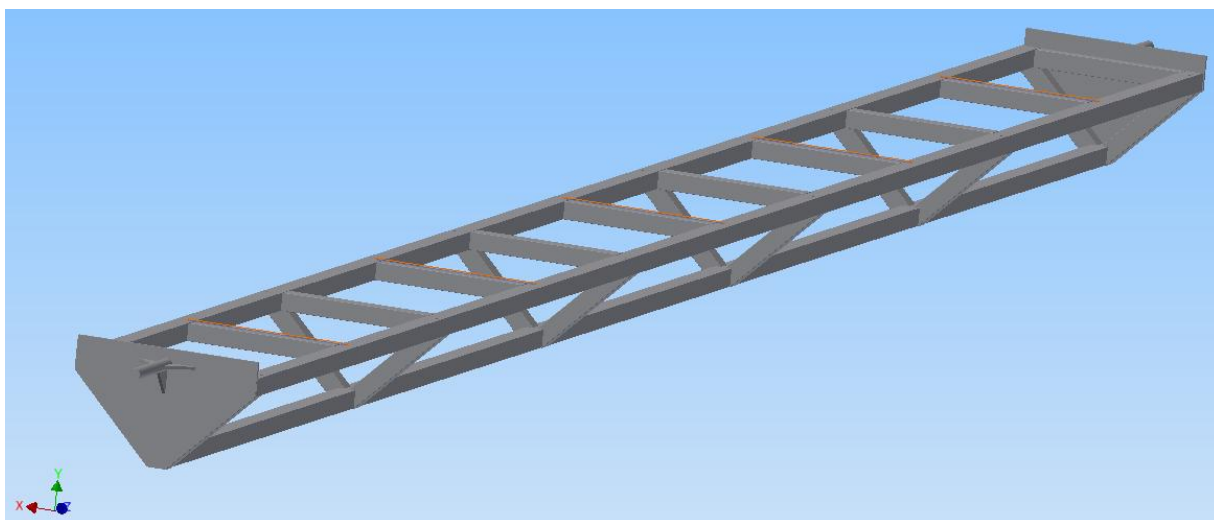


Figura 4.6 Estructura soporte de reflector

Tabla 4. 5 Tabla de materiales de la estructura soporte de reflector.

Perfil	Longitud m	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	Masa kg	Cantidad de perfiles	Peso total kg
PTR 1 ½ X 1 ½ C-14	6	78760		18.42	3	55.26
PTR 1 ½ X 1 ½ C-14	0.3238	78760		1	11	10.93
PTR 1 ½ X 1 ½ C-14	0.256	78760		0.7859	12	9.43
BASE LATERAL CON EJE REDONDO DE 1 IN		78760	0.000561856	4.416	2	8.83

La sola estructura tiene un peso total de **84.46 kg**, el peso restante para los 120 kg corresponde al peso del material reflector.

Las cargas para los espejos son de 120 kg y se muestran por las flechas de color rojo, y las cargas para el concentrador son de 120 kg, ilustradas por las flechas que se encuentran en el extremo superior del mástil.



En la estructura del extremo se aplica una carga por reflector de 60 kg (correspondientes a la mitad del peso de los reflectores que soporta esta viga). Y al centro se aplican los 120 kg (correspondiente a la suma de la mitad de los pesos de los dos reflectores que soporta esta viga).

Tabla 4. 6 Esfuerzos y equilibrios del modelo

Concepto	Masa [kg]	Carga [N]
Concentrador Termo-solar	120	1177.2
Estructura base de los espejos	120	1177.2
Carga por efecto del viento		645.912

### 4.3.2 Condiciones de Frontera del caso de estudio.

El modelo se restringe de desplazamiento en el eje “Z” en cada uno de sus patas o soportes, y también se restringe de movimiento en el eje “X y Y” solo en tres soportes de un extremo para permitir movimiento por dilatación, en función de que dos de sus patas van ancladas al suelo mediante un sistema de cimentación con bases metálicas para ensamblar mediante tuercas y tornillos.

En cuanto a rotación se restringe en las tres direcciones cada uno de los soportes.



# CAPÍTULO V

# DISEÑO DE

# ELEMENTOS

# ESTRUCTURALES

# Y MECANISMOS



## 5.1 Objetivo

Realizar análisis y modelado estructural del SOLAR FRESNEL-SATCF para la determinación de geometría y calibres óptimos de materiales para su construcción. Sometidos a condiciones de lluvia, viento granizo, nevada y calor extremo.

## 5.2 Diseño de la estructura del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF

El alma del equipo de concentración Solar denominado “Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF” es su estructura de soporte, la cual sostendrá el peso de todos los elementos necesarios para el buen desempeño del prototipo.

En la siguiente gráfica se ilustran los principales elementos que van a componer un Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF y que van a ser soportados por la estructura base.

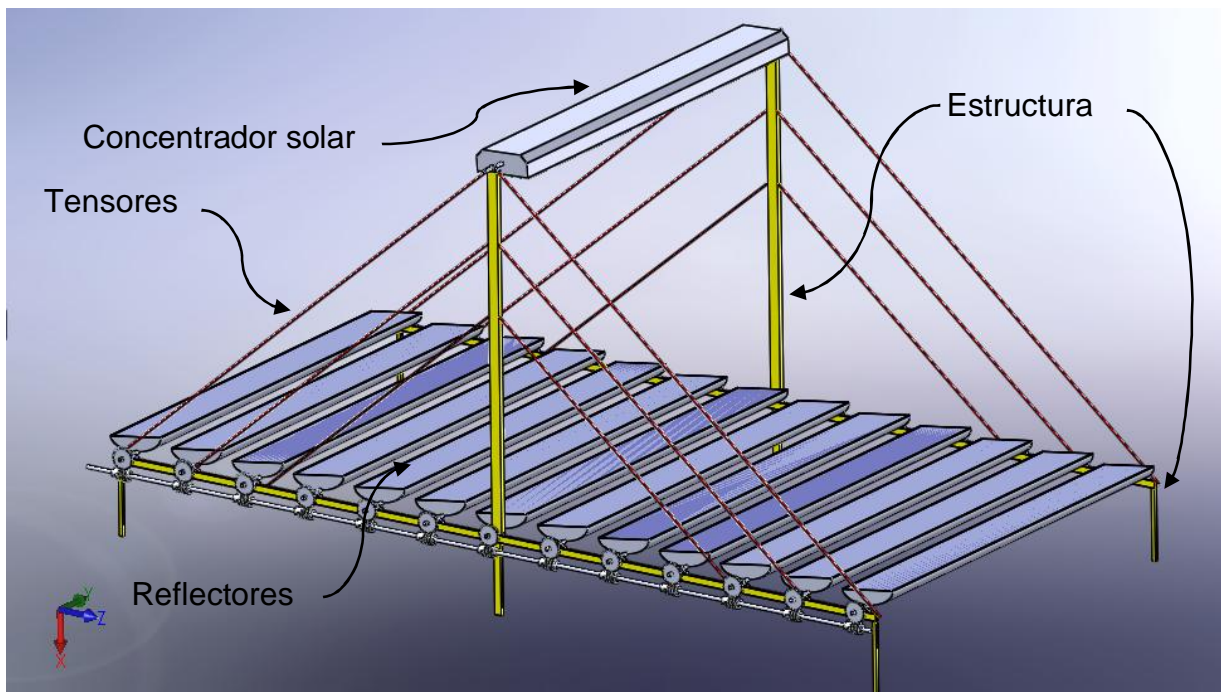


Figura 5. 1 Principales componentes del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF.

Para el modelo de la Figura 5. 1 se propone un arreglo de perfiles estructurales soldados como el que se muestra en la Figura 5. 2.

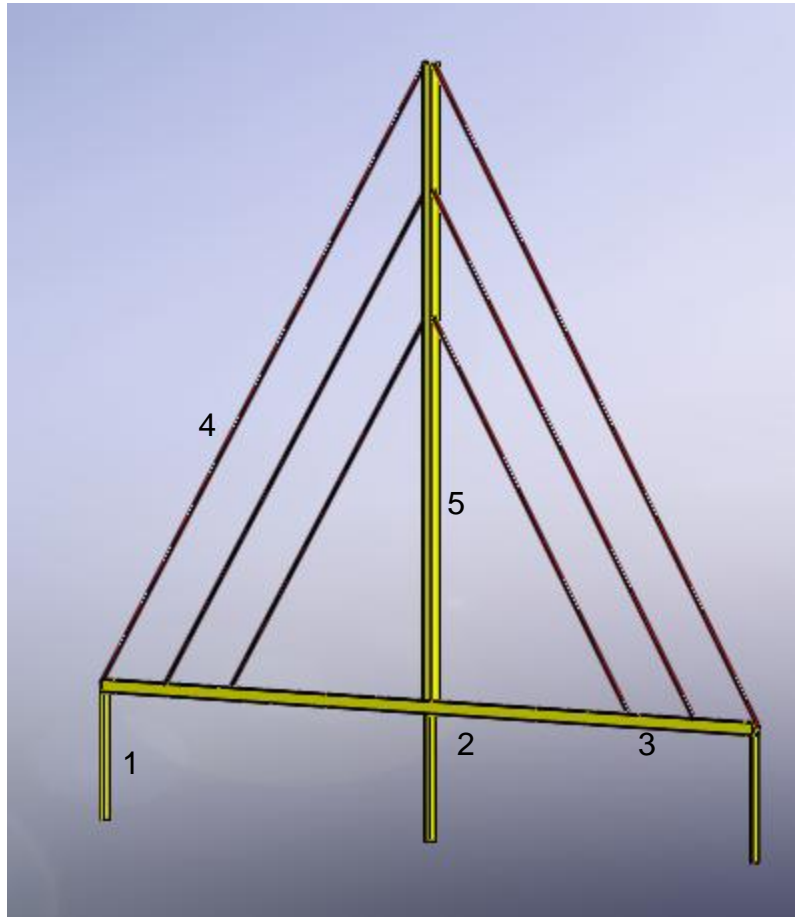


Figura 5. 2 Principales elementos estructurales utilizados en la estructura del modelo.

En la Tabla 5. 1 es posible identificar cada uno de los diferentes perfiles que se utilizan en el modelo.

Tabla 5. 1. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF

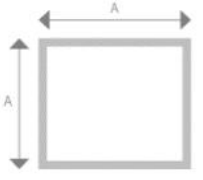
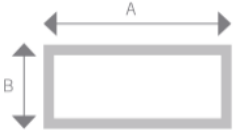
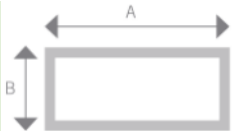

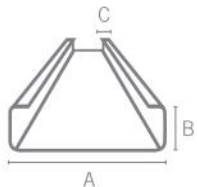
Nomenclatura	Descripción
1	Perfil cuadrado de 1 in por 1.9 mm de espesor
2	Perfil rectangular de 1x2 in de 1.9 mm de espesor
3	Perfil rectangular de 1x2 in de 1.9 mm de espesor
4	Redondo de 9.53 mm de diámetro
5	Perfil tipo C de 3x 1½ in de 1.5 mm de espesor

Es importante mencionar que todos los perfiles utilizados son comerciales y de acero estructural.





Tabla 5. 2. Perfiles utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF

ID	Dimensiones	Sección transversal del perfil
1	Perfil cuadrado de 1 in por 1.9 mm de espesor (C-14)	
2	Perfil rectangular de 1x2 in de 1.9 mm de espesor	
3	Perfil rectangular de 1x2 in de 1.9 mm de espesor	
4	Redondo de 9.53 mm de diámetro	
5	Perfil tipo C de 3x 1½ in de 1.5189 mm de espesor	

### 5.3 Modelado en elemento finito de la estructura del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF

Para la simulación con elemento finito se utilizó el elemento beam188, dicho elemento está basado en teoría de la viga de Timoshenko [43], esta viga incluye efectos de deformación por cortante. El elemento es una viga lineal, cúbica o cuadrática con dos nodos en 3D. Esta viga tiene seis o siete grados de libertad en cada nodo, éstos incluyen traslación en las tres direcciones y rotación también en los tres ejes, el séptimo grado de libertad es opcional. Éste elemento puede aplicarse para deformación lineal, rotación y aplicaciones no lineales.



### 5.3.1 Análisis sin considerar cargas de viento.

En la Figura 5. 3 se puede ilustrar la sencillez del modelo, utilizando únicamente líneas para cada perfil.

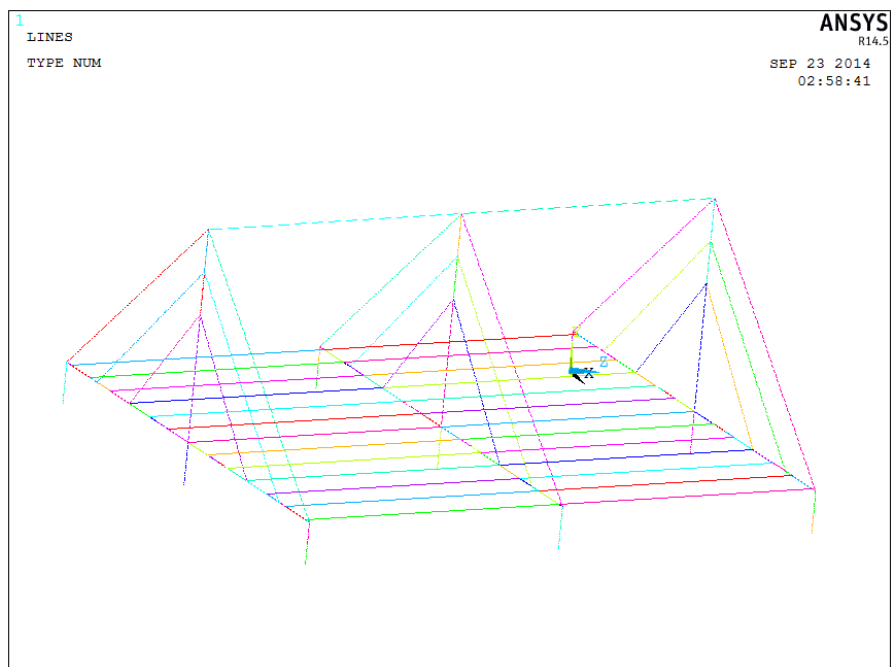


Figura 5. 3 Modelado de la segunda propuesta del modelo perfeccionado

Las restricciones utilizadas son las que se muestran a continuación en la Figura 5. 4.

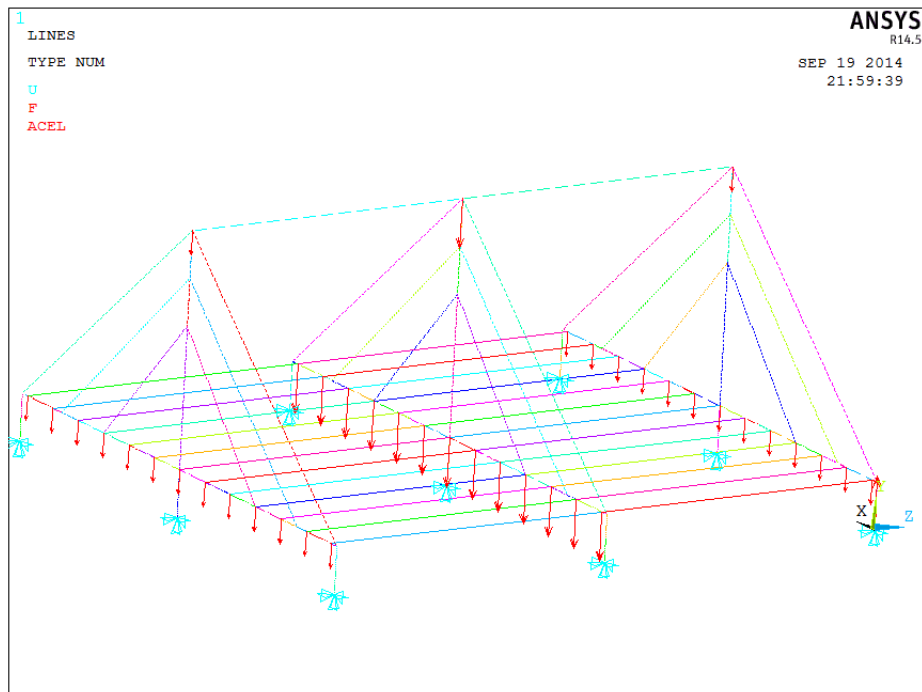


Figura 5. 4 Restricciones para el modelo sin cargas de viento

### 5.3.1.1 Solución del modelo sin cargas de viento.

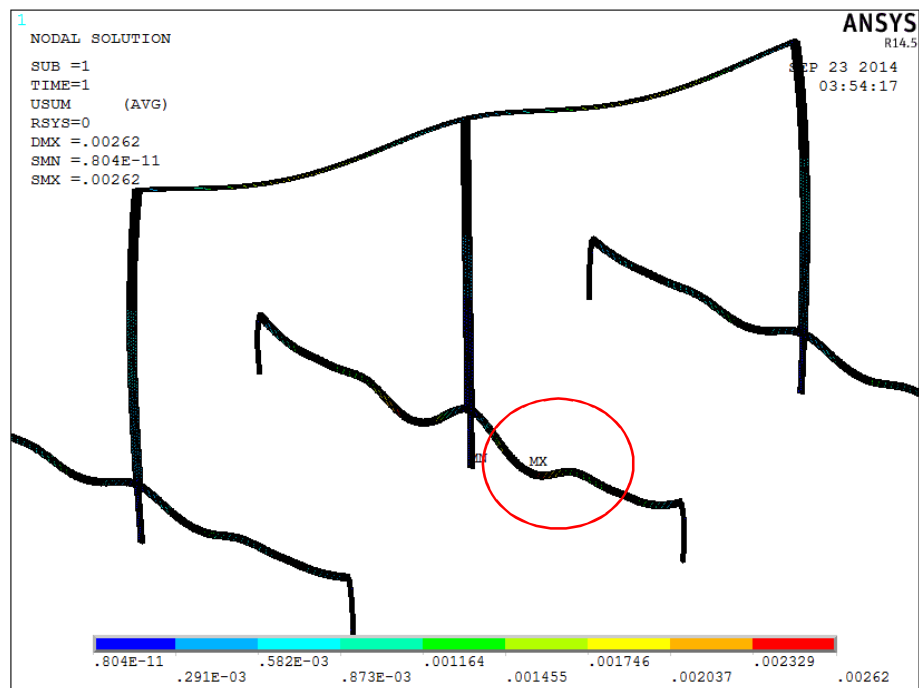


Figura 5. 5 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF



Finalmente cabe mencionar que se utilizó un total de 3962 elementos para la simulación.

De la Figura 5. 5 es posible visualizar que la deformación máxima es de 0.00262 m, lo que equivale a 2.62 mm. La deformación máxima se encuentra en el perfil rectangular de la estructura central marcado con un círculo rojo.

Es importante señalar que se ocultan los tensores porque presentan deformaciones por el propio peso del material como se verá en el análisis realizado con cargas de viento.

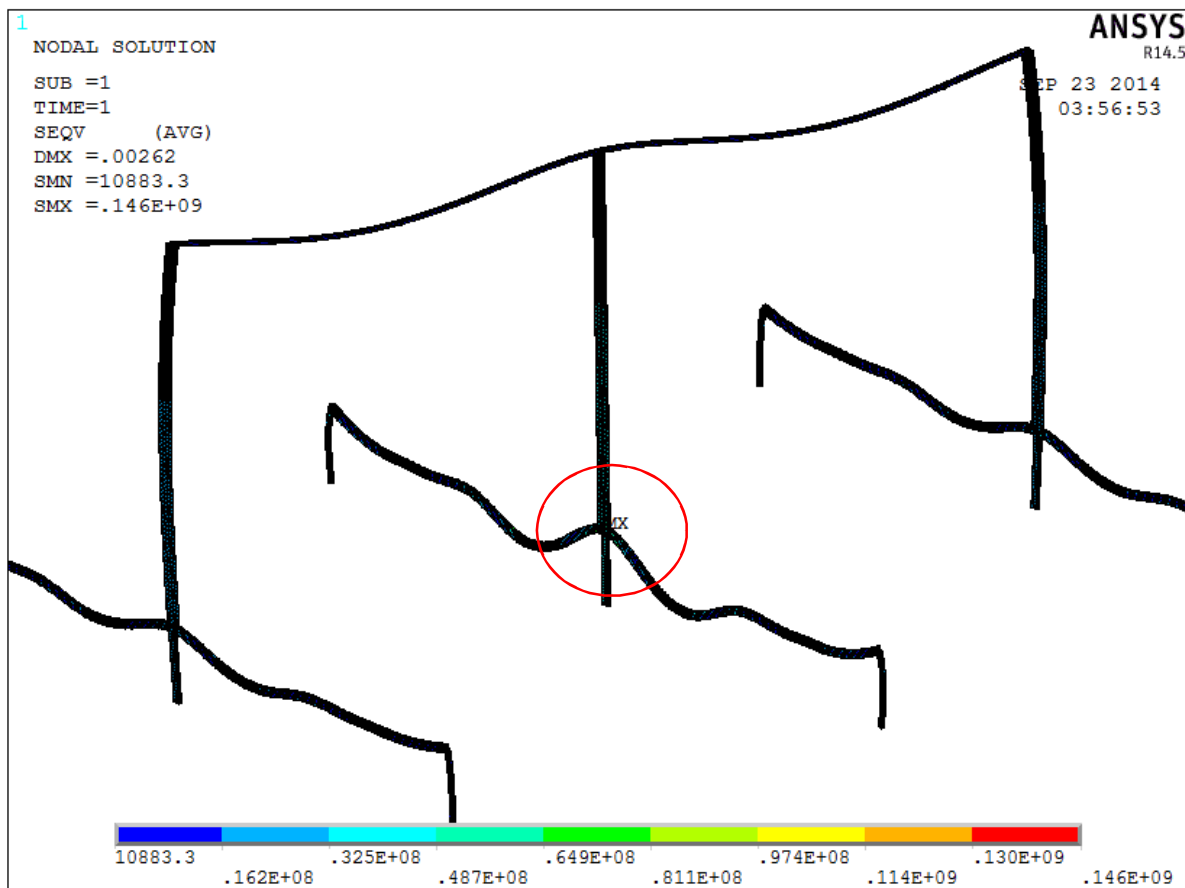


Figura 5. 6 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF

El esfuerzo máximo presente en la estructura es de 146 MPa, y se encuentra en la parte señalada con el círculo rojo, en la estructura del centro. Comparando este resultado con el esfuerzo de cedencia del material que es de 215 MPa, es posible concluir que la estructura soporta perfectamente, incluso tiene un factor de seguridad de:



$$n = \frac{S_y}{S_{\max}} = \frac{215 \text{ MPa}}{146 \text{ MPa}} = 1.4726 \quad (1)$$

Mediante este cálculo se puede concluir que la estructura soporta perfectamente con un factor de seguridad de 1.4726, siempre que esta relación sea mayor que uno se garantiza que la estructura no falla.

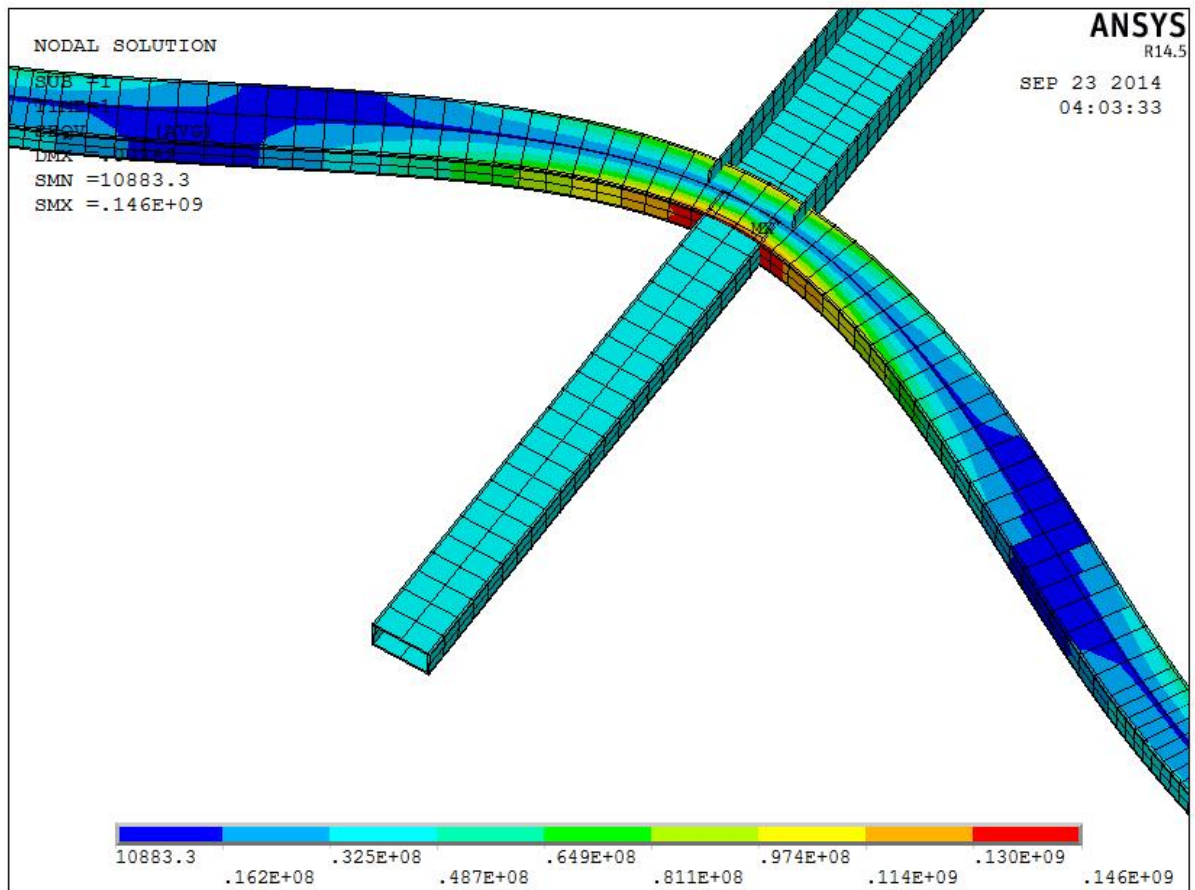


Figura 5. 7 Acercamiento al área de concentración de esfuerzo máximo.

En la Figura 5. 7 se puede ver un acercamiento al área donde se encuentra el esfuerzo máximo, es claro que se presente en el apoyo del centro de la estructura intermedia, debido a que es en este punto donde se concentra la mayor parte de la carga del Solar Fresnel-SATCF, ya que esta base soporta el peso de los espejos de uno y del otro lado, así como el peso de los dos concentradores del arreglo.



### 5.3.2 Análisis considerando cargas de viento.

Para este análisis se tomó una carga efectiva de 645.912 N distribuida en 3 puntos, en la parte superior de los mástiles de los extremos y el del centro. Por lo que las cargas puntuales aplicadas al concentrador son de 215.304 N, como se muestra en la siguiente Figura de cargas por Keypoint.

Las cargas aplicadas al modelo se muestran en la siguiente Figura, las unidades son N.

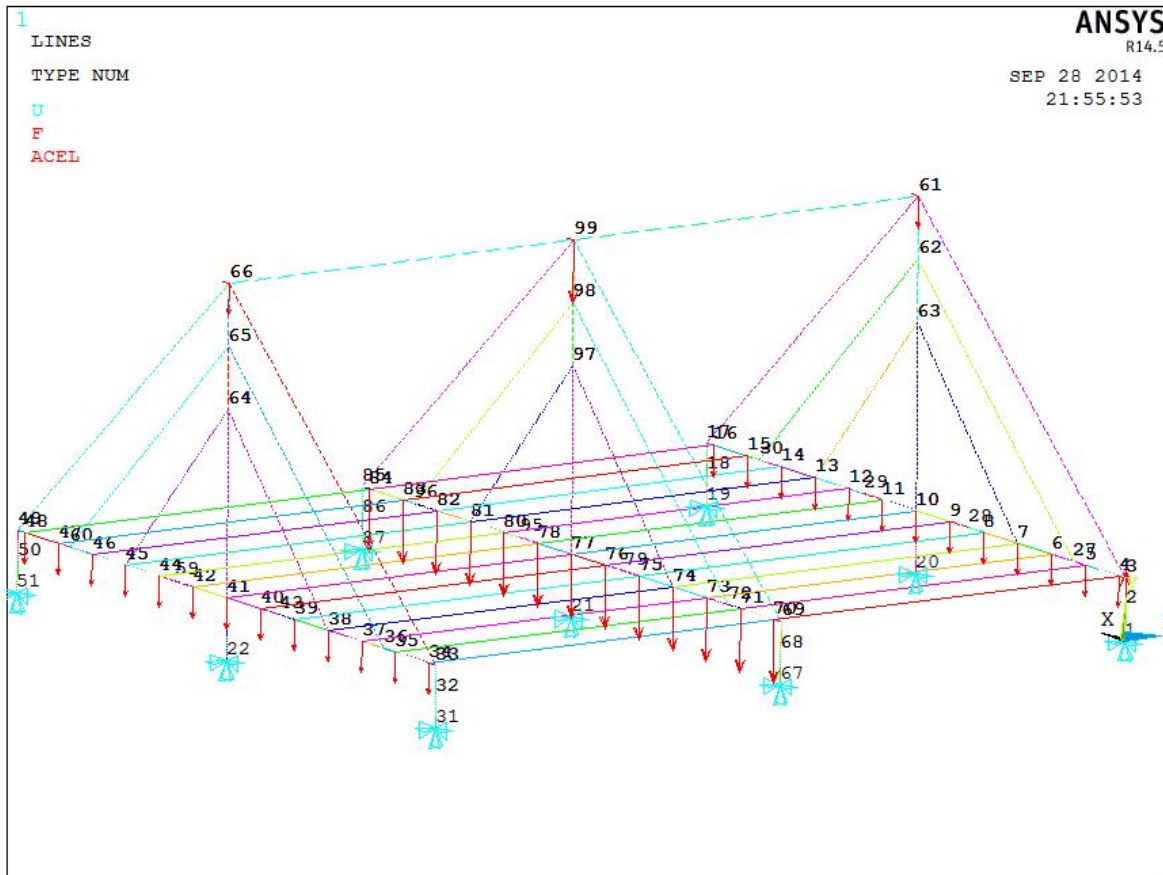


Figura 5. 8 Ubicación de cargas y restricciones aplicadas al modelo del Solar Fresnel-SATCF

De la Figura 5. 8 es posible distinguir cada una de las restricciones aplicadas al modelo, cabe mencionar que en todos los apoyos se restringe movimiento en las tres direcciones debido a que se considera que dichos apoyos están ensamblados en dados de concreto sepultados en el suelo.

En los Keypoint 66, 99 y 61 de la Figura 5. 8 se pueden apreciar las cargas por el peso del concentrador (en la dirección vertical) y las cargas ejercidas por el viento (en la dirección x perpendicular a la dirección y longitud del concentrador). Es claro que la



carga en el Keypoint 99 es mayor por el tamaño de la flecha, esto es porque la estructura del centro carga el doble que las estructuras de los extremos.

### 5.3.1.2 Solución del modelo con cargas de viento.

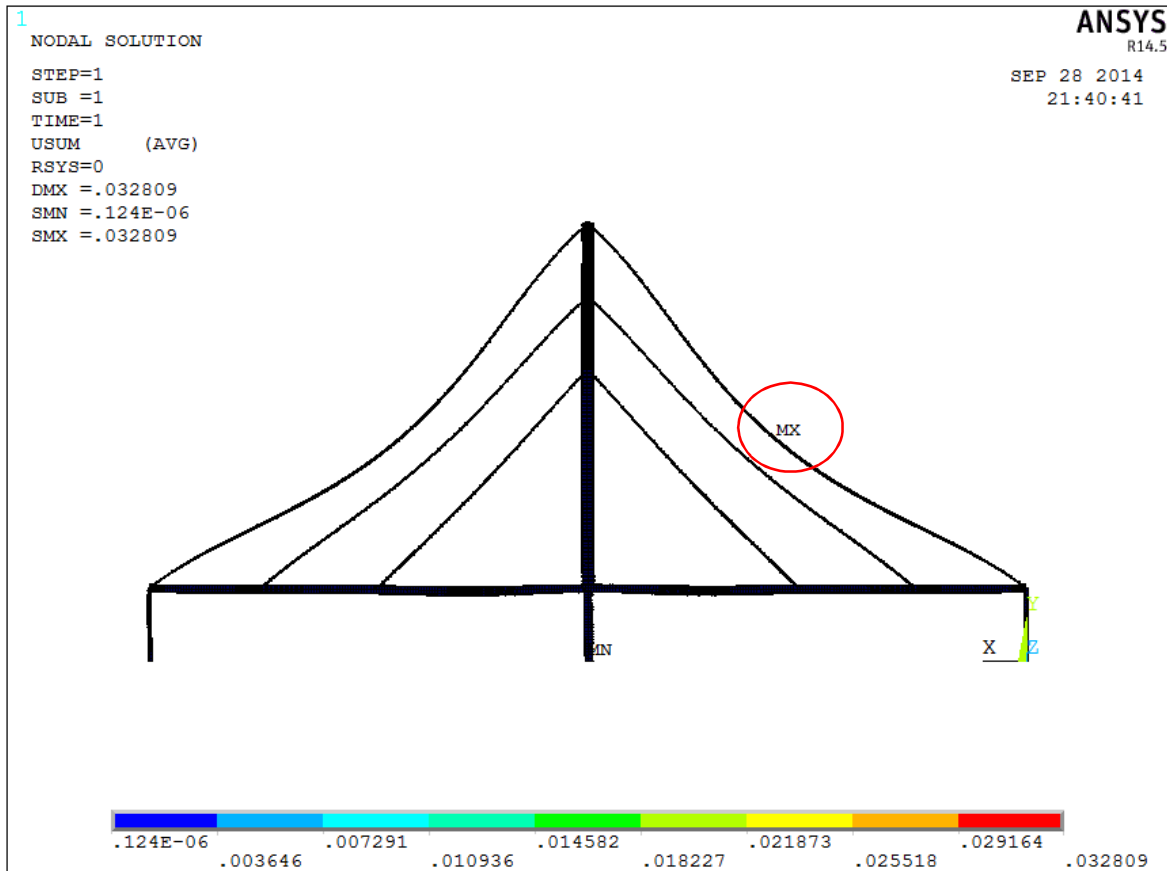


Figura 5. 9 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF

En la Figura 5. 9 se aprecia la deformación máxima presente en la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF, es claro que la deformación máxima se ubica en uno de los tensores (marcado con círculo de color rojo, en MX), sin embargo es posible ver que dicha deformación se da únicamente por el peso del tensor, observándose esta en el tensor de mayor longitud. Con esto se puede concluir que la fuerza ejercida por el aire no afecta de manera considerable el campo de deformaciones del modelo.

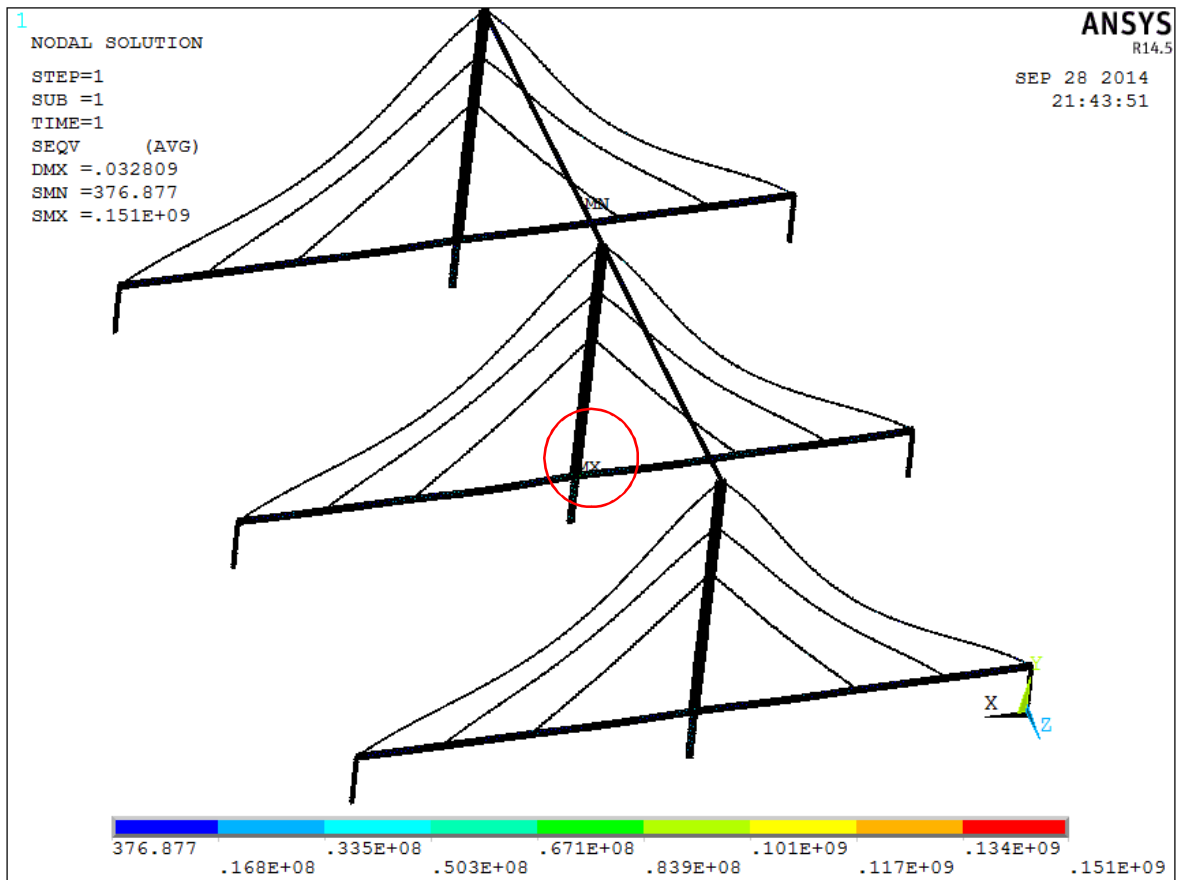


Figura 5. 10 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura

En la Figura 5. 10 se aprecia el esfuerzo máximo, el cual se encuentra en la estructura del centro, remarcado con un círculo de color rojo. Para este análisis el esfuerzo máximo se encuentra en el mismo punto que cuando se analizó la estructura sin cargas de viento. El valor numérico de esfuerzo crítico se analiza en la Tabla 5. 3

Tabla 5. 3. Comparación del campo de esfuerzos con y sin cargas de viento

Modelo	Parámetro	
Sin cargas de viento	Smax [MPa]	146
Con cargas de viento	Smax [MPa]	151
Esfuerzo de cedencia	Sy [MPa]	215

De la Tabla 5. 3 es posible distinguir que el esfuerzo máximo presente en el modelo cuando se aplican las cargas de viento es mayor que el esfuerzo presente sin cargas de viento. Esto es claro debido a que las cargas de viento las resiste directamente el mástil que soporta el concentrador y por consecuencia los apoyos centrales de cada una de las estructuras.



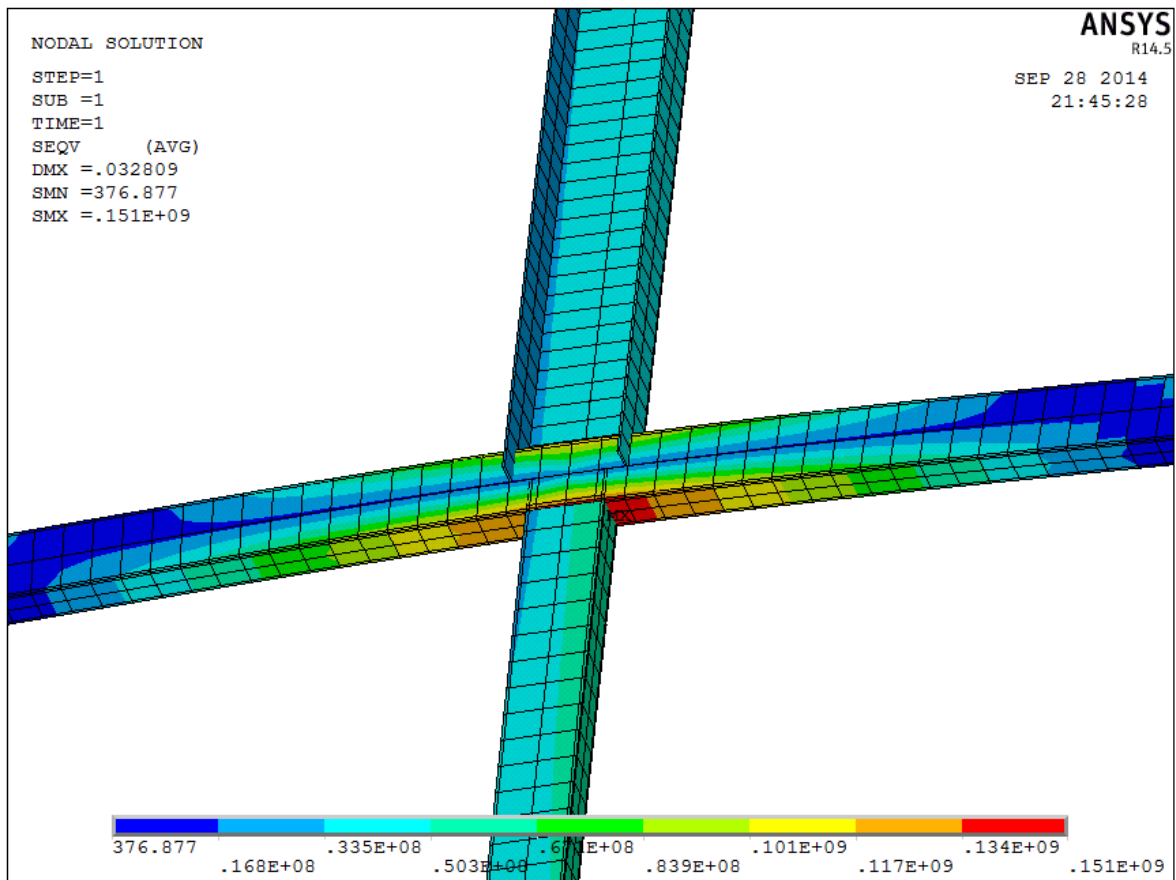


Figura 5. 11 Acercamiento del área de concentración de esfuerzo máximo

En esta figura se puede apreciar un acercamiento al punto donde se encuentra la concentración de esfuerzo máximo, sin embargo el lugar donde se observa es en la misma zona de concentración que para el modelo sin cargas de viento.

## 5.4 Modelado en elemento finito de la estructura soporte del reflector

Para la simulación con elemento finito se utilizó el elemento beam188. Utilizando como material un acero estructural con las propiedades de la Tabla 4. 2 (Propiedades mecánicas del Acero Estructura AISI 304).

En la siguiente tabla se ilustran los perfiles utilizados para el modelo de la estructura.

Tabla 5. 4. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF

Nomenclatura	Descripción
1	Perfil cuadrado de 1 ½ in C-14 (1.90 mm)
2	Perfil tipo "C" de 6x2 in C-14
3	Placa de ¼ de pulgada de espesor
4	Redondo de 1 in de diámetro (Eje de reflectores)

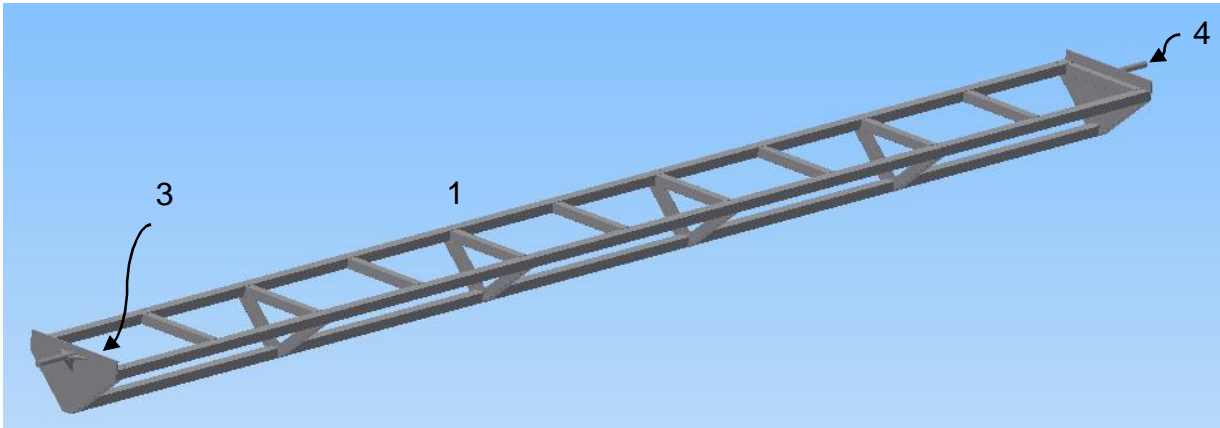


Figura 5. 12 Principales elementos estructurales utilizados en la estructura del reflector

### 5.4.1 Análisis de la estructura

En la Figura 5. 13 se puede ilustrar la sencillez del modelo, utilizando únicamente líneas para cada perfil estructural.

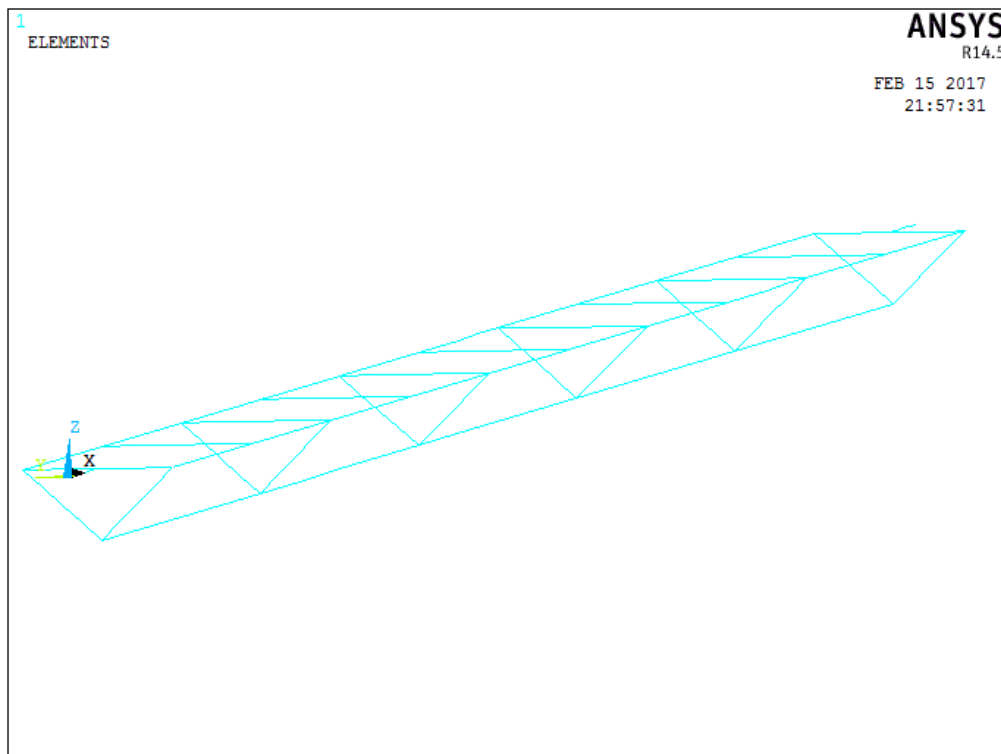


Figura 5. 13 Modelado estructura de soporte del reflector



Las restricciones utilizadas son las que se muestran a continuación en la Figura 5. 14. Las cargas por efecto de la película reflectora son de 35.54 kg y se muestran por las flechas de color rojo, distribuidas sobre dicha estructura.

El modelo se restringe de movimiento en las tres direcciones en cada una de sus barras de los extremos, así como de movimiento de rotación en las direcciones “Y” y “Z”, en función de que las barras de los extremos van ensambladas a sistemas de chumaceras que permiten girar la estructura sobre su eje longitudinal.

Es importante mencionar que para el modelado en elemento finito también se toma en cuenta la influencia de la gravedad.

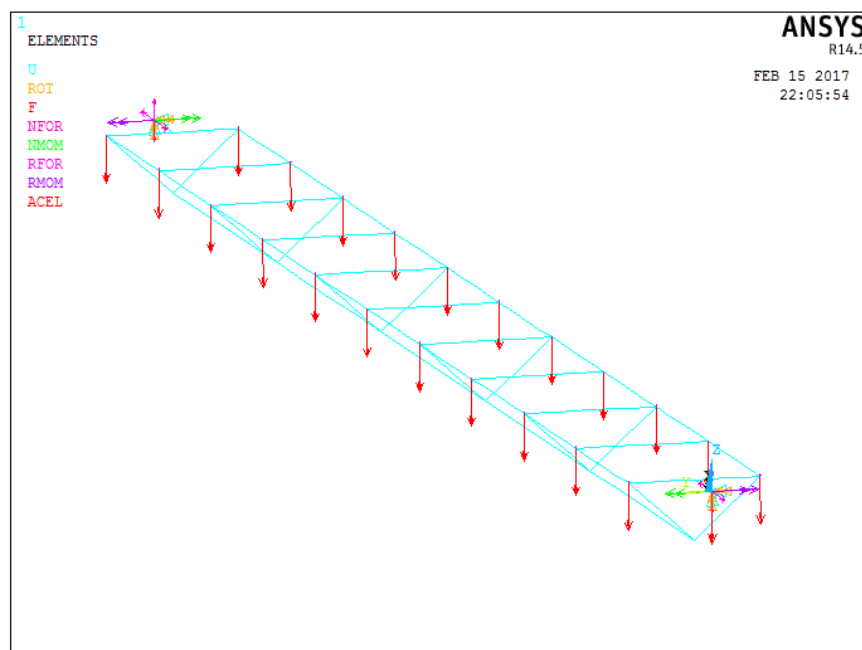


Figura 5. 14 Restricciones y cargas aplicadas al modelo.



### 5.4.1.1 Solución del modelo.

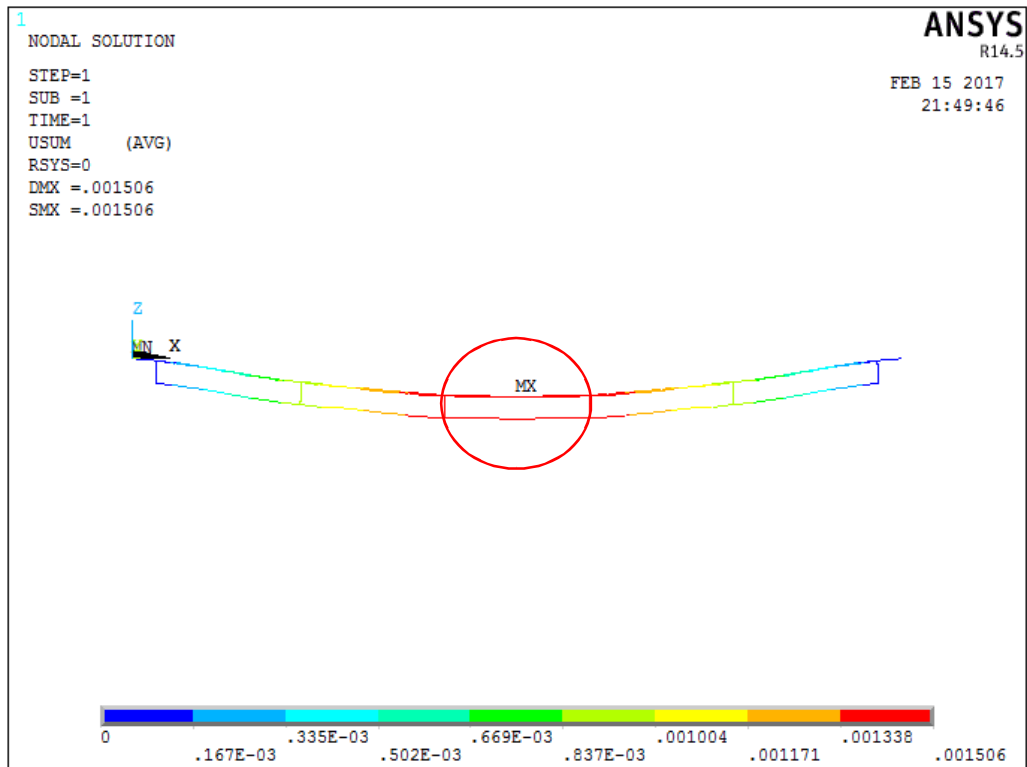


Figura 5. 15 Deformación máxima de la estructura que soporta los reflectores.

De la Figura 5. 15 es posible visualizar que la deformación máxima es de 0.001506 m, lo que equivale a 1.5 mm. La deformación máxima se encuentra al centro de la estructura.

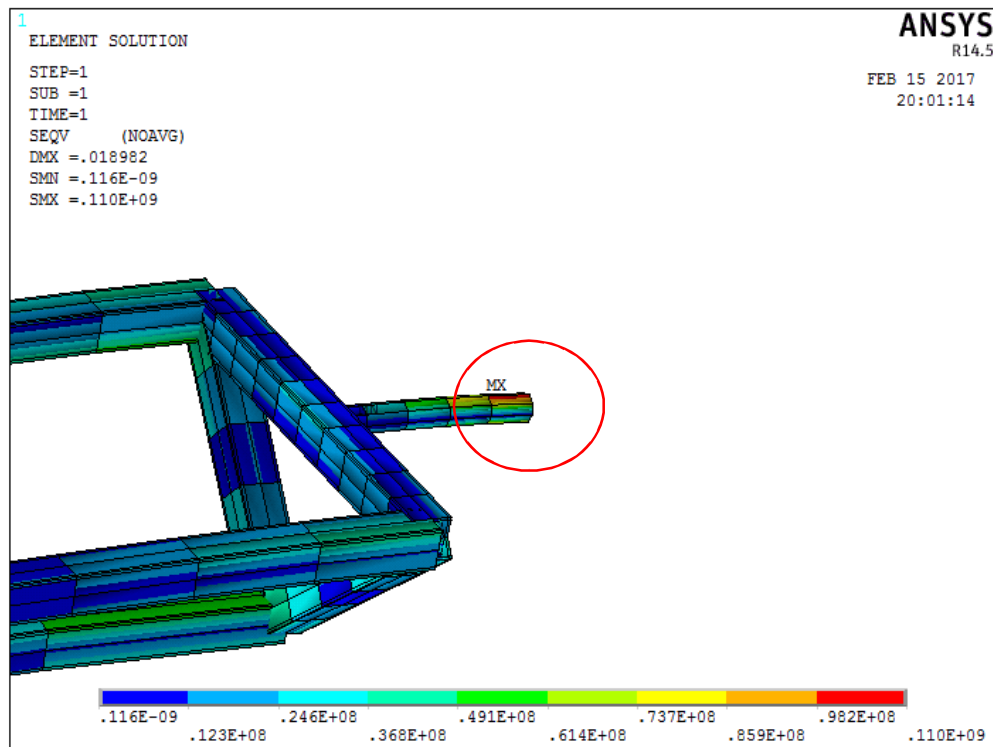


Figura 5. 16 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF

El esfuerzo máximo presente en la estructura es de 110 MPa, y se encuentra en la parte señalada con el círculo rojo, en la barra redonda que funge como eje de rotación, con este resultado es posible concluir que la estructura soporta perfectamente, incluso tiene un factor de seguridad de:

$$n = \frac{S_y}{S_{\max}} = \frac{215 \text{ MPa}}{110 \text{ MPa}} = 1.95 \quad (2)$$

Mediante este cálculo se observa un factor de seguridad de 1.95, siempre que esta relación sea mayor que uno se garantiza que el material soporta las condiciones de trabajo.



## 5.5 Diseño y modelado en elemento finito de la Tercer propuesta del Modelo perfeccionado.

En función de los resultados previamente obtenidos, se sugiere una variación en la estructura del modelo, la cual consiste en variar el diseño del armado en el centro de cada estructura (zona donde se presentan los esfuerzos máximos para el modelo de la estructura del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF), la finalidad es distribuir el área de carga y evitar la concentración de esfuerzos en un punto. Con la nueva propuesta además se pretende eliminar los tensores y generar una estructura de mayor estabilidad con materiales más ligeros.

La tercer propuesta sigue contando con un total de trece reflectores de 40x580 cm, lo que equivale a un área total de reflexión de 30.16 m<sup>2</sup>, el tercer modelo es totalmente ensamblable mediante un sistema de acoplamiento atornillados, y utiliza en la totalidad de su estructura perfil del tipo PTR de 1 ½ x 1 ½ pulgada C-14.

La finalidad del tercer modelo es generar un equipo muy práctico, que en su estructura tenga un solo tipo de perfil estructural comercial, más pequeño, más ligero, con una estructura que permita una mejor estabilidad, con una buena distribución de esfuerzos, que tenga la característica de poder ser armado por cualquier persona con herramientas básicas, que soporte cargas de viento y trabaje bien bajo condiciones ambientales en el estado de Guanajuato y que además sus partes sean fácil de transportar.

En la siguiente gráfica se ilustran los principales elementos que van a componer un Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF y que van a ser soportados por la estructura base.

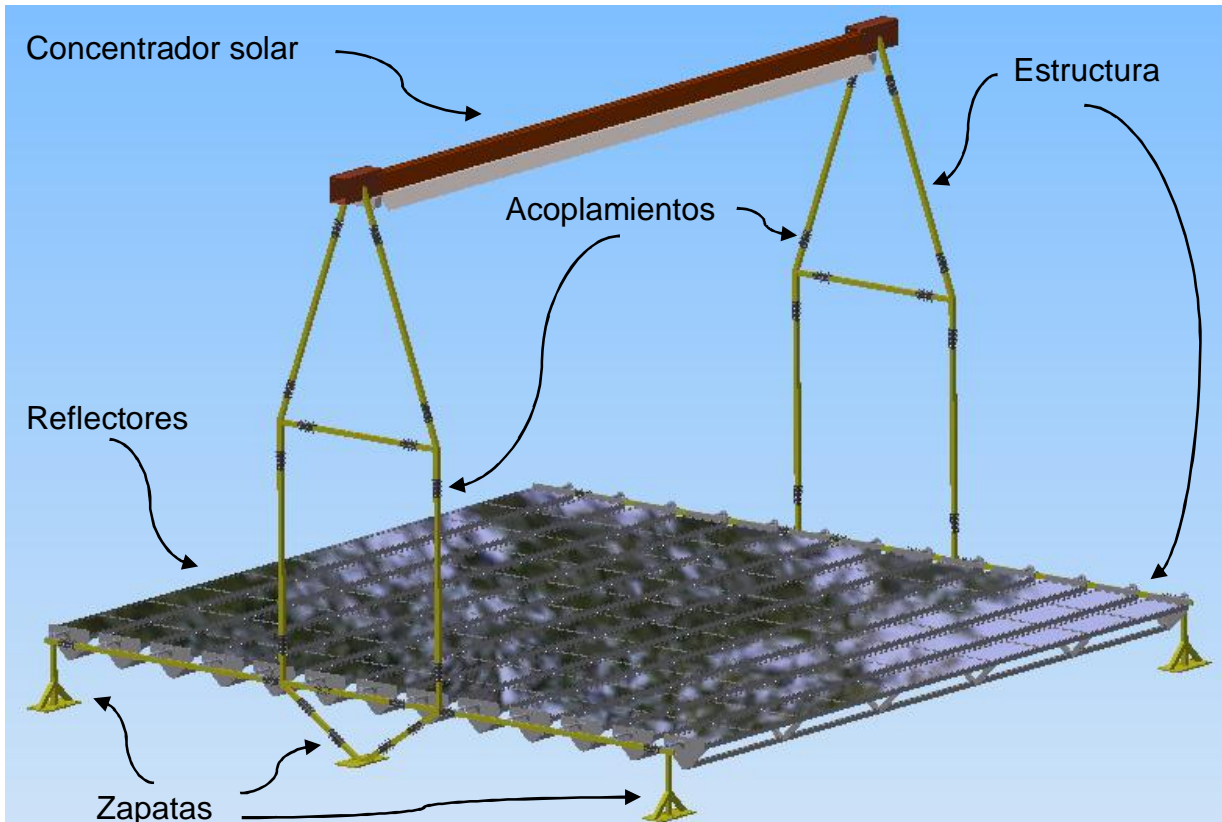


Figura 5. 17 Tercer propuesta del Modelo perfeccionado.

La estructura soporte de los reflectores ahora cuenta con un diseño que presente una mejor distribución de esfuerzos en las zonas críticas (que incluyen los tres apoyos), este modelo ya no cuenta con tensores, y es completamente desmontable.

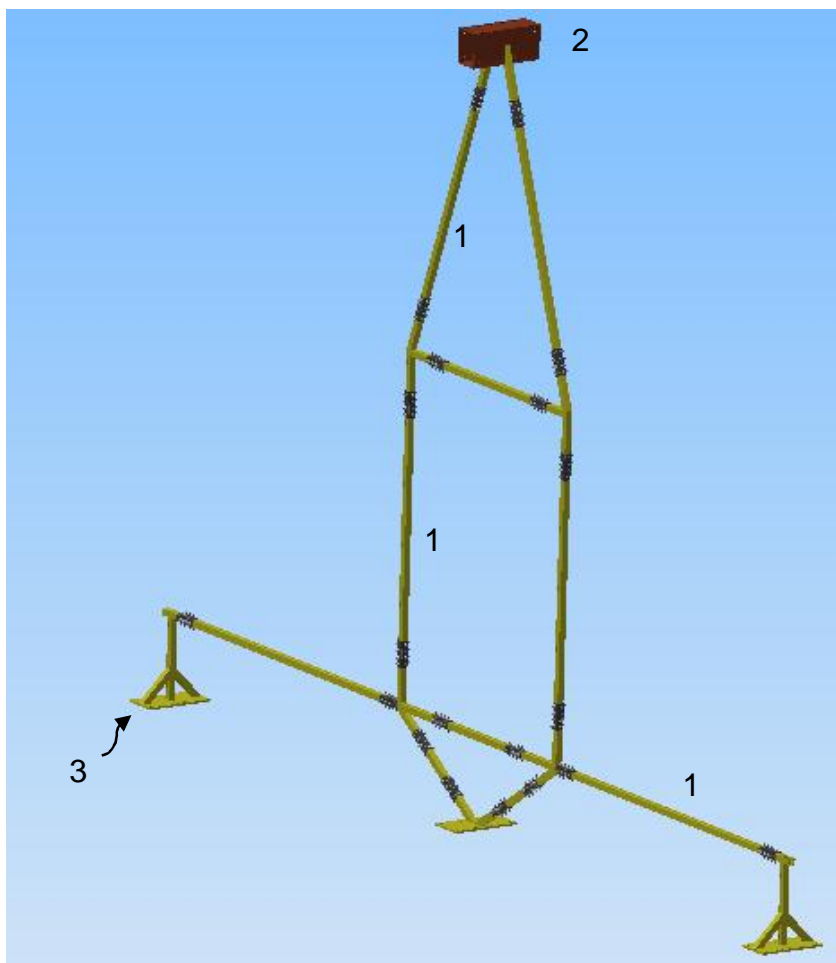


Figura 5. 18 Tercer propuesta del Modelo perfeccionado.

En la Tabla 5. 5 es posible identificar cada uno de los diferentes perfiles que se utilizan en el modelo.

Tabla 5. 5. Perfiles estructurales utilizados en la estructura del Solar Fresnel-SATCF

Nomenclatura	Descripción
1	Perfil cuadrado de 1 ½ in C-14 (1.90 mm)
2	Perfil tipo "C" de 6x2 in C-14
3	Placa de ¼ de pulgada de espesor
4	Redondo de 1 in de diámetro (Eje de reflectores)

Es importante mencionar que todos los perfiles utilizados son comerciales y de acero estructural, en la tabla anterior se muestran los perfiles utilizados para la estructura de soporte y para la estructura de los reflectores.





### 5.5.1 Modelado de la estructura del concentrador Termosolar tipo Fresnel-SATCF

Para la simulación con elemento finito se utilizó el elemento beam188.

En la Figura 5. 19 es posible visualizar el modelo de la estructura utilizando líneas para cada perfil estructural del equipo.

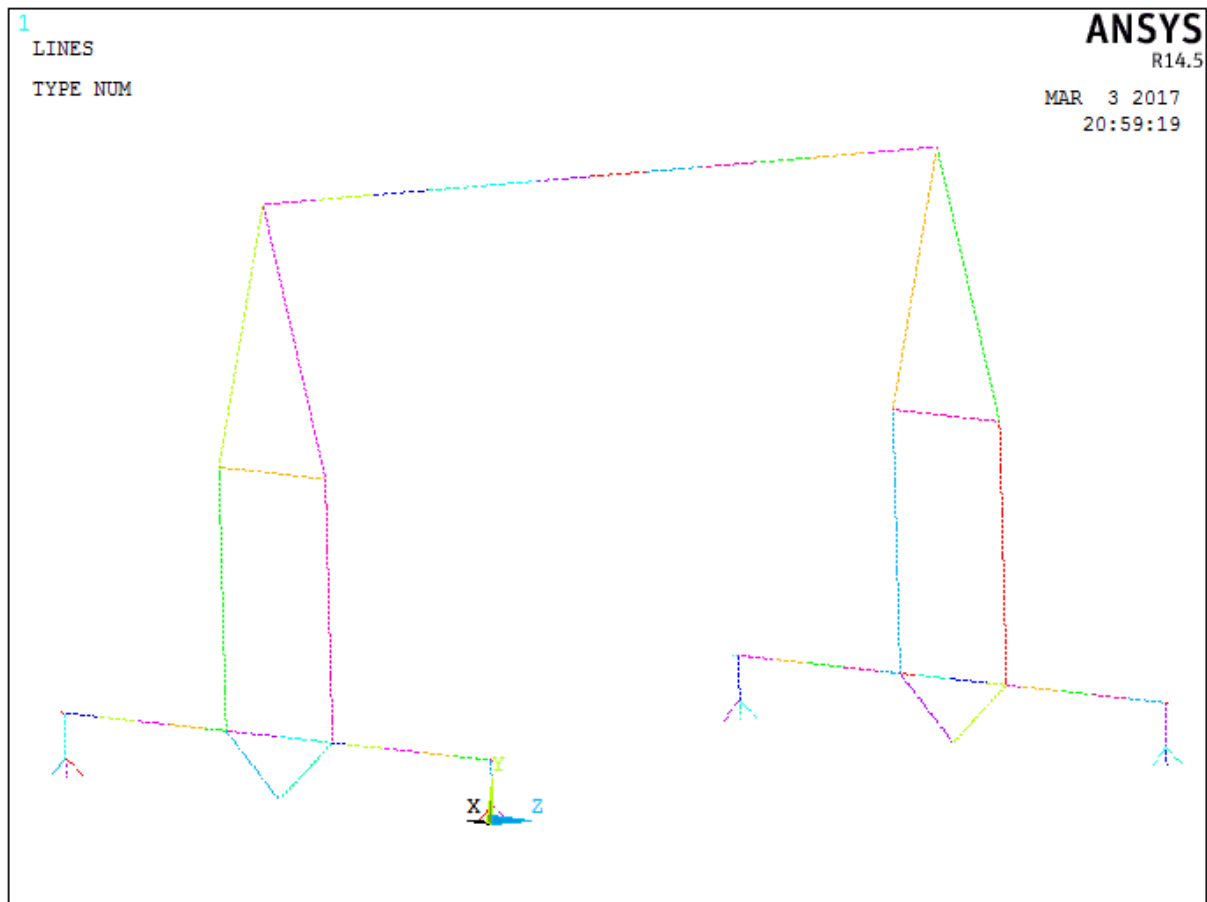


Figura 5. 19 Tercera propuesta del modelo perfeccionado del Concentrador Solar

Las restricciones utilizadas son las que se muestran a continuación en la Figura 5. 20. Las cargas para los reflectores son de 120 kg y se muestran por las flechas de color rojo, y las cargas para el concentrador son de 120 kg, ilustradas por las flechas que se encuentran en el extremo superior del mástil, Así mismo las cargas de viento se aplican en el concentrador aplicando una carga distribuida de 645.912 N. Importante mencionar que el modelo considera los efectos inerciales de la gravedad.

El modelo se restringe de movimiento en las tres direcciones en cada una de sus patas o soportes, en función de que sus patas van ancladas a dados de concreto cimentados, utilizando para este fin tuercas y tornillos.

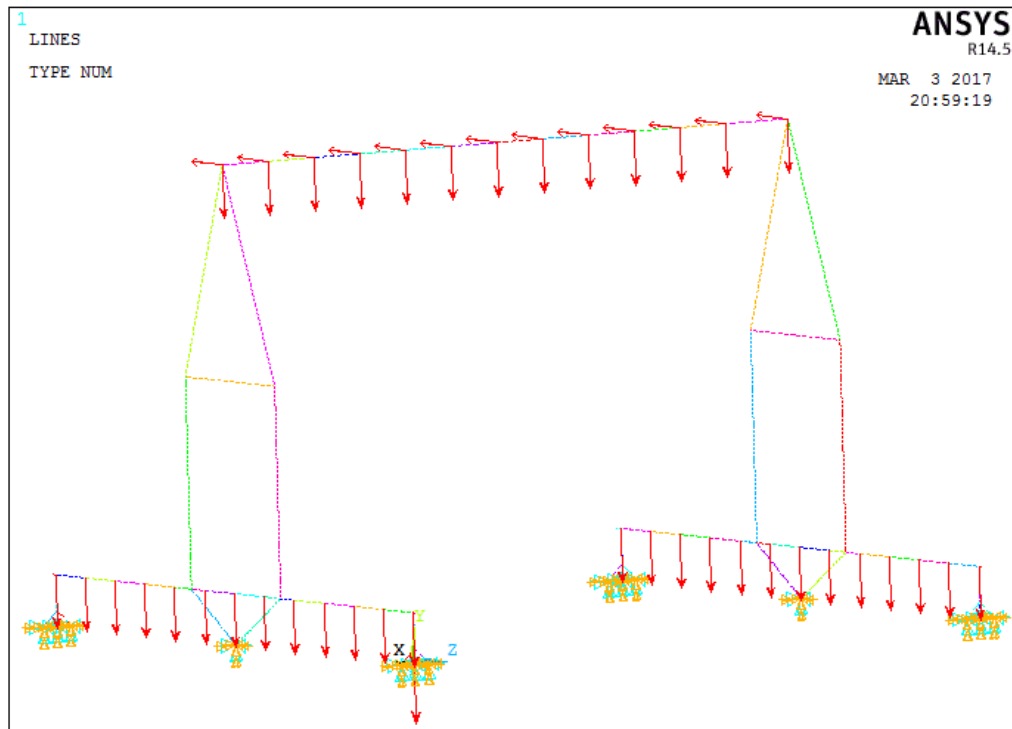


Figura 5. 20 Restricciones aplicadas sobre el modelo

### 5.5.1.1 Solución de la tercer propuesta del modelo perfeccionado

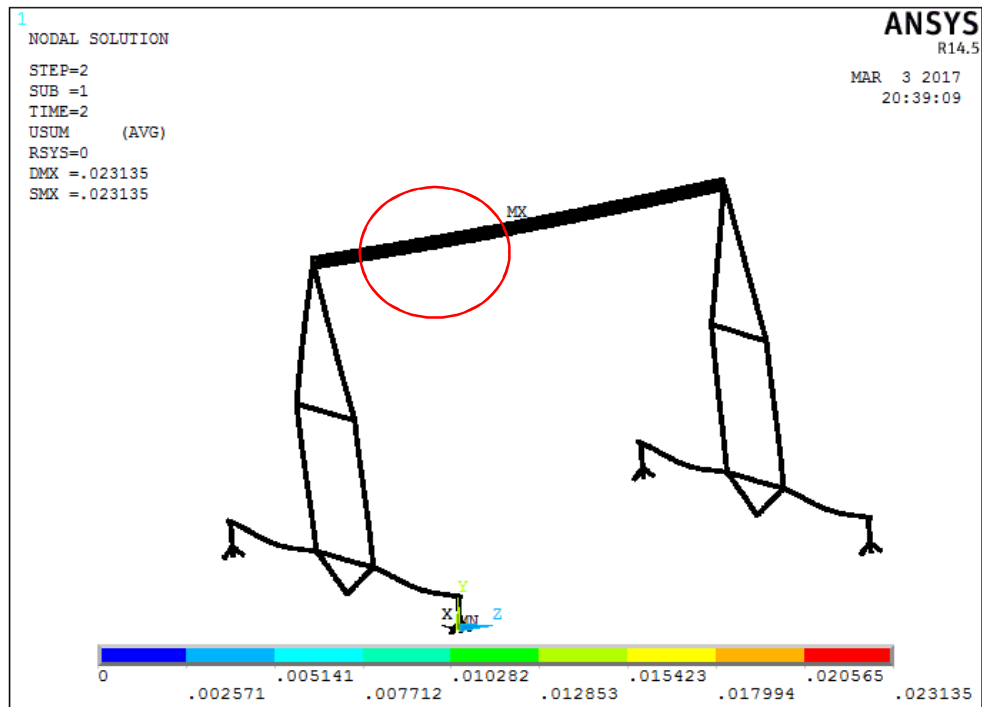


Figura 5. 21 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF



Finalmente cabe mencionar que se utilizó un total de 2301 elementos para la simulación.

De la Figura 5. 21 es posible visualizar que la deformación máxima es de 0.0231 m, lo que equivale a 2.31 cm. La deformación máxima se encuentra en la parte media del perfil que sostiene el concentrador.

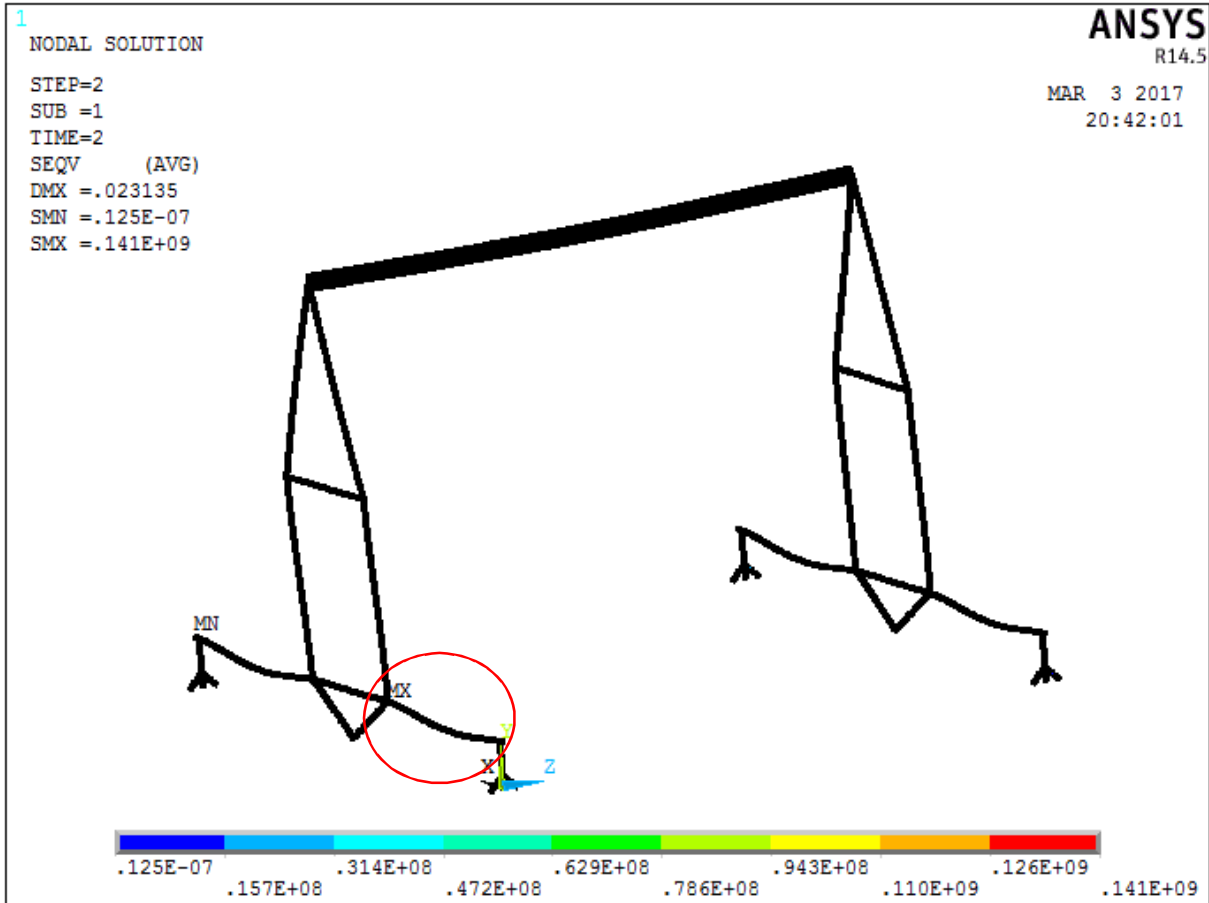


Figura 5. 22 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF

El esfuerzo máximo presente en la estructura es de 141 MPa, y se encuentra en la parte señalada con el círculo rojo, en el apoyo central de una de las estructuras. Comparando este resultado con el esfuerzo de cedencia del material que es de 215 MPa, es posible concluir que la estructura soporta la carga de trabajo con un factor de seguridad de:

$$n = \frac{S_y}{S_{\max}} = \frac{215 \text{ MPa}}{141 \text{ MPa}} = 1.53 \quad (5.3)$$

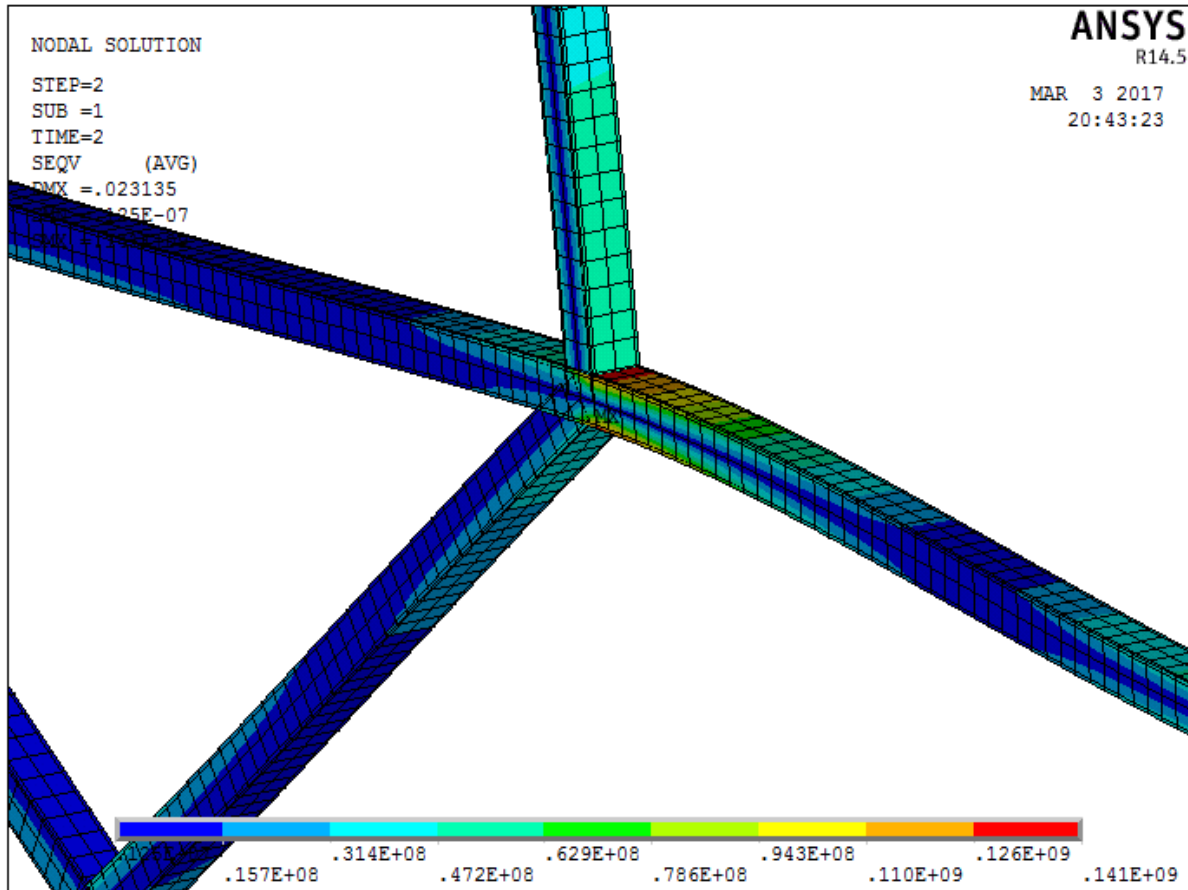


Figura 5. 23 Acercamiento al área de concentración de esfuerzo máximo.

En la Figura 5. 23 se puede ver un acercamiento al área donde se encuentra el esfuerzo máximo, es claro que se presente en el apoyo del centro de la estructura, debido a que es en este punto donde se concentra la mayor parte de la carga del Solar Fresnel-SATCF, las cargas del concentrador y reflectores.



# **CAPÍTULO VI**

# **CONCLUSIONES Y**

# **PERSPECTIVA**



Se desarrolló el diseño conceptual, selección de materiales, diseño estructural y además se realizó la fabricación del prototipo del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF.

## 6.1 Conclusión del Capítulo I.

Se realizó un análisis del estado del arte en artículos, publicaciones, revistas, patentes y bibliografía en general en temas de sistemas de concentración solar convencionales y sistemas de almacenamiento térmico con materiales con cambio de fase que sirven como base para el modelo que se propone en el presente trabajo.

En cuanto al diseño y construcción de concentradores solares tipo Fresnel, algunas de las consideraciones más importantes y claves para la selección de un concentrador de este tipo, es el arreglo de espejos, la distancia del concentrador respecto a estos, la forma de ellos, la separación entre éstos, el número de espejos y el propio espejo. Para el arreglo de espejos se pueden utilizar superficies planas o curvas en las cuales se montan los espejos de acuerdo a la configuración deseada. Cada configuración tiene sus ventajas, ya que el usar una superficie plana permite una construcción más sencilla, reduciendo así los costos. Por otra parte, la superficie plana causa que se produzca una sombra entre los espejos en las primeras y últimas horas del día, por lo que esta sombra proyectada no permite que los otros espejos concentren la luz solar. Esto no es problema para la superficie curva, ya que esta superficie permite que los espejos no se hagan sombra entre sí aprovechando al máximo la radiación solar. El problema de esta superficie es que es más difícil de construir, lo que encarece el sistema y lo hace más complicado para instalarlo. La distancia del colector o absorbedor a los espejos permite que la radiación solar se aproveche mejor, ya que permite que los espejos estén más juntos y reflejan mejor la radiación solar; el problema con la altura es que a medida de que el concentrador está más alto, es más difícil construir y controlar el sistema, lo que por ende eleva los costos del equipo. La separación entre los espejos y el número de espejos son de los parámetros finales a seleccionar, ya que en función de la forma de espejo y del colector, se selecciona el espaciamiento y el número de espejos para evitar crear sombras y aprovechar al máximo la radiación incidente al sistema. A parte de los espejos, ya existen superficies o películas reflectoras delgadas que pueden tomar la forma que se desee. Estas películas reflectoras son delgadas, resistentes a las condiciones ambientales, anti polvo y suciedad, y tienen una reflexividad por arriba del 90%, siendo una alternativa atractiva.



El uso de almacenamiento energético cada vez se hace más necesario en la búsqueda de fuentes de energía nuevas y renovables, esta tecnología relativamente nueva no solo reduce el ajuste entre la oferta y la demanda, sino que además mejora la fiabilidad de los sistemas de energía, desempeñando un factor muy importante en la conservación del excedente de energía, lo que representa una oportunidad en la disponibilidad y hace que un sistema sea más rentable. En base a lo investigado, el almacenamiento energético puede ser por calor latente o sensible, sin embargo, el uso del material adecuado depende directamente de la temperatura de aplicación, existen materiales a baja temperatura para aplicaciones de calefacción u otras a nivel doméstico, hasta temperaturas más elevadas como en la generación de energía eléctrica.

Para el presente proyecto, se restringió a materiales para almacenamiento por cambio de fase en un rango de temperaturas de 80°C a 250 °C, considerando también los materiales por calor sensible que se apeguen a este mismo rango.

## **6.2 Conclusión del Capítulo II.**

Se realizó la primera fase del proyecto del concentrador Solar Fresnel-SATCF. Para el desarrollo de ideas se utilizó la técnica de creatividad TRIZ teoría de resolución de problemas de inventiva, en conjunto con la metodología de diseño conceptual.

El primer paso fue la identificación del área de oportunidad con la finalidad de proponer todas las soluciones posibles, apegándose solo a dar solución a las necesidades planteadas. Se hicieron varias propuestas de diseño, y al final del día se valoraron las características de cada una de las propuestas preliminares, para generar un único modelo que contara con las mejores cualidades de cada una de las referidas propuestas.

Se realizó el diseño del Fresnel-SATCF desde su concepción y diseño de detalle hasta su fabricación y la planeación del fin de su vida útil, haciendo un producto completamente desmontable, reciclable y amigable con la naturaleza.



### 6.3 Conclusión del Capítulo III.

Auxiliándose de mapas de materiales y utilizando el método gráfico de selección de materiales se propuso una tabla con los materiales que mejor cumplen las propiedades que se requieren, a la cual se le asignaron valores cuantitativos para poder obtener una especie de calificación por material y así poder hacer más clara la **selección del material** que cumpla con las especificaciones del diseño y funcionalidad de la estructura del Solar Fresnel-SATCF.

Una vez que se tienen tres candidatos, se realizó un estudio de su reacción química con el entorno, con la finalidad de visualizar el comportamiento del material bajo las condiciones ambientales, para lo que se utilizó el diagrama de materiales de ataque ambiental, y del cual el ACERO resultó con un comportamiento excelente en 5 de las 6 condiciones ambientales estudiadas, resultando así como la mejor opción.

Por otro lado el ACERO es un material que tiene aplicaciones en la elaboración de herramientas, instrumentos y elementos para las construcciones civiles de buques y automóviles, estructuras resistentes fabricadas en acero dan forma a edificios, rascacielos y viviendas unifamiliares, -Puentes: modernos, colgantes, de arco, de vigas triangulados... entre muchos otros usos del sector transporte y construcción.





## 6.4 Conclusión del Capítulo IV.

Se desarrolló una introducción del Método de los elementos Finitos, utilizado para solucionar el análisis estructural de la geometría del modelo propuesto.

Las condiciones de frontera para el análisis fueron:

- De desplazamiento
  - Se restringió su desplazamiento horizontal (en el eje “X” y “Y”) en tres de sus apoyos laterales
  - Se restringió su desplazamiento Vertical (en el eje “Z”) en los seis apoyos de la estructura.
- Cargas aplicadas
  - Por efecto de los reflectores a lo largo de los dos ejes laterales de la estructura [ $F_r$ ].
  - Por efecto del concentrador [ $F_c$ ]
  - Carga distribuida de viento de forma horizontal sobre el captador solar [ $q_v$ ]

Para la solución del modelo se utilizaron las relaciones de esfuerzo-deformación unitaria provienen de la ley de Hooke generalizada por tratarse de un material elástico lineal, y las propiedades del material utilizadas fueron el módulo de Young y la relación de Poisson  $\nu$  por considerarse el material de la estructura como un material isotrópico.

Los efectos por temperatura no se consideraron, en el sentido de que la estructura de soporte del equipo no sufre cambios considerables, ya que los rayos que inciden sobre los reflectores son direccionados hacia el concentrador, el cual es una cavidad aislada y ensamblada mediante tornillos, lo que impide la transferencia de calor de los ductos de concentración hacia el resto de la estructura.

Como criterio de falla se utilizó el Esfuerzo de Von Misses, el cual debe ser menor que el esfuerzo de fluencia del material (acero estructural).

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_y$$



## 6.5 Conclusión del Capítulo V.

Se realizó el modelado y análisis estructural del Concentrador SOLAR FRESNEL-SATCF, se consideraron cargas por viento, granizo y calor extremo, después de los resultados obtenidos con las primeras propuestas, y mediante el análisis de concentración de esfuerzos se realizaron algunas variaciones al diseño, el cual finalmente quedó como se muestra a continuación.

### 6.5.1 Resultados del modelo en elemento finito.

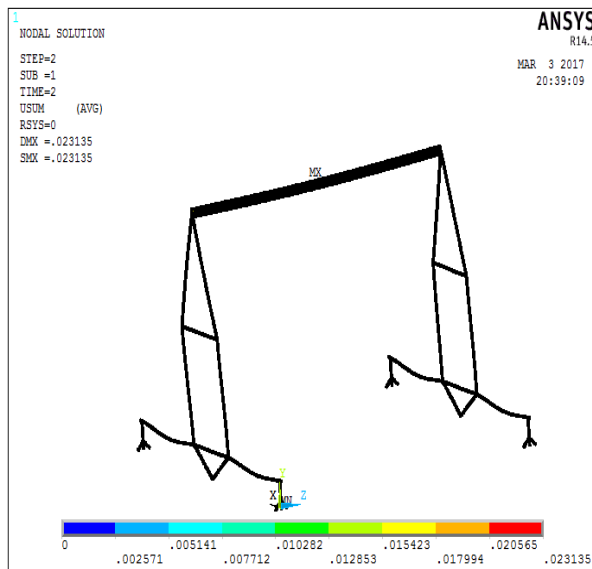


Figura 6. 1 Deformación máxima de la estructura del Concentrador Fresnel-SATCF

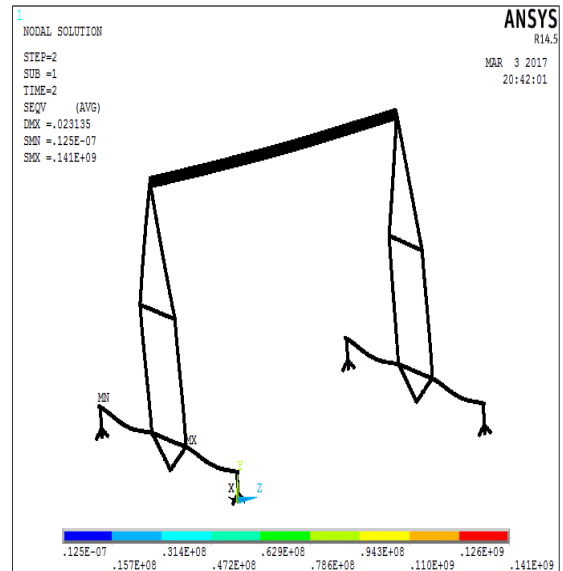


Figura 6. 2 Campos de concentración de esfuerzos de la estructura del Solar Fresnel-SATCF

Tabla 6. 1 Propiedades mecánicas del Acero Estructura AISI 304

Módulo de elasticidad E (MPa)	$2 \times 10^5$
Densidad $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	7850
Razón de Poisson $\nu$	0.3
Sy (MPa)	215
Su (Mpa)	505



Tabla 6. 2 Elementos y restricciones utilizadas en el modelo.

CARGAS Y RESTRICCIONES DEL MODELO PROPUESTO	
ELEMENTO UTILIZADO	BEAM 188
CARGA APLICADA POR REFLECTOR [Kg]	120
CARGA APLICADA POR CONCENTRADOR [Kg]	120
CARGA DISTRIBUIDA DE VIENTO [N]	645.912
EFFECTO DE LA GRAVEDAD [m/s <sup>2</sup> ]	9.8
RESTRICCIONES DE MOVIMIENTO	Z EN TODOS SUS APOYOS O PATAS, y X, Y, en los apoyos de uno de los costado.

Tabla 6. 3 Resultados del modelo propuesto

RESULTADOS	
Deformación máxmia [cm]	2.31
Esfuerzo máximo [Mpa]	141

Eficiencia del modelo

$$n = \frac{S_y}{S_{\max}} = \frac{215 \text{ MPa}}{141 \text{ MPa}} = 1.53$$



### 6.5.2 Modelo propuesto

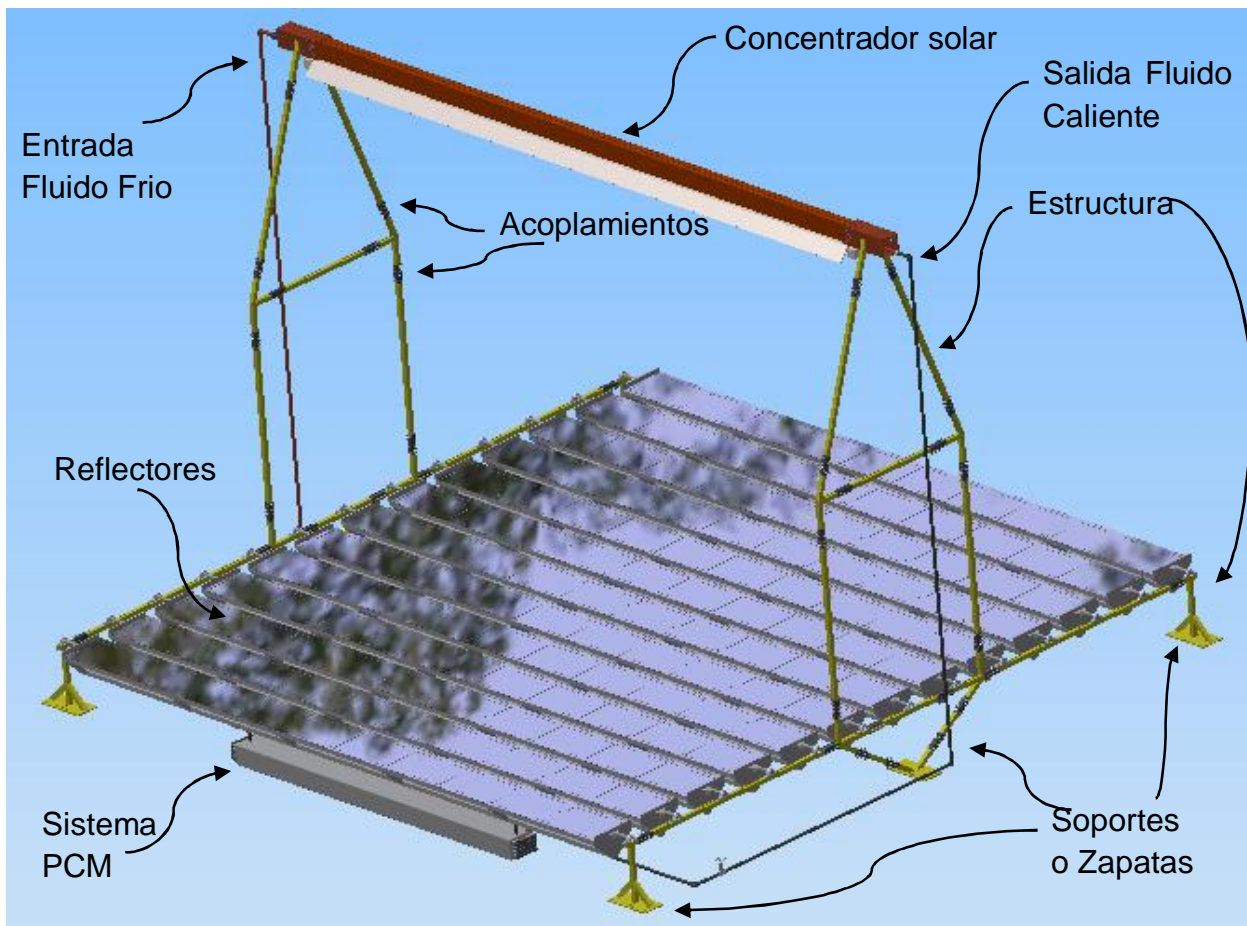


Figura 6. 3 Propuesta final del SOLAR FRESNEL-SATCF

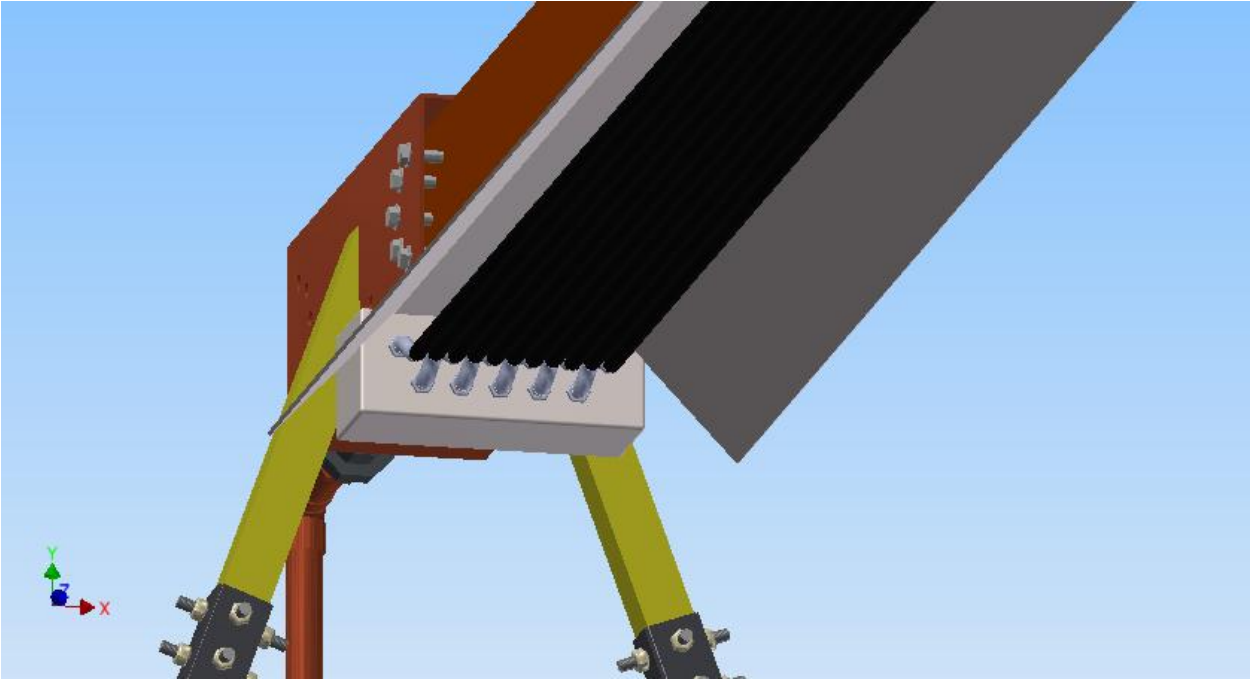


Figura 6. 4Vista de detalle del concentrador Solar.

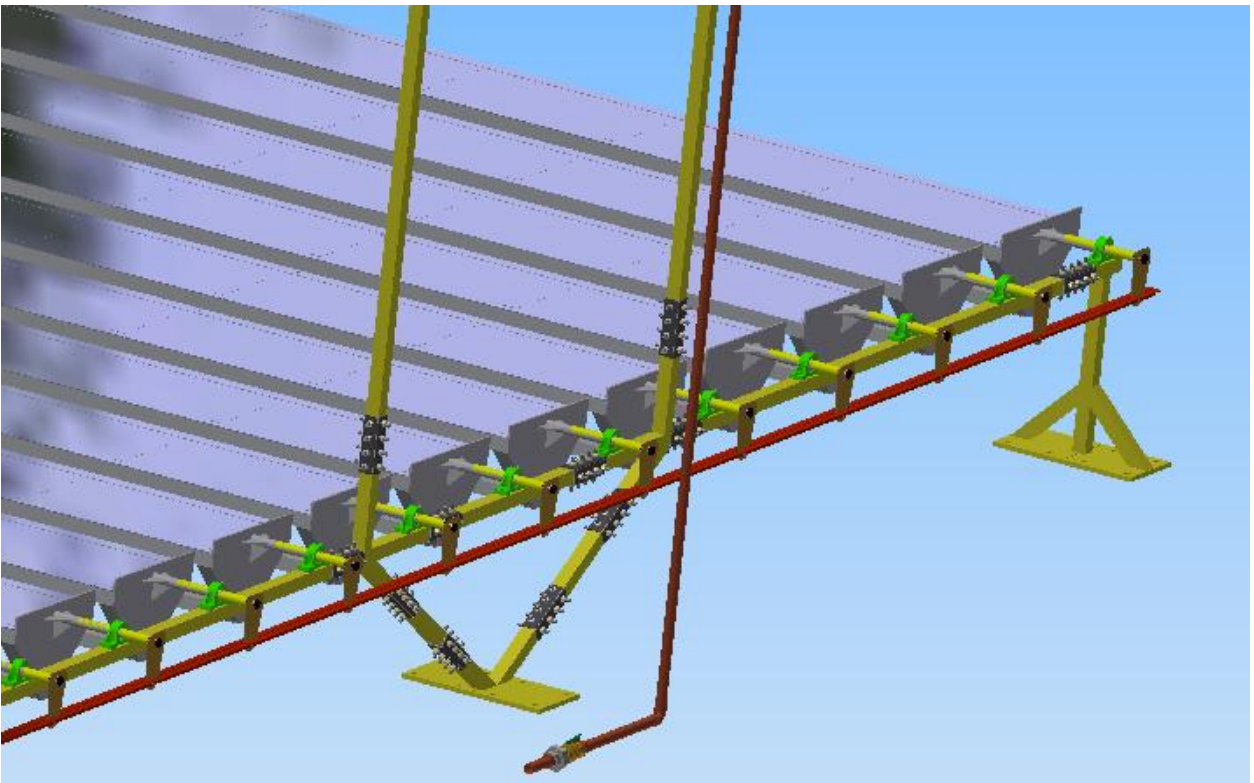


Figura 6. 5Vista de detalle del sistema de alimentación y mecanismo de seguidor solar.



Tabla 6. 4 Material utilizado

	MATERIAS PRIMAS	CANTIDAD POR UNIDAD	UNIDAD	Precio Unitario	Subtotal
Estructura	Perfil cuadrado de 1 ½ in C-12	38.774624	m	\$ 443.51	\$ 2,401.00
	Placa de 3/8" 3X10	0.4944	m <sup>2</sup>	\$1,294.33	\$ 647.17
	SOLERA DE 1 1/2 X 1/8	12.16	m	\$ 117.00	\$ 234.00
	Tuerca, rondana y tornillo hexagonal Grado 2 de 3/8"X 2 1/2 rosca estándar	160	Piezas	\$ 7.84	\$ 1,254.40
Estructura del reflector	Perfil cuadrado de 1 ½ in C-12	311.961	m	\$ 443.51	\$17,836.00
	Placa de ¼" 3X10	1.84886	m <sup>2</sup>	\$2,688.00	\$ 5,376.00
	Barra Redondo de 1 in	5.2	m	\$ 440.00	\$ 440.00
	Película metálica base C-22	30.095	m <sup>2</sup>	\$ 215.00	\$ 2,150.00
	Chumacera de piso 1" Diámetro	26	Pieza	\$ 69.00	\$ 1,794.00
	Tuerca, rondana y tornillo de 1/4" X 2 1/2 cabeza hexagonal, rosca estándar	52	Pieza	\$ 4.50	\$ 234.00
Mecanismo de seguimiento del sol	Angulo 3/4 x 1/8	12.28	m	\$ 104.00	\$ 208.00
	Perno guía de 1/4 X 1/2" longitud, con cabeza y orificio para chaveta	13	Pieza	\$ 12.00	\$ 156.00
	Eslabón de tracción (UNIDADES)	13	Pieza	\$ 45.00	\$ 585.00
	Rondana de alta presión de 1/2	13	Pieza	\$ 0.40	\$ 5.20
	Rondana plana de 1/2	13	Pieza	\$ 0.40	\$ 5.20
	Tornillo Estándar de 1/2 X 1"	13	Pieza	\$ 4.50	\$ 58.50
	Tuerca Hexagonal estándar de 1/2"	13	Pieza	\$ 3.50	\$ 45.50
Concentrador Solar	Perfil tipo "C" de 6x2 in C-14 [m]	11.574	m	\$ 478.00	\$ 956.00
	Lamina C-18 protectora de Tubos (m2)	2.634	m <sup>2</sup>	\$ 215.00	\$ 215.00
	Tuerca y tornillo cabeza hexagonal de 3/8" X 7" rosca estándar [UNIDAD]	10	Piezas	\$ 52.00	\$ 520.00
	CRISTAL INFERIOR de 6 mm de espesor	2.127	m <sup>2</sup>	\$ 600.00	\$ 1,276.20
	Tubos de Cu 1/2 in	64.119	m	\$ 221.00	\$ 4,862.00
	Cabezales	2	Unidades	\$1,200.00	\$ 2,400.00
	Aislante del concentrador (Lana mineral)	6.05154	m <sup>2</sup>	\$ 70.00	\$ 423.61
	Lamina metálica C-22 3X10	6.05154	m <sup>2</sup>	\$ 215.00	\$ 1,301.08
Intercambiador de calor	Tubería de cobre de 1/2"	74.856	m	\$ 221.00	\$ 5,304.00
	Tapón de cobre de 1/2" soldable	24	Pieza	\$ 4.00	\$ 96.00



	Conector Cu 1/2", rosca exterior	24	Pieza	\$ 12.00	\$ 288.00
	Tapón rosca interior de 1/2 "	24	Pieza	\$ 4.00	\$ 96.00
	Contenedor metálico	1	Pieza	\$2,800.00	\$ 2,800.00
	Aislante del contenedor (Lana mineral)	4.368024	m <sup>2</sup>	\$ 70.00	\$ 305.76
	Lamina metálica C-22 3X10	4.368024	m <sup>2</sup>	\$ 215.00	\$ 322.50
Tubería y Conexiones, Alimentación	Tubo de Cu de 1 in	5.3	m	\$1,160.00	\$ 1,160.00
	Conector macho de Cu de 1 in	4	Pieza	\$ 47.00	\$ 188.00
	Codo de Cu de 1"X90	2	Pieza	\$ 39.00	\$ 78.00
	tuerca unión de Cu de 1 in	2	Pieza	\$ 130.00	\$ 260.00
	Válvula esfera de Cu de 1 in	1	Pieza	\$ 160.00	\$ 160.00
Tubería y Conexiones, Salida	Codo de Cu 1"	1	Pieza	\$ 39.00	\$ 39.00
	Tuerca unión Roscada de Cobre de 1"	1	Pieza	\$ 130.00	\$ 130.00
	Tubo de cobre de 1 "	15.1472	m	\$1,160.00	\$ 3,480.00
	Codo de cobre 1"X90	5	Pieza	\$ 39.00	\$ 195.00
	Válvula esfera de Cu de 1 in	2	Pieza	\$ 160.00	\$ 320.00
TOTAL					\$60,606.12

### 6.5.3 Conclusiones

En el presente trabajo se parte de un modelo conceptual de lo que se pretende ser un equipo de concentración y captación solar, el cual cuenta con un sistema de almacenamiento térmico que prolongue el uso de un fluido de trabajo a una temperatura constante.

Durante la fase de diseño conceptual, se desarrollaron varios modelos preliminares, muchos de los cuales no aparecen documentados en este trabajo, sin embargo se tomaron los más representativos, de los cuales se generó una propuesta conceptual que reuniera todas las necesidades solicitadas.

Una vez teniendo la propuesta del modelo, se realizó un estudio de selección de materiales con el objetivo de seleccionar un material idóneo que reúna todas las características físicas, químicas, mecánicas y económicas que el equipo requiere para un óptimo desempeño.

Una vez que se tuvo un modelo propuesto y un material idóneo, se realizó un análisis estructural en elemento finito con la finalidad de estudiar los campos de esfuerzo así como los campos de deformación a los que se somete la estructura en condiciones extremas de uso.



El producto final fue un equipo de concentración denominado “Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF”, que es autosustentable, el cual está hecho con un material reciclable, ligero, no toxico, es desmontable y fácil de instalar, además de que es un equipo que estructuralmente garantiza un excelente funcionamiento al presentar concentraciones de esfuerzo máximo que están por debajo del esfuerzo de cedencia del material utilizado, lo que garantiza el buen desempeño del equipo.

## 6.6. Perspectiva

Las empresas suministradoras de la tecnología de colectores Fresnel representan una industria muy joven, con pocos líderes en el mercado y muchas empresas emergentes en diferentes fases de desarrollo.

La empresa alemana Industrial Solar vende un sistema Fresnel ligero, de bajo costo de operación y alta eficiencia de superficie. Ellos hacen la recomendación económica de 16 módulos, y cada uno soporta una velocidad máxima de viento de 180 km/h, estos sistemas en conjunto generan vapor a 400°C a 120 bar. Pueden operar con agua, aceite o glicol, y se tiene una potencia de salida 12.3 kW por módulo. Todo esto con una radiación solar de 900 W/m<sup>2</sup>. El módulo básico (7.5 m x 4.06 m) contiene: 11 reflectores con área de 22 m<sup>2</sup> y un colector. Arreglo mínimo de módulos: 8, altura de módulo de 4.5 m.



Figura 6. 6. Concentrador Fresnel de Industrial Solar.

Actualmente, existen empresas en etapas muy diferentes en cuanto al desarrollo tecnológico de las tecnologías lineales Fresnel.





Tabla 6. 5 Lista productores de Concentradores Lineales Fresnel en el mundo [44].

NOMBRE	PAÍS	SITIO WEB
AIRATermosolar	España	<a href="http://www.airatermosolar.es/">www.airatermosolar.es/</a>
Alsolen	Francia	<a href="http://www.alsolen-alcen.com/fr">www.alsolen-alcen.com/fr</a>
AM Brain	Alemania	<a href="http://www.am-brain.de/">www.am-brain.de/</a>
Areva Solar	USA/Francia	<a href="http://www.areva.com/">www.areva.com/</a>
BBEnergy	Sudáfrica	<a href="http://www.bbe.co.za/energy/solar/">www.bbe.co.za/energy/solar/</a>
Chromasun	USA	<a href="http://www.chromasun.com">www.chromasun.com</a>
CNIM	Francia	<a href="http://www.cnim.com">www.cnim.com</a>
Elianto CSP	Italia	<a href="http://www.eliantocsp.com">www.eliantocsp.com</a>
FERA Srl	Italia	<a href="http://www.ferasolar.it">www.ferasolar.it</a>
Feranova	Alemania	<a href="http://www.feranova.com">www.feranova.com</a>
Fresnex	Austria	<a href="http://www.fresnex.com">www.fresnex.com</a>
Glayx Tech	Italia	<a href="http://www.glayx.com">www.glayx.com</a>
Heliodynamics	UK	<a href="http://www.heliodynamics.com">www.heliodynamics.com</a>
Himin Solar Energy Group	China	<a href="http://www.himin.com">www.himin.com</a>
Hitachi Zosen	Japón	<a href="http://www.hitachizosen.co.jp/english/news/2013/04/000876.html">www.hitachizosen.co.jp/english/news/2013/04/000876.html</a>
Industrial Solar	Alemania	<a href="http://www.industrial-solar.de">www.industrial-solar.de</a>
INERSUR	España	<a href="http://www.inersur.com">www.inersur.com</a>
KGDS Renewable Energy Private Limited (KGDS)	India	<a href="http://solar.kgisl.com">http://solar.kgisl.com</a>
Lanzhou Dacheng	China	<a href="http://www.lzdc solar.com/en/">www.lzdc solar.com/en/</a>
Mulk Enpar	India	<a href="http://www.mulkre.com">www.mulkre.com</a>
Novatec Solar oficina regional en Chile	Alemania	<a href="http://www.novatecsolar.com">www.novatecsolar.com</a>
SkyFuel	USA	<a href="http://www.skyfuel.com">www.skyfuel.com</a>
Solar Euromed SAS	Francia	<a href="http://www.solareuromed.com">www.solareuromed.com</a>
Solar Power Group con actividades en Chile 13	Alemania	<a href="http://www.solarpowergroup.com">www.solarpowergroup.com</a>
Solar Space Frame Industrial	Tailandia	<a href="http://solarspaceframe.com/CLFR.htm">http://solarspaceframe.com/CLFR.htm</a>
Soltigua	Italia	<a href="http://www.soltigua.com">www.soltigua.com</a>



# REFERENCIAS

- [1] R. P. Mata, Optimización Termo-estructural de un calentador solar SATCF, Primera ed., Salamanca, 2012.
- [2] C. H. F. J. Z. A. A. O. A. A. A. M. E. D. Pérez Mata Raúl, «OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA PLACA COLECTORA DE UN SATCF,» *SOMIM*, nº 1, pp. 843-851, SEPTIEMBRE 2013.
- [3] O. A. A. Z. A. A. R. A. D. A. R. H. M. A. P. M. R. Conejo Hernández Francisco J, «ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON CAMBIO DE FASE MEDIANTE LA NORMA NMX-ES-001-NORMEX-2005,» *SOMIM*, nº 1, pp. 1215-1224, SEPTIEMBRE 2012.
- [4] NORMA, NMX-ES-001-NORMEX-2005, MÉXICO, 2005.
- [5] J. M. M. L. F. C. H. M. B. Zalba, «Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications,» *Applied Thermal engineering*, pp. 251-283, 2003.
- [6] H. D. S. B. N. S. Najla El Gharbi, «A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies,» *Energy Procedia*, nº 6, pp. 565-572, 2011.
- [7] H. Ortega, «ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA PROCESOS INDUSTRIALES EN MEXICO,» México, 2018.
- [8] E. R. Jaimes, «México, un país,» *EL ECONOMISTA*, Septiembre 2012.
- [9] R. A. CHÁVEZ, EL PICO DEL PETRÓLEO Y LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO; APLICACIÓN DEL MODELO DE HUBBERT BAJO CONDICIONES ACTUALES Y CON RESTRICCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO, MEXICO, 2017.
- [10] W. Szulmayer, «Solar Concentrator». Burwood Australia Patente 4,230,094, 10 February 1976.



- 
- [11] M. J. O'Neill, «Solar concentrator and energy collector system». Dallas, Texas, U.S. Patente 4,069,812, 20 December 1976.
- [12] M. P. Andrew R. Jones, «Tracking Solar Energy Concentrator». U.S. Patente 4249514, 10 February 1981.
- [13] D.-V. H. Richard A. Steenblik, «FRESNEL SPIRAL REFLECTOR AND METHOD FOR MAKING SAME». U.S. Patente 4350412, 21 SEPTEMBER 1982.
- [14] E. A. Sampayo, «Solar Concentrator System». Lakewood, California, U.S. Patente 5542409, 6 August 1996.
- [15] L. X. Huang Zhong, «Large Tracking-Type Fresnel lens point-focusing solar system». Francia Patente 2375184A1, 12 October 2011.
- [16] P. Feher, «ULTRA-COMPACT, LINEAR, SOLAR-THERMAL STEAM GENERATOR». United States Patente 0078011 A1, 1 APRIL 2010.
- [17] B. R. William James Todd, «COLLECTING SOLAR RADIATION USING FRESNEL SHIFTING». USA Patente US 2011/0083664A1, 13 October 2009.
- [18] E. G. Najla, D. Halima, B. Sofiane y S. Noureddine, «A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies,» *Energy Procedia* 6, pp. 565-572, 2011.
- [19] P. L. Lievre, «Multi-Tube Solar Collector Structure». North Sydney U.S. Patente US 7,992,553 B2, 9 August 2011.
- [20] D. B. Hoermann Alexander, «A solar concentrator for a solar energy collector having improved drive assembly». California US, Pennsylvania US. Patente EP2639524A1, 13 March 2012.
- [21] D. R. M. a. G. L. MORRISON, «COMPACT LINEAR FRESNEL REFLECTOR SOLAR THERMAL POWERPLANTS,» *SOLAR ENERGY*, vol. 68, nº 3, pp. 263-283, 1999.
- [22] A. Hoshi, R. M. David, A. Bittar y T. S. Saitoh, «Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR,» *Solar Energy*, vol. 79, pp. 332-339, 2005.
- [23] F. T. C. P. R. C. A. M. y. L. S. M. Gea, «ACUMULACIÓN TÉRMICA EN HORMIGÓN DE LA ENERGÍA SOLAR CAPTADA POR UN CONCENTRADOR



- TIPO FRESNEL LINEAL PARA GENERACIÓN DE VAPOR,» *ASADES*, vol. 13, pp. 03.113-03.119, 2009.
- [24] F. J. N. A. G. S. A. Oliver, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Materiales de construcción*, vol. 62, nº 305, pp. 131-140, 2012.
- [25] A. s. C. c. T.-N. w. Atul Sharma, «Development of phase change materials (PCMs) for low temperature energy storage applications,» *Sustainable Energy technologies and Assessments*, vol. 7, pp. 17-21, 2014.
- [26] J. Lizana, R. Chacartegui, Á. Barrios-Padura y J. m. Valverde, «Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación,» *Libro de Actas del 3er Congreso Internacional de construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes*, pp. 621-637.
- [27] F. M. V. F. G. G. Manuel Rajadell Carreras, «La estimulación de la creatividad como fuente de ventaja competitiva,» *Ingeniería de Organización*, 2006.
- [28] H. Gardner, *Art, mind and brain. A cognitive approach to creativity*, Cambridge, Massachusetts: Argentina, 1982.
- [29] S. Majaro, *Como generar ideas para generar beneficios*, Granica, 1992.
- [30] P. V. J. Escorsa, *Tecnología e innovación en la empresa*, UPC, 1997.
- [31] F. M. V. F. G. G. Manuel Rajadell Carreras, «La estimulación de la creatividad como fuente de ventaja competitiva,» *Ingeniería de Organización*, 2006.
- [32] O. r. I. Marco Henrich Saavedra, «Aplicaciones de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo,» *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, pp. 102-107, 2013.
- [33] D. I. P. Livotov, «TRIZ and Innovation management,» *INNOVATOR*, pp. 1-30, 2008.
- [34] C. A. V. CHAMORRO, «METODOLOGÍA TRIZ PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA E INVENTIVA,» [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/metodologia-triz-innovacion-tecnologica-inventiva/metodologia-triz-innovacion-tecnologica-inventiva2.shtml>. [Último acceso: 07 MAYO 2016].



- [35] H. Leal, SELECCIÓN DE MATERIALES, Puerto Cabello, 2011.
- [36] D. R. H. J. Michael F Ashby, Engineering Materials 1, Cambridge, UK: BH, 2002.
- [37] D. H. M. G. Héctor Álvaro González, «La importancia del método en la selección de materiales,» *Scienza et Technica*, nº 24, pp. 175-180, X.
- [38] M. Ashby, «Material and Process Selection Charts,» de *Material and Process Selection Charts*, Cambridge UK, 2009.
- [39] M. F. Ashby, Materials Selection in mechanical Design, OXFORD INGLATERRA: ELSEVIER BUTTERWORTH HEINEMANN, 2005.
- [40] T. R. C. & A. D. Belegundu, INTRODUCTION TO FINITE ELEMENTS IN ENGINEERING, New Jersey, 2002.
- [41] «"Coupled Field Analysis Guide",» *Release 12.0 Documentation for ANSYS*, vol. ANSYS INC., 2009.
- [42] «Tu Tiempo.net,» [En línea]. Available: <http://www.tutiempo.net/clima/GUANAJUATO/2011/765770.htm>. [Último acceso: 20 Enero 2017].
- [43] A. A. Al-Azzawi, «ANALYSIS OF TIMOSHENKO BEAM RESTING ON NONLINEAR COMPRESSIONAL AND FRICTIONAL WINKLER FOUNDATION,» *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, nº 11, pp. 100-113, 2011.
- [44] M. b. S. S. j. F. Dr. Andreas Haberle, «La Tecnología CSP Fresnel,» Deutsche Gesellschaft Fur, Internationale Zusammenarbiet (GIZ) GmbH, Santiago Chile, 2014.
- [45] H. O. O. N. Julio A. Valle Pereña, «Prospectiva de Energías Renovables,» *SECRETARÍA DE ENERGÍA*, pp. 1-156, 2012-2026.
- [46] K. Gouthamraj, K. J. Rani y G. Satyanarayana, «Design and Analysis of Rooftop Linar Fresnel Reflector Solar Concentrator,» *Internacional Journal of Engineering and Innovate Technology*, vol. 2, nº 11, pp. 66-69, 2013.
- [47] M. C. A. L. PATRICIO MORCILLO, CREATIVIDAD QUE ESTÁS EN LOS CIELOS, MADRID, 2005.
- [48] O. Saab, Introducción al Dibujo Mecánico, Rosario Argentina, 2004.





# **ANEXO I CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR TERMOSOLAR TIPO FRESNEL- SATCF**



*Figura 7. 1 Construcción del equipo en taller.*



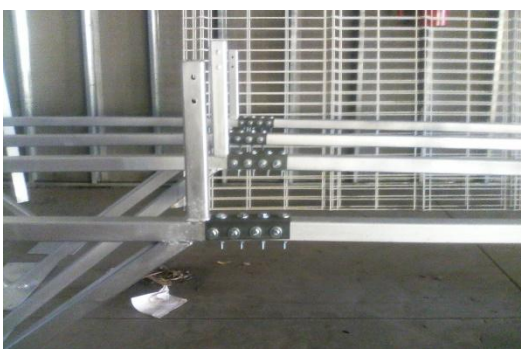
*Figura 7. 2 Proceso de pintura de la estructura.*



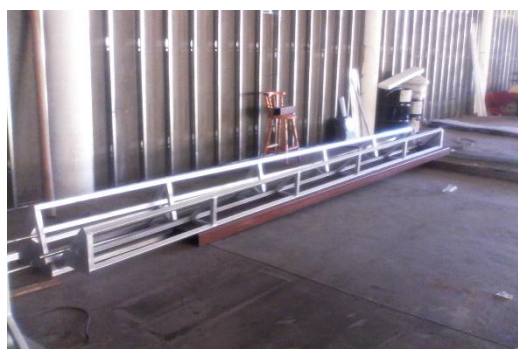
*Figura 7. 3 Proceso de pintura de la estructura, parte central*



*Figura 7. 4 Proceso de pintura de los soportes de los reflectores*



*Figura 7. 5 Proceso de secado de estructura base.*



*Figura 7. 6 Proceso de secado de estructura reflectores.*





Figura 7. 7 Proceso de construcción del sistema PCM



Figura 7. 8 Proceso de construcción del sistema PCM



Figura 7. 9 Proceso de construcción de la estructura del concentrador solar.



Figura 7. 10 Proceso de construcción de la estructura del concentrador solar.



Figura 7. 11 Preparación de la superficie para la instalación del equipo



Figura 7. 12 Instalación de estructura base sobre dados de concreto.



Figura 7. 13 Vista del sistema de ensamble de la estructura del equipo.



Figura 7. 14 Armado de la estructura de soporte del concentrador solar.



Figura 7. 15 Armado de la estructura de soporte del concentrador solar.



Figura 7. 16 Instalación del concentrador solar sobre la estructura de soporte.



Figura 7. 17 Instalación de estructura de reflectores.



Figura 7. 18 Instalación de estructura de reflectores.



## ANEXO 1 CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR TERMOSOLAR TIPO FRESNEL-SATCF



Figura 7. 19 Instalación de superficie reflectora y sistemas de rodamiento.



Figura 7. 20 Vista general del Concentrador Termosolar Tipo Fresnel-SATCF



Figura 7. 21 Instalación de líneas de alimentación y de servicio del equipo.



Figura 7. 22 Instalación del sistema PCM

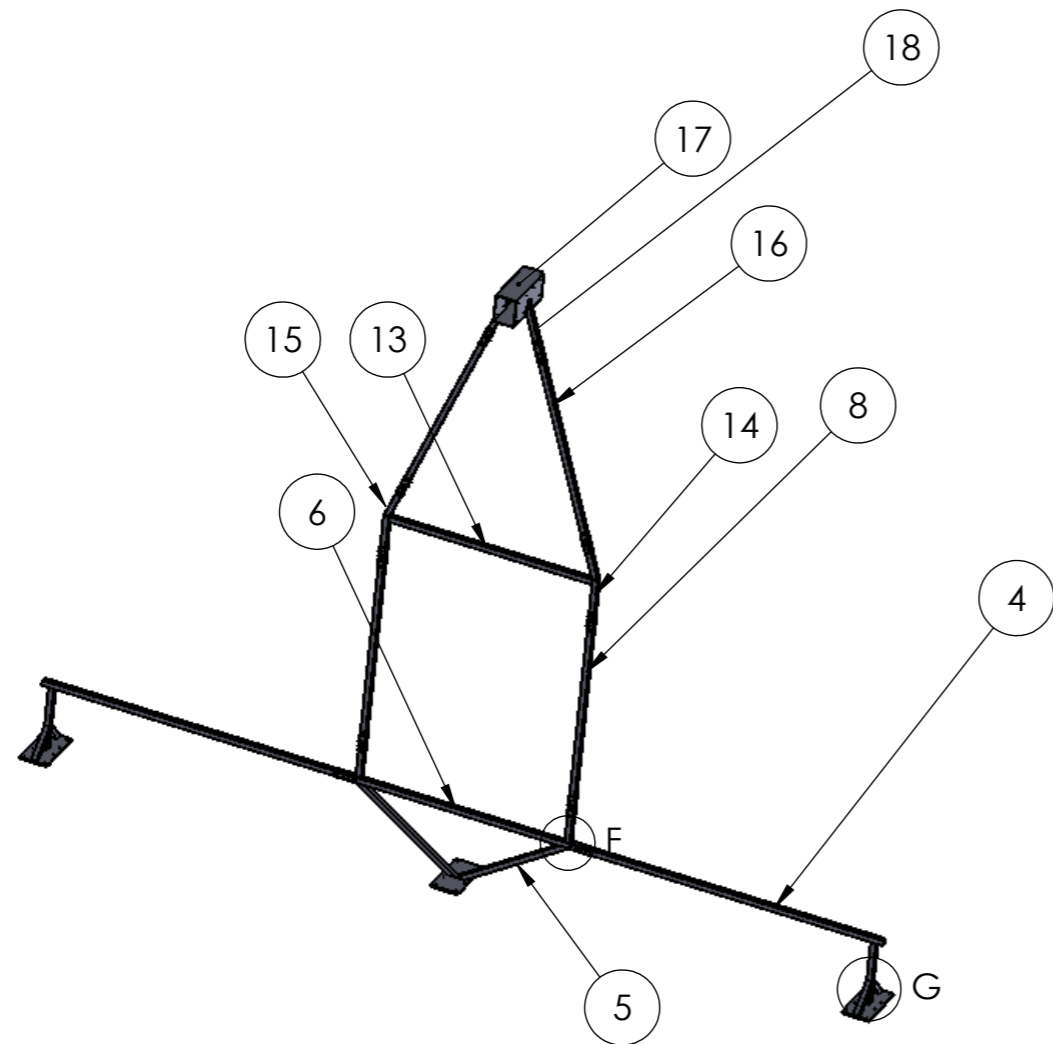


# ANEXO 2

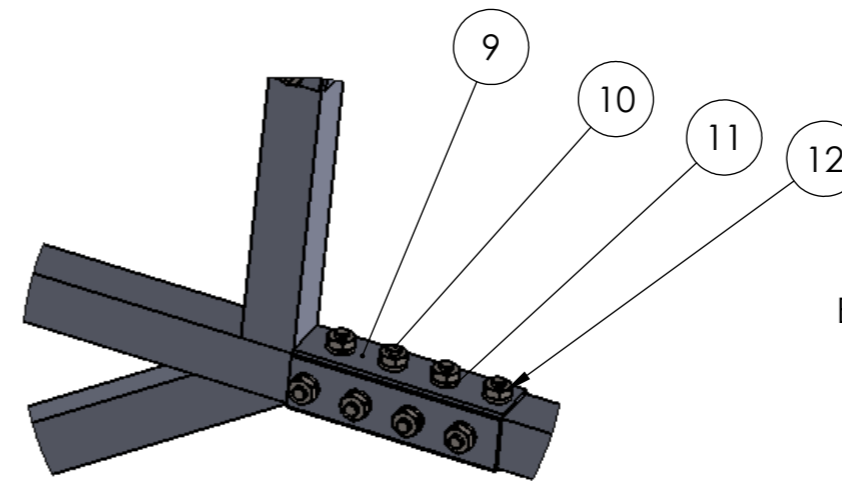
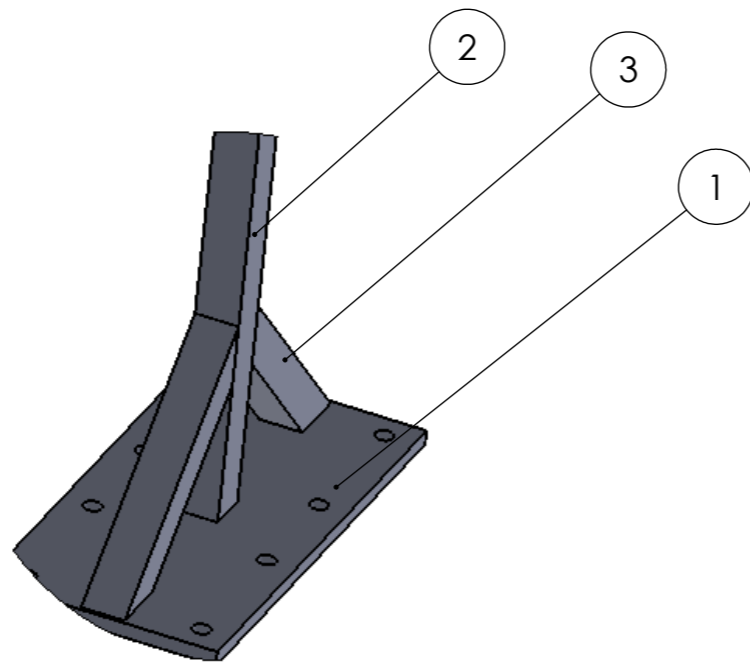
# PLANOS DE

# FABRICACION





DETAIL G  
SCALE 1 : 6



DETALLE F  
ESCALA 1 : 5

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1A	Placa cimentación	3
2	1C	Apoyo vertical cimentación	2
3	1B	Cartabón cimentación	4
4	1D	Barra de soporte de espejos	2
5	2A	Apoyo inclinado cimentación central	2
6	2B	Apoyo horizontal cimentación central	1
7	2C	Placa de unión	2
8	3	lateral vertical concentrador	2
9	7A	Placa para uniones atornilladas	40
10	HFBOLT 0.375-24x2.25x1-N	Tornillo 3/8 x 2 1/4 Rosca Estandar	80
11	Extra Duty LW 0.375	Rondana de alta presión 3/8	80
12	HHJNUT 0.3750-16-D-N	Tuerca exagonal 3/8 rosca estandar	80
13	4B	Soporte horizontal	1
14	4A		2
15	4C		2
16	5	Lateral inclinado concentrador	2
17	6B	Base área de captación	1
18	6A	Soporte área de captación	2



UNIDADES: in (mm)  
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.  
VERIF. D. Iván Duran M.  
APROB. Dr. Alejandro Zuleta  
FABR.

TÍTULO:

Ensamble general Estructura Fresnel

EF\_000

Estructura Fresnel

N.º DE DIBUJO

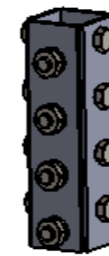
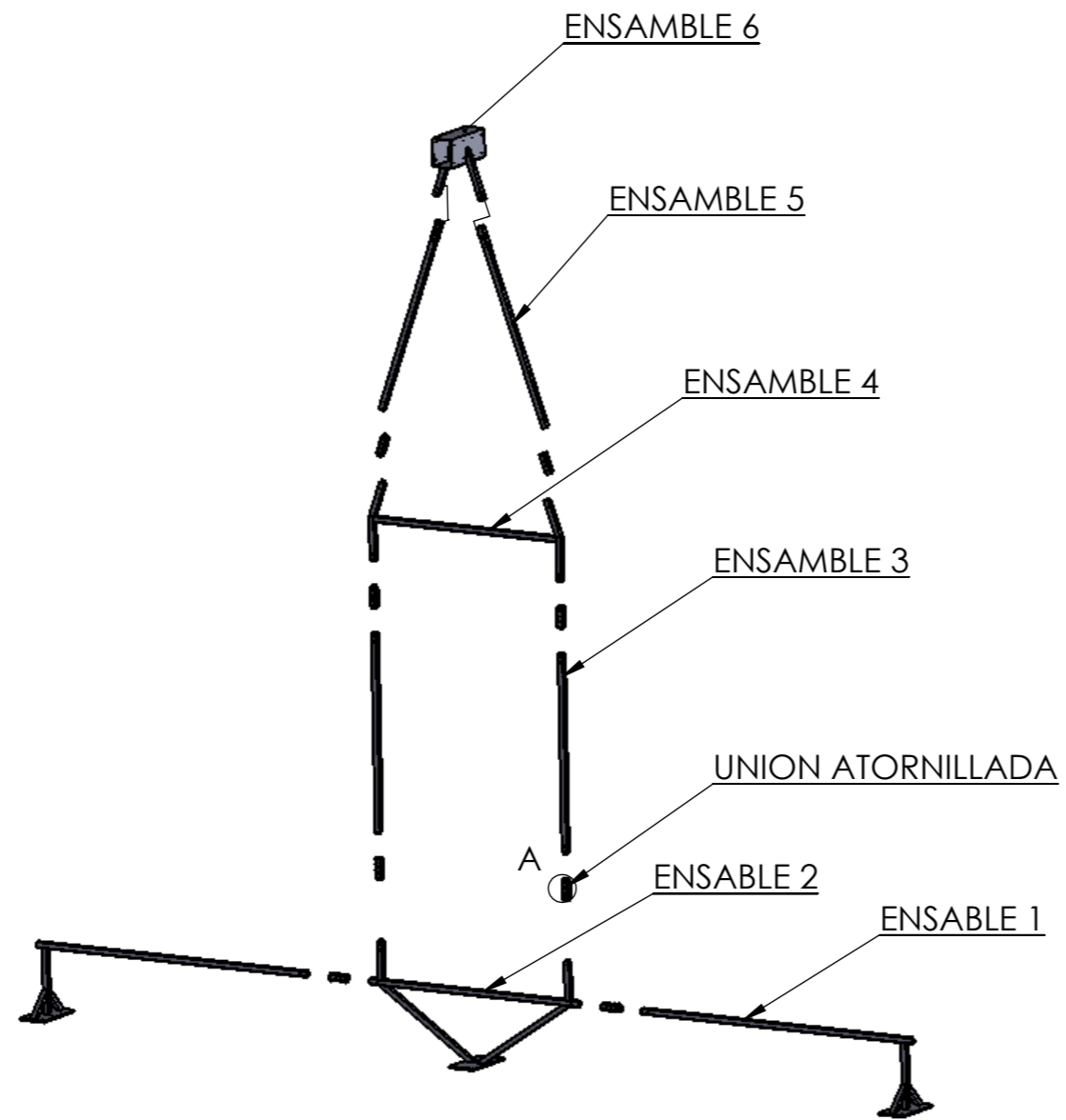


MATERIAL:  
Indicado


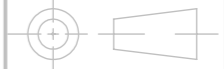
A3

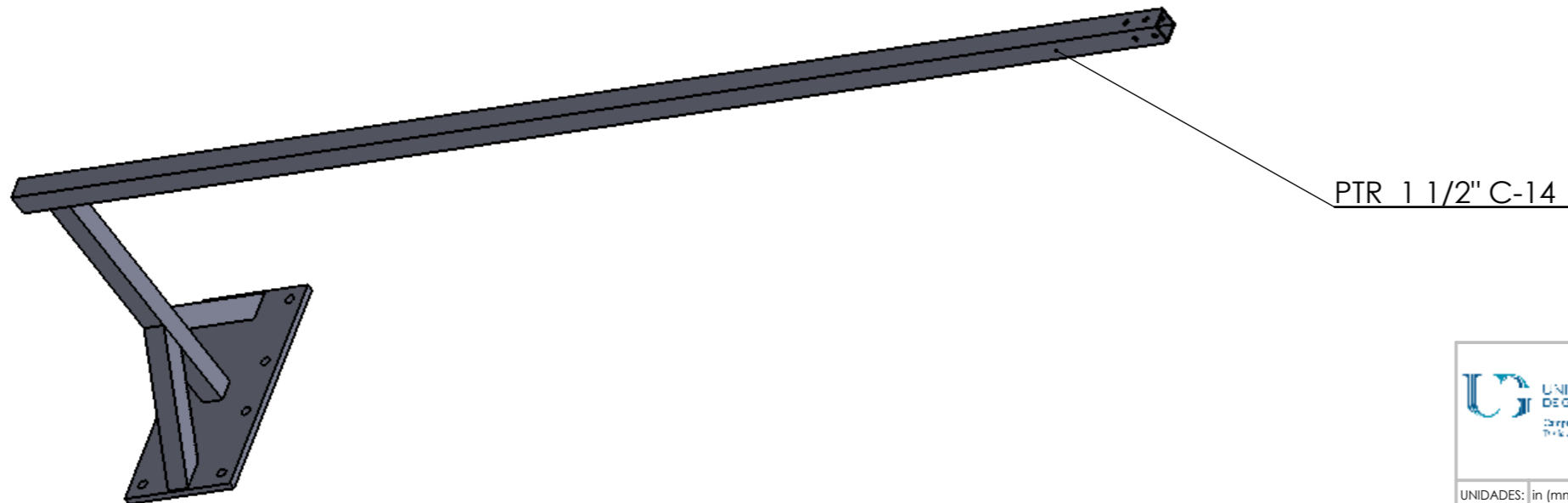
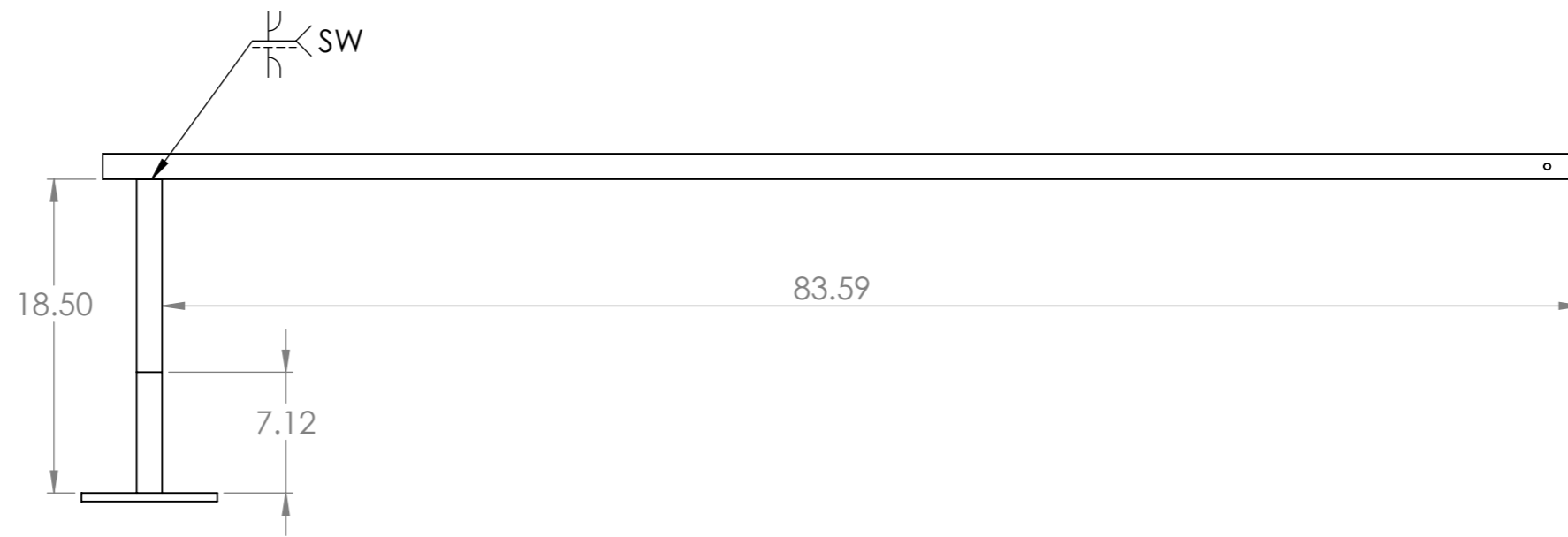
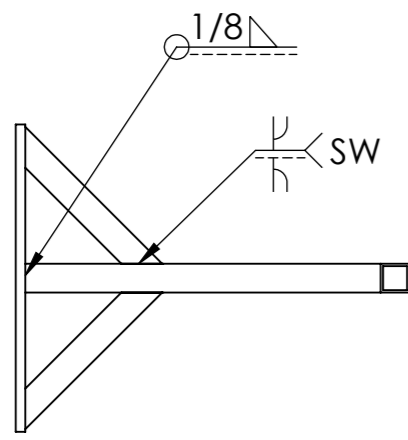
ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1



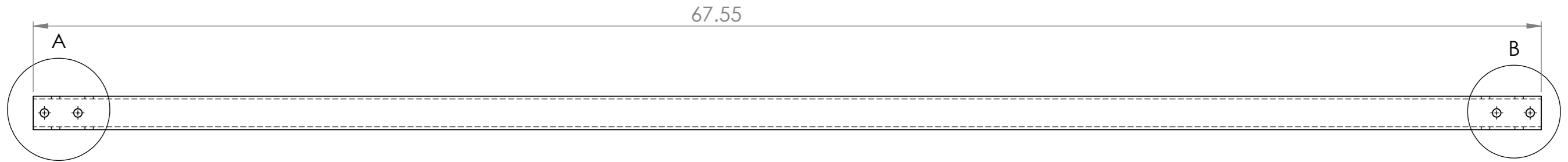
DETAIL A  
SCALE 1 : 5

		TÍTULO:		Sub-ensamble general	
		EF_000_SE		Estructura Fresnel	
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.				
VERIF.	D. Iván Duran M.				MATERIAL: Indicado
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta				A3
FABR.				ESCALA: 1:50	HOJA 1 DE 1

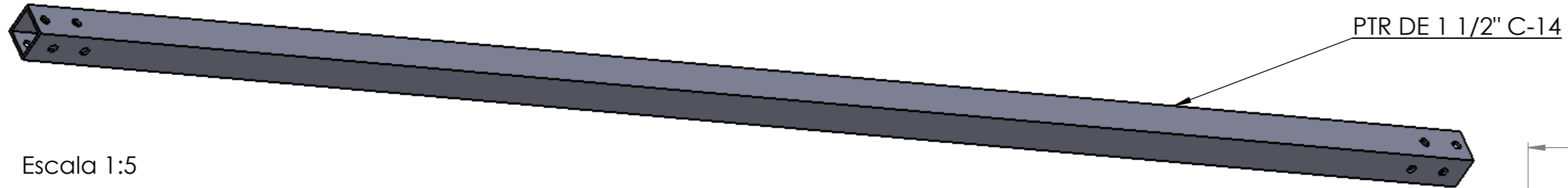


		TÍTULO: <b>Apoyo lateral cimentación</b>	
		EF_001	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			
VERIF. D. Iván Duran M.			MATERIAL: Indicado
APROB. Dr. Alejandro Zaleña			<b>A3</b>
FABR.			ESCALA: 1:10
			HOJA 1 DE 1

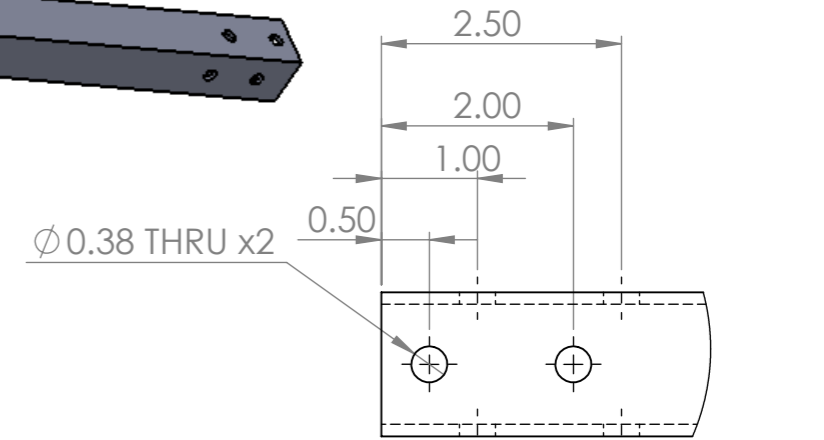
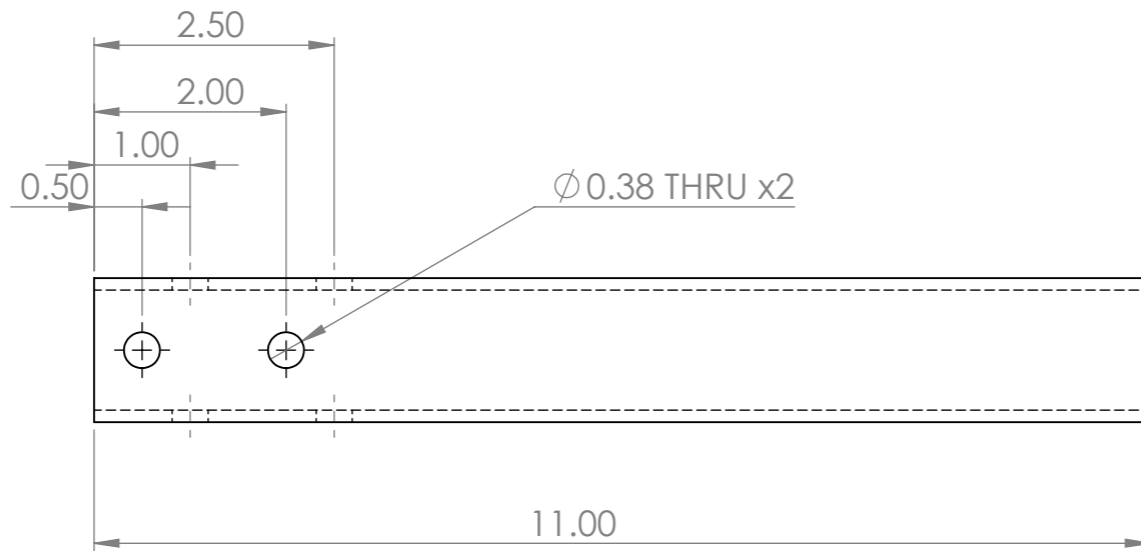




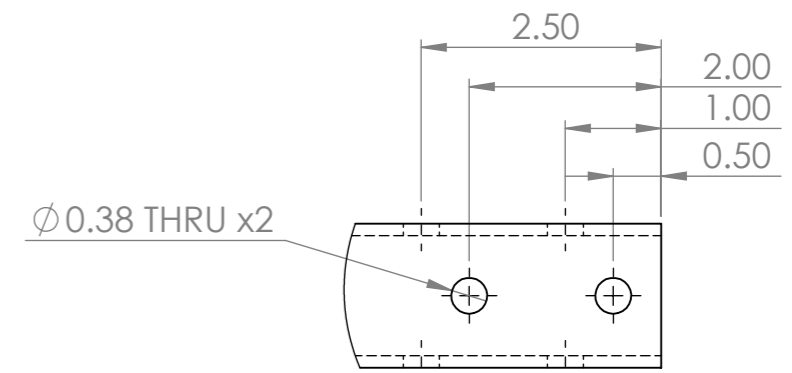
Escala 1:5



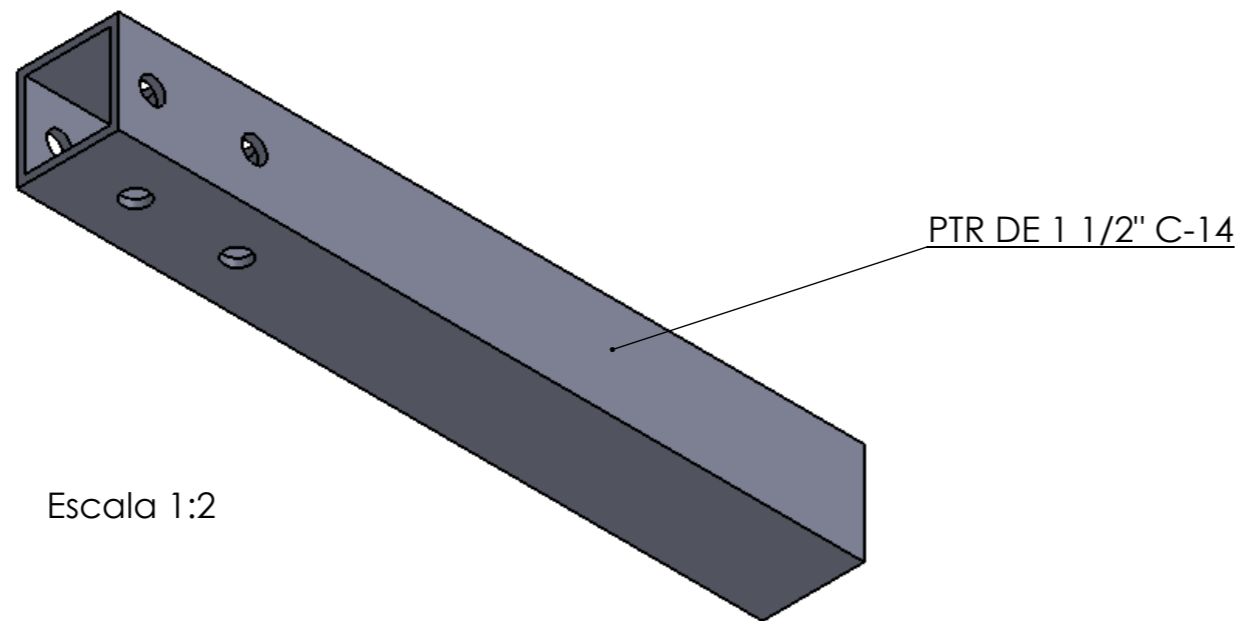
Escala 1:5



DETAIL A  
SCALE 1 : 2



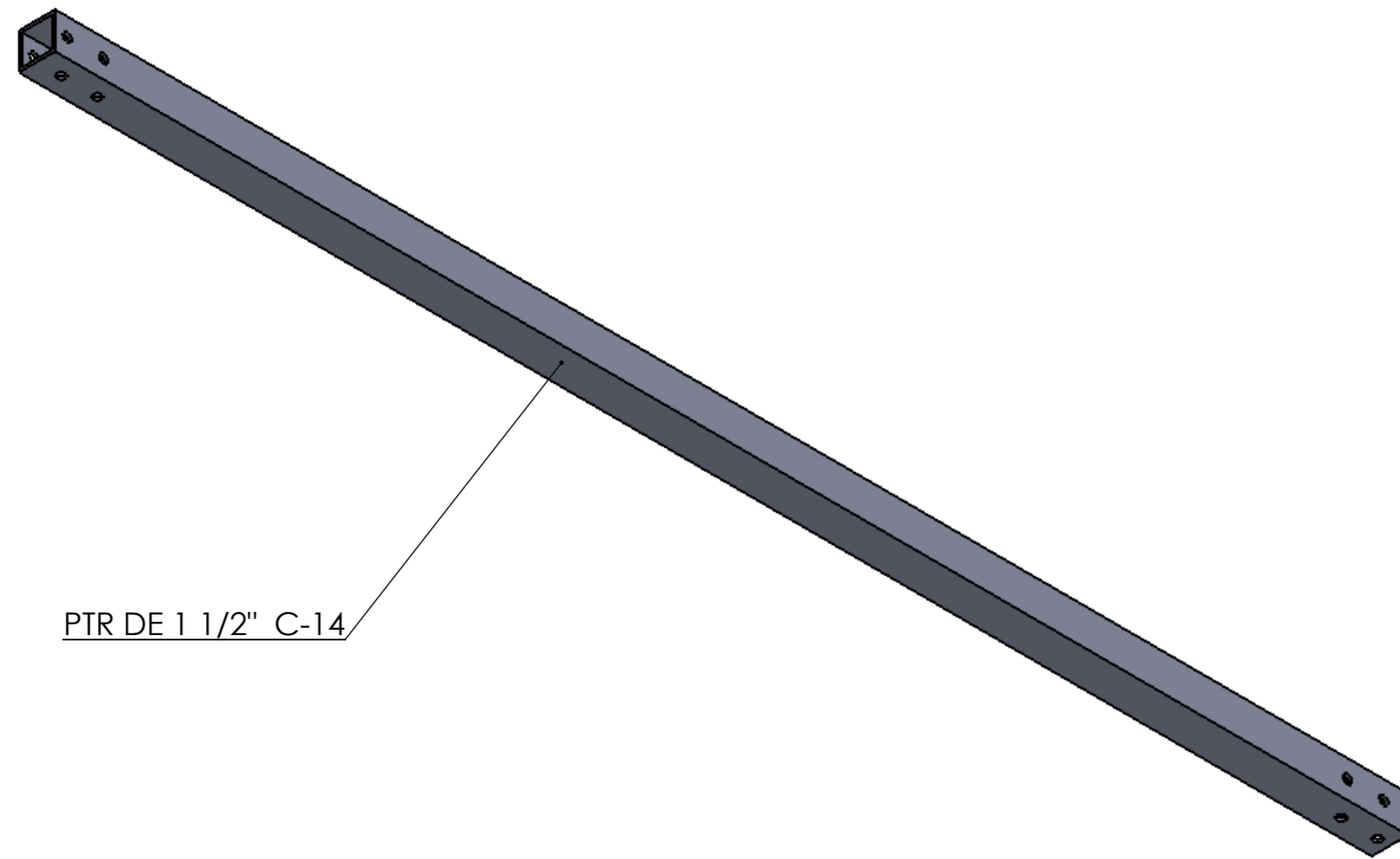
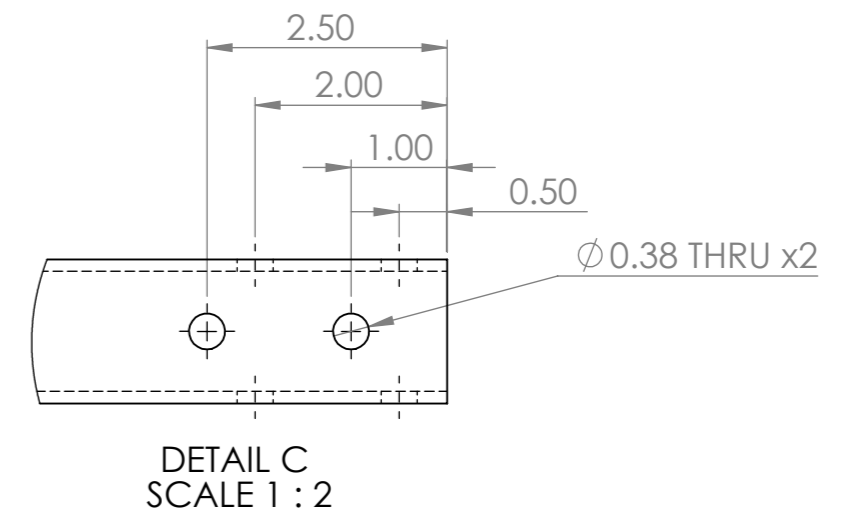
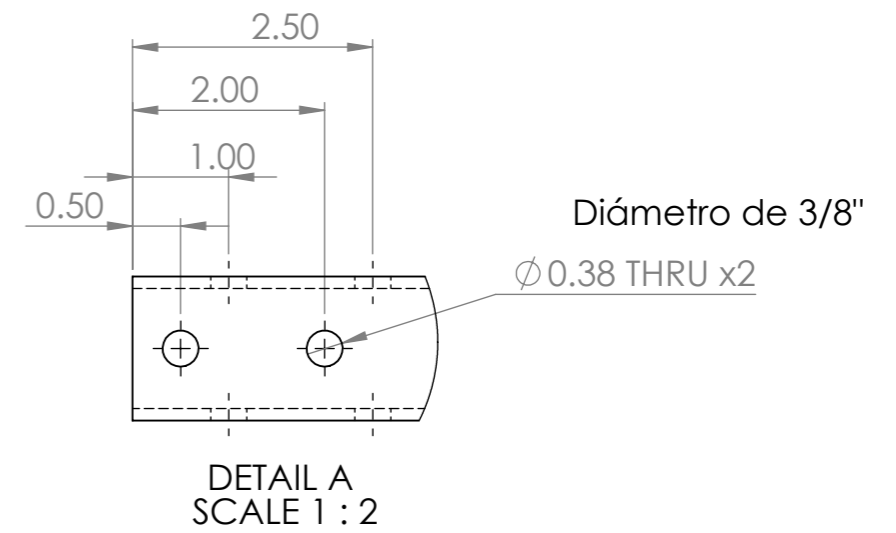
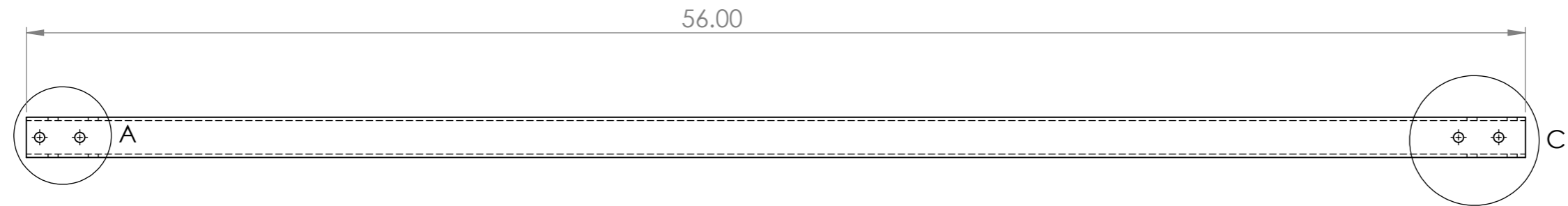
DETAIL B  
SCALE 1 : 2



Escala 1:2

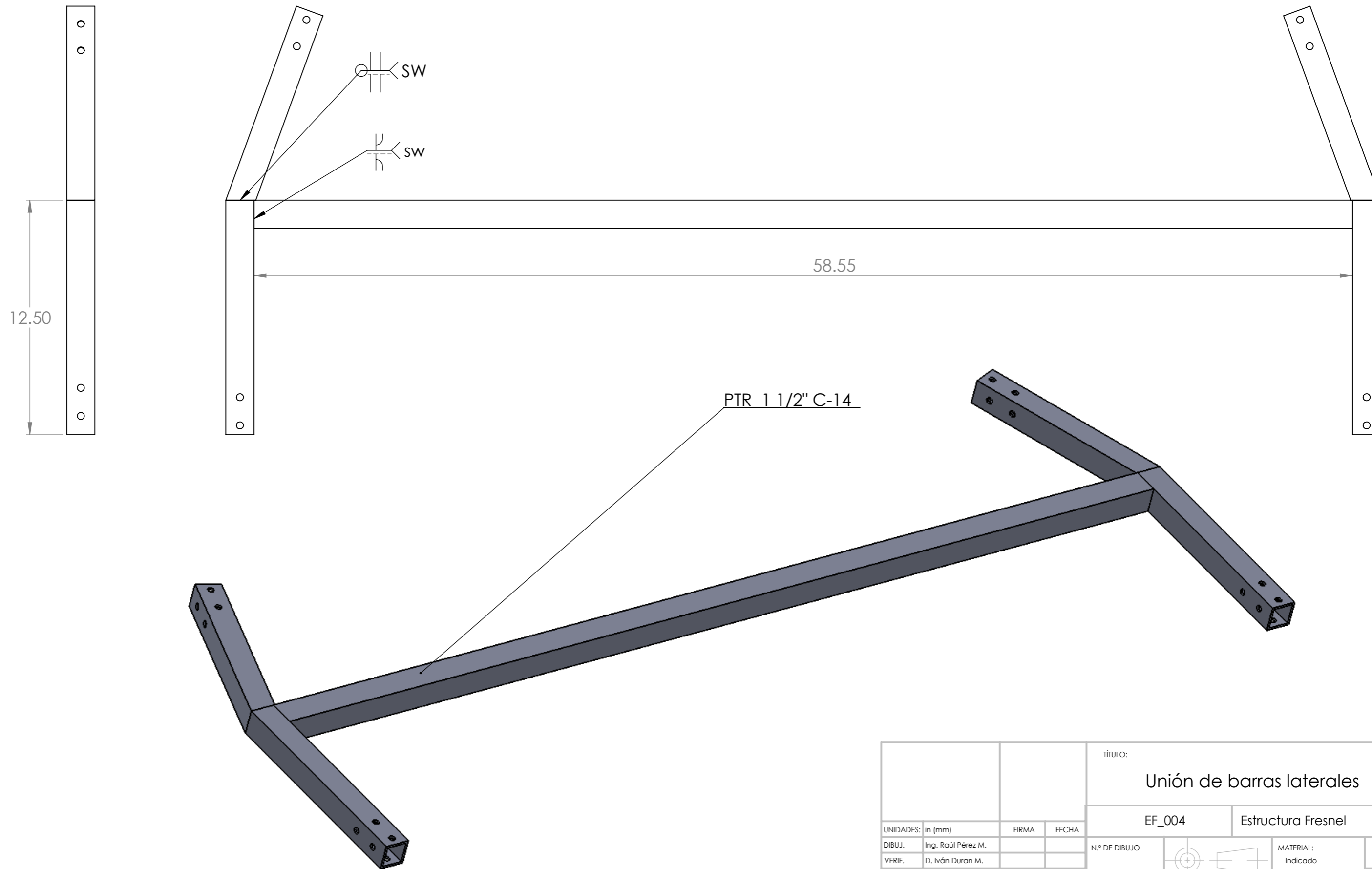
Escala 1:2



		TÍTULO: <b>Apoyo central cimentación</b>	
		EF_002_B,C	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO <b>2B, 2C</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			MATERIAL: Indicado
VERIF. D. Iván Duran M.			<b>A3</b>
APROB. Dr. Alejandro Zuleta			
FABR.			ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 1

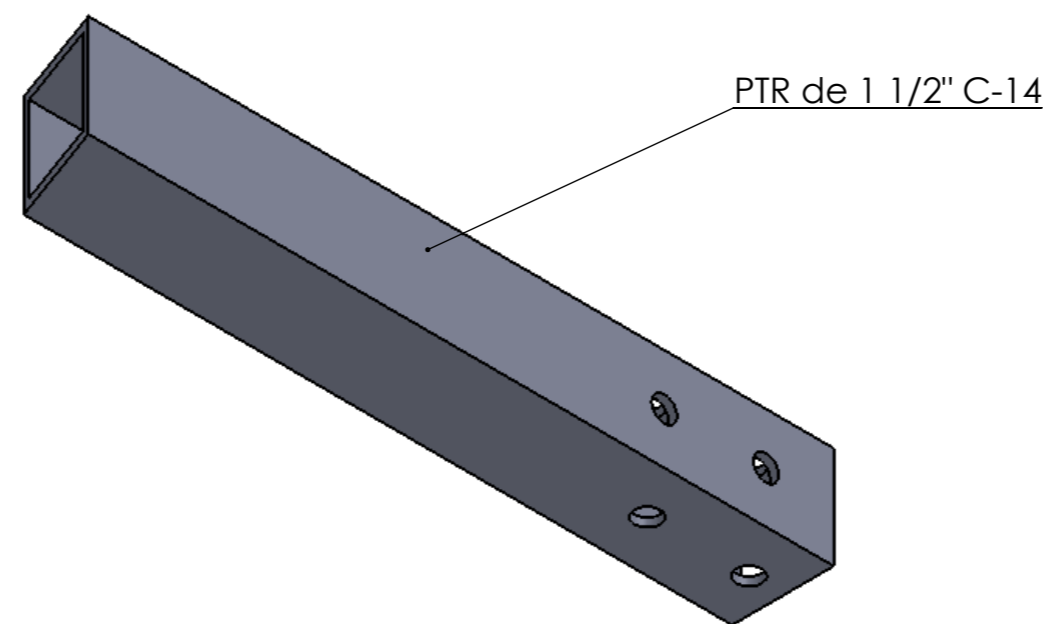
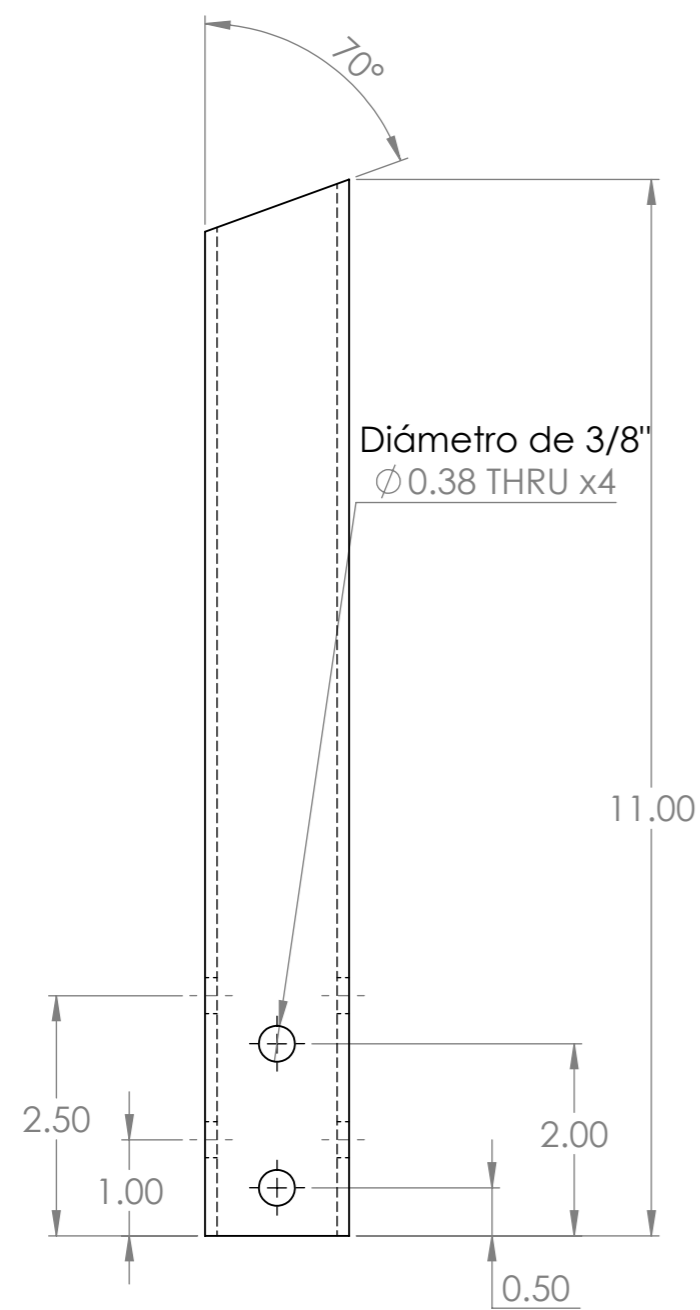
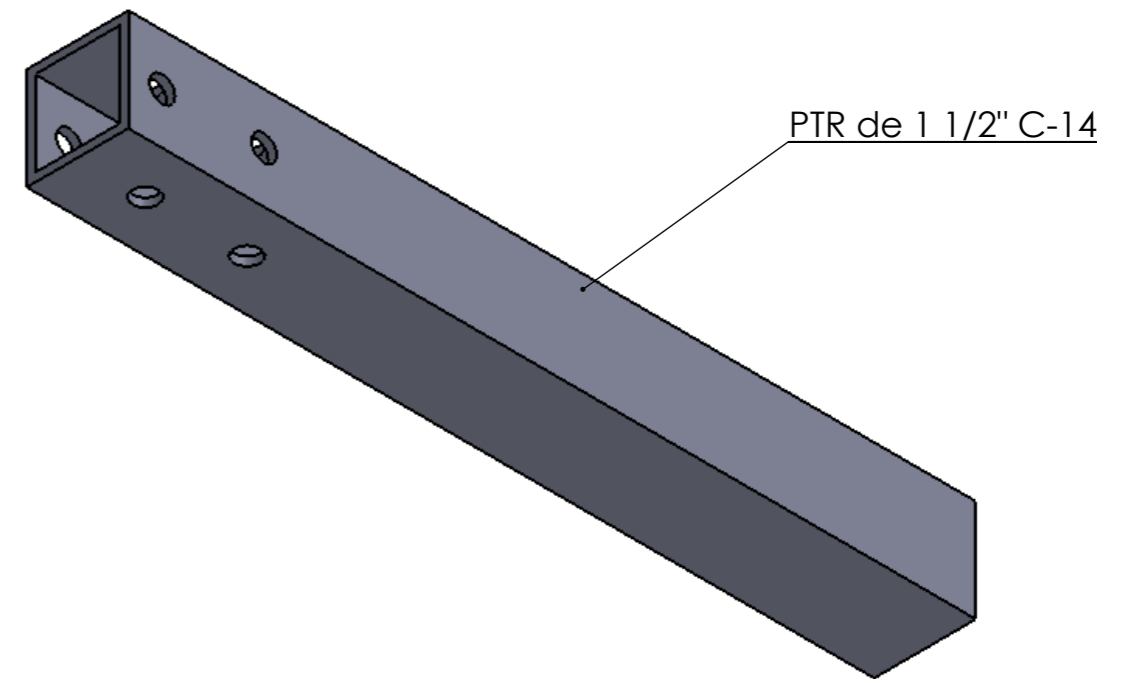
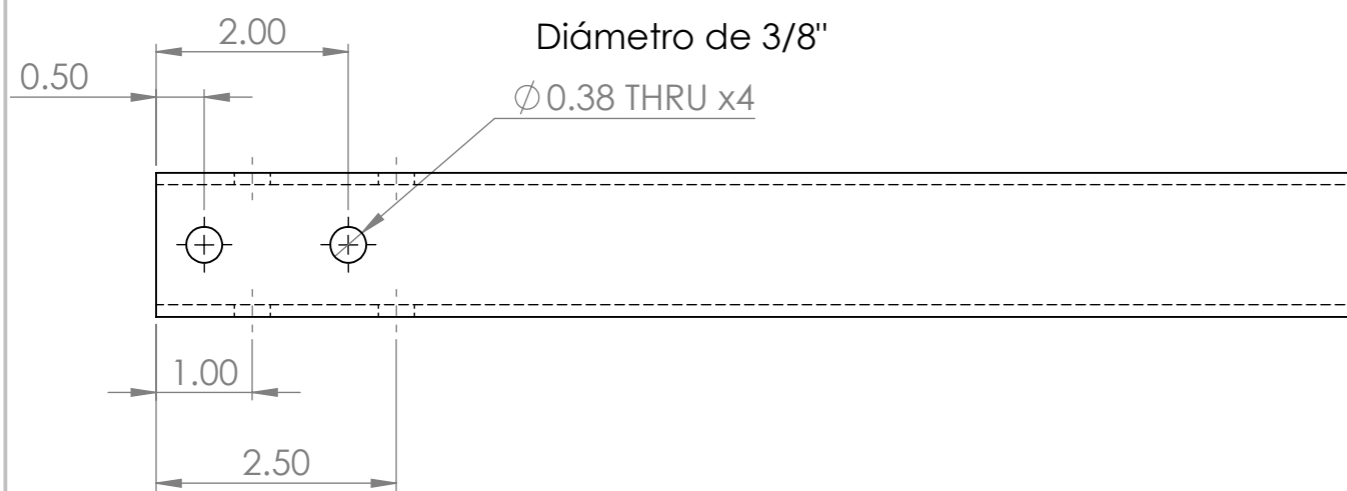




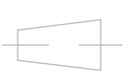
PTR DE 1 1/2" C-14

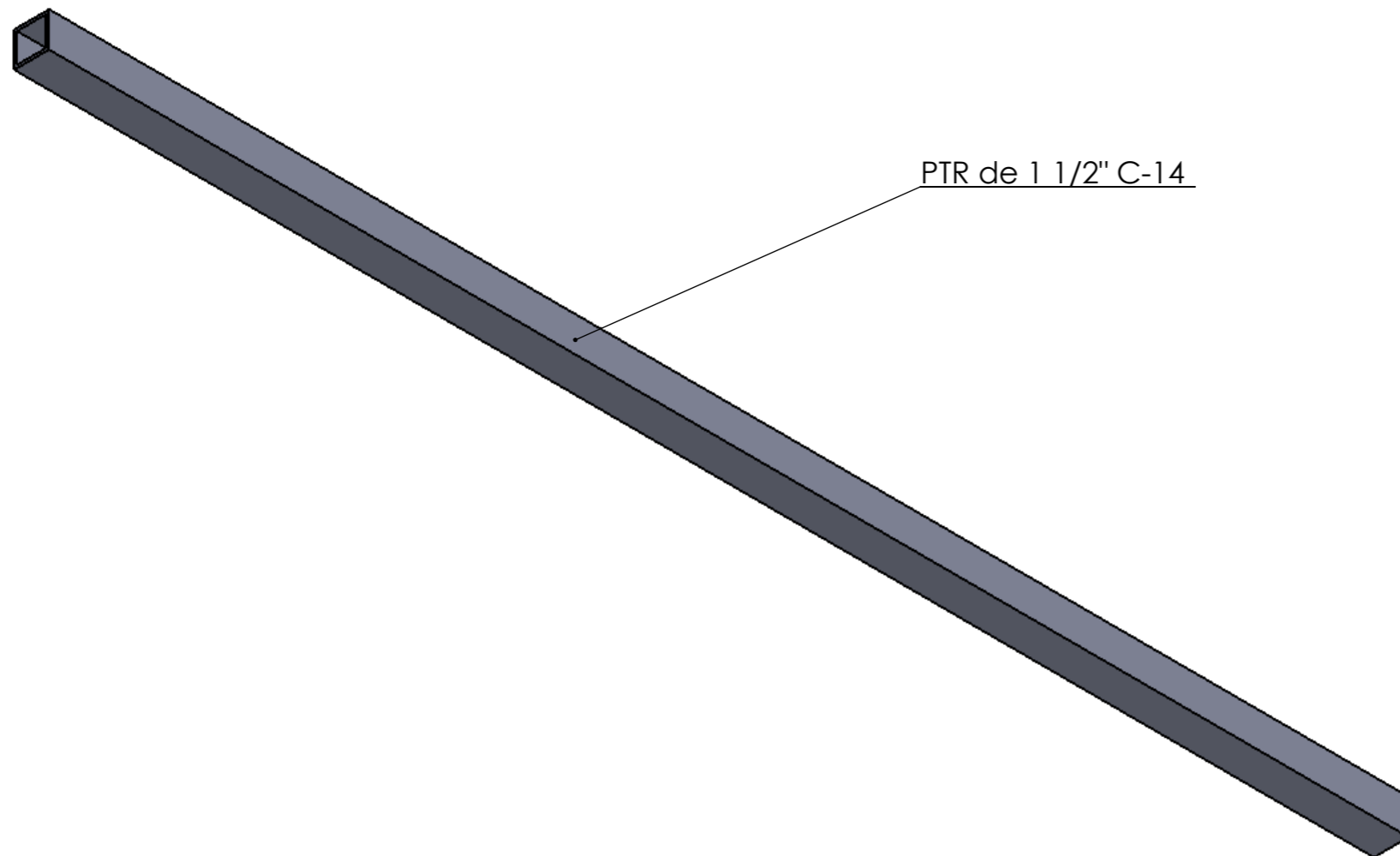
		TÍTULO:		Barra lateral vertical concentrador	
		EF_003		Estructura Fresnel	
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			3		
VERIF. D. Iván Duran M.			ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1	
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					A3
FABR.					





		TÍTULO:		Unión de barras laterales	
		EF_004	Estructura Fresnel		
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO	MATERIAL: Indicado
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.			 	A3
VERIF.	D. Iván Duran M.				
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta			ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1
FABR.					

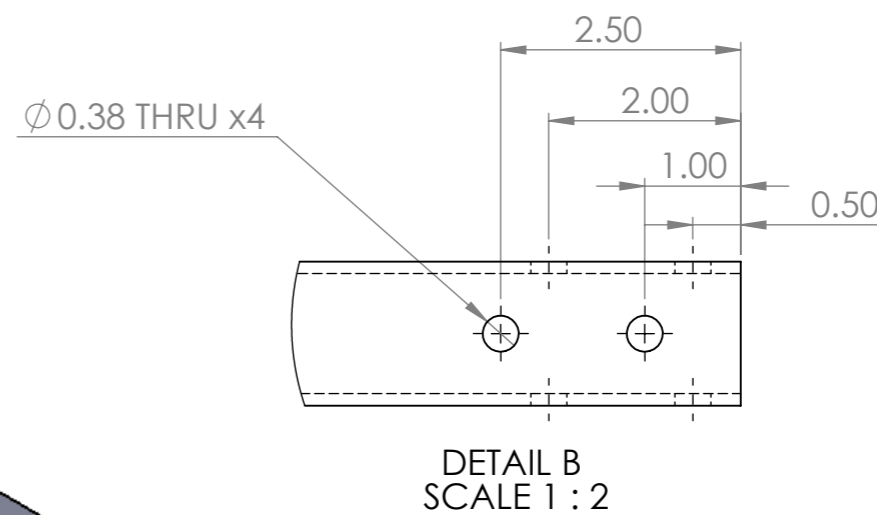
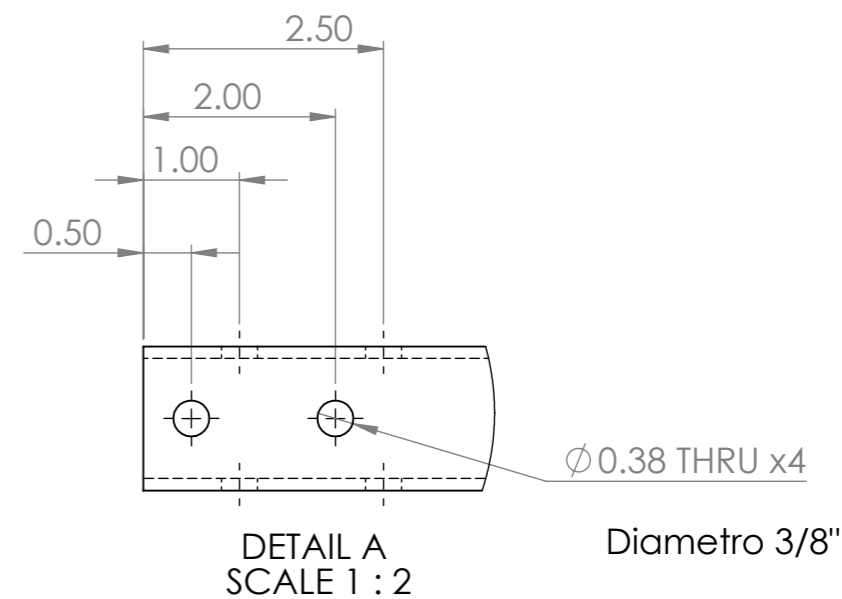
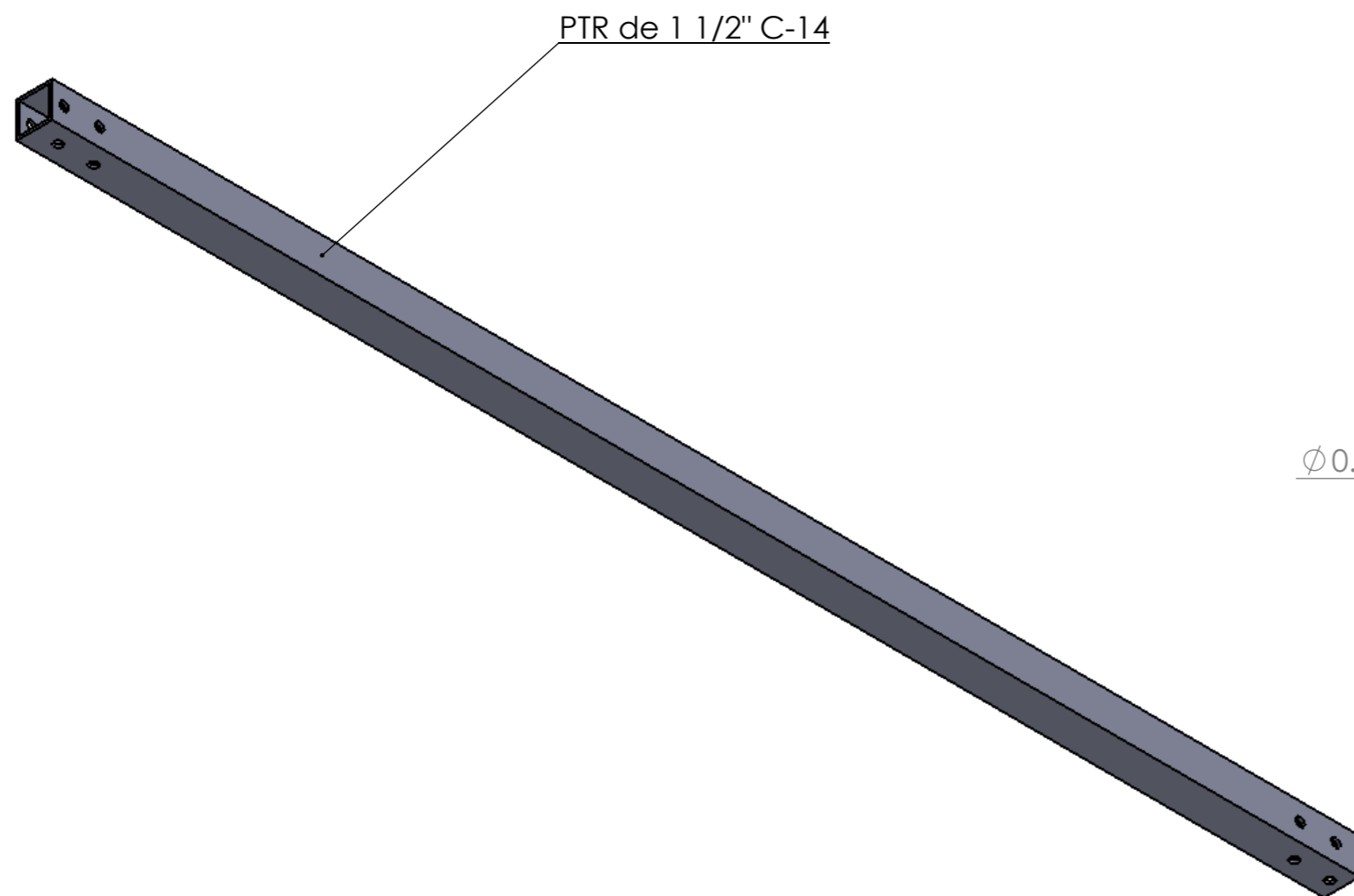
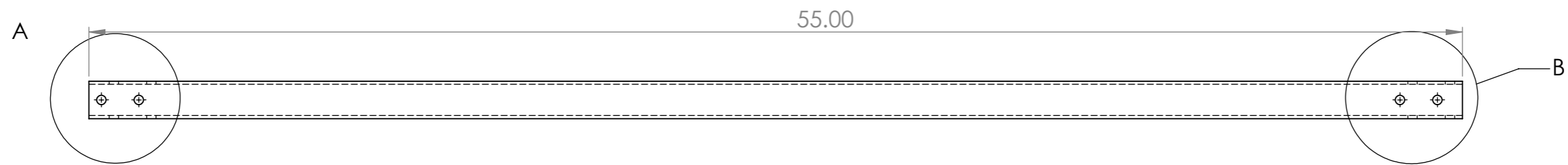




		TÍTULO:		Unión barras laterales	
UNIDADES: in (mm)		FIRMA	FECHA	EF_004_A,C	Estructura Fresnel
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.			N.º DE DIBUJO	 
VERIF.	D. Iván Duran M.			4A, 4C	
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta			ESCALA: 1:2	MATERIAL: Indicado
FABR.					A3
					HOJA 1 DE 1

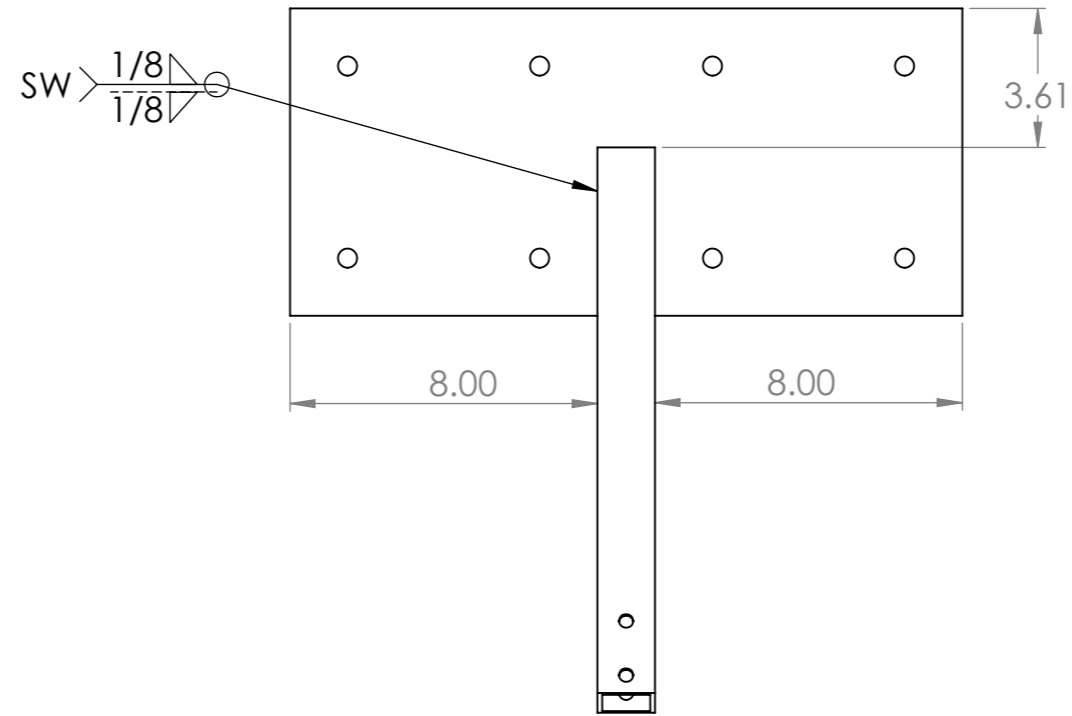
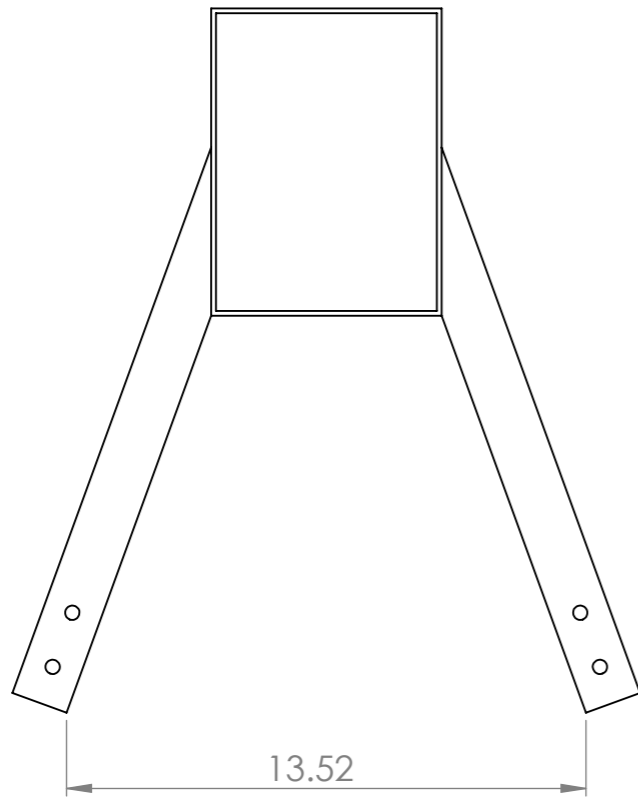


PTR de 1 1/2" C-14

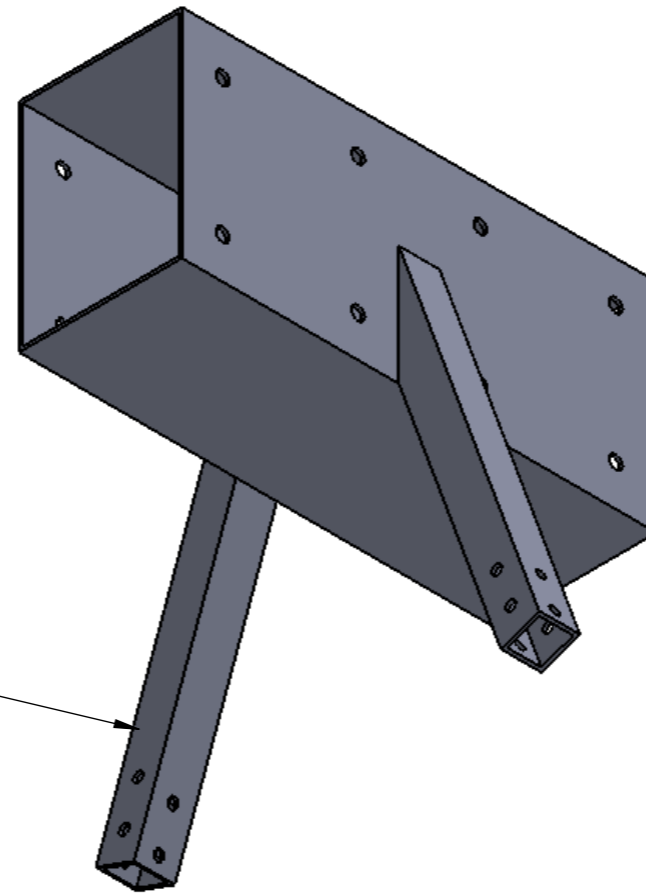
		TÍTULO: <b>Unión barras laterales</b>			
				EF_004_B	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO <b>4B</b>	MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					
VERIF. D. Iván Duran M.				ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					



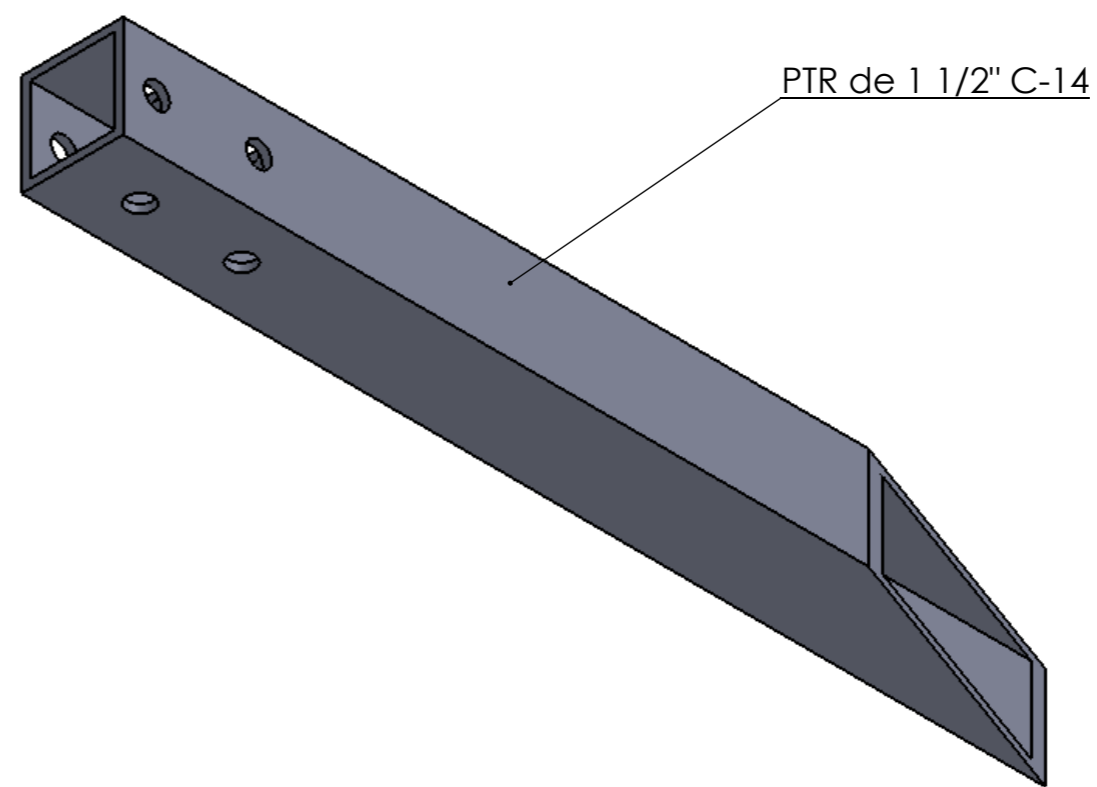
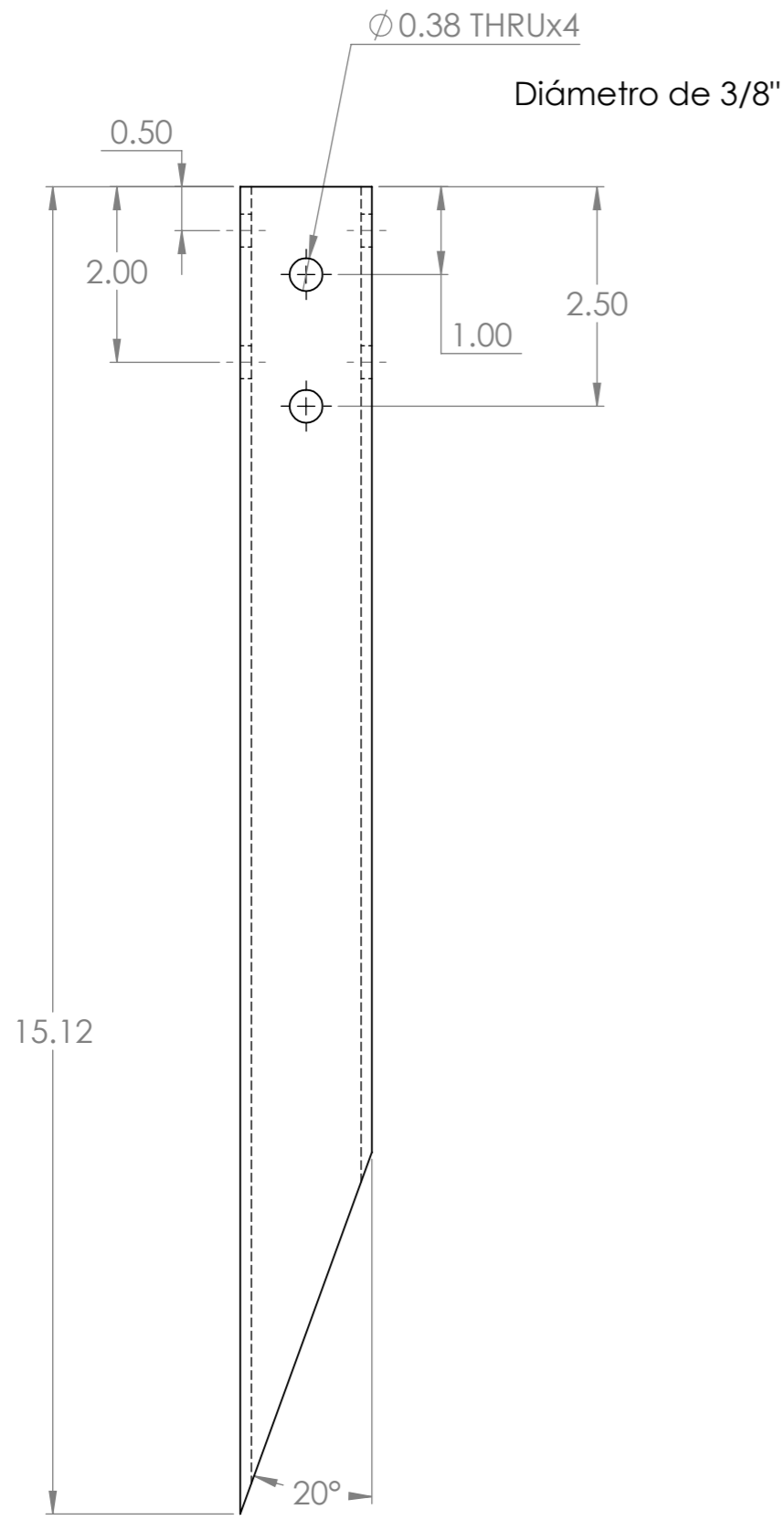
		TÍTULO:		Barra lateral inclinada concentrador	
		EF_005		Estructura Fresnel	
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			5		A3
VERIF. D. Iván Duran M.					
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.			ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1





PTR 1 1/2" C-14

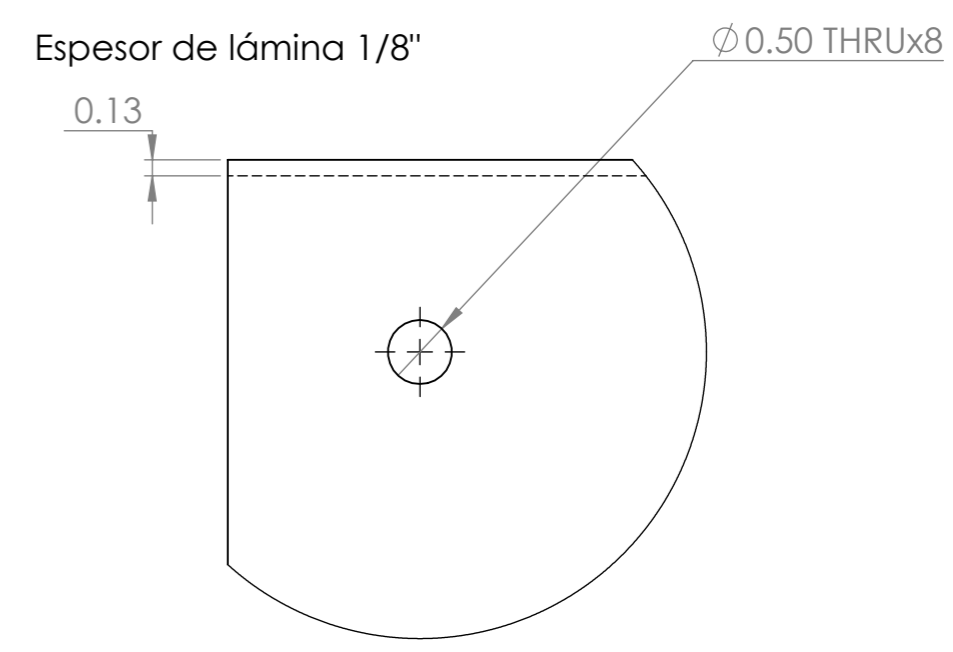
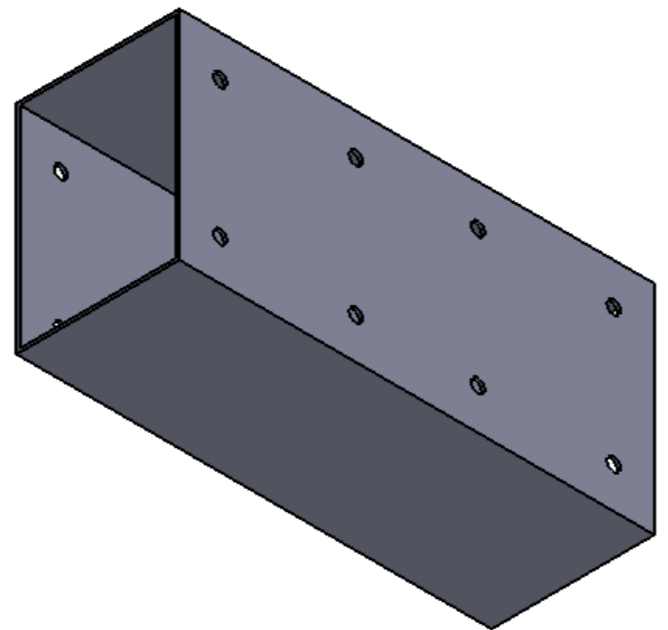
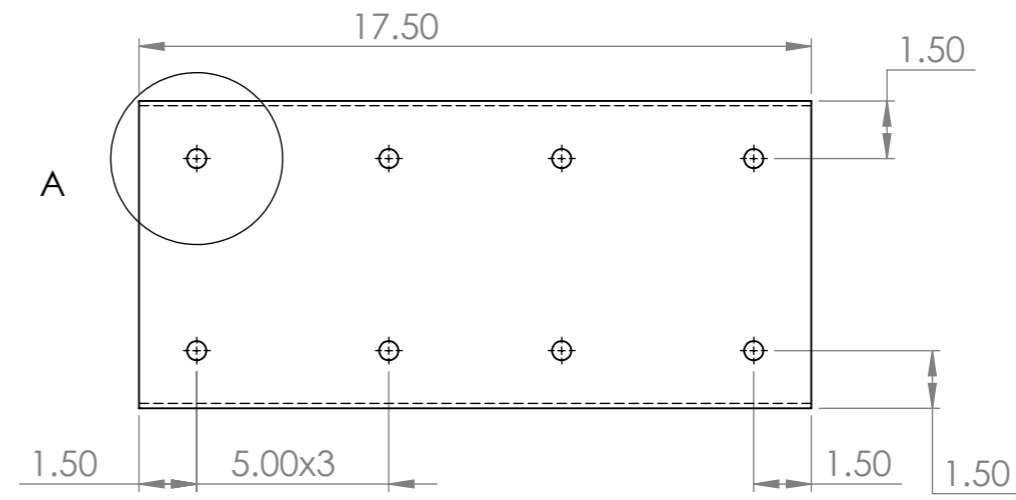
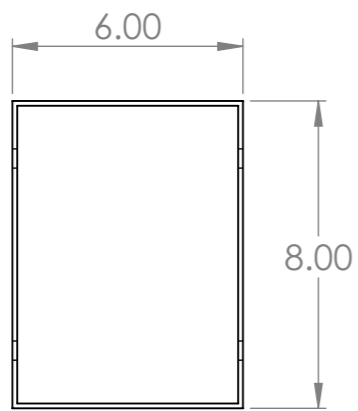


		TÍTULO:		Soporte área de concentración				
		EF_006		Estructura Fresnel				
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL:	Indicado	A3
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.					ESCALA: 1:5		
VERIF.	D. Iván Duran M.							
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta							
FABR.								


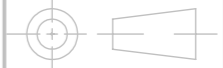


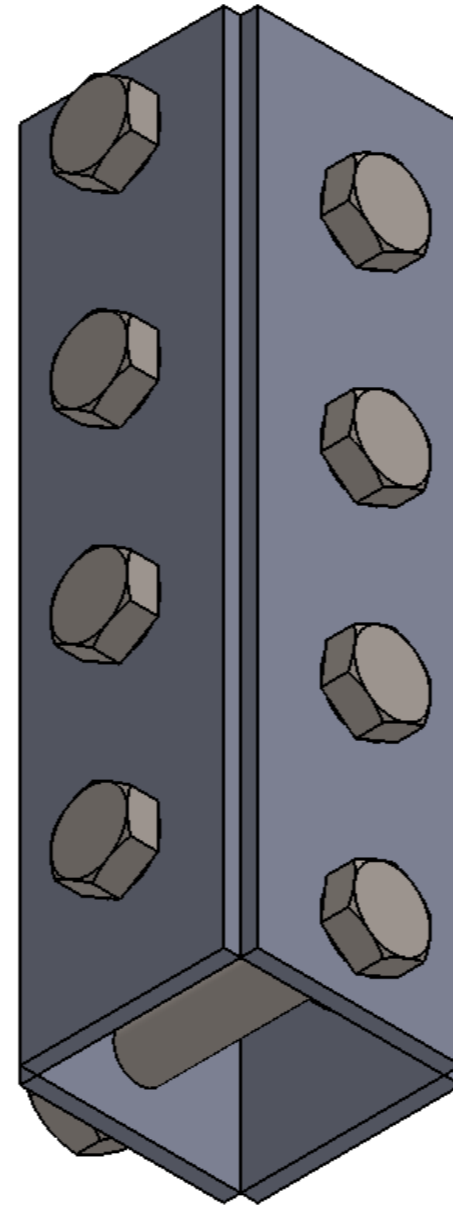
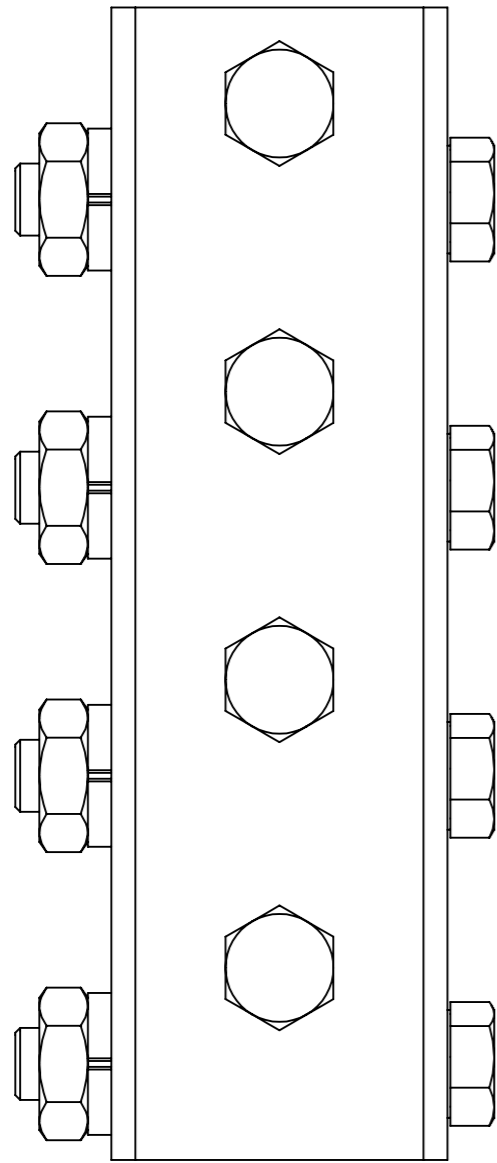
		TÍTULO: <b>Soporte área de concentración</b>	
UNIDADES: in (mm)		FIRMA	FECHA
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.	N.º DE DIBUJO <b>6A</b>	Estructura Fresnel	
VERIF. D. Iván Duran M.		MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
APROB. Dr. Alejandro Zaleña	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1	
FABR.			



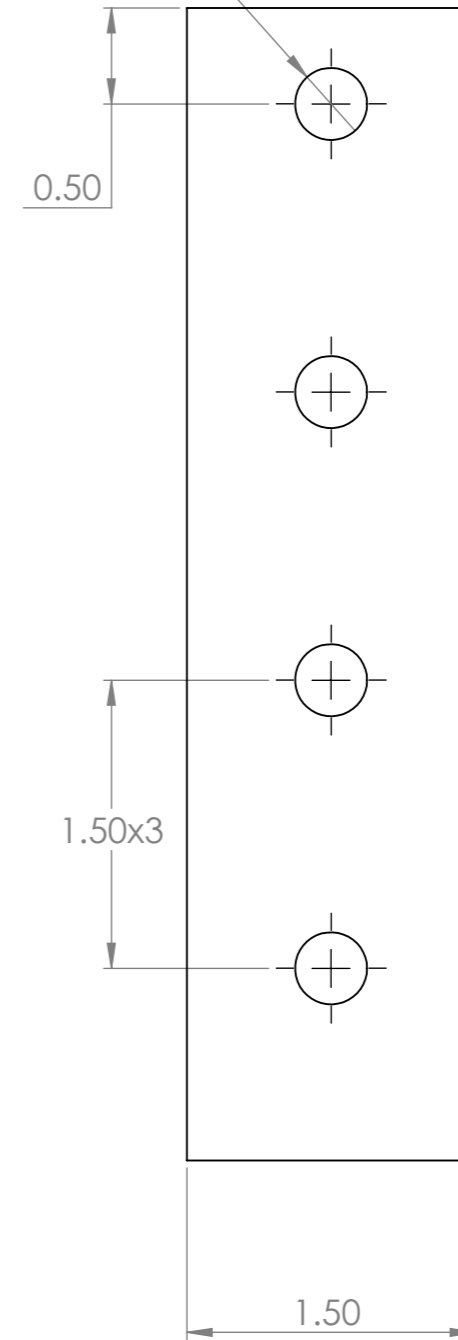


DETAIL A  
SCALE 2 : 3

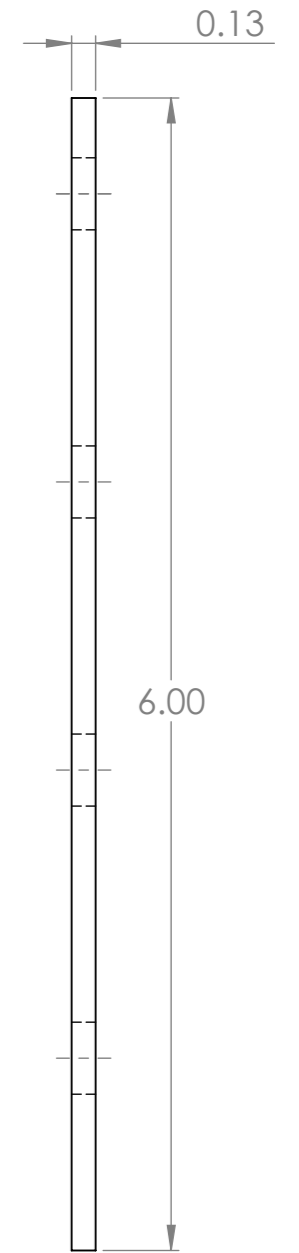
		TÍTULO: <b>Soporte área de concentración</b>			
				EF_006_B	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO <b>6B</b>	 MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					
VERIF. D. Iván Duran M.			ESCALA: 1:5		HOJA 1 DE 1
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					

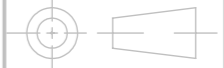


Diámetro 3/8"  
 $\varnothing 0.38$  THRU x4

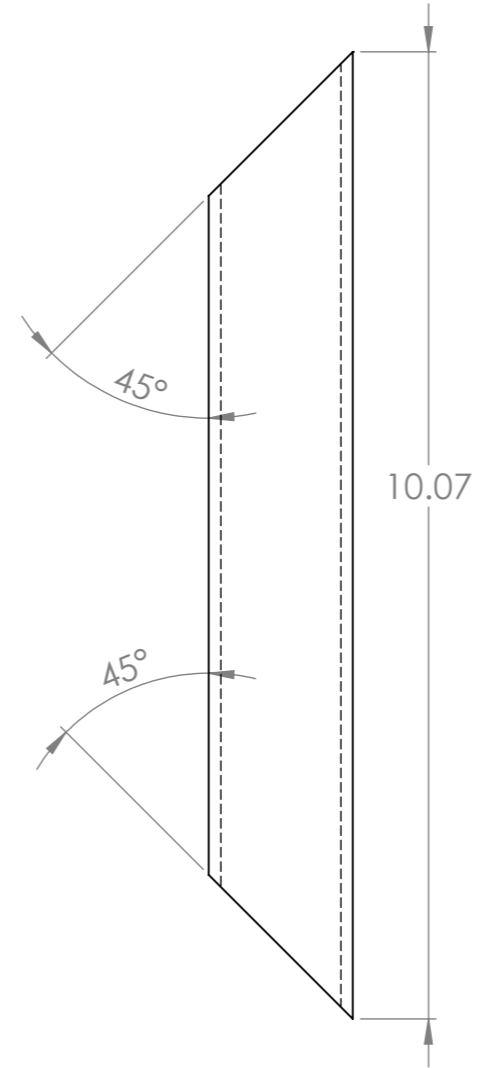
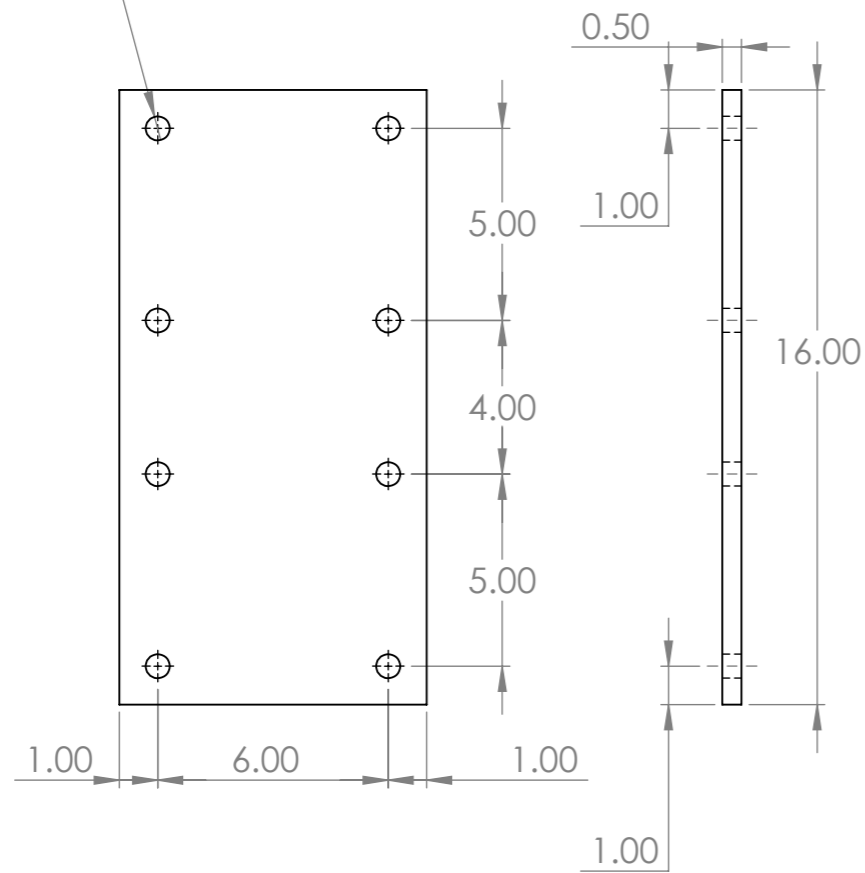


Espesor de lámina 1/8"

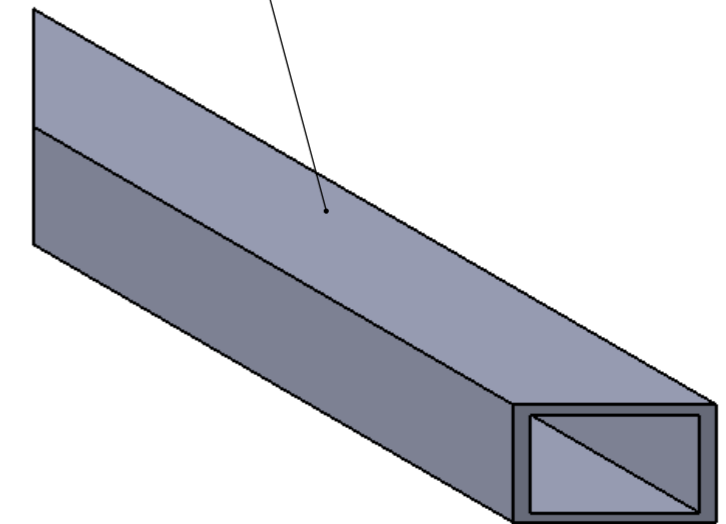


		TÍTULO:		Acoplamiento			
		EF_007				Estructura Fresnel	
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado	A3
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.			7			
VERIF.	D. Iván Duran M.						
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta						
FABR.							
ESCALA: 1:1				HOJA 1 DE 1			

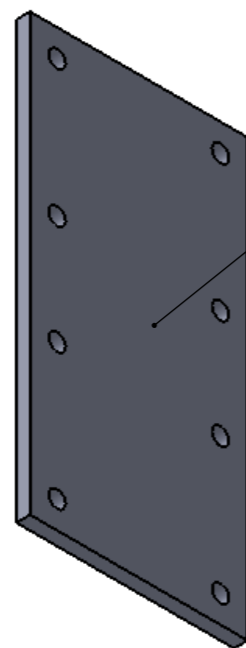
Ø0.62 THRU X8

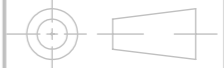


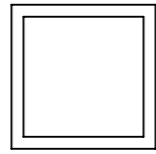
PTR DE 1 1/2" C-14



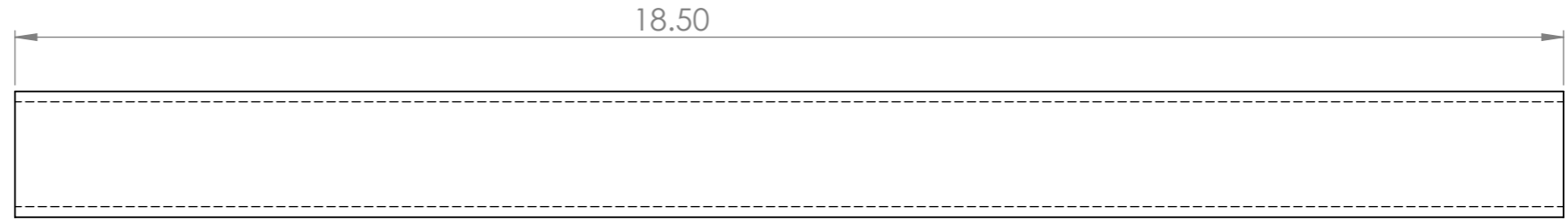
PLACA DE 1/2" DE ESPESOR



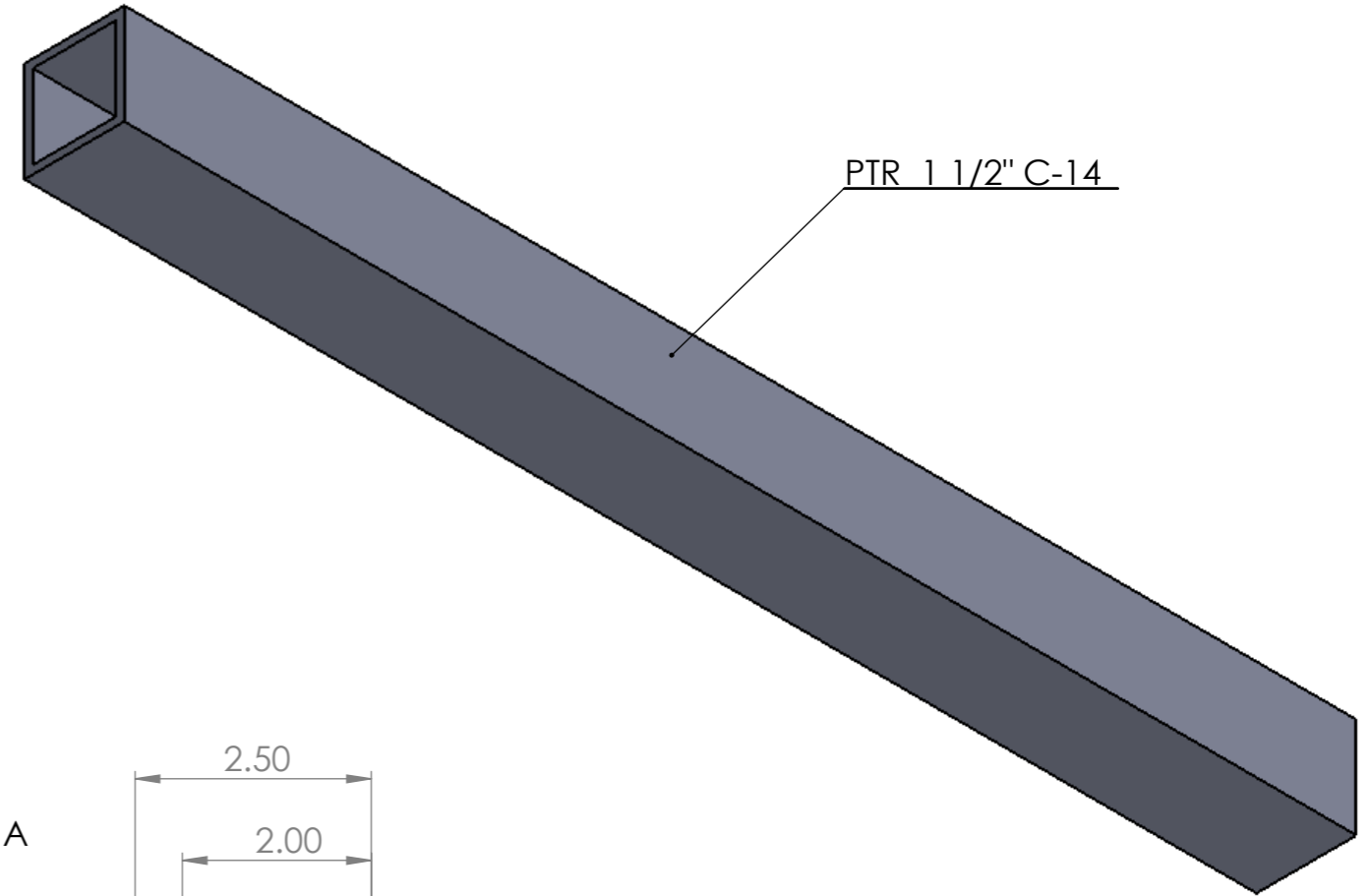
		TÍTULO:		Apoyo lateral cimentación	
		EF_001_A,B		Estructura Fresnel	
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					A3
VERIF. D. Iván Duran M.					
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.			ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1



Escala 1:2



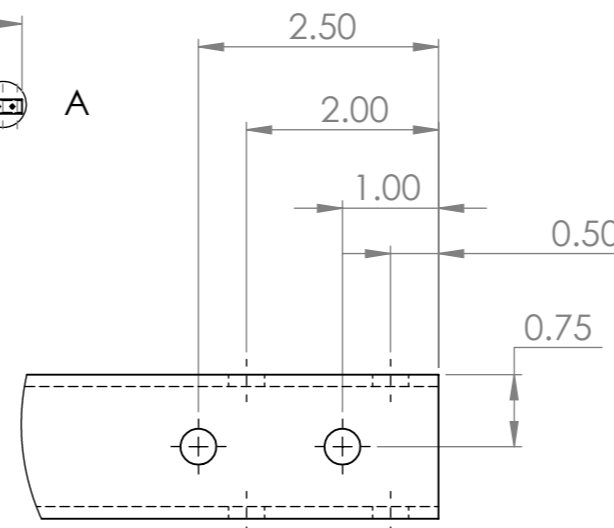
Escala 1:2



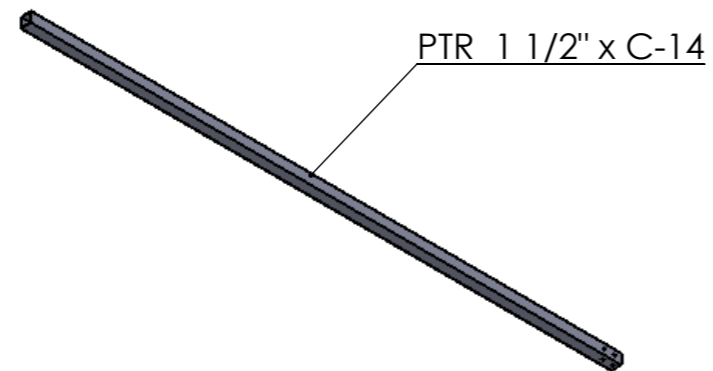
Escala 1:20





A

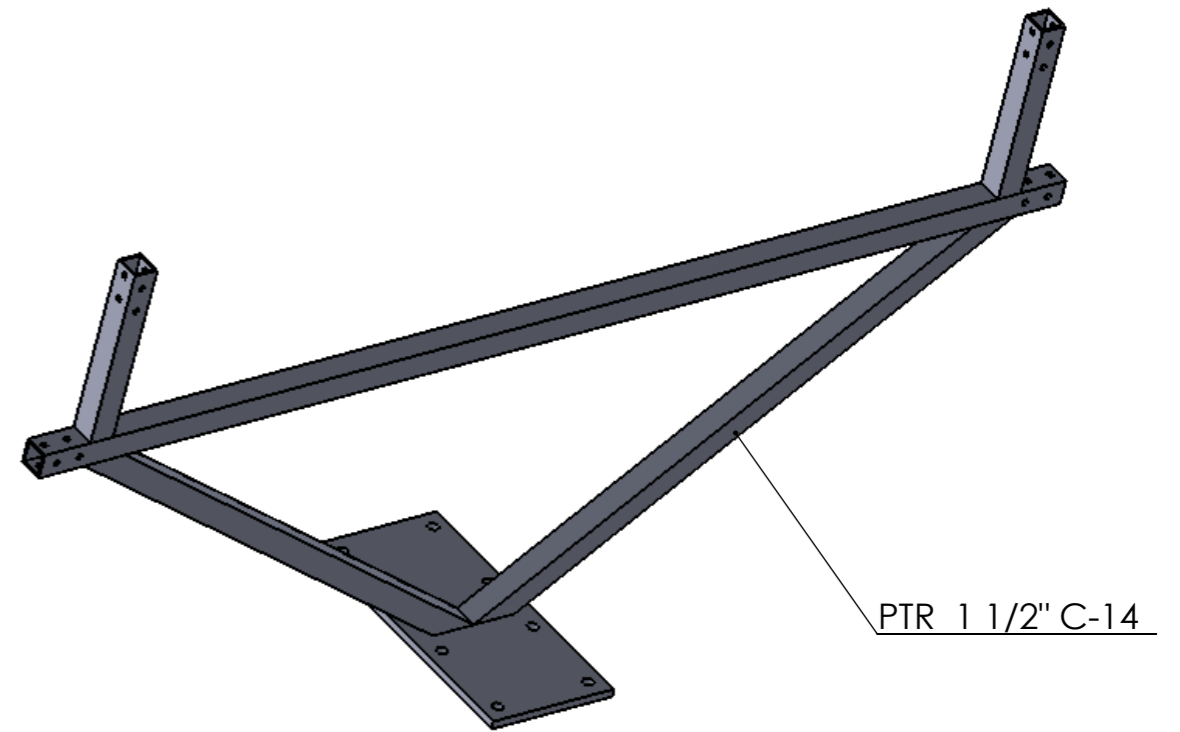
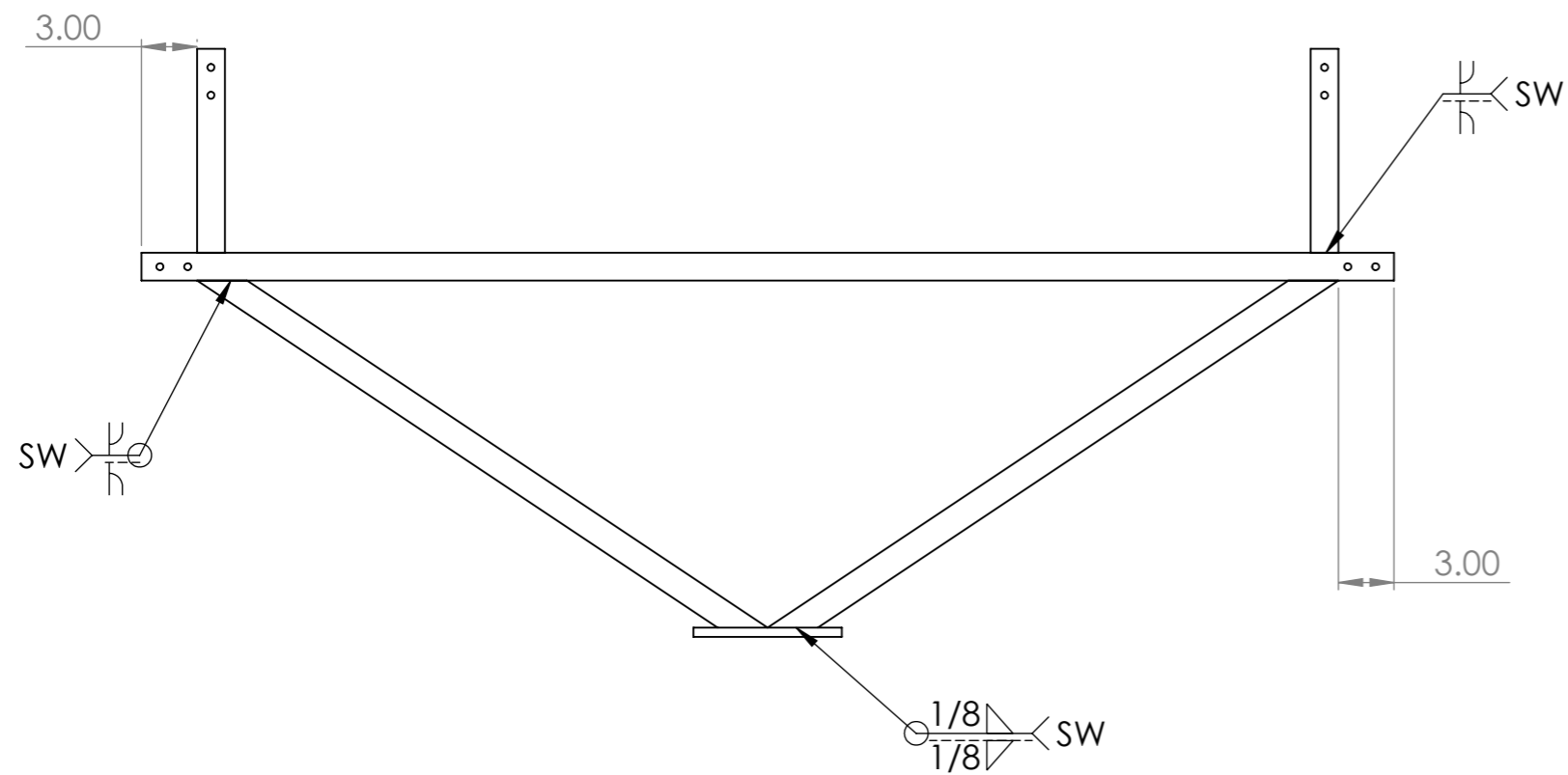
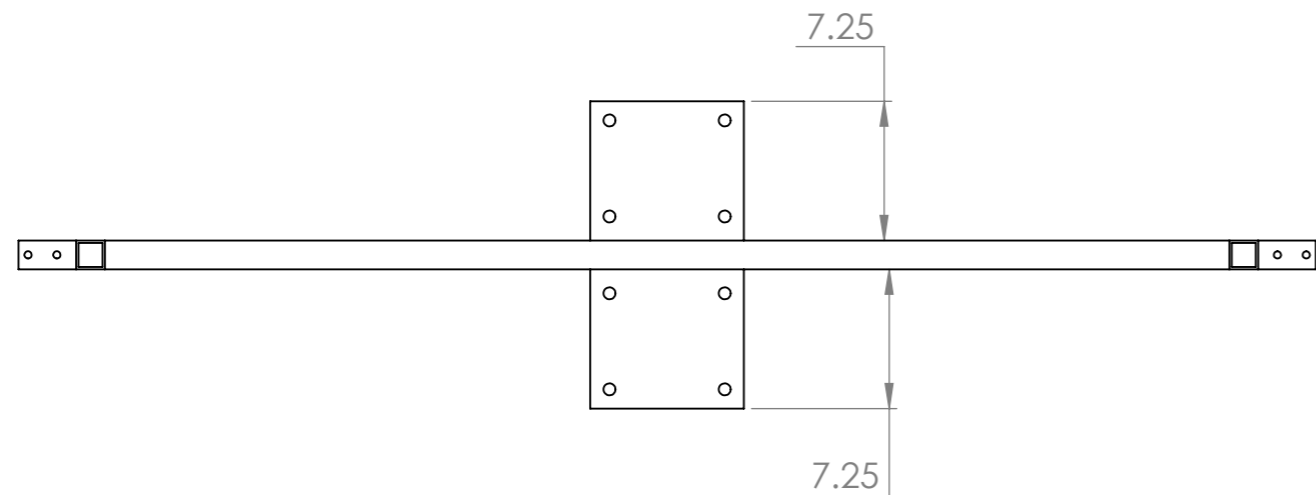




DETAIL A  
SCALE 1 : 2

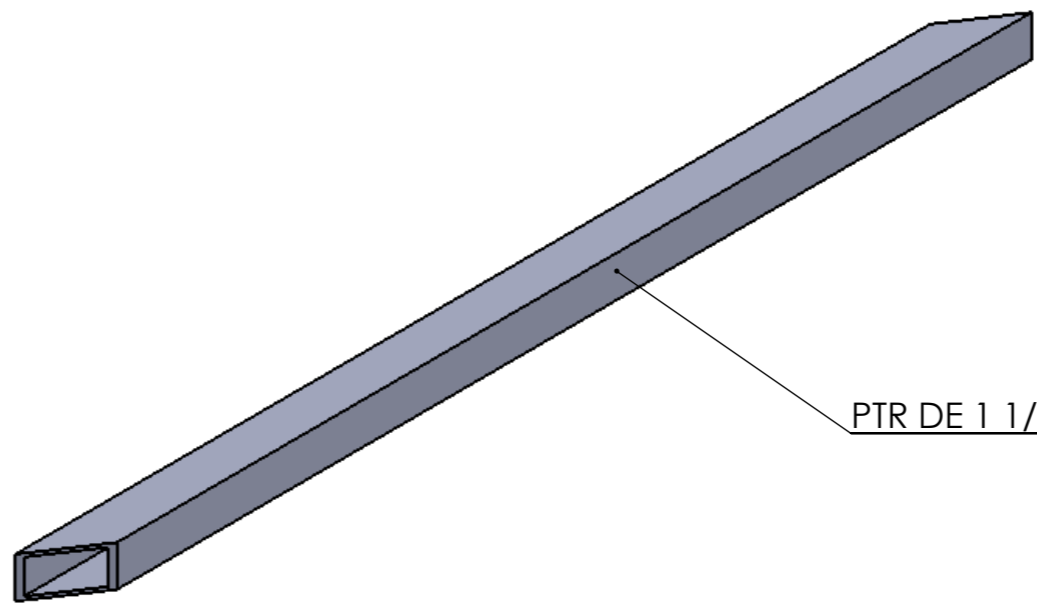
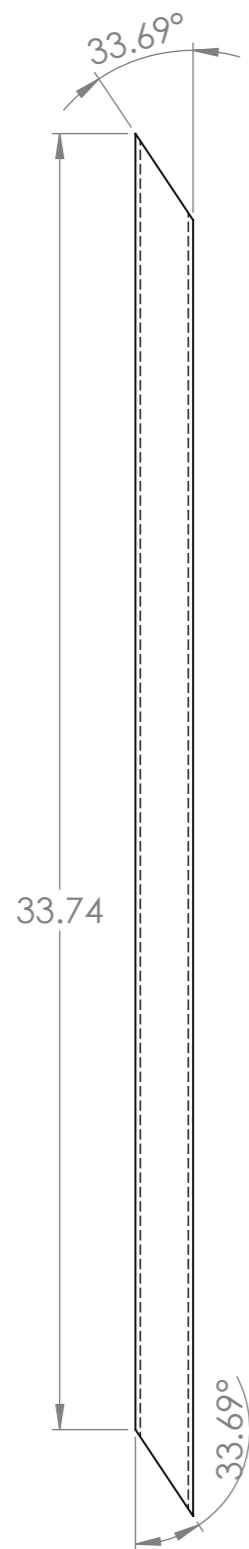


Escala 1:20


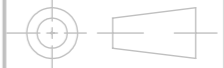
		TÍTULO:		Apoyo lateral cimentación	
		EF_001_C,D		Estructura Fresnel	
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			1C, 1D		
VERIF. D. Iván Duran M.			ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					

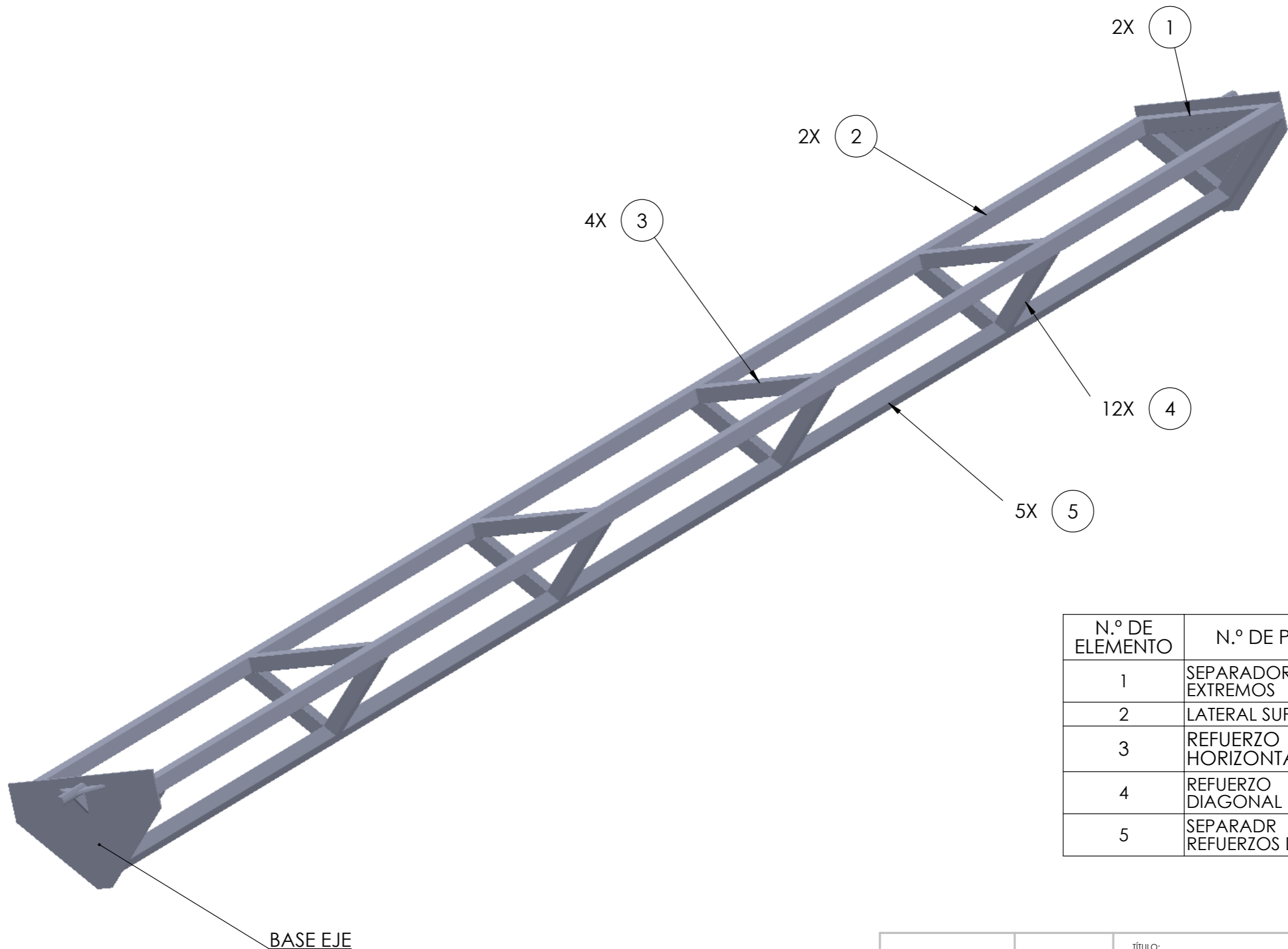


		TÍTULO:		Apoyo central cimentación	
		EF_002	Estructura Fresnel		
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.				
VERIF.	D. Iván Duran M.				MATERIAL:
APROB.	Dr. Alejandro Zaleta				Indicado
FABR.				ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1


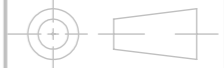


PTR DE 1 1/2" C-14

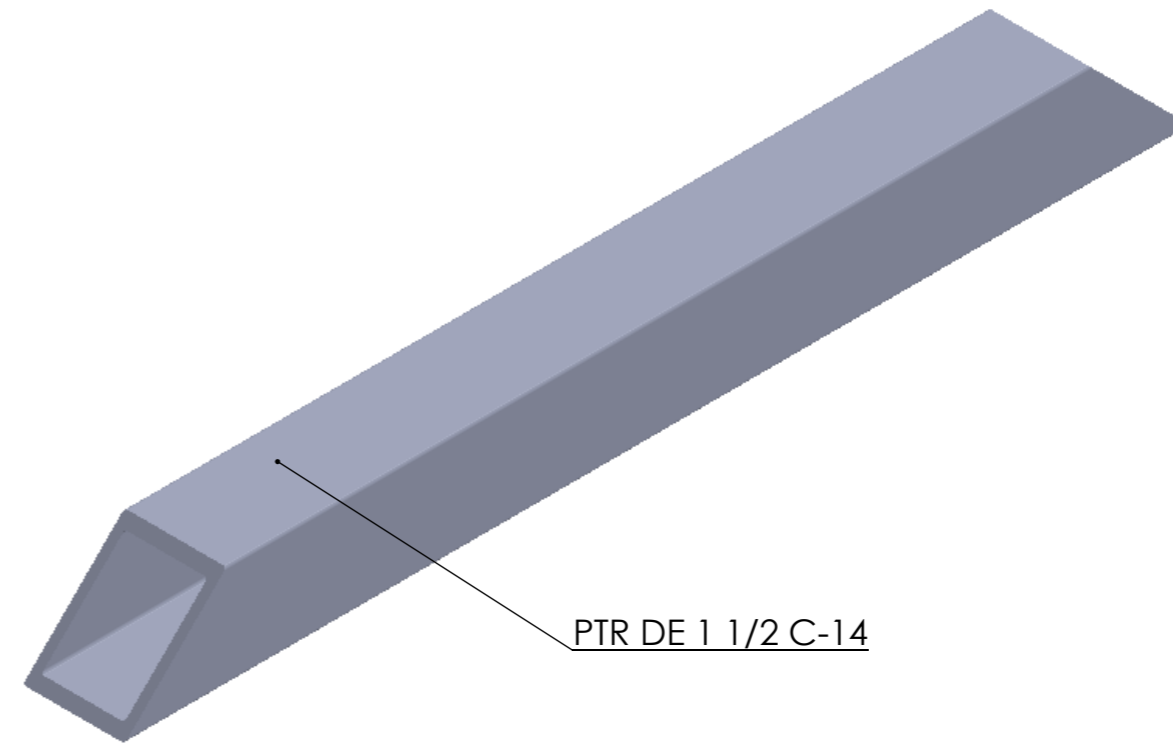
		TÍTULO: <b>Apoyo central cimentación</b>			
				EF_002_A	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO <b>2A</b>	MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.				ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1
VERIF. D. Iván Duran M.					
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					



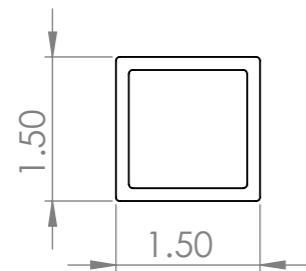
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	SEPARADOR EXTREMOS	2
2	LATERAL SUPERIOR	2
3	REFUERZO HORIZONTAL	4
4	REFUERZO DIAGONAL	12
5	SEPARADR REFUERZOS DIAG	5

		TÍTULO: <b>Base Reflectores General</b>	
UNIDADES: in (mm)		BR_000      Estructura Fresnel	
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.		N.º DE DIBUJO 	
VERIF.		MATERIAL: Indicado	
APROB. Dr. Alejandro Zuleta		ESCALA: 1:10	
FABR.		HOJA 1 DE 1	

A3

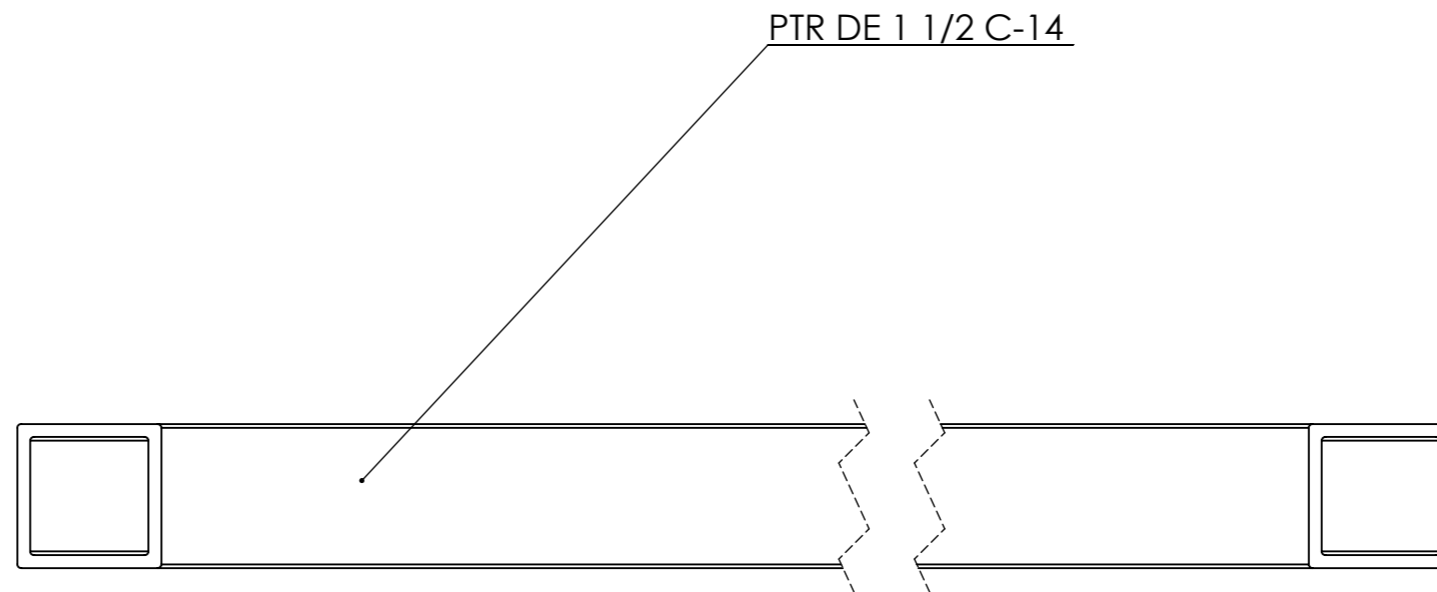
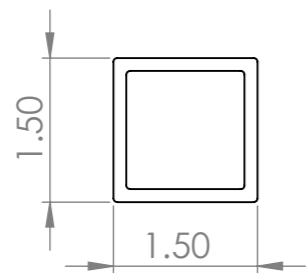
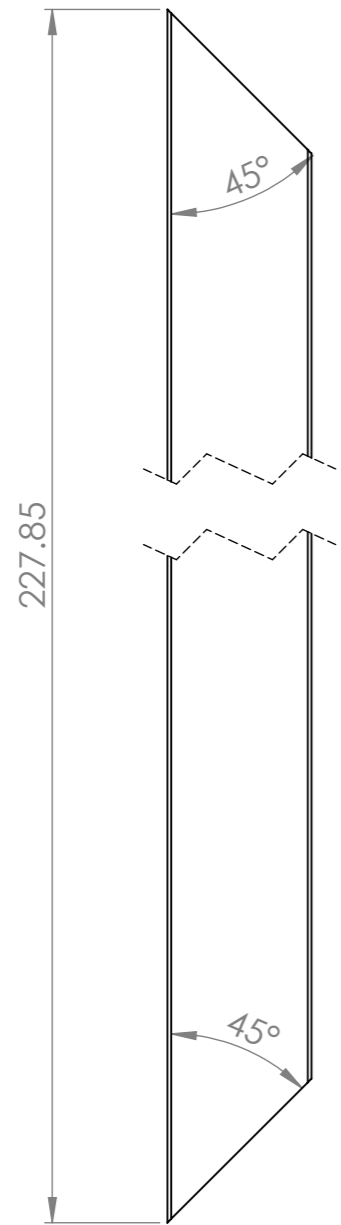



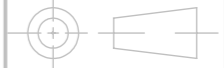
PTR DE 1 1/2 C-14

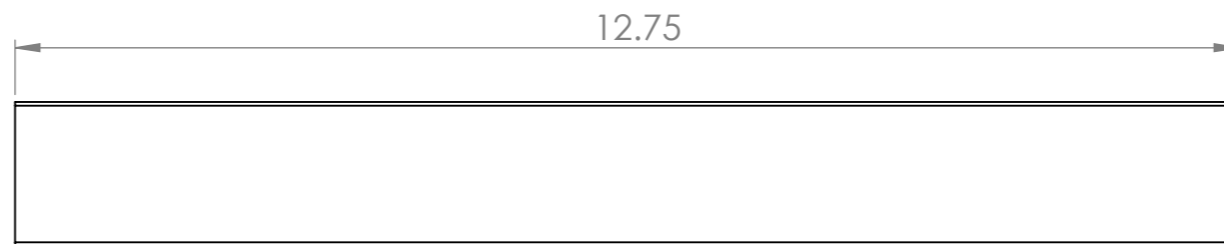
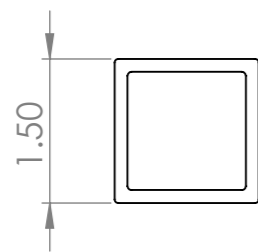
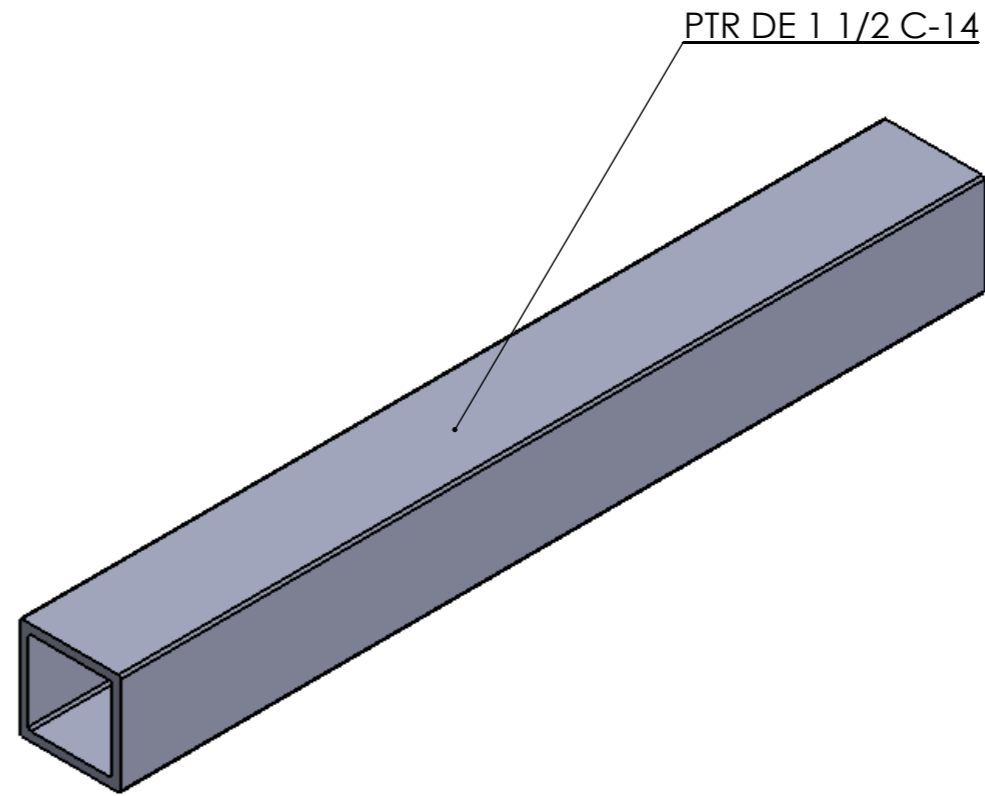



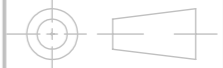
		TÍTULO: <b>Separador Extremos</b>			
				BR_001	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO 	MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					
VERIF.			ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					

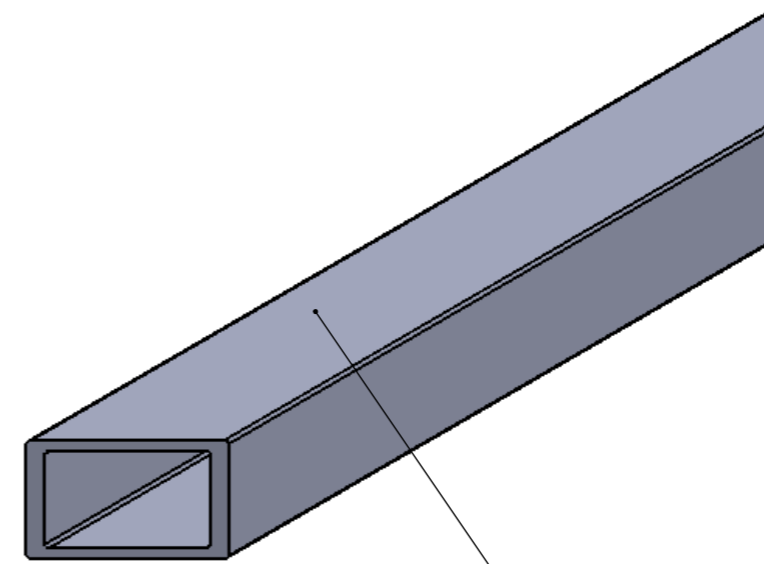
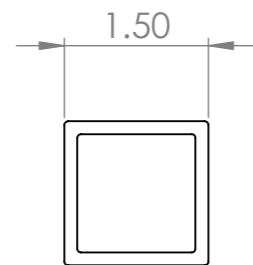
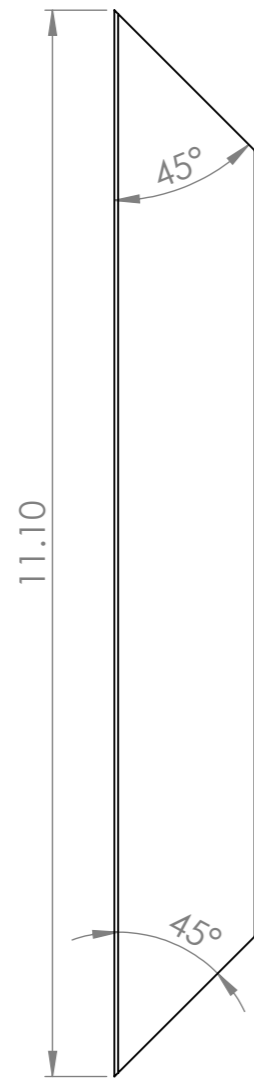





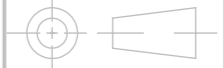
 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO <small>Centro de Estudios e Investigaciones de Ingeniería</small>		TÍTULO:		Lateral Superior BR_002      Estructura Fresnel	
		FIRMA	FECHA		
UNIDADES:	in (mm)				A3
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.				
VERIF.				HOJA 1 DE 1	
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta			ESCALA: 1:50	
FABR.					

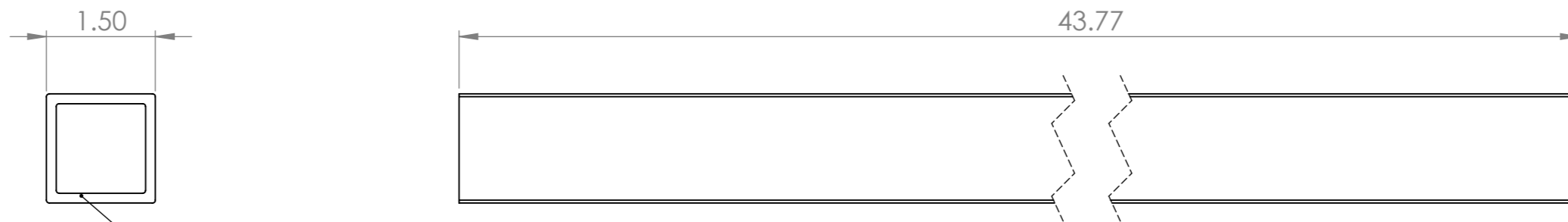


		TÍTULO: <b>PTR 3-1 SEPARADOR HORIZONTAL</b>			
				EF_003	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO 	MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					
VERIF.			ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					



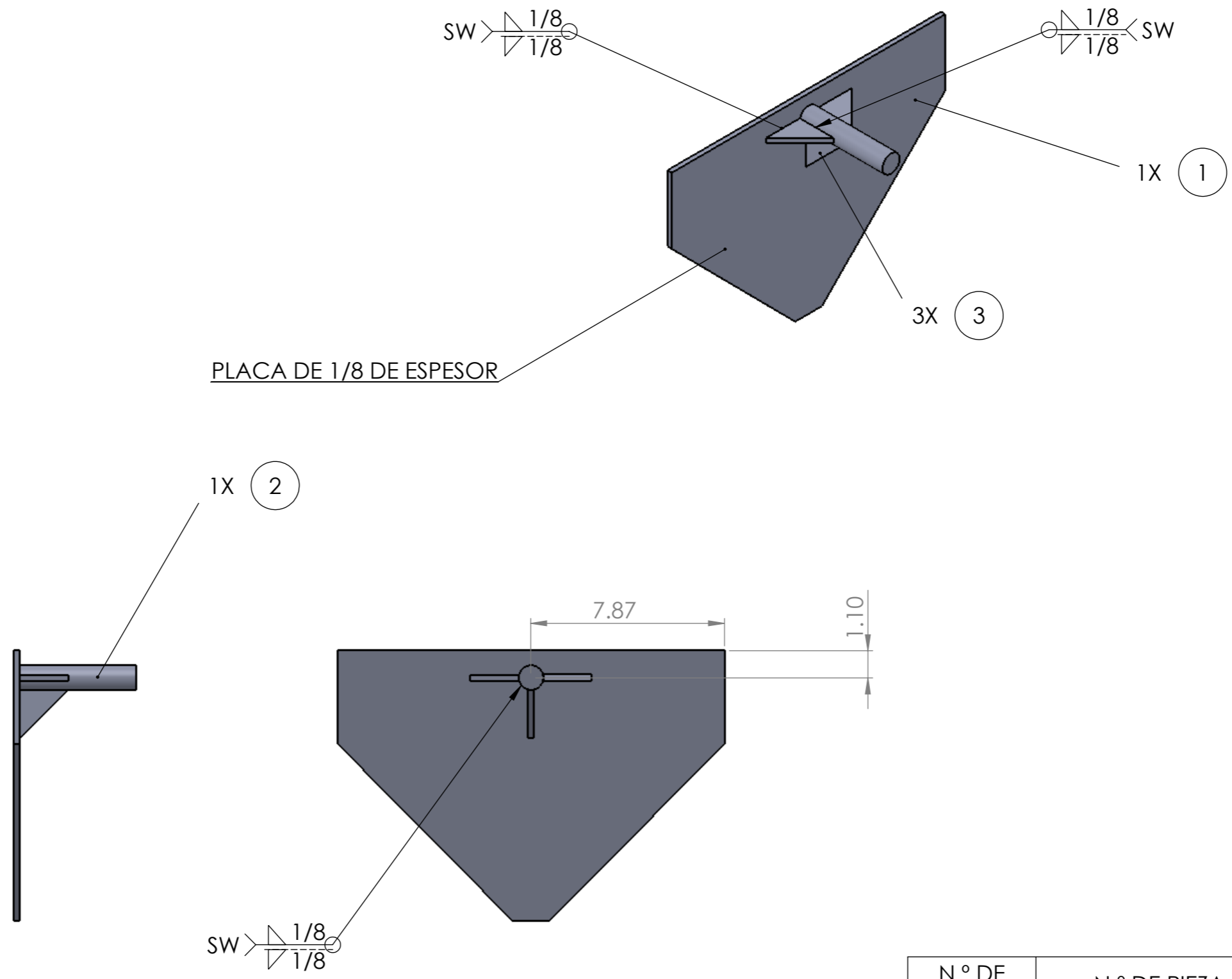
PTR DE 1 1/2 C-14

		TÍTULO: <h3 style="text-align: center;">Refuerzo diagonal</h3>			
				BR_004	Estructura Fresnel
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO 	MATERIAL: Indicado	<b>A3</b>
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.					
VERIF.			ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1
APROB. Dr. Alejandro Zuleta					
FABR.					





PTR DE 1 1/2 C-14

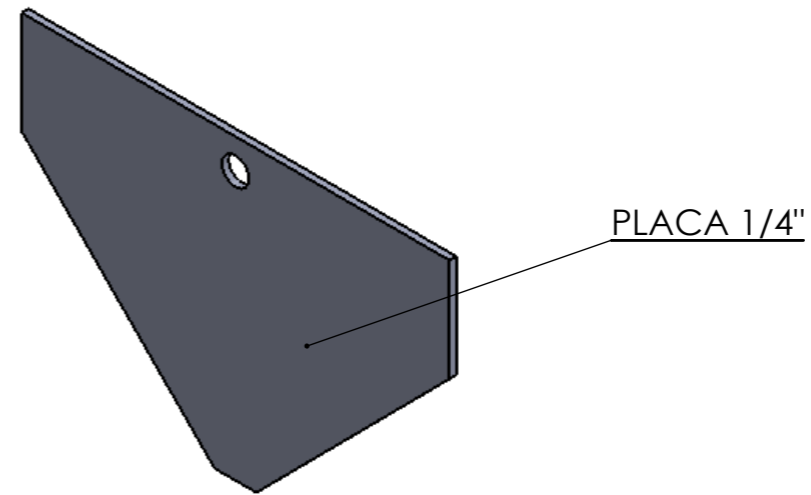
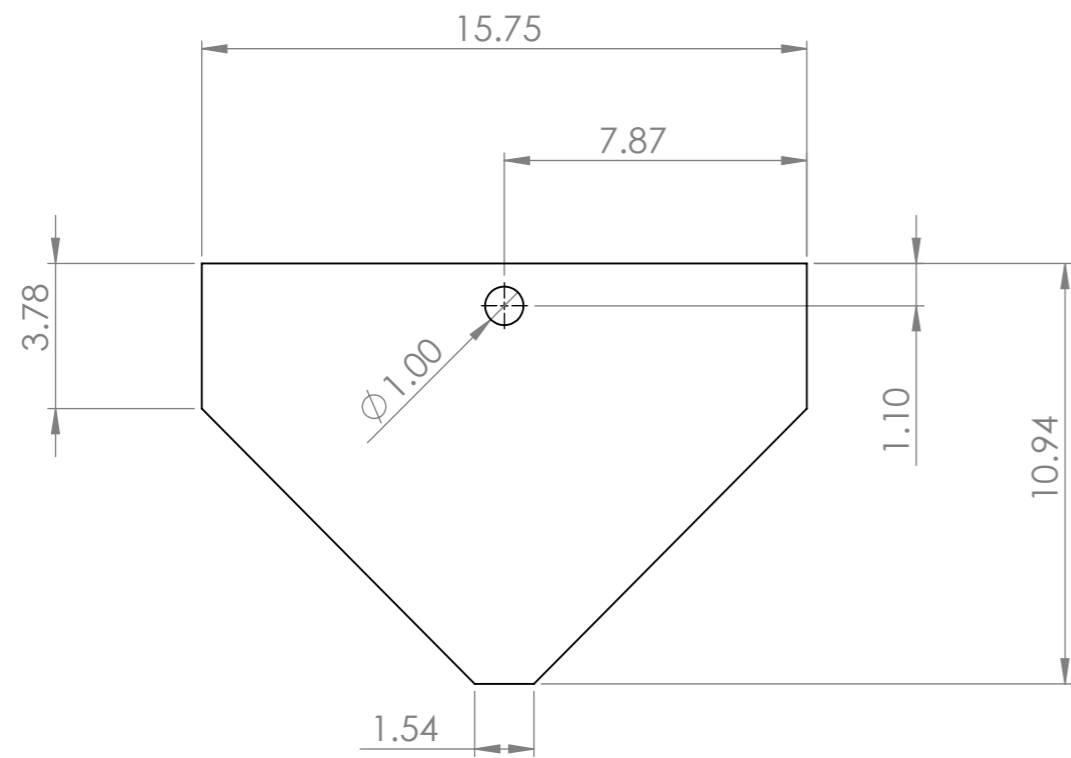
		TÍTULO: <b>Separador refuerzos diagonales</b>					
				BR_005	Estructura Fresnel		
UNIDADES:	in (mm)	FIRMA	FECHA	N.º DE DIBUJO		MATERIAL:	A3
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.					Indicado	
VERIF.							
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta						
FABR.					ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1


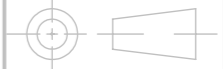


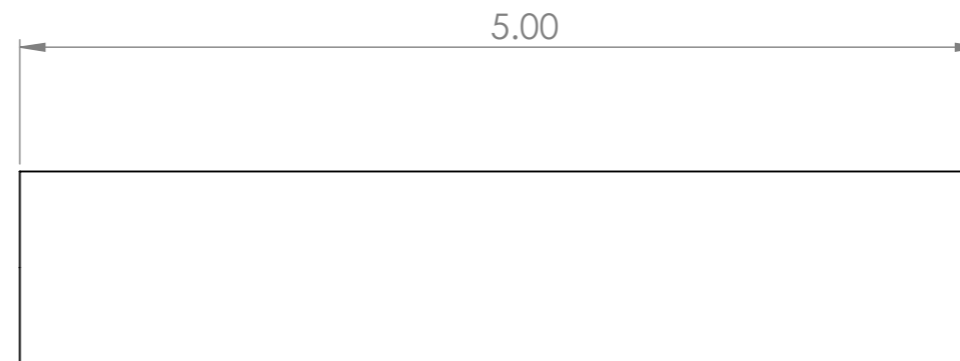
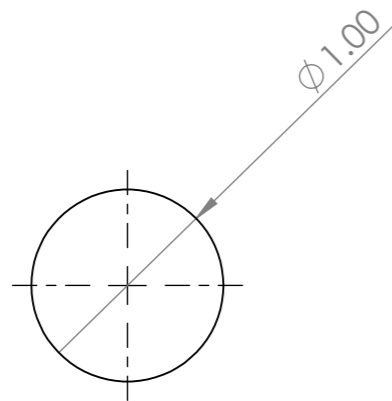
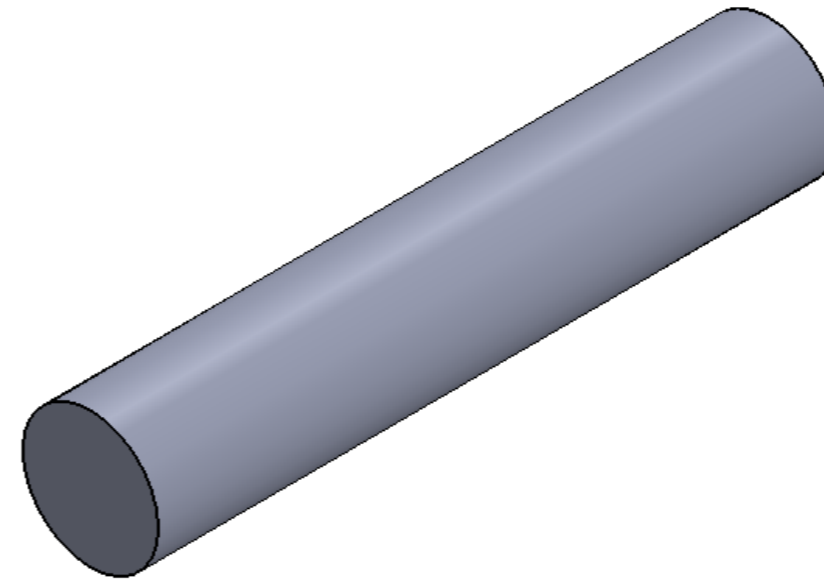
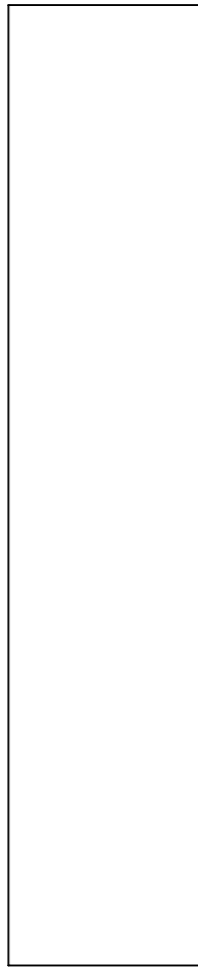
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	PLACA BASE EJE		1
2	EJE REDONDO		1
3	CARTABON		3


		TÍTULO: <b>BASE EJE</b>	
UNIDADES: in (mm)		BE_000      Estructura Fresnel	
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.		N.º DE DIBUJO	
VERIF.			
APROB. Dr. Alejandro Zuleta		MATERIAL: Indicado	
FABR.		ESCALA: 1:50	
		HOJA 1 DE 1	

A3

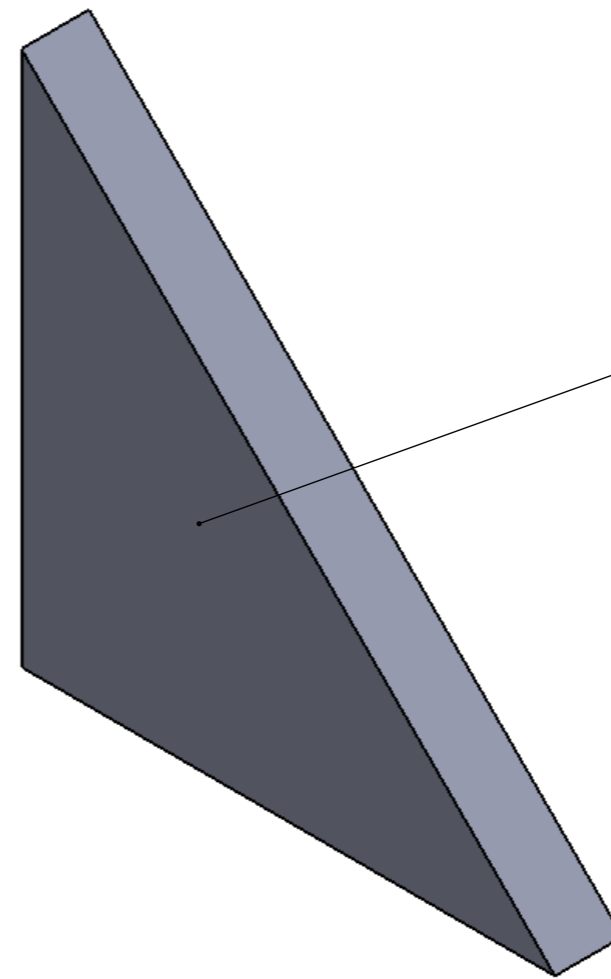


		TÍTULO: <b>PLACA BASE EJE</b>	
UNIDADES: in (mm)		FIRMA	FECHA
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.		BE_001 Estructura Fresnel	
VERIF.		N.º DE DIBUJO	MATERIAL: Indicado
APROB. Dr. Alejandro Zuleta			
FABR.		ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1
		<b>A3</b>	

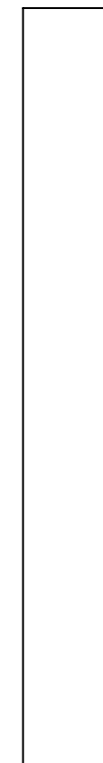
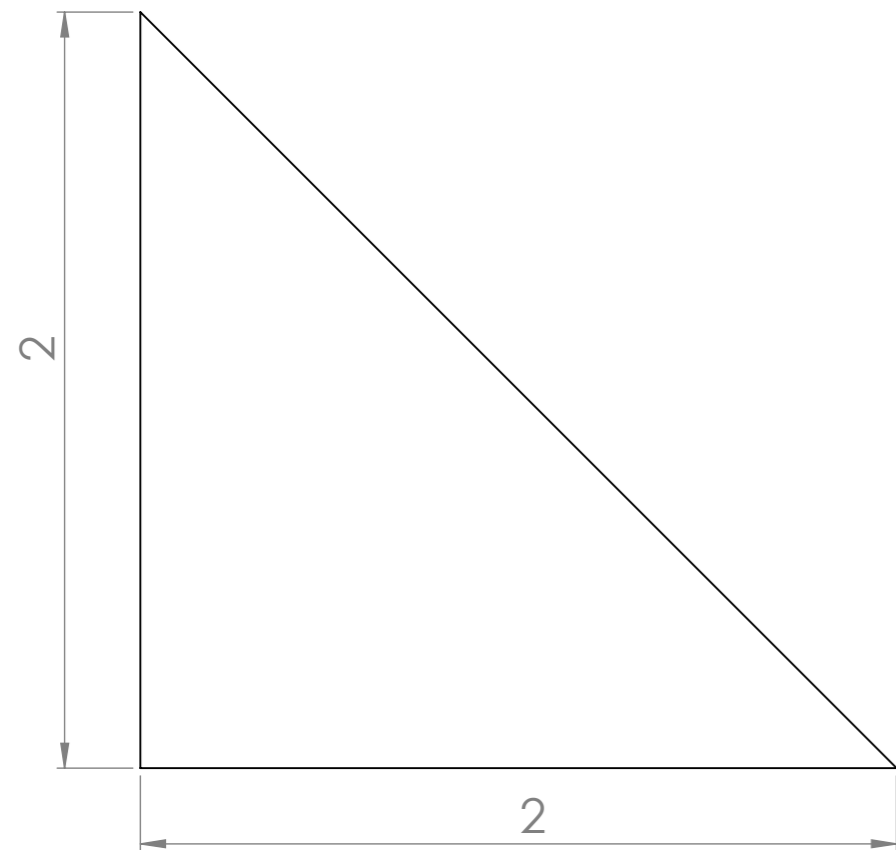


 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO Callejón de las Artes y las Letras Tercer piso del edificio		TÍTULO: <b>EJE REDONDO</b>	
UNIDADES: in (mm)	FIRMA	FECHA	BE_002 Estructura Fresnel
DIBUJ. Ing. Raúl Pérez M.			N.º DE DIBUJO
VERIF.			
APROB. Dr. Alejandro Zuleta			MATERIAL: Indicado
FABR.			ESCALA: 1:1
			HOJA 1 DE 1

A3



PLACA 1/4"



		TÍTULO:		CARTABON			
UNIDADES: in (mm)		FIRMA	FECHA	BE_003	Estructura Fresnel		
DIBUJ.	Ing. Raúl Pérez M.			N.º DE DIBUJO		MATERIAL: Indicado	A3
VERIF.							
APROB.	Dr. Alejandro Zuleta						
FABR.				ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	