

DISEÑO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA
SOLAR EN POTENCIA MECÁNICA COMPUESTO POR UN CONCENTRADOR
SOLAR Y UN MOTOR STIRLING

JOSE LUIS GARCÍA CAMPUZANO

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2010

DISEÑO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA
SOLAR EN POTENCIA MECÁNICA COMPUESTO POR UN CONCENTRADOR
SOLAR Y UN MOTOR STIRLING

JOSE LUIS GARCÍA CAMPUZANO

Proyecto de grado para optar a título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Luis Santiago Paris

Ingeniero Mecánico

Docente Departamento de Ingeniería de Producción

Universidad EAFIT

UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2010

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, quienes con tanto amor, siempre me han apoyado en mis proyectos y han creído en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor Santiago París por toda la colaboración y apoyo brindadas.

A los ingenieros Jorge Bustamante y Carolina Mira de la universidad EAFIT. A Wilson Bustamante y las personas de los laboratorios de Modelos y Máquinas Herramientas de la universidad EAFIT, quienes aportaron con su conocimiento y experiencia al desarrollo de este proyecto.

A mi novia Adriana Merino por toda su dedicación y apoyo incondicionales.

CONTENIDO

	Pág.
1. ANTECEDENTES	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. ENERGÍA SOLAR	17
4.1 ENERGÍA SOLAR EN LA TIERRA.	18
4.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	20
4.3 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA	21
4.4 ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR	22
4.5 RADIACIÓN SOLAR EN MEDELLÍN	24
5. CONCENTRADORES SOLARES	27
5.1 ESPEJOS PARABÓLICOS	28
5.1.1 Espejos Paraboloides.	30
5.1.2 Espejos Parabólicos Cilíndricos	32
5.2 ESPEJO PARABÓLICO PARA EL SISTEMA CONCENTRADOR- MOTOR STIRLING	34
6. MOTORES STIRLING	39
6.1 BREVE HISTORIA DEL MOTOR STIRLING	39
6.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING	40
6.3 TIPOS DE MOTORES	42
6.3.1 Motor Tipo Alfa.	43
6.3.2 Motor Tipo Gama.	44
6.3.3 Motor Tipo Beta.	45
6.4 ANÁLISIS DEL CICLO STIRLING	46
6.4.1 Eficiencia del ciclo.	52

7. DISEÑO DEL MOTOR STIRLING TIPO BETA.	58
7.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO	59
7.1.1 Método de Diseño de Primer Orden.	59
7.1.2 Cálculo de la potencia.	60
7.1.3 Elección del motor basándose en el trabajo entregado.	62
7.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN, DIMENSIONES Y DEMÁS CARACTERÍSTICAS	65
7.3 PROCESO DE DISEÑO DEL MOTOR	67
7.3.1 Resultados del análisis de las características del motor SS B7.	68
7.4 MODELACIÓN GEOMÉTRICA DEL MOTOR SS B7	72
8. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR STIRLING TIPO BETA	80
8.1 MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR	80
8.2 PROCESOS DE MANUFACTURA	82
8.3 ENSAMBLE DEL MOTOR	86
9. PRUEBAS DEL SISTEMA	90
9.1 PRUEBAS DEL CONCENTRADOR SOLAR	90
9.1.1 Pruebas de variación de temperatura del concentrador.	90
9.1.2 Pruebas de variación de corriente del concentrador.	91
9.2 PRUEBAS DEL MOTOR STIRLING	93
9.3 PRUEBAS DEL SISTEMA COMPLETO ACOPLADO	93
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
11. CONCLUSIONES	98
12. RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	107

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores promedio de la radiación solar en Colombia en el mes de enero.	22
Tabla 2. Radiación solar en Colombia por regiones.	22
Tabla 3. Comportamiento de la radiación solar en Medellín para cada mes del año.	25
Tabla 4. Área de captación, área de la imagen y CR del concentrador solar.	35
Tabla 5. Factor de reflexión para la luz blanca de varios materiales y colores.	36
Tabla 6. Valores numéricos de las características físicas del concentrador solar.	38
Tabla 7. Dimensiones y condiciones de operación del motor SS B4.	64
Tabla 8. Volumen y Presión en función del ángulo para el motor SS B4.	64
Tabla 9. Características y condiciones iniciales para el diseño del motor.	66
Tabla 10. Condiciones iniciales de operación del motor SS B7.	69
Tabla 11. Dimensiones del motor SS B7 según referencia a la figura 26.	69
Tabla 12. Valores de los volúmenes y temperatura del regenerador para el SS B7.	70
Tabla 13. Trabajo por ciclo y variables para su cálculo con la ecuación de Schmidt.	70
Tabla 14. Hoja de cálculo con las variaciones de volumen y presión en función del ángulo (N).	71
Tabla 15. Piezas del motor con su función, plano correspondiente y número de piezas.	78
Tabla 16. Material y máquinas utilizadas en la fabricación de las piezas del motor.	84
Tabla 17. Evaluación de la temperatura en el disco y en la región de concentración.	91

Tabla 18. Evaluación de la corriente producida por la radiación solar.	92
Tabla 19. Datos obtenidos de la medición de temperaturas, RPM, torque y potencia del motor.	94
Tabla 20. Datos obtenidos del sistema completo.	95

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Regiones solares y sus respectivas temperaturas.	18
Figura 2. Radiación solar en la tierra.	19
Figura 3. Variación de la radiación solar respecto al movimiento de traslación de la tierra.	20
Figura 4. Radiación multianual para el mes de enero en Colombia	23
Figura 5. Valores de la radiación correspondientes a cada color	24
Figura 6. Radiación promedio multianual para la ciudad de Medellín.	25
Figura 7. Comportamiento de la radiación solar en Medellín para cada mes del año.	26
Figura 8. Gráfico de la parábola en dos dimensiones.	29
Figura 9. Paraboloide de revolución.	30
Figura 10. Sistema “Sun Catcher” producido por SES.	31
Figura 11. Conjunto de Sistemas “Sun Catcher” producidos por SES.	31
Figura 12. Sistema “Power Dish” producido por Infinia Corp.	32
Figura 13. Sistema de estanque o abrevadero solar.	33
Figura 14. Gráfico de la elipse.	34
Figura 15. Imagen del espejo paraboloide usado para el proyecto.	35
Figura 16. Comparación entre la radiación solar captada y la concentrada del sistema.	38
Figura 17. Funcionamiento motor combustión interna.	40
Figura 18. Funcionamiento motor Stirling.	41
Figura 19. Principales configuraciones de motores Stirling.	43
Figura 20. Configuración motor Stirling tipo Alfa.	44
Figura 21. Configuración motor Stirling tipo Gama.	44
Figura 22. Fotografía de un motor LTD.	45
Figura 23. Configuración del motor Stirling tipo Beta.	46

Figura 24. Etapas del ciclo Stirling y su respectiva variación en el volumen dentro del cilindro.	47
Figura 25. Gráfico Presión vs. Volumen del ciclo Stirling.	48
Figura 26. Partes del motor tipo Beta para analizar con el ciclo Schmidt.	53
Figura 27. Movimiento sinusoidal de las partes del motor.	55
Figura 28. Curva para hallar el número de Beale en función de la temperatura.	61
Figura 29. Presión vs. Volumen para 3 tipos de motor Stirling tipo Beta.	63
Figura 30. Diagrama del proceso seguido para el diseño del motor.	67
Figura 31. Gráfica de la variación de la presión en función del volumen del SS B7.	71
Figura 32. Modelación del cilindro del motor e identificación de sus componentes.	72
Figura 33. Vista isométrica del cilindro.	73
Figura 34. Acople del pistón de potencia dentro del cilindro.	74
Figura 35. Acople de los pistones, eje del desplazador y buje pasador dentro del cilindro.	74
Figura 36. Acople del tapón del cilindro y el cilindro.	75
Figura 37. Vista trimétrica ensamble cilindro y pistones.	75
Figura 38. Acople de los O´rings y la camisa de refrigeración al cilindro.	76
Figura 39. Acople caja soporte y cilindro del motor.	76
Figura 40. Modelo 3D del motor con el mecanismo de transmisión de potencia.	77
Figura 41. Modelo 3D del ensamble final del motor.	79
Figura 42. Fotografía torno convencional.	82
Figura 43. Fotografía fresadora convencional.	83
Figura 44. Fotografía de una cortadora de plasma.	83
Figura 45. Cilindro fundición: material, proceso de rectificado y pieza terminada.	85
Figura 46. Proceso de manufactura en el torno.	85

Figura 47. Proceso de manufactura en la fresadora.	85
Figura 48. Piezas en procesos de fresado.	86
Figura 49. Unión de las placas de soporte y cilindro con tornillos hexagonales.	86
Figura 50. Piezas unidas con Loctite 640.	87
Figura 51. Piezas unidas con Loctite 277.	87
Figura 52. Sub ensamble pistón de desplazamiento.	88
Figura 53. Sub ensamble mecanismo.	88
Figura 54. Sistema completo de transmisión de potencia.	88
Figura 55. Motor terminado completamente y ensamblado.	89
Figura 56. Imagen del proceso de medición de temperatura.	91
Figura 57. Celda fotovoltaica y multímetro para medir variaciones de radiación.	92
Figura 58. Imagen de la medición de las RPM del motor.	93
Figura 59. Sistema completo acoplado.	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Planos de taller y ensamblajes del motor	107

1. ANTECEDENTES

En la actualidad el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles está ligado a una serie de factores económicos, sociales y ambientales que afectan cada vez más el pleno desarrollo de la vida en la tierra.

El calentamiento global, la inestabilidad en los precios del petróleo y la contaminación del medio ambiente son solo algunos de los impactos generados por dichos factores.

Por lo anterior hoy en día se está despertando a nivel mundial un especial interés hacia la generación de energía proveniente de fuentes alternativas, que siempre han estado disponibles en la naturaleza y que han sido subvaloradas debido al gran auge que siempre han tenido los combustibles provenientes de fuentes no renovables.

El Sol, una fuente que ha estado disponible desde hace cinco mil millones de años representa un recurso energético limpio, gratuito e inagotable, que aprovechándolo de forma correcta puede suplir gran parte de la demanda energética actual [Censolar].

Uno de los usos más comunes que da el hombre a la energía es el de realizar trabajo mecánico, y una forma de aprovechar la energía solar para lograr este tipo de tarea es mediante una máquina térmica llamada motor Stirling. Gracias a que este tipo de máquina necesita una fuente de calor con alta temperatura y otra con baja temperatura para su funcionamiento, el motor Stirling representa una buena alternativa para la transformación de la energía solar teniendo como fuente de calor el Sol y como sumidero el medio ambiente.

2. JUSTIFICACIÓN

La energía solar además de proporcionar el 99.97% de la energía usada en la tierra para todos sus procesos naturales [UPME] y el hecho de que durante el presente año arrojará sobre la tierra cuatro mil veces más energía de la que será consumida por todo el planeta, representa una fuente que ha estado disponible desde hace millones de años y se cree que aún no ha alcanzado la mitad de su existencia [Censolar].

Actualmente existe la necesidad de descubrir la manera de satisfacer la demanda energética mundial mediante energías que sean económicas y que no impliquen la destrucción de los recursos en el proceso de su obtención y utilización; estas energías son conocidas como renovables y el Sol es la fuente primaria de todas ellas.

Colombia es un país privilegiado desde el punto de vista de la incidencia de la energía solar debido a su ubicación en la zona tórrida, en donde la energía proveniente de la radiación solar puede llegar a alcanzar valores de hasta 5,5 Kwh/m² por día de luz [Delgado].

Considerando lo anterior resulta poco razonable no aprovechar esta energía limpia, renovable y sin costo; e intentar sacar de ésta el mayor provecho mediante todos los usos posibles que el hombre pueda darle, particularmente en su utilización para generación de energía mecánica, la cual puede ser posteriormente transformada en energía eléctrica.

Una máquina capaz de convertir el calor de la energía solar en energía mecánica es el motor Stirling. Su funcionamiento se debe básicamente a que en su interior existe un gas sometido a un delta de temperatura que provoca la expansión y

compresión constante del gas confinado (por ejemplo aire) y por consiguiente el desplazamiento de un pistón de potencia, el cuál junto con otro pistón de desplazamiento, pueden ser configurados para obtener un movimiento rotatorio que entrega potencia.

Las cualidades del motor Stirling son variadas, particularmente se destaca que es una máquina que admite diferentes fuentes de energía térmica, lo que permite su adaptabilidad a diferentes entornos, como es el caso del aprovechamiento de energía limpia y renovable como la solar.

Un sistema conformado por un concentrador de energía solar como un espejo parabólico, el cual concentra los rayos que llegan a su superficie hacia una región específica (punto focal) incrementando su intensidad de radiación; y un motor Stirling que convierta esta energía solar concentrada en energía mecánica disponible para un sinnúmero de aplicaciones; representa una opción interesante para esta época de transición y de búsqueda de fuentes alternas a las tradicionales que sean limpias, económicas e inagotables.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Construir un sistema prototipo conformado básicamente por un concentrador de energía solar y un motor Stirling alimentado por dicho concentrador, que permita obtener energía mecánica a partir de energía solar.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las características que posee la energía solar que llega a la ciudad de Medellín para establecer su potencial de uso.
- Diseñar un sistema que permita convertir la energía solar en energía térmica y disponer de una fuente de alta temperatura.
- Diseñar el prototipo de una máquina térmica tipo Stirling que permita convertir la energía térmica obtenida en trabajo mecánico.
- Construir un prototipo funcional conformado por un concentrador de energía solar y un motor Stirling.
- Realizar pruebas de los componentes por separado y del sistema en conjunto para verificar su operación y rendimiento.
- Evaluar y concluir.

4. ENERGÍA SOLAR

El Sol es la fuente primaria de la energía presente en la tierra. Esto incluye la energía por el calentamiento directo, la energía del viento, la energía hidroeléctrica, y la energía derivada de los combustibles fósiles. Los fósiles existen hoy en día como una consecuencia de la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas convierten energía solar en energía química [Wieder].

Por otra parte la cantidad de energía solar captada por la tierra anualmente es aproximadamente de $5,4 \times 10^{24}$ Joules, esto es 4500 veces la energía consumida en todos los procesos [ISAGEN].

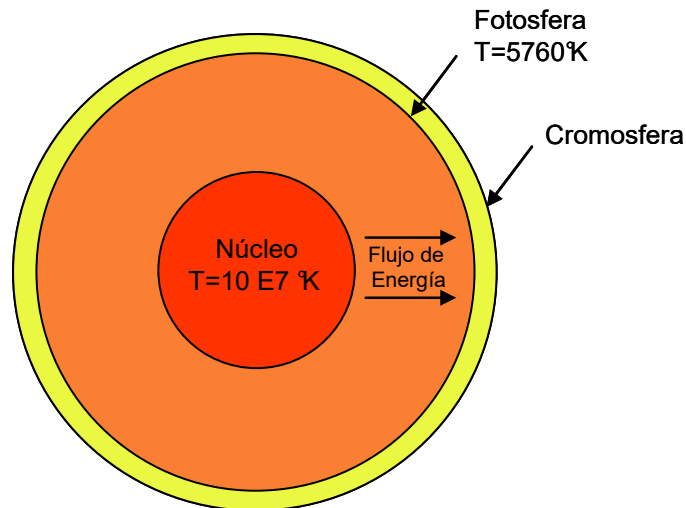
Esta estrella está compuesta principalmente por hidrógeno y una pequeña cantidad de helio. Estos dos elementos los cuales sumados conforman entre el 96% y 99% de la masa solar, se encuentran bajo enormes presiones y solo la enorme fuerza gravitacional del Sol mantiene esta gran masa unida.

La energía en el Sol es generada en el interior de este por medio de la fusión nuclear del hidrogeno en helio a una temperatura aproximada de 15 millones de grados kelvin. Esta energía viaja a la superficie de este y luego es transmitida al espacio en forma de radiación electromagnética.

La mayor parte de energía que llega a la tierra proviene de la región solar llamada *fotosfera*, en donde la temperatura proveniente del núcleo desciende hasta aproximadamente 6000 grados Kelvin. Después de esta región existe otra llamada *cromosfera*, esta absorbe ciertos colores de la radiación emitida por la fotosfera, sin embargo por ser relativamente transparente sus efectos sobre la radiación solar emitida no son significativos.

La figura 1 muestra de manera simplificada la distribución de temperaturas en las diferentes regiones del sol.

Figura 1. Regiones solares y sus respectivas temperaturas.



Fuente: An introduction to solar energy, Sol Wieder.

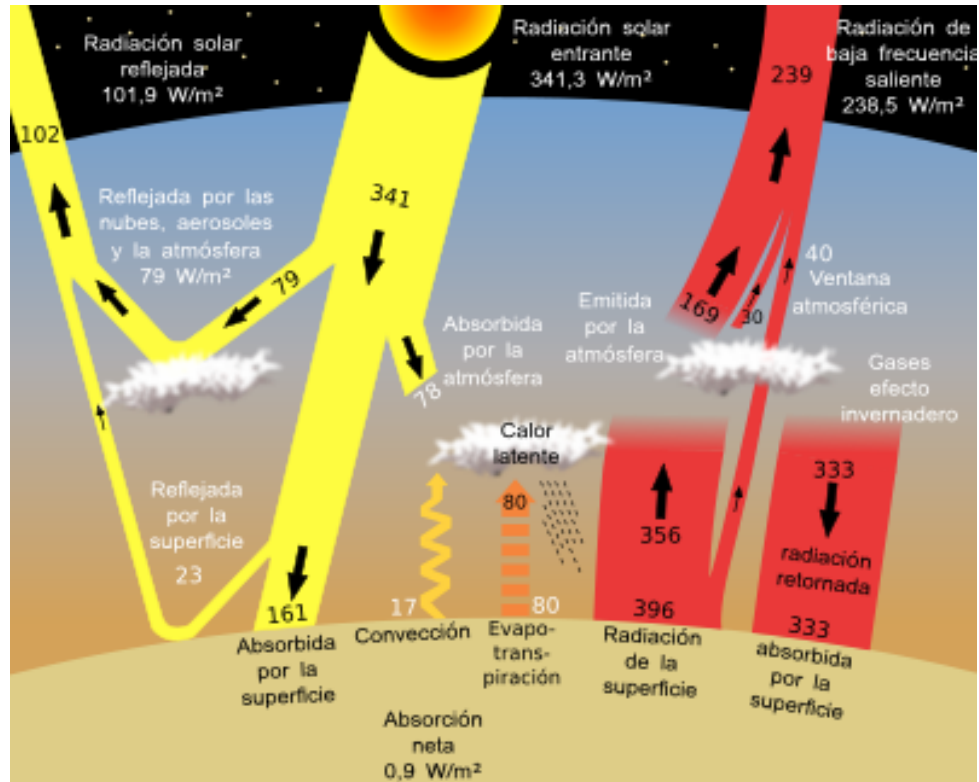
4.1 ENERGÍA SOLAR EN LA TIERRA.

De la energía solar que incide en la atmósfera de la tierra solo una parte llega a la superficie, pues hay otra parte que es reflejada y reemitida nuevamente hacia el espacio (procesos de reflexión y reemisión).

La componente restante de energía se transfiere a la superficie en pequeñas cantidades de energía (*cuantos ó quantums*) que interactúan con la atmósfera por medio de dos formas: incidiendo directamente sobre los objetos iluminados (radiación directa) y por la reflexión de la radiación solar absorbida en la atmósfera y el polvo atmosférico (radiación difusa). La suma de estas dos componentes se conoce como radiación solar global [ISAGEN].

Los valores de la radiación solar que recibe la tierra pueden variar en función de las condiciones climatológicas, la ubicación geográfica y el periodo del año como se observa en la figura 2. El promedio de esta radiación se encuentra aproximadamente entre 1300 y 1400 W/m².

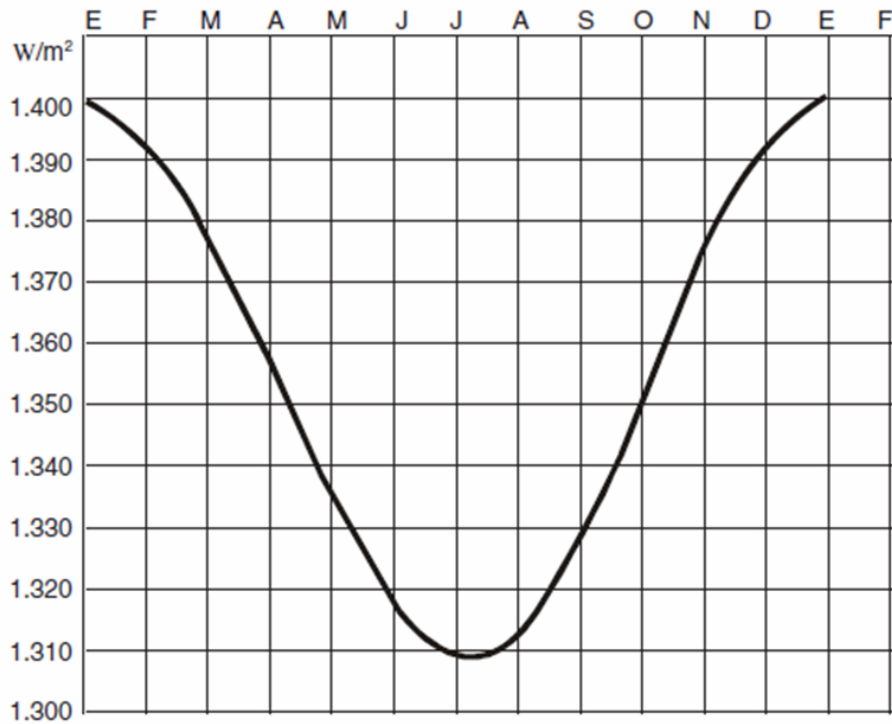
Figura 2. Radiación solar en la tierra.



Fuente: www.erenovable.com

Otro factor que influye en la intensidad de energía solar recibida por la tierra es el movimiento de traslación que realiza la tierra alrededor del Sol. En este movimiento la tierra describe una elipse entorno al Sol, lo cual conlleva a que en determinadas épocas del año se perciba mayor o menor radiación. La figura 3 muestra esta variación.

Figura 3. Variación de la radiación solar respecto al movimiento de traslación de la tierra.



Fuente: Atlas de Radiación Solar, UPME.

4.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

La medición de la radiación emitida por el Sol se hace comúnmente de dos formas:

1. Medición en forma instantánea como la cantidad de energía incidente sobre unidad de área por tiempo (ecuación 1):

$$(\text{energía} / (\text{área} \times \text{tiempo})) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{EC.1}$$

2. Medición de la cantidad de energía por unidad de área durante un tiempo determinado el cual es generalmente un día (ecuación 2).

$$(\text{energía} / \text{área} \times \text{tiempo}) \quad [\text{W}/\text{m}^2 \text{ día}] \quad \text{EC.2}$$

Cuando no se cuenta con dispositivos especiales ni con mapas para medir la radiación solar, generalmente se usa la siguiente ecuación llamada correlación de Ångstrom (ecuación 3):

$$I=I_0 (a + bn/N) \qquad \text{EC.3}$$

Donde,

I_0 = Radiación solar para una atmósfera completamente despejada en el lugar en un tiempo determinado.

n = Brillo solar para la mismas condiciones de I_0 .

N = Duración promedio del día en esa latitud.

a = Constante que relaciona la radiación solar terrestre con la extraterrestre.

b = Constante que representa la variación de I/I_0 respecto a n/N .

Los valores de cada una de las variables y constantes descritas anteriormente varían de acuerdo a la ubicación y características atmosféricas en un momento determinado. Esto significa que estos valores serán diferentes para cada mes del año y serán afectados si en el momento de la medición se encuentra un cielo despejado ó por el contrario se encuentra un cielo nublado [ISAGEN].

4.3 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA

Colombia por ser un país ubicado cerca de la línea del Ecuador se encuentra en una posición privilegiada en cuanto la cantidad de radiación solar recibida por año, por esta razón no se ve afectado por el cambio el clima debido a las estaciones.

La tabla 1 muestra los valores de promedio de I_0 (radiación solar en cielo despejado) y las constantes a y b para varias ciudades del país en el mes de enero [ISAGEN].

Tabla 1. Valores promedio de la radiación solar en Colombia en el mes de enero.

CIUDAD	Io [KWh/m ² /día]	a	b
Bogotá	9.4	0.22	0.52
Cali	9.5	0.36	0.34
Cartagena	8.7	0.30	0.41
Medellín	9.2	0.30	0.44
Neiva	9.6	0.36	0.38

Fuente: Fuentes no convencionales de generación de electricidad, ISAGEN.

El país tiene una gran capacidad de producción en este tipo de energía ya que cuenta con zonas que presentan una alta intensidad de radiación solar. La tabla 2 muestra la radiación solar en las diferentes regiones del país en términos de energía por unidad de área en un año.

Tabla 2. Radiación solar en Colombia por regiones.

REGIÓN DEL PAIS	Radiación Solar [KWh/m ² /año]
Guajira	2000 – 2200
Costa Atlántica	1800 – 2000
Orinoquia-Amazonía	1800 - 2000
Región Andina	1600 – 1800
Costa Pacifica	1400 – 1600

Fuente: Fuentes no convencionales de generación de electricidad, ISAGEN.

4.4 ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR

La UPME (Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia) ha publicado el Atlas de Radiación Solar, un documento muy completo sobre las características que posee la radiación solar incidente en el país. Este atlas tiene como parte principal los mapas correspondientes a la radiación solar en las regiones del país para cada mes, además de otro que contiene el promedio de las radiaciones recibidas en el año.

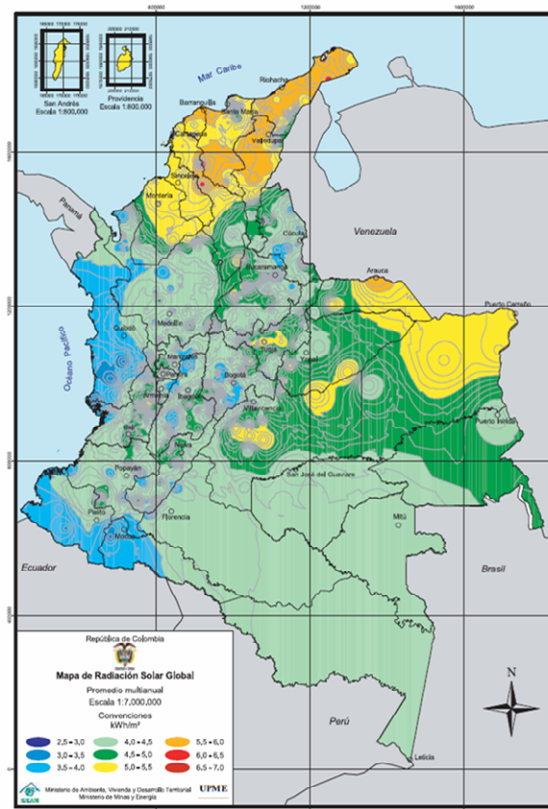
Es de gran importancia conocer que tipo de radiación se puede esperar en determinada región y en que época, ya que esto permite una evaluación sobre

que tipo de sistema se puede implementar para el aprovechamiento de esta o determinar si es viable o no un proyecto de energía solar.

Los resultados publicados por la UPME en el Atlas de Radiación Solar del año 2005 (la publicación más reciente), se basan en la información tomada de las estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país.

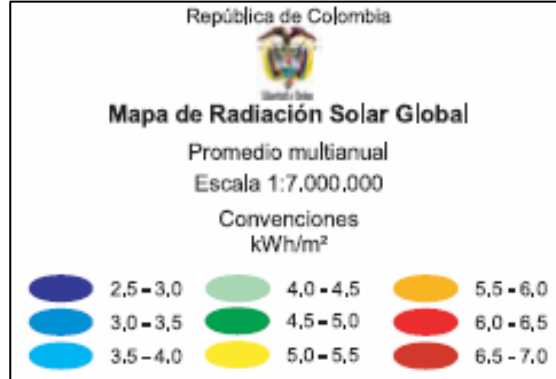
En la figura 4 se puede observar el promedio que ha tenido la radiación solar en las diferentes regiones de Colombia durante los últimos años (promedio multianual). El patrón de colores va desde azul oscuro (intensidad mínima) hasta el color rojo (intensidad máxima). La figura 5 muestra el valor en KWh/m^2 por día, que corresponde a cada color.

Figura 4. Radiación multianual promedio en Colombia



Fuente: Atlas de radiación solar, UPME.

Figura 5. Valores de la radiación correspondientes a cada color



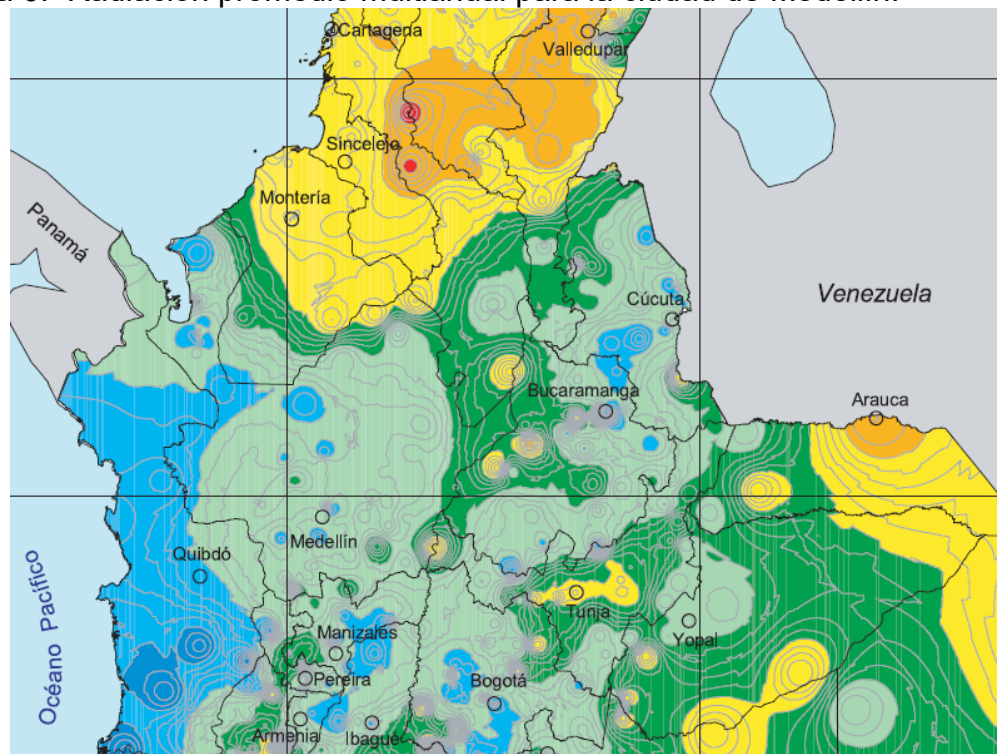
Fuente: Atlas de radiación solar, UPME.

4.5 RADIACIÓN SOLAR EN MEDELLÍN

Tomando como guía el atlas de radiación solar de la UPME, se observa en el mapa que contiene la información promedio de todo el año de las radiaciones que, para la ciudad de Medellín la radiación promedio es de 4,0 a 4,5 KWh/m². Esto se obtiene ubicando a Medellín en el mapa de la figura 6 y luego identificando el color en el que esta se encuentra según la escala de valores de la figura 5.

Por otra parte, también es posible saber el comportamiento de la radiación solar en Medellín (ó cualquier ciudad o región de Colombia) de acuerdo a la información obtenida en los mapas solares para cada mes del año. Después de observar en los mapas respectivos, se obtiene el comportamiento de la radiación según muestran la tabla 3 y la figura 7.

Figura 6. Radiación promedio multianual para la ciudad de Medellín.

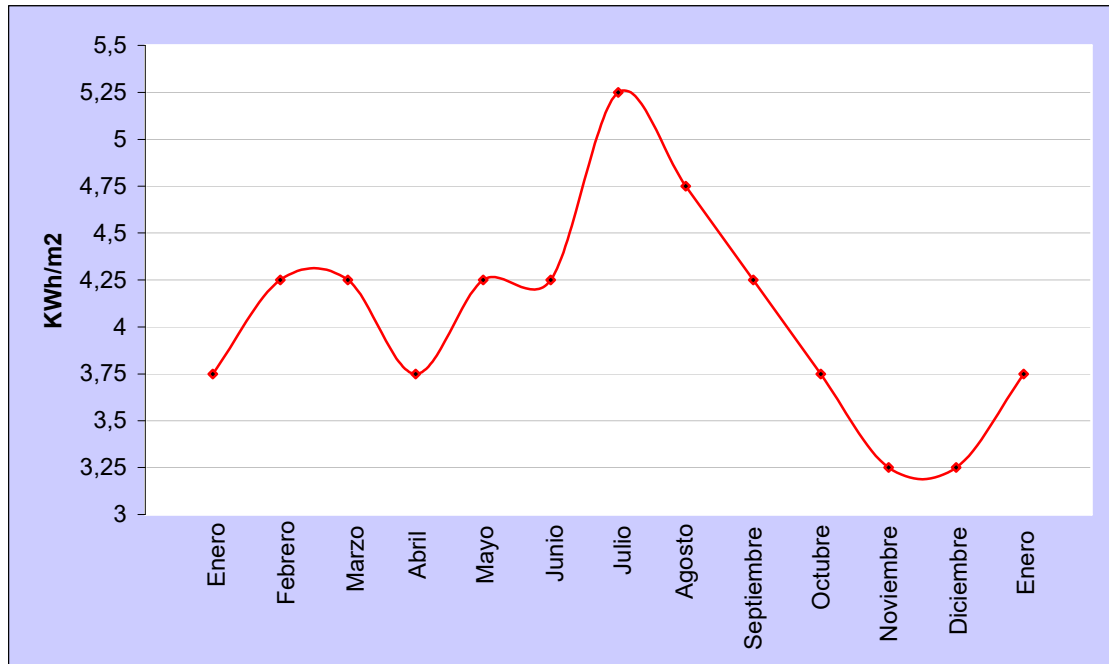


Fuente: Atlas de radiación solar, UPME.

Tabla 3. Comportamiento de la radiación solar en Medellín para cada mes del año.

Mes	Radiación Mínima (KWh/m ²)	Radiación Máxima (KWh/m ²)	Promedio (KWh/m ²)
Enero	3,5	4,0	3,7
Febrero	4,0	4,5	4,2
Marzo	4,0	4,5	4,2
Abril	3,5	4,0	3,7
Mayo	4,0	4,5	4,2
Junio	4,0	4,5	4,2
Julio	5,0	5,5	5,2
Agosto	4,5	5,0	4,7
Septiembre	4,0	4,5	4,2
Octubre	3,5	4,0	3,7
Noviembre	3,0	3,5	3,2
Diciembre	3,0	3,5	3,2
Enero	3,5	4,0	3,7

Figura 7. Comportamiento de la radiación solar en Medellín para cada mes del año.



5. CONCENTRADORES SOLARES

El desempeño de cualquier sistema de energía solar depende en gran parte de las propiedades ópticas de sus componentes. Estas propiedades ópticas de los materiales generalmente dependen de la longitud de onda de la radiación involucrada.

Comúnmente las temperaturas que puede alcanzar una placa plana expuesta a la radiación solar no experimenta temperaturas muy altas, cuando mucho puede llegar a unos 150°C bajo condiciones ideales. Sin embargo como los elementos interactúan con el medio que les rodea, se deben tener en cuenta factores de pérdida de energía por convección, radiación y conducción [Wieder].

Debido a que estas formas de transferencia de calor son proporcionales al área de la superficie calentada, se puede obtener una importante reducción en las pérdidas si el área que absorbe la radiación se hace más pequeña. De esta forma si la energía solar captada se puede concentrar y direccionar hacia un receptor de menor área se pueden obtener temperaturas muy altas y con pérdidas térmicas menores [Wieder].

Sin embargo los concentradores presentan otro tipo de problemas, como por ejemplo, el hecho de que solo pueden aprovechar la energía solar directa y por esta razón se desaprovecha aproximadamente el 20% de energía que contiene la radiación difusa. Por esta razón estos sistemas deben estar orientados siempre en línea recta hacia el sol para captar los rayos directamente.

Generalmente la energía solar directa es concentrada por medio de lentes ó espejos. En este documento se tratará el tema de los espejos como medio de concentración de radiación ya que es el usado en el sistema prototipo fabricado.

La razón de la elección de espejos ó superficies reflectoras en vez de lentes se debe a que los lentes son más costosos y absorben mayor energía debido al paso del rayo de luz. Por su parte los espejos concentran la energía por reflexión y su absorción de energía es mínima [Wieder].

5.1 ESPEJOS PARABÓLICOS

Un espejo parabólico con la cara reflectante cóncava tiene los siguientes elementos:

- Eje óptico: eje de simetría de la superficie.
- Foco: punto donde convergen todos los rayos que llegan paralelos al eje óptico.

Los espejos parabólicos tienen la propiedad de que todos los rayos que llegan paralelos al eje óptico, al ser reflejados, pasan por el foco. Este comportamiento es propio de los espejos parabólicos. Los espejos esféricos se comportan de igual forma cuando corresponden a una pequeña sección de esfera [Serway].

Para entender como un espejo curvo concentra la energía solar directa, se puede analizar primero el comportamiento de la parábola en dos dimensiones representada matemáticamente por la ecuación 4. La característica principal de esta figura geométrica es la de concentrar todos los rayos que llegan a esta y que son paralelos al eje de simetría, en un solo punto llamado *foco*.

$$X^2=4f (y) \qquad \text{EC. 4}$$

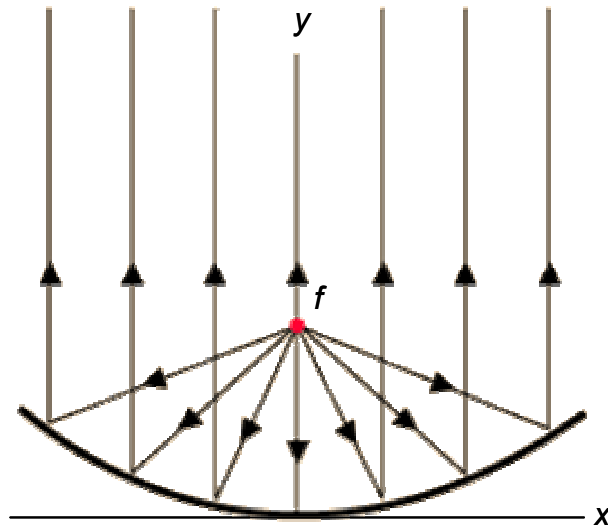
Donde,

y= eje óptico de la parábola.

f= foco de la parábola.

En la figura 8 se muestra la parábola en dos dimensiones y sus componentes.

Figura 8. Gráfico de la parábola en dos dimensiones.



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/acoustic/reflc.html>

El eje **Y** de la figura anterior es llamado *eje de la parábola* y los rayos que llegan paralelos a este son llamados *rayos paraxiales*. Se puede observar la convergencia de todos los rayos paraxiales al foco de la parábola.

En la realidad los rayos no coinciden literalmente en un punto, sino más bien, en una región con un área determinada. La relación entre el área de captación del concentrador y el área a la cual es redireccionada la radiación, se le conoce como *radio de concentración (CR)* y se expresa matemáticamente según la ecuación 5 [Wieder].

$$CR = \text{Área de intercepción} / \text{Área de la imagen}$$

EC. 5

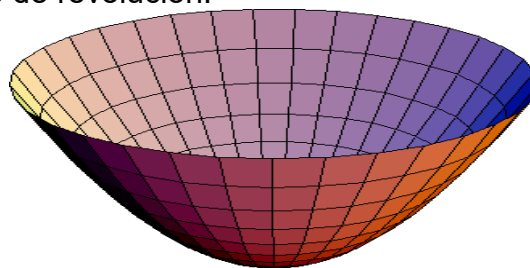
Como se puede observar en la ecuación anterior entre más pequeña sea el área de la imagen, mayor será el radio de concentración del concentrador solar, así que teóricamente se puede llegar a un radio de concentración infinito, sin embargo esto no es posible debido diversos factores que lo impiden.

Primero, la curvatura del espejo no es perfecta. Segundo, el rayo solar no es perfectamente *monodireccional* sino que diverge un poco. Tercero, ya que los rayos solares son ondas electromagnéticas, cuando estos se reflejan en una superficie se da el fenómeno de difracción¹.

De la parábola en dos dimensiones se obtienen espejos de tipo paraboloides y parabólico cilíndrico.

5.1.1 Espejos Paraboloides. Un paraboloides es una superficie de revolución que se obtiene al hacer girar una parábola bidimensional sobre su eje óptico (figura 9).

Figura 9. Paraboloides de revolución.



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:ParaboloidOfRevolution.png>

Este tipo de espejos son los que se usan en aplicaciones en las cuales en el foco se dispone un motor Stirling y, por lo tanto, el tipo usado en este proyecto. Las

¹ En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo [Wikipedia].

figuras 10 a la 12 muestran ejemplos de aplicaciones solares de este tipo de espejos.

Figura 10. Sistema “Sun Catcher” producido por SES (Stirling Energy Systems).



Fuente: <http://www.stirlingenergy.com/suncatcher-gallery.htm>

Figura 11. Conjunto de Sistemas “Sun Catcher” producidos por SES.



Fuente: <http://www.stirlingenergy.com/suncatcher-gallery.htm>

Figura 12. Sistema “Power Dish” producido por Infinia Corp.



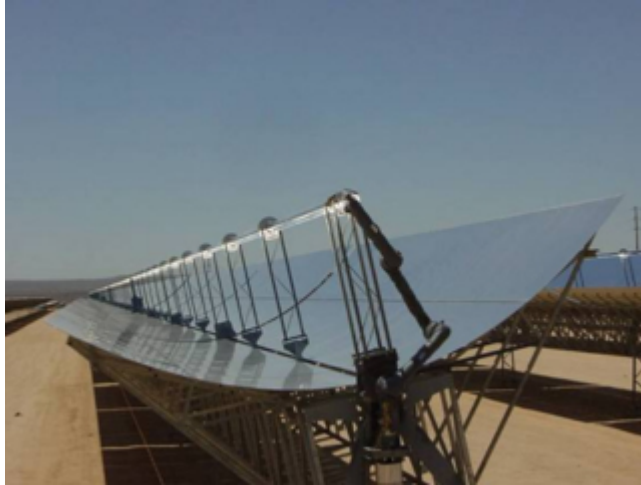
Fuente: <http://www.infiniacorp.com/powerdish.html>

En las imágenes anteriores se observa claramente la gran intensidad que puede alcanzar la energía concentrada en el foco de estos espejos parabólicos. En este punto la energía solar se transforma en energía térmica para ser la fuente de alta temperatura del motor Stirling.

5.1.2 Espejos Parabólicos Cilíndricos. Este tipo de espejos se obtiene al tomar una parábola bidimensional y extruirla a lo largo de un eje que sea perpendicular al plano de esta.

Los sistemas que usan este tipo de espejos son conocidos como abrevaderos ó estanques solares y su aplicación es usada en sistemas de conversión de energía solar por medio de turbinas de vapor (figura 13).

Figura 13. Sistema de estanque o abrevadero solar.



Fuente: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/elvicon/nivel1/index.php?opcionSelec=66>

El proceso de transformación de energía en un sistema de estanque solar comienza con la concentración de los rayos solares hacia el foco, en el que se ubica una tubería transparente que calienta un fluido (generalmente aceite) el cual viaja hacia un intercambiador de calor, generando vapor de agua con la energía transportada, para luego con este vapor impulsar una turbina que va conectada a un generador de energía eléctrica.

Teóricamente el radio de concentración (CR) de un estanque solar es igual a la raíz cuadrada del radio de concentración de un espejo paraboloide (ecuación 6) y, en la práctica, el radio de concentración de un espejo paraboloide es usualmente limitado a 3600, así que el radio de concentración correspondiente para un estanque solar es de 60 [Wieder].

$$CR_p = (CR_e)^{1/2} \quad \text{EC. 6}$$

Donde,

CR_p = Radio de Concentración del paraboloide.

CR_e = Radio de Concentración del estanque solar.

5.2 ESPEJO PARABÓLICO PARA EL SISTEMA CONCENTRADOR-MOTOR STIRLING

Para este proyecto se utilizó un concentrador de rayos solares del tipo paraboloide, el cual es el más apto para aplicaciones con motores Stirling. La superficie usada para este fin no es en sí un espejo, sino más bien una superficie metálica pulida y brillada hasta el punto de darle un acabado lo más reflectivo posible, para luego cromarla con el fin de mantener este brillo y proteger la superficie de los elementos naturales.

Este espejo está conformado por una elipse que tiene en su eje mayor una longitud de 70 centímetros y en su eje menor una longitud de 60 centímetros (figuras 14 y 15). Conociendo esto, se puede hallar el área de captación del espejo utilizado para este proyecto aplicando la ecuación que permite calcular el área de una elipse en el plano (ecuación 7).

$$Ae = \pi \times a \times b$$

EC. 7

Donde,

Ae = área de la elipse

a = semieje mayor

b = semieje menor

Figura 14. Gráfico de la elipse.

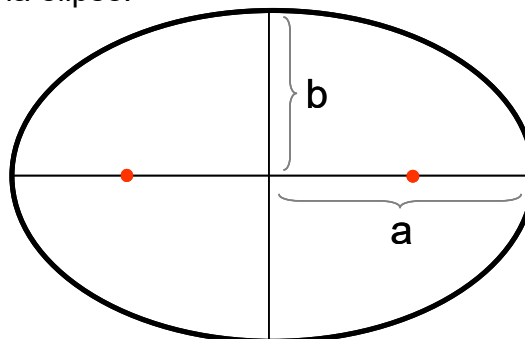


Figura 15. Imagen del espejo paraboloide usado para el proyecto.



5.2.1 Características del concentrador solar. Como se mencionó anteriormente un concentrador de rayos solares posee dos áreas de importancia: el área de captación y el área de proyección de la imagen. Conociendo estas dos áreas se puede medir el radio de concentración (CR) respectivo del espejo.

Este concentrador tiene un su eje mayor una longitud de 67 centímetros y en su eje menor una longitud de 59 centímetros, así que los valores para **a** y **b** en la ecuación 2.4 son 0,335 metros y 0,295 metros respectivamente. La imagen proyectada es un círculo de 5cm de diámetro aproximadamente. Los valores correspondientes a las dimensiones concentrador solar y el cálculo de su radio de concentración se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4. Área de captación, área de la imagen y *CR* del concentrador solar.

a (m)	b (m)	Área Captación (m²)	Área Proyección (m²)	Radio Concentración
0,335	0,295	0,310	0,002	158,160

En términos de eficiencia se debe considerar que la superficie no es 100% reflectiva aun cuando parezca un espejo, esto se debe a que el material siempre

presentará una rugosidad así sea lo más pequeña posible. La tabla 5 muestra los valores de reflexión que tienen varios materiales y colores para la luz blanca.

Tabla 5. Factor de reflexión para la luz blanca de varios materiales y colores.

Superficie reflectora	% Factor de reflexión
Plata brillante	92 - 97
Oro	60 - 92
Plata blanca (mate)	85 - 92
Níquel pulido	60 - 65
Cromo pulido	60 - 65
Aluminio pulido	67 - 72
Aluminio electro abrillantado	86 - 90
Aluminio vaporizado	90 - 95
Cobre	35 - 80
Hierro	50 - 55
Porcelana esmaltada	60 - 80
Espejos	80 - 85
Pintura blanca mate	70 - 80
Beige claro	70 - 80
Amarillo y crema claro	60 - 75
Techos acústicos	60 - 75
Verde muy claro	70 - 80
Verde claro y rosa	45 - 65
Azul claro	45 - 55
Gris claro	40 - 50
Rojo claro	30 - 50
Marrón claro	30 - 40
Beige oscuro	25 - 35
Marrón, verde y azul oscuros	5 - 20
Negro	3 - 4

Fuente: www.indal.es

En este caso la superficie reflectiva del paraboloide utilizado está cubierta con cromo pulido, el cual tiene un factor de reflexión para la luz blanca de **60% a 65%**. En la ecuación 8 se observa como afecta este factor a la energía del concentrador solar.

$$E_e = E_c \times F_r$$

EC. 8

Donde,

E_e = Energía Efectiva.

E_c = Energía Captada.

F_r = Factor de Reflexión del material.

Aplicando las ecuaciones 5, 7 y 8 es posible estimar la energía que será concentrada por el espejo parabólico y que será la fuente de alta temperatura para el motor Stirling alojado en el foco de este. El procedimiento para hallar dicha estimación es el siguiente:

1. Se halla el área de captación del espejo (área elipse, ecuación 7).
2. Con el valor de la radiación solar instantánea se estima cual es la radiación captada por el concentrador. Por ejemplo si en el momento hay una radiación de 1000 W/m^2 en el lugar y el área del concentrador es de $0,66 \text{ m}^2$, entonces por medio de una regla de 3 se obtiene que la radiación captada es de 660 W/m^2 .
3. La radiación obtenida en el paso anterior se multiplica por el radio de concentración (CR) hallado en la ecuación 5.
4. El valor de la radiación concentrada se multiplica por el factor de reflexión del espejo, el cual siempre será menor que la unidad.

En la tabla 6 se pueden observar los valores respectivos del concentrador solar usado en este proyecto. Estos valores se obtuvieron aplicando el procedimiento recién descrito y con la información correspondiente a las características del concentrador.

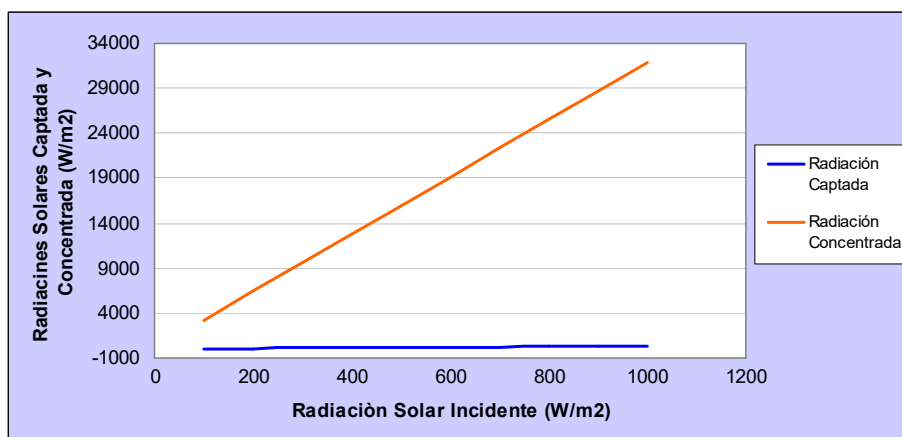
Tabla 6. Valores numéricos de las características físicas del concentrador solar.

Radiación Solar (w/m ²)	Área Elipse (m ²)	Radiación Captada (W)	Área Imagen (m ²)	CR	Factor Reflexión	Radiación Concentrada (W/m ²)
100	0,31	31,05	0,002	158,16	0,65	3 191,78
200	0,31	62,09	0,002	158,16	0,65	6 383,55
300	0,31	93,14	0,002	158,16	0,65	9 575,33
400	0,31	124,19	0,002	158,16	0,65	12 767,10
500	0,31	155,24	0,002	158,16	0,65	15 958,88
600	0,31	186,28	0,002	158,16	0,65	19 150,65
700	0,31	217,33	0,002	158,16	0,65	22 342,43
800	0,31	248,38	0,002	158,16	0,65	25 534,20
900	0,31	279,42	0,002	158,16	0,65	28 725,98
1000	0,31	310,47	0,002	158,16	0,65	31 917,76

Según la información de la tabla anterior se observa que este concentrador puede elevar el valor de la radiación solar **103** veces ($158 \times 0,65$) más que la captada. Se debe recordar que para que este valor de concentración sea alcanzado, el concentrador debe estar dirigido en línea recta hacia el Sol, ya que este solo concentra la radiación solar directa.

La figura 16 grafica los datos de la tabla 6 y permite comparar la diferencia en la potencia por área que se puede obtener cuando se usa el concentrador solar.

Figura 16. Comparación entre la radiación solar captada y la concentrada del sistema.



6. MOTORES STIRLING

6.1 BREVE HISTORIA DEL MOTOR STIRLING

El motor Stirling fue inventado en Escocia por el monje Robert Stirling, motivado por el hecho de que en la época se buscaba hallar alternativas a los motores de vapor, los cuales eran potencialmente peligrosos debido a la frecuente explosión de las calderas con las cuales estos trabajaban.

En principio esta máquina térmica era usada en aplicaciones de baja potencia como la de suministrar potencia a pequeñas bombas. Eventualmente con la aparición de los motores de combustión interna y motores eléctricos se volvió obsoleto.

Se reconoce en el motor Stirling la sencillez de sus mecanismos, la facilidad de operación y el hecho de que puede operar con cualquier fuente que genere calor. Sin embargo siempre fue desplazado por los otros dos tipos de motores mencionados anteriormente.

A partir de la década 1970-1980 se despertó la iniciativa de utilizar estos motores en aplicaciones espaciales y hoy en día se siguen considerando nuevos desarrollos para este tipo de aplicaciones.

También en el área de los automóviles, la empresa Phillips dedicó un largo tiempo a desarrollar aplicaciones para este campo obteniendo buenos resultados.

Hoy en día este tipo de motores es desconocido para la mayoría de las personas, sin embargo son usados en submarinos, investigación espacial, y una serie de aplicaciones con alto grado de complejidad.

Una tendencia que está apareciendo nuevamente, después de sus inicios en los ochentas, es la de utilizar estos motores para la generación de energía en zonas apartadas en las cuales no tiene interconexión el servicio de distribución eléctrica y en donde se hace difícil la consecución de combustibles.

6.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING

Un motor Stirling como cualquier máquina térmica comprende los cuatro procesos básicos de compresión, calentamiento, expansión y enfriamiento. Una comparación con un motor de combustión interna (como los encontrados en la mayoría de los automotores) puede aclarar la idea del motor Stirling. En la figura 17 se observa como funciona un motor de combustión interna [MARTINI].

Figura 17. Funcionamiento motor combustión interna.

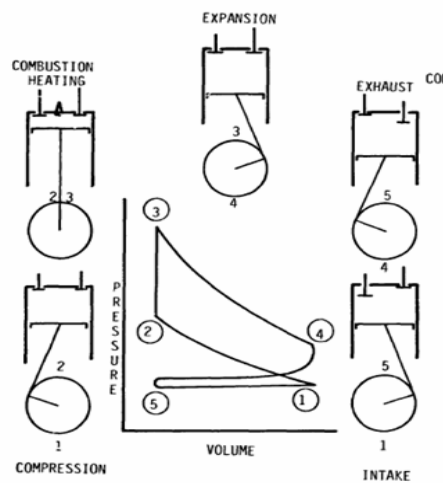


Figure 2-2. Example of Internal Combustion Engine.

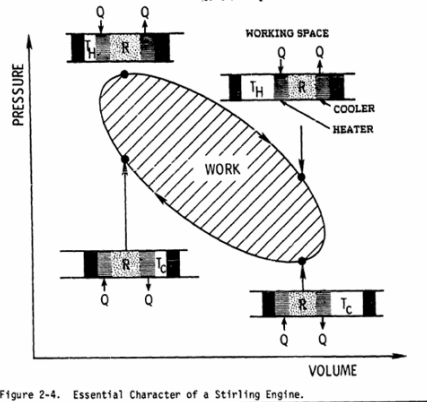
Fuente: Stirling Engine Design Manual.

En este motor una mezcla de gasolina y aire entra en el cilindro y es comprimida por el pistón. Luego la mezcla es calentada por ignición y quemada, lo cual resulta en una generación de trabajo mayor que la necesaria para comprimirla inicialmente. Por último la mezcla abandona el sistema con un pequeño

descenso en su temperatura y una nueva porción de mezcla ingresa al sistema para realizar un nuevo ciclo.

A diferencia del motor descrito anteriormente, en un motor Stirling el gas que realiza el trabajo nunca abandona las fronteras del sistema y su funcionamiento se basa en la expansión y compresión de este, por medio de su calentamiento y enfriamiento respectivamente. La figura 18 muestra este ciclo y su gráfica de presión vs. volumen.

Figura 18. Funcionamiento motor Stirling.



Fuente: Stirling Engine Design Manual.

El motor Stirling opera en un ciclo termodinámico regenerativo con la compresión y expansión cíclica de un fluido (aire) a diferentes niveles de temperatura. El flujo es controlado mediante cambios en el volumen en las cámaras fría y caliente, eliminando la necesidad de válvulas. Este proceso es reversible, lo que significa que así como una entrada de energía en forma de calor puede producir energía mecánica, una entrada de energía mecánica puede producir calor.

La configuración más básica de estos motores consiste en un juego de pistones, intercambiadores de calor y un elemento llamado "regenerador". El fluido puede ser aire (más común), helio, hidrogeno o nitrógeno. Los pistones son organizados

de tal forma que ambos crean un cambio en el volumen del fluido de trabajo y establecen un flujo neto hacia los intercambiadores de calor, de esta forma el calor es absorbido de una fuente exterior para crear energía mecánica y luego regresado al ambiente a través de su parte fría.

Como el ciclo es cerrado (el fluido está completamente contenido dentro del motor todo el tiempo) los motores Stirling tienen la cualidad de operar muy silenciosa y limpiamente, ya que no se producen productos de combustión [Martini].

Un elemento importante en este tipo de motores es el regenerador, el cual tiene como función absorber parte del calor del fluido de trabajo mientras este viaja de la parte caliente hacia la parte fría, para luego regresarla cuando éste regresa de la parte fría hacia la caliente. Este reciclaje interno de energía permite mayores eficiencias y un mejor desempeño [SESUSA].

6.3 TIPOS DE MOTORES

Existen 3 tipos básicos de motores o configuraciones de Motores Stirling: Alfa, Beta y Gama.

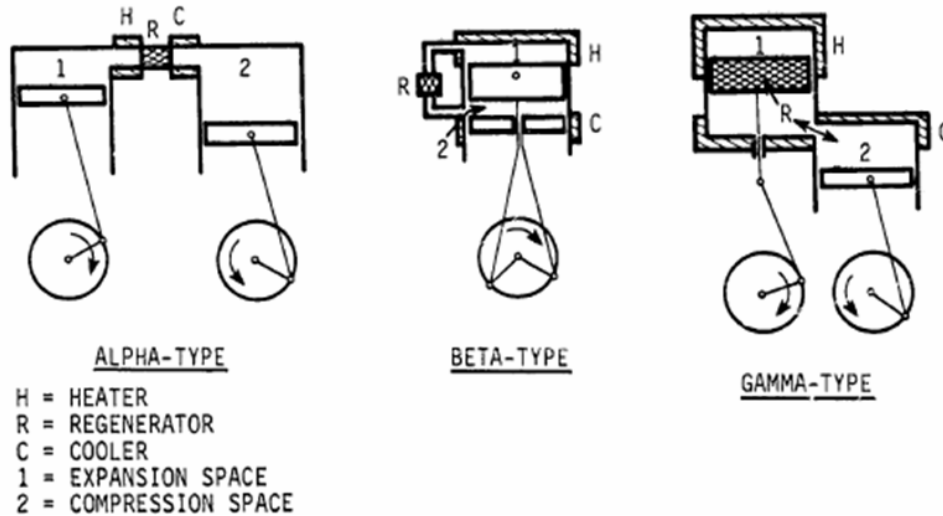
La configuración Alfa usa dos pistones los cuales comprimen mutuamente el gas en la cámara de enfriamiento, moviéndolo hacia la parte caliente donde este se expande nuevamente y regresa a la parte fría. El regenerador, el calentador y el refrigerador están dispuestos en serie entre las zonas de calentamiento y refrigeración.

Por su parte las otras dos configuraciones usan un pistón (pistón de potencia) y un desplazador (pistón de desplazamiento). El pistón realiza las funciones de compresión y expansión mientras que el desplazador se encarga de transferir el gas de la zona fría hacia la caliente y viceversa. Cuando el pistón y el

desplazador se encuentran dispuestos en línea en un mismo cilindro se trata de un motor tipo Beta, y cuando pistón y desplazador se encuentran en diferentes cilindros y no están en línea se trata de una configuración tipo Gama.

La figura 19 muestra las gráficas de los tres tipos de configuraciones [Martini].

Figura 19. Principales configuraciones de motores Stirling.

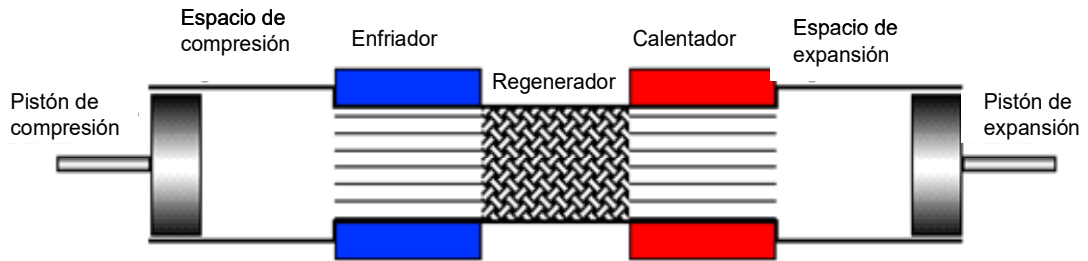


Fuente: Stirling Engine Design Manual.

6.3.1 Motor Tipo Alfa. La configuración de un motor tipo Alfa consiste en dos pistones que se encuentran en cilindros separados los cuales están conectados en serie por medio de un calentador, un regenerador y un enfriador [Urieli].

El tipo Alfa es conceptualmente la configuración más simple de los motores Stirling, sin embargo presenta la desventaja que los dos pistones deben tener sellos para contener el gas que realiza el trabajo. La figura 20 muestra como está conformada esta configuración [Urieli].

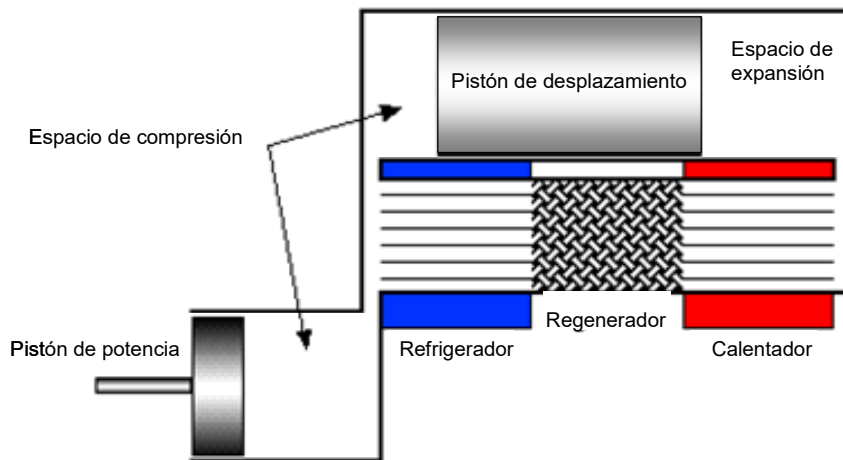
Figura 20. Configuración motor Stirling tipo Alfa.



Fuente: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines/engines.html>.

6.3.2 Motor Tipo Gama. Los motores tipo Gama tienen un pistón de desplazamiento y un pistón de potencia dispuestos en diferentes cilindros. Esta configuración permite una completa separación entre las cámaras intercambiadoras de calor (fría y caliente). El inconveniente que presenta esta configuración es que debido a la separación entre cilindros se presenta un mayor volumen muerto, el cual disminuye la eficiencia del motor (figura 21) [URIELI].

Figura 21. Configuración motor Stirling tipo Gama.



Fuente: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines/gamma.html>

Una aplicación de esta configuración es la usada en los motores Stirling de bajo delta de temperatura ó LTD (Low Temperature Delta), los cuales operan con diferencias de temperatura muy pequeñas (aproximadamente 5°C). Estos motores pueden accionarse simplemente ubicándolos en la mano de una persona en donde obtendría la fuente de calor y el aire circundante sería el sumidero (figura 22).

Figura 22. Fotografía de un motor LTD.



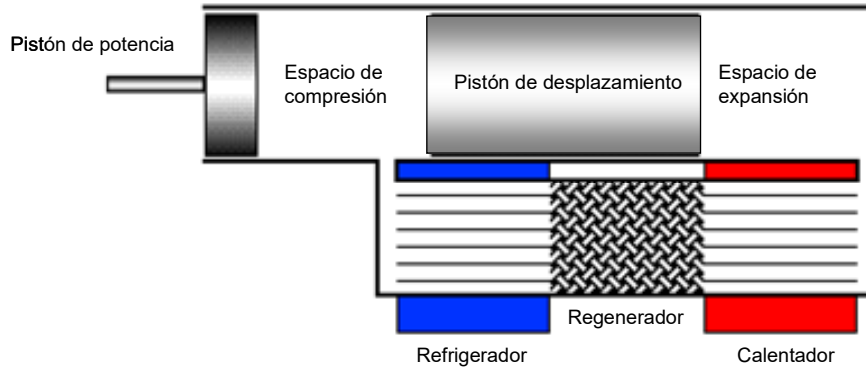
Fuente: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines/gamma.html>

6.3.3 Motor Tipo Beta. El motor tipo Beta tiene un solo cilindro en el cual están alojados en línea el pistón de desplazamiento y el pistón de potencia. El propósito del pistón de desplazamiento es, como su nombre lo dice, desplazar el gas de trabajo de una cámara a otra (expansión y compresión) en cada ciclo del motor a un volumen constante, haciéndolo circular en serie por el calentador, regenerador y refrigerador respectivamente.

Esta configuración se caracteriza por ser la que mayor eficiencia puede tener, ya que al no haber ductos de conexión entre diferentes cilindros se minimiza el

volumen muerto. Sin embargo este tipo de motor debe ser muy preciso en su manufactura para impedir fugas del gas de trabajo por fuera de los límites del sistema. La figura 23 muestra la configuración básica de este tipo de motor [Urieli].

Figura 23. Configuración del motor Stirling tipo Beta.



Fuente: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/engines/beta.html>

Este tipo de motor es el que se escogió para construir y las razones por la cuales se tomó esta decisión se mencionan en el capítulo 7.

6.4 ANÁLISIS DEL CICLO STIRLING

El ciclo Stirling consiste en un proceso termodinámico de expansión y compresión isotérmicas de un gas, a una tasa de calentamiento y enfriamiento constantes. En la figura 24 se pueden observar 4 puntos los cuales identifican cada etapa del ciclo.

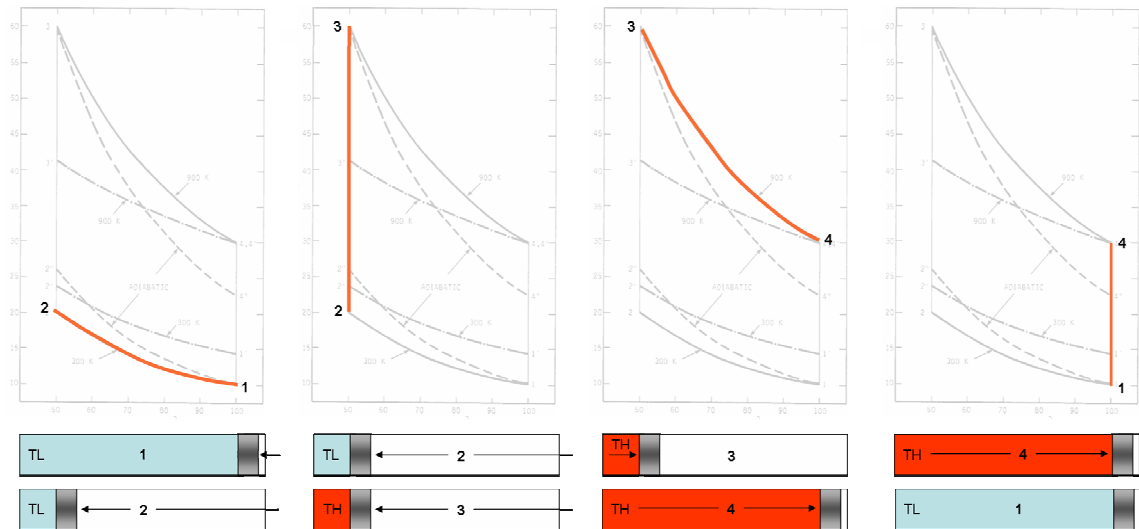
En el punto 1 se inicia la compresión del gas hasta el punto 2, esto da como resultado un incremento en la presión y una disminución en el volumen a temperatura constante.

En el punto 2 se adiciona calor al sistema lo que resulta en un incremento de la presión a un volumen constante hasta llegar al punto 3.

El proceso de expansión inicia en el punto 3 hasta el punto 4, en donde el sistema gana volumen nuevamente y pierde presión a una temperatura constante.

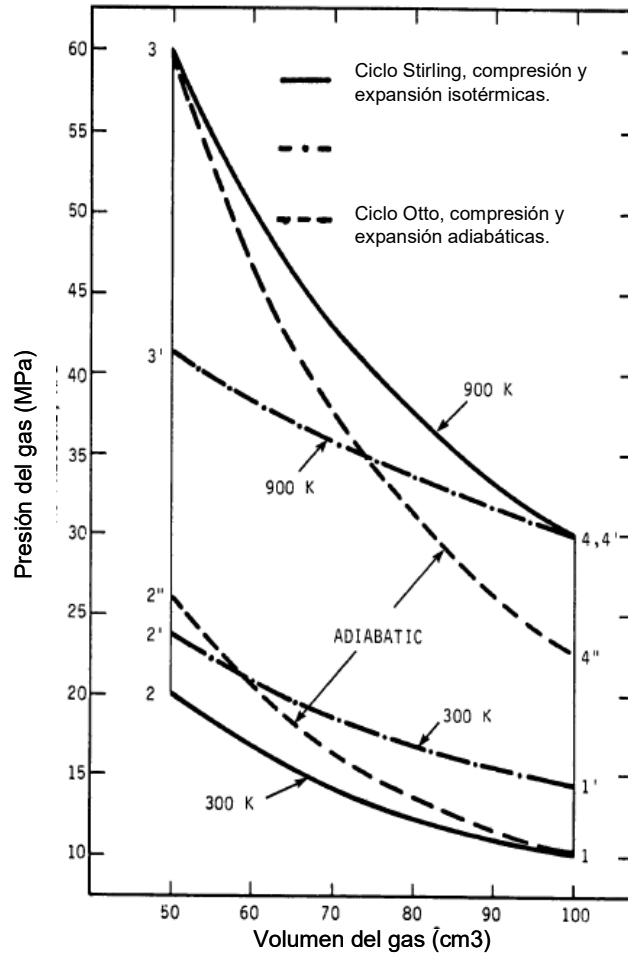
Finalmente la temperatura disminuye del punto 4 al punto 1 a volumen constante para que el ciclo inicie nuevamente.

Figura 24. Etapas del ciclo Stirling y su respectiva variación en el volumen dentro del cilindro.



Para un mejor entendimiento del ciclo se explica a continuación un ejemplo numérico tomado del libro *Stirling Engines Manual* (Martini) y tomando como referencia el grafico de la figura 25.

Figura 25. Gráfico Presión vs. Volumen del ciclo Stirling.



Fuente: Stirling Engine Design Manual.

En la figura 25 se observa que en el estado 1 se tienen 100 cm^3 de gas (hidrógeno) a una presión de 10 MPa, los cuales se comprimen hasta un volumen final de 50 cm^3 a una temperatura constante de 300°K ($^\circ\text{K} = ^\circ\text{C} + 273$). En este punto (2) la presión se ha elevado a 20 MPa debido a la compresión ejercida sobre el gas. El área bajo la curva entre estos dos puntos es el trabajo requerido para comprimir el gas y es también la cantidad de calor que el gas entrega en el ciclo.

Si la presión se mide en Pascales (N/m^2) y el volumen en m^3 el trabajo será como muestra la ecuación 9.

$$(\text{N/m}^2) (\text{m}^3) = \text{Newton} \times \text{metro} = \text{Joule} = \text{Watt} \times \text{Segundo} \quad \text{EC. 9}$$

Entonces se tiene:

$$P \times V = (100 \times 10^5) \text{Pa} \times (100 \times 10^{-6}) \text{m}^3 = 1000 \text{ J.}$$

Por conveniencia en el ejemplo se trabajará con cm^3 para los volúmenes y MPa para las presiones.

El incremento en el trabajo será según la ecuación 10.

$$dW = PdV = (1000 / V) \times dV \quad \text{EC. 10}$$

Integrando:

$$W = 1000 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = 1000 [\ln V]_{V_1}^{V_2}$$

$$W = 1000 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$W_1 = 1000 \ln\left(\frac{50}{100}\right) = -693.14 \text{ Joules}$$

El valor del trabajo es negativo porque es el sistema el que está entregando trabajo en esta etapa.

En la siguiente etapa, en los estados del 2 al 3, el gas es calentado a volumen constante de 300°K a 900°K. El calor que se debe suministrar al gas está dado por la ecuación 11.

$$QR_2 = M \times CV \times (TH_3 - TC_2) \quad \text{EC. 11}$$

Donde,

QR_2 = Calor requerido en el estado 2.

CV = Capacidad calorífica a volumen constante, $J/^\circ K \times g/mol$.

M = Masa del gas.

TH = Temperatura alta.

TC = Temperatura baja.

Entonces,

$$QR_2 = 0.4009 \times 21.030 \times (900 - 300) = 5059 \text{ J}$$

Cuando el gas alcanza los 900°K la presión en este punto se halla según la ecuación 12:

$$P_3 = M \times R \times (TH_3 / V_2) \quad \text{EC. 12}$$

Donde,

R = Constante del gas.

TH = Temperatura alta.

V = Volumen del gas.

M = masa del gas.

Entonces,

$$P_3 = 0.4009 \times 8.314 \times (900 / 50) = 60 \text{ MPa}$$

Del estado 3 al 4 se da una expansión isotérmica se halla con la misma ecuación usada para la compresión (ecuación 10), de modo que el trabajo para esta etapa es:

$$W_3 = M \times R \times T_{H_3} \times \ln(V_1/V_2)$$

$$W_3 = 0.4009 \times 8.314 \times 900 \times \ln(100/50)$$

$$W_3 = 2079.4 \text{ J}$$

Finalmente cuando el gas expandido regresa del estado 4 al 1 para finalizar el ciclo se emplea la misma fórmula que para el calentamiento (ecuación 11), así que el calor en esta etapa es:

$$Q_{R_4} = M \times C_V \times (T_{C_1} - T_{C_4})$$

$$Q_{R_4} = 0.4009 \times 21.030 \times (-900 + 300)$$

$$Q_{R_4} = -5059 \text{ J}$$

Este valor es opuesto al calor ganado en el estado 3 del ciclo, así que estos dos valores se cancelan mutuamente y el trabajo neto del ciclo sería como en la ecuación 13.

$$W_{\text{neto}} = W_1 + W_3$$

EC.13

$$W_{\text{neto}} = W(\text{in}) + W(\text{out}) = -693.14 + 2079.4$$

$$W_{\text{neto}} = 1383.3 \text{ J}$$

6.4.1 Eficiencia del ciclo. La eficiencia del ciclo será la razón del trabajo neto sobre el calor ingresado al sistema (ecuación 14).

$$EF = \text{Trabajo neto} / \text{Calor ingresado} \quad \text{EC. 14}$$

$$EF = 1383.3 / 2079.4 = 0.6667$$

En general la eficiencia se halla como (ecuación 15):

$$EF = \frac{\text{Trabajo ingresado} + \text{trabajo entregado}}{\text{Calor ingresado}} \quad \text{EC. 15}$$

$$EF = TH_3 - TC_1 / TH_3$$

$$EF = 900 - 300 / 900 = 0.6667$$

Esta eficiencia es conocida como *eficiencia de carnot* y es la máxima eficiencia que una máquina térmica puede alcanzar teóricamente. En el ejemplo no se tuvieron en cuenta las pérdidas que puede tener un sistema en la práctica, por esta razón la eficiencia fue la máxima.

6.5 CICLO SCHMIDT

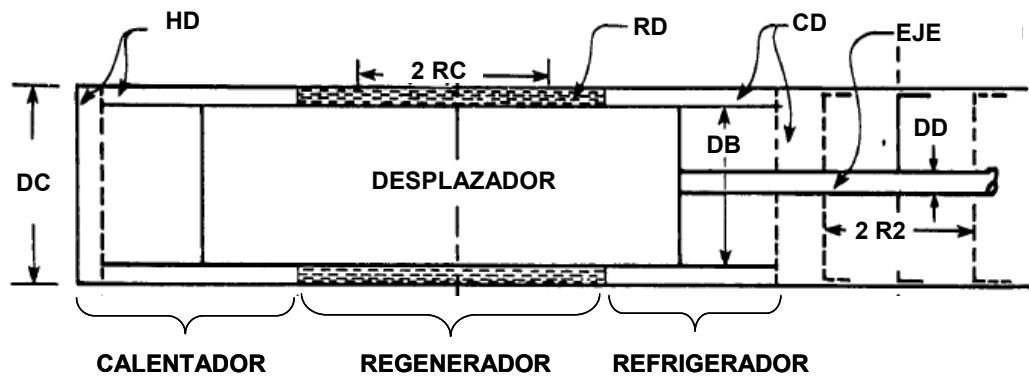
Este ciclo es muy importante para este proyecto ya que será la base del cálculo para el diseño del motor construido, pues debido a la configuración elegida, el ciclo Schmidt describe apropiadamente el funcionamiento de sus partes y las propiedades del motor.

El ciclo Schmidt es un ciclo en el cual el desplazador y el pistón de potencia se mueven sinusoidalmente (figura 27). Este análisis parte de los siguientes supuestos [Martini]:

1. Las partes se mueven sinusoidalmente.
2. Las temperaturas son conocidas y constantes en todas las partes del motor.
3. No hay fugas de gas.
4. El fluido de trabajo obedece a la ley de los gases perfectos.
5. En cada instante del ciclo la presión del gas es la misma en todo el sistema.

Para comprender adecuadamente el funcionamiento del motor con este ciclo lo primero es identificar las partes que componen el motor. En la figura 26 están detalladas las partes y a continuación se describe cada una de ellas.

Figura 26. Partes del motor tipo Beta para analizar con el ciclo Schmidt.



Fuente: Stirling Engine Design Manual, Martini.

DB = Diámetro del desplazador.

DD = Diámetro del eje del desplazador.

DC = Diámetro interior del cilindro.

HD = Volumen muerto en la zona de alta temperatura, (cm^3).

2RC = Carrera del desplazador, (cm).

RD = Volumen muerto del regenerador, (cm^3).

CD = Volumen muerto en la zona de baja temperatura, (cm^3).

2R2 = Carrera del pistón de potencia, (cm).

TH = Temperatura efectiva del gas en la zona caliente, ($^{\circ}\text{K}$).

TR = Temperatura efectiva del gas en el regenerador, ($^{\circ}\text{K}$).

TC = Temperatura efectiva del gas en la zona fría, ($^{\circ}\text{K}$).

M = Masa del gas, (g mol).

R = Constante universal de los gases $8.314 \text{ J/g mol } ^{\circ}\text{K}$.

P(N) = Presión del gas en punto particular (N) del ciclo, (MPa).

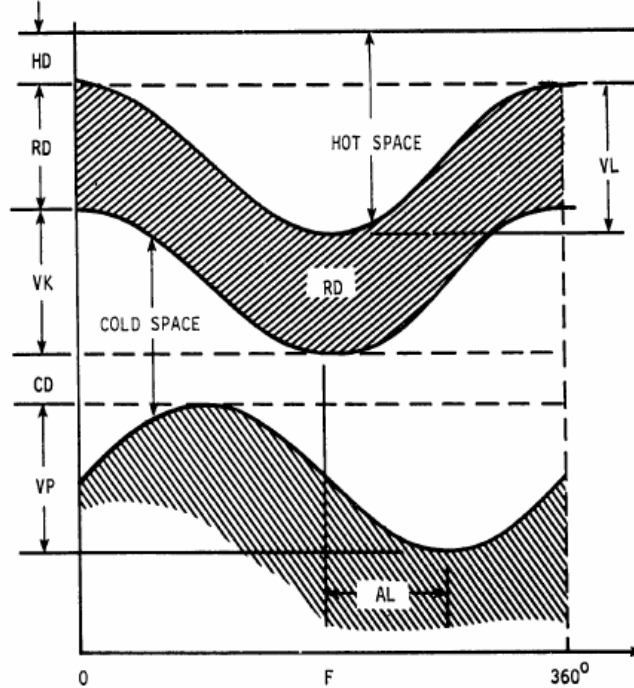
F = Ángulo de la biela, (grados).

AL = Ángulo de desfase entre pistón y desplazador, (grados).

Luego de identificar las partes que componen el motor, es necesario conocer la forma como se relacionan los elementos del motor entre sí.

Como se dijo anteriormente, en este ciclo los pistones se mueven de forma sinusoidal, la figura 27 muestra 2 áreas comprendidas entre curvas sinusoidales que están desfasadas en un ángulo determinado (generalmente 90°). Este desfase entre las curvas representa el desfase físico que existe entre los pistones, el cual es necesario para hacer que el pistón de desplazamiento envíe el gas de trabajo hacia la zona requerida por el pistón de potencia, en el momento preciso para generar el trabajo mecánico.

Figura 27. Movimiento sinusoidal de las partes del motor.



Fuente: Stirling Engine Design Manual, Martini.

Además de la información contenida en las dos figuras anteriores, se deben determinar otras variables que son necesarias para hallar el valor de las presiones y volúmenes del motor, para luego hallar el trabajo producido por este. A continuación se describen estas variables y las ecuaciones para calcularlas.

Volumen vivo caliente máximo: Es el máximo volumen que hay en la zona de *calentamiento* del motor y que alcanza a ser barrido por el pistón de desplazamiento, se le dice vivo porque al ser barrido por el desplazador hace parte en la generación de trabajo. Su valor se halla con la ecuación 16.

$$VL = 2RC \times DB^2 \times (\pi/4) \quad \text{EC. 16}$$

En la figura 26 se puede observar que hay una zona en la parte de enfriamiento del gas la cual es barrida tanto por el pistón de desplazamiento como por el pistón

de potencia, así que se deben tener en cuenta estos dos volúmenes para calcularlos.

Volumen vivo frío máximo asociado al pistón de *desplazamiento*: Es el máximo volumen que hay en la zona de *enfriamiento* del motor y que alcanza a ser barrido por el pistón de *desplazamiento*. La ecuación 17 permite hallar su valor.

$$VK = 2RC \times (DB^2 - DD^2) \times (\pi/4) \quad \text{EC. 17}$$

Volumen vivo frío máximo asociado al pistón de *potencia*: Es el máximo volumen en la zona de *enfriamiento* que es barrido por el pistón de *potencia*. La ecuación 18 permite hallar su valor.

$$VP = 2R2 \times (DC^2 - DD^2) \times (\pi/4) \quad \text{EC. 18}$$

Para un ángulo F, el conjunto de volúmenes calientes es:

$$H(N) = \frac{VL}{2} [1 - \cos(F)] + HD \quad \text{EC. 19}$$

De igual forma, el conjunto de volúmenes fríos para un ángulo F es:

$$C(N) = \frac{VK}{2} [1 + \cos(F)] + CD + \frac{VP}{2} [1 - \cos(F - AL)] \quad \text{EC. 20}$$

Con lo anterior se puede hallar el volumen del gas total (V(N)) para cualquier ángulo N de la biela. Esto es:

$$V(N) = H(N) + C(N) + RD \quad \text{EC. 21}$$

Por lo tanto, aplicando la ley de los gases perfectos, la presión en el interior del motor para un ángulo **N** de la biela es:

$$P(N) = \frac{M(R)}{\frac{H(N)}{TH} + \frac{C(N)}{TC} + \frac{RD}{TR}} \quad P(N) = \frac{M(R)}{\frac{H(N)}{TH} + \frac{C(N)}{TC} + \frac{RD}{TR}} \quad \text{EC. 22}$$

La temperatura del regenerador **TR** se calcula de forma más aproximada a la realidad, como la media logarítmica de las temperaturas alta y baja (ecuación 23):

$$TR = (TH-TC) / \ln (TH/TC) \quad \text{EC. 23}$$

El **trabajo** generado en cada ciclo (W_1), para un motor tipo Beta en el cual las carreras de los pistones de desplazamiento y de potencia se *traslapan*, se halla por medio de la ecuación 24 [MARTINI].

$$W_1 = \frac{\pi(1-AU)PX(VL)(XY)\text{seno}(AL)}{Y + (Y^2 - X^2)^{1/2}} \left[\frac{Y - X}{Y + X} \right]^{1/2} \quad \text{EC. 24}$$

Donde,

$$X = \left[(AU-1)^2 + 2(AU-1)(XY)\cos(AL) + (XY)^2 \right]^{1/2}$$

$$Y = AU + 4(XX)(AU)/(1+AU) + Z$$

$$Z = (1 + (XY)^2 - 2(XY)\cos(AL))^{1/2}$$

$$AU = TC/TH$$

$$XX = \frac{RD + HD + CD}{VL}$$

$$VL = VK$$

$$XY = \frac{VP}{VL}$$

PX = Máxima presión alcanzada en cada ciclo (MPa).

7. DISEÑO DEL MOTOR STIRLING TIPO BETA.

El motor elegido para construir fue el tipo Beta debido a las siguientes características:

- Debido a que es el más eficiente de los 3 tipos.
- Por su disposición lineal de los dos pistones en un solo cilindro presenta una forma alargada, la cual ocupa menos área y por lo tanto proyecta menos sombra sobre el concentrador de rayos solares.
- Este tipo de motor funciona mejor cuando es dispuesto en posición vertical debido a que se reduce la fricción ejercida por el pistón de potencia sobre las paredes del cilindro; y ya que el concentrador de rayos solares estará la mayor parte del tiempo aproximadamente en esta posición (con algunos grados de variación), el sistema se beneficia de esta característica del motor.

Es por esto que el análisis hecho sobre las ecuaciones para calcular las presiones, el trabajo y demás variables del motor se han hecho con respecto a este tipo, y no se describió la forma para calcular estos valores para las otras dos configuraciones conocidas (Alfa y Gama). Sin embargo, en la literatura citada en la bibliografía de este trabajo se pueden encontrar las ecuaciones para calcular los valores para estas otras dos configuraciones.

Teniendo claro el tipo de motor a construir lo siguiente será definir la metodología de diseño a aplicar, las dimensiones del motor, las temperaturas de operación, las presiones y demás características que permitieran diseñar y construir un motor

que se acoplara al otro componente del sistema, el concentrador solar. A continuación se describe como se hizo para solucionar estas partes del problema.

7.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología aplicada para el diseño del motor Stirling tipo Beta fue tomada del libro *Stirling Engine Design Manual* (MARTINI). Este libro describe tres métodos para el diseño de motores Stirling, los cuales clasifica como métodos de primer, segundo y tercer orden.

En este proyecto se utilizó el método de primer orden el cual se describe a continuación, en tanto que los métodos de segundo y tercer orden se basan en otros ciclos como el ciclo semiadiabático de Phillips (segundo orden) que no se describen en este trabajo, ya que no hacen parte del proceso de diseño escogido.

7.1.1 Método de Diseño de Primer Orden. Este método permite calcular la potencia de salida y la eficiencia del motor, mediante el conocimiento de las dimensiones y condiciones de operación de este y el uso de las ecuaciones de Schmidt descritas en el capítulo 6.5.

Según lo anterior, el proceso de diseño parte de un modelo base que sea aproximado a lo que se requiere, se evalúa este modelo inicial mediante las ecuaciones descritas y a partir de allí, se empiezan a hacer variaciones en las dimensiones y condiciones de operación (temperatura, presión, etc.) hasta lograr un resultado satisfactorio.

7.1.2 Cálculo de la potencia. El cálculo de la potencia de un motor Stirling con este método se puede hacer siguiendo dos caminos.

El primero es ejecutar la siguiente secuencia:

1. Determinar las dimensiones iniciales del motor (figura 26).
2. Determinar ó estimar las condiciones de operación iniciales del motor: temperaturas, presiones, masa del gas, tipo de gas, etc.
3. Hallar los valores de las variables del ciclo Schmidt (ecuaciones 16 – 24).
4. El valor real del trabajo está entre un 30% y 40% del obtenido con las ecuaciones de Schmidt².

El otro camino es similar al anterior:

1. Determinar las dimensiones iniciales del motor (figura 26).
2. Determinar ó estimar las condiciones de operación iniciales del motor: temperaturas, presiones, masa del gas, tipo de gas, etc.
3. Hallar los valores de las variables del ciclo Schmidt (ecuaciones 16– 24).
4. Hallar la potencia como indica la siguiente ecuación:

$$P = (B) \times (p) \times (f) \times (V_o) \quad \text{EC. 25}$$

Donde,

P = Potencia del motor (Watts).

p = Presión media del ciclo (Bar).

f = Frecuencia del ciclo de la velocidad del motor (Hz).

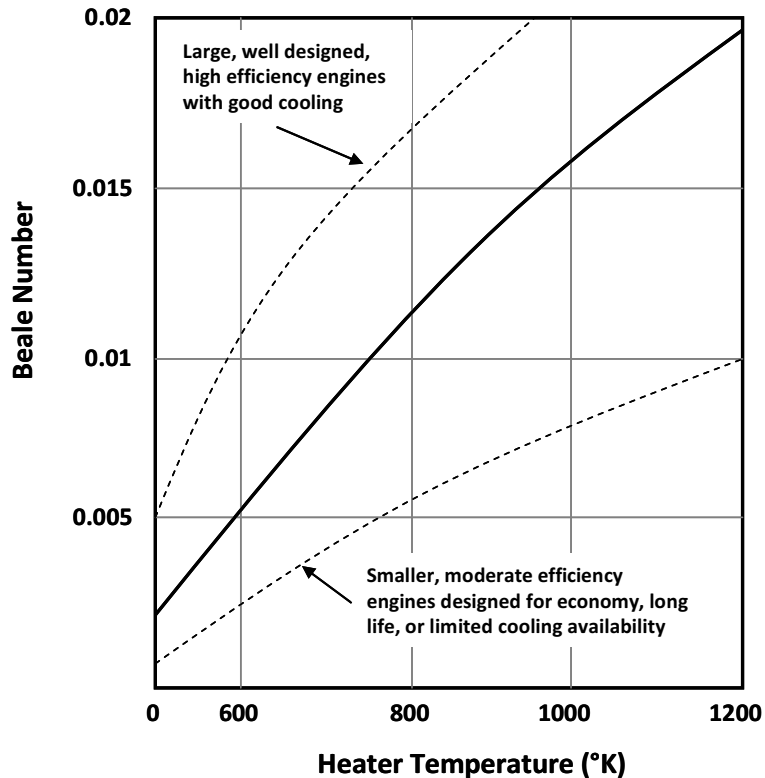
V_o = Desplazamiento ó volumen barrido por el pistón de potencia (cm³).

B = Número de **Beale**.

² Este porcentaje se ha observado experimentalmente durante mucho tiempo según el libro Stirling Engine Design Manual (MARTINI).

El número de Beale se ha determinado experimentalmente por parte de William Beale, luego de haber examinado motores y evaluar su comportamiento por muchos años. Este número está en función de la temperatura del calentador del motor Stirling y se puede hallar utilizando la curva de la figura 28.

Figura 28. Curva para hallar el número de Beale en función de la temperatura.



Fuente: Stirling Engine Design Manual, MARTINI.

Se puede observar en la figura del número de Beale, que el valor de este puede verse afectado también por el tamaño, diseño y eficiencia que presente el motor. De esta forma la línea punteada inferior es la guía para determinar este número en motores pequeños y de baja eficiencia, mientras que la línea punteada superior permite hallar el valor para motores grandes y de alta eficiencia. La línea llena ubicada en la parte central del gráfico es el estándar para la mayoría de los

motores. Es importante resaltar que la temperatura en el eje de la abscisa está dada en grados Kelvin (K).

7.1.3 Elección del motor basándose en el trabajo entregado. La razón por la cual se elija diseñar determinado motor depende de muchos factores que van desde lo que busque el diseñador y el tipo de aplicación del motor, hasta las limitaciones que pueda tener como el tamaño y las condiciones de operación de este.

Generalmente lo que se busca en un motor de este tipo es que entregue la mayor cantidad de trabajo en cada ciclo de la forma más eficiente. Si la razón para elegir el motor es esta, entonces se puede proceder de la siguiente manera a fin de obtener una ayuda gráfica para visualizar el desempeño general del motor:

1. Determinar las dimensiones iniciales del motor ó las diferentes opciones de motores que se tengan (figura 26).
2. Determinar ó estimar las condiciones de operación iniciales del motor ó motores: temperaturas, presiones, masa del gas, tipo de gas, etc.
3. Hallar los valores de las variables del ciclo Shmidt (ecuaciones 16 – 24).
4. Con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel³, hallar los valores de las variables en los puntos anteriores, para un rango de 0° a 360°. Esto generará las variaciones de todas estas variables durante un ciclo completo.
5. Graficar la variación de la presión en función del volumen durante el ciclo completo. Esto se hace con la información de varios motores, los cuales tengan entre ellos algunas modificaciones en las dimensiones ó condiciones de operación.

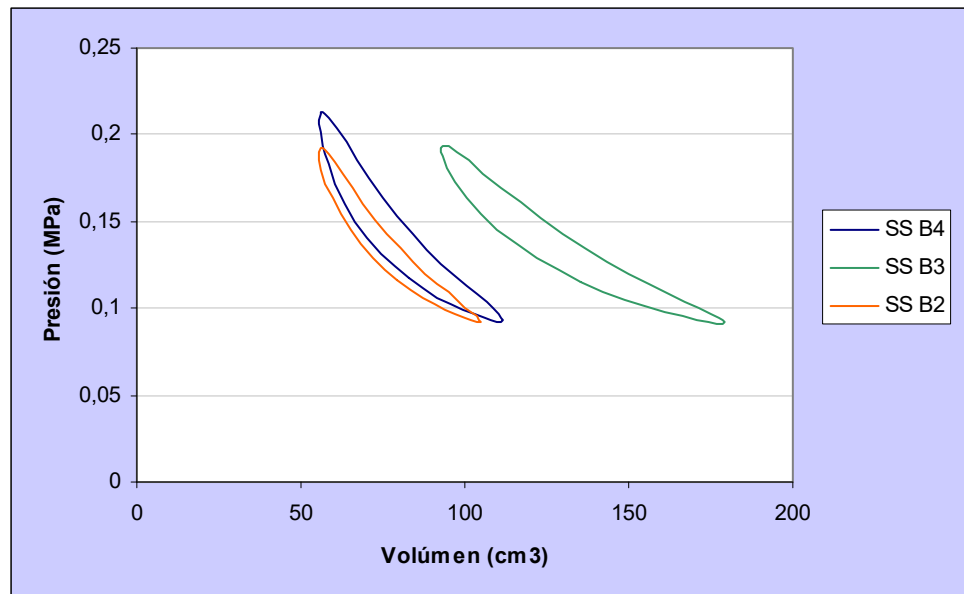
³ Excel es una herramienta de Microsoft Office para realizar cálculos y analizar información.

6. La gráfica de cada motor es diferente. La opción a elegir es la gráfica que encierre una mayor área dentro de ella, ya que esto significa que es la que mayor trabajo está entregando en cada ciclo.

Para ilustrar lo anterior, en la figura 29 se encuentran las curvas de Presión (MPa) vs. Volumen (cm^3) de tres tipos de motor similares. Estos motores se nombraron como SS B2 (rojo), SS B3 (verde) y SS B4 (azul); los cuales corresponden a diferentes configuraciones que fueron evaluadas durante el proceso de diseño del motor y provienen de la contracción de: Stirling Solar tipo Beta (SS B).

También, en la tabla 7 se encuentran los valores de las dimensiones y condiciones de operación del motor SS B4, y en la tabla 8 se encuentran los cálculos de presión y volumen en un rango de 0° a 360° (un ciclo completo) para este mismo motor.

Figura 29. Presión vs. Volumen para 3 tipos de motor Stirling tipo Beta.



Se puede ver en la figura anterior que la curva azul (SS B4) tiene mayor área que la roja (SS B2). Estos dos motores tienen las mismas condiciones de operación y la diferencia se logró mediante la variación de algunas de sus dimensiones.

Tabla 7. Dimensiones y condiciones de operación del motor SS B4.

Parámetro	Valor	Unidades
DB	3,90	cm
DD	0,50	cm
DC	4,00	cm
HD	6,20	cm ³
2RC	4,55	cm
RD	0	cm ³
CD	-4,92	cm ³
2R2	4,55	cm
TH	423	°K
TC	300	°K
M	0,00011	Kg
R	287	J / Kg°K
AL	90	grados

Tabla 8. Volumen y Presión en función del ángulo para el motor SS B4.

F (grados)	V(N) cm ³	P(N) Mpa
0	82,96	0,117
18	74,27	0,131
36	66,48	0,150
54	60,35	0,171
72	56,47	0,192
90	55,23	0,208
108	56,75	0,212
126	60,88	0,204
144	67,21	0,185
162	75,12	0,164
180	83,85	0,143
198	92,53	0,126
216	100,32	0,112
234	106,45	0,103
252	110,33	0,096
270	111,57	0,093
288	110,05	0,092
306	105,93	0,094
324	99,60	0,098
342	91,68	0,106
360	82,96	0,117

Por otra parte, la curva verde (SS B3) se muestra con un comportamiento y ubicación diferentes, esto es porque para este motor se modificaron tanto las dimensiones como las condiciones de operación con respecto a los otros dos.

7.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN, DIMENSIONES Y DEMÁS CARACTERÍSTICAS

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de diseño del motor también deben tenerse en cuenta otras variables además del método de diseño aplicado, y se deben definir las condiciones de operación (temperatura, presiones, etc.), las dimensiones (tamaño, peso, forma, etc.) y otras características (como el tipo de gas de trabajo, materiales, etc.) que permitan realizar el diseño y, posteriormente, la construcción del motor.

Ya que este motor hace parte de un sistema junto con el concentrador de rayos solares, se debe acoplar a este último y por esta razón es el concentrador el que determina los límites del motor⁴.

En cuanto al tamaño del motor, este no debía ser muy grande con el objeto de proyectar la menor área de sombra sobre el concentrador, con el fin captar la mayor cantidad de radiación incidente.

Respecto a las temperaturas, la fuente de alta temperatura sería la región sobre la cual se concentraría la radiación solar, y el sumidero (baja temperatura) sería un elemento de refrigeración que usaría agua como fluido de trabajo⁵.

⁴ Se decidió este orden de importancia en los componentes del sistema porque la construcción del concentrador solar fue muy complicada, debido a la escasez de opciones en el mercado.

⁵ El agua tiene una capacidad de transferencia de calor mucho mayor respecto a la del aire.

En estos motores generalmente el fluido de trabajo es aire, hidrógeno o helio. Estos últimos tienen una capacidad mayor de transferencia de calor con lo cual se lograría una mayor eficiencia en el motor; sin embargo la difícil contención de estos gases implicaría la necesidad de usar sellos especiales dentro del motor y un proceso de manufactura más complicado, por lo tanto se decidió usar aire como gas de trabajo.

El peso estaría determinado por las dimensiones de las piezas que conforman el motor y por la densidad de los materiales usados para la construcción de las mismas. La opción tomada en este caso fue elegir materiales de bajo costo, de fácil *maquinabilidad* y que cumplieran con los requerimientos necesarios para su aplicación.

La tabla 9 muestra de forma resumida las características y condiciones iniciales que tendría el motor.

Tabla 9. Características y condiciones iniciales para el diseño del motor.

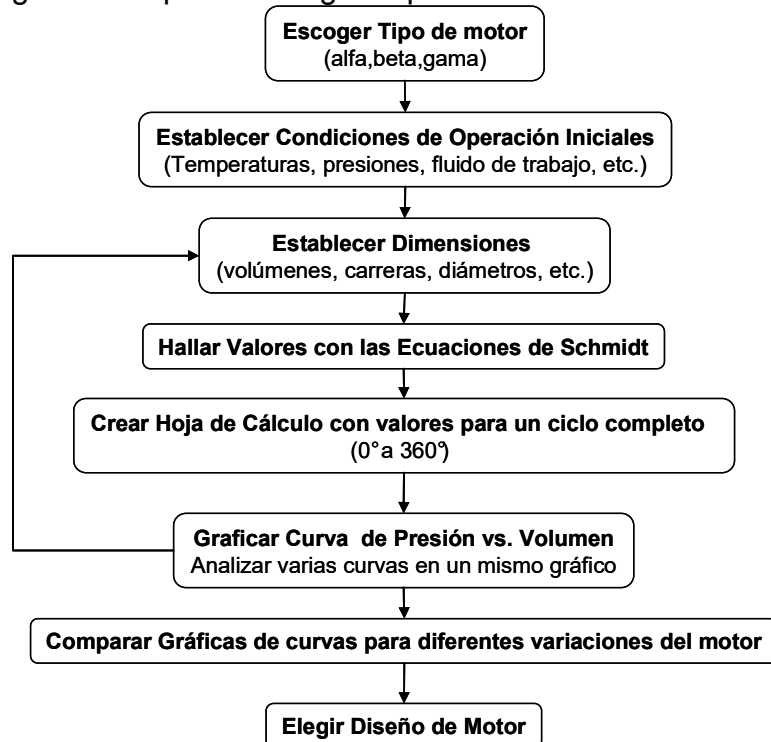
Variable	Valor	Unidades
Temperatura Alta, TH	423	°K
Temperatura Baja, TL	300	°K
Presión Inicial	0.085113	MPa
Gas de trabajo	Aire	
Fluido Refrigeración	H ₂ O	
Área Máxima de Sombra Proyectada	100	cm ²

Ya que el objetivo del diseño no estaba sujeto a alcanzar una potencia predeterminada, las dimensiones de las partes que componen el motor (diámetros, volúmenes, carreras, etc.) eran variables, y se podían modificar a gusto en busca de una solución óptima.

7.3 PROCESO DE DISEÑO DEL MOTOR

El proceso que se siguió para el diseño del motor es como se observa en el diagrama de la figura 30. Este diagrama es el resumen de todo el procedimiento que se ha descrito a partir del capítulo 7.

Figura 30. Diagrama del proceso seguido para el diseño del motor.



El proceso que se muestra en el diagrama de la figura anterior se siguió sistemáticamente, evaluando y comparando los resultados por medio de la hoja de cálculo creada en *Excel* y el análisis de las gráficas derivadas de esta. Como se mencionó en el capítulo 7.1.3, para cada opción ó alternativa de diseño del motor se asignó un nombre según el número de iteración a la que pertenecía, de esta forma la configuración inicial se denominó SS B1 (Stirling Solar Beta 1). Es por esta razón que en la figura 29 se pueden ver los gráficos de las alternativas de diseño 2,3 y 4 con los nombres de SS B2, SS B3 y SS B4.

Durante el proceso de diseño se descubrió en la literatura un motor que cumplía con la mayoría de los requisitos como condiciones de operación y dimensiones, y que presentaba un mecanismo de transmisión de potencia muy atractivo para ser usado en el motor que se estaba diseñando. Así que se tomaron partes de este motor y se adaptaron a lo que se estaba buscando, se rediseñó el motor y se evaluó según el procedimiento del diagrama de la figura 30. El diseño base mencionado se encuentra en el libro *Stirling and Hot Air Engines: Designing and Building Experimental Model Stirling Engines*, el cual está citado en la bibliografía.

El motor que se decidió construir fue el que resultó de la séptima iteración en el proceso de diseño descrito en el diagrama, por esta razón se nombró al motor como SS B7 (Stirling Solar Beta 7). A continuación se mostraran las tablas y gráficas que resultaron del análisis de las características de este motor.

7.3.1 Resultados del análisis de las características del motor SS B7. De acuerdo con el diagrama de diseño de la figura 30, los resultados obtenidos del análisis del motor diseñado se mostrarán en ese mismo orden.

Escoger tipo de motor:

El motor Stirling escogido fue del tipo Beta por las razones que se expusieron al inicio del capítulo 7.

Establecer condiciones iniciales de operación:

Las condiciones iniciales que tendría el motor se detallan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10. Condiciones iniciales de operación del motor SS B7.

Variable	Valor	Unidades	Comentario
Temperatura Alta, TH	423	°K	Temperatura en el foco del concentrador.
Temperatura Baja, TL	300	°K	Temperatura del fluido de refrigeración (Ambiente).
Presión Inicial	0.085113	Mpa	Presión atmosférica en Medellín.
Gas de trabajo	Aire		Facilidad de contención dentro del sistema.
Fluido Refrigeración	H2O		Mejor disipador de calor que el aire.
Área Máxima de Sombra Proyectada	100	cm ²	Llevar al mínimo para mayor captación de radiación.
Tipo de energía de trabajo	Solar		Radiación solar directa captada por el concentrador.

Establecer dimensiones:

Tomando como referencia la figura 26, la cual muestra y define las partes que componen un motor tipo Beta, en la tabla 11 se observan los valores que se tomaron para cada una de estas variables en el motor elegido.

Tabla 11. Dimensiones del motor SS B7 según referencia a la figura 26.

Parámetro	Valor	Unidades
DB	3,17	cm
DD	0,50	cm
DC	3,37	cm
HD	4,49	cm ³
2RC	2,04	cm
RD	4,62	cm ³
CD	-4,05	cm ³
2R2	2,04	cm
TH	423	°K
TC	298	°K
M	0,00133	g mol
R	8,314	J / g mol°K
AL	76,23	grados

Hallar valores de las variables para la ecuación de Schmidt:

Introduciendo la información de las dos tablas anteriores en las ecuaciones 16 a la 25 se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Valores de los volúmenes y temperatura del regenerador para el SS B7.

Parámetro	Valor	Unidades
VL	16,10	cm ³
VK	15,69	cm ³
VP	17,79	cm ³
TR	356,85	°K

Tabla 13. Trabajo por ciclo y variables para su cálculo con la ecuación de Schmidt.

Parametro	Valor	Unidades
W ciclo	0,42	Joule
X	1,07	
Y	2,52	
Z	1,30	
AU	0,70	
XX	0,31	
XY	1,10	
PX	0,19	

Crear hoja de cálculo con valores para un ciclo completo:

En la tabla 14 se muestra la variación que tuvieron los volúmenes y las presiones en función del ángulo (N) para un ciclo completo (0° a 360°). En la tabla los ángulos están dados en grados y en radianes; y los volúmenes calculados en función del ángulo son volumen frío (C), volumen caliente (H) y volumen total (V).

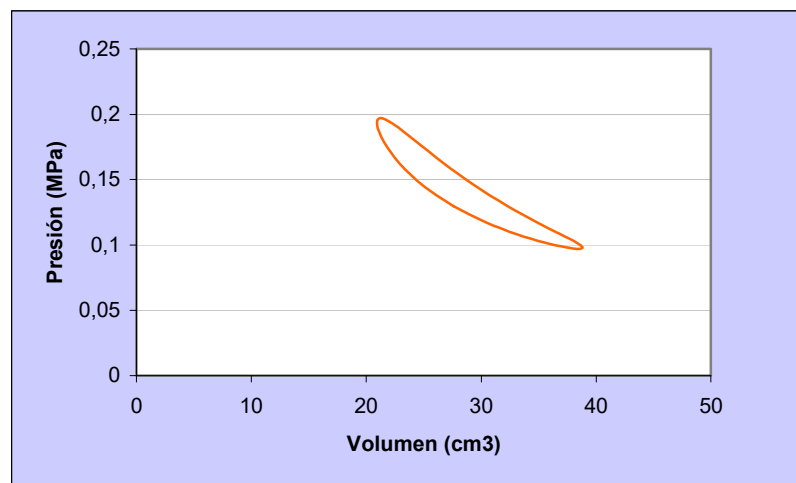
Graficar curva de presión vs. volumen para un ciclo completo:

La gráfica de la curva de la variación de la presión en función del volumen para un ciclo completo (o revolución), se obtiene con los datos de la tabla anterior y se muestra en la figura 31.

Tabla 14. Hoja de cálculo con las variaciones de volumen y presión en función del ángulo (N).

F (rad)	F (grados)	H(N) cm3	C(N) cm3	V(N) cm3	P(N) Mpa
0	0	4,50	18,43	27,55	0,20
0,31	18	4,89	15,48	24,99	0,23
0,63	36	6,04	12,25	22,91	0,26
0,94	54	7,82	9,07	21,51	0,30
1,26	72	10,06	6,25	20,93	0,33
1,57	90	12,55	4,05	21,23	0,35
1,88	108	15,04	2,71	22,36	0,35
2,20	126	17,28	2,34	24,24	0,33
2,51	144	19,06	2,98	26,66	0,30
2,83	162	20,20	4,57	29,40	0,26
3,14	180	20,60	6,96	32,19	0,23
3,46	198	20,20	9,92	34,74	0,21
3,77	216	19,06	13,14	36,82	0,19
4,08	234	17,28	16,32	38,22	0,17
4,40	252	15,04	19,14	38,80	0,16
4,71	270	12,55	21,34	38,51	0,16
5,03	288	10,06	22,69	37,37	0,16
5,34	306	7,82	23,06	35,50	0,16
5,65	324	6,04	22,41	33,07	0,17
5,97	342	4,89	20,82	30,33	0,18
6,28	360	4,50	18,43	27,55	0,20

Figura 31. Gráfica de la variación de la presión en función del volumen del SS B7.



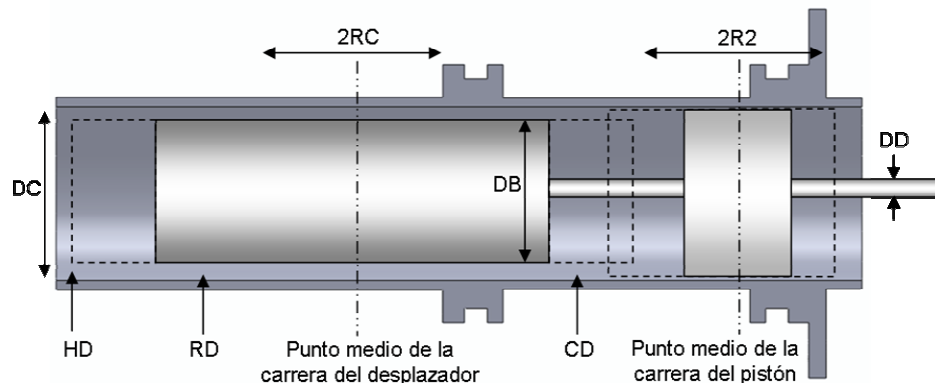
7.4 MODELACIÓN GEOMÉTRICA DEL MOTOR SS B7

Después de haber realizado los cálculos termodinámicos y tener claras las dimensiones del motor, lo siguiente era crear un modelo 3D de este que permitiera el análisis de cada una de sus piezas y como se relacionarían estas entre sí.

Con la ayuda del programa SOLIDWORKS⁶ se creó la representación 3D de las piezas, se unieron en un ensamble y luego se simuló su movimiento para analizar como sería el comportamiento mecánico del motor en la realidad.

La pieza de mayor importancia de este motor es el *cilindro*, pues es dentro de este que se dan los procesos termodinámicos, los cuales finalmente determinarían la potencia entregada por el motor. También esta pieza necesita una precisión mayor en su manufactura para garantizar la contención de los gases y el desplazamiento del pistón potencia dentro de este. Así que se empezó por diseñar esta pieza y a partir de allí se fueron modelando las demás. La figura 32 muestra la forma final del cilindro y la identificación de las partes que lo componen, calculadas en el capítulo anterior.

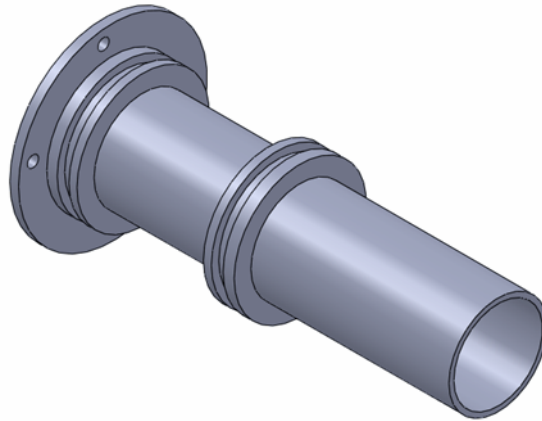
Figura 32. Modelación del cilindro del motor e identificación de sus componentes.



⁶ SOLIDWORKS es un programa de diseño asistido por computador para modelado mecánico que corre bajo el sistema operativo Microsoft Windows y es desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. (<http://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>).

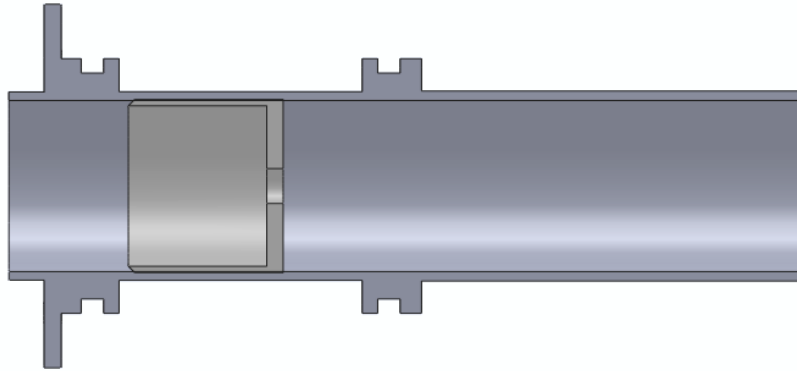
La figura anterior es un corte longitudinal del cilindro, en este las líneas punteadas señalan el recorrido que hace cada uno de los pistones y se observa claramente la región en la que se entrecruzan estos recorridos. En la figura 33 se muestra una vista isométrica del cilindro, sin embargo el plano con las medidas completas de este se encuentra en el anexo A.

Figura 33. Vista isométrica del cilindro.



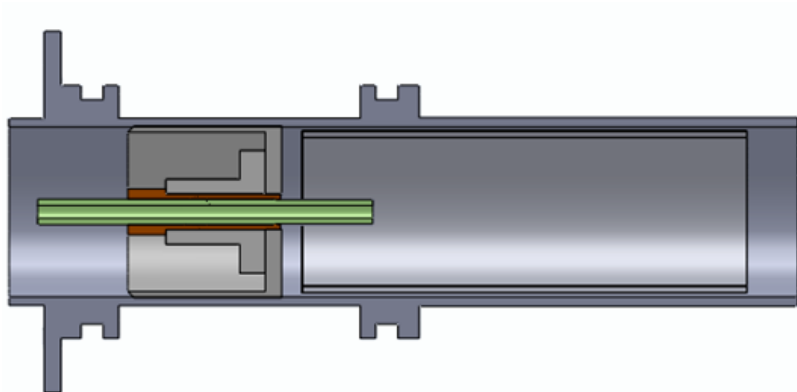
El siguiente elemento en orden de importancia es el pistón de potencia, ya que este es el encargado de entregar la potencia, además este debe tener un ajuste muy preciso con respecto al cilindro. Tanto el pistón de potencia como el cilindro fueron sometidos a un proceso de rectificado, el cual se explicará con detalle en el capítulo *Manufactura del Motor SS B7*. La figura 34 muestra en un corte longitudinal la forma como se acopla el pistón de potencia dentro del cilindro.

Figura 34. Acople del pistón de potencia dentro del cilindro.



En el tercer elemento, el desplazador, no era tan importante conservar tolerancias muy estrictas, ya que este no estaría en contacto con las paredes del cilindro. Sin embargo, el eje que sujeta al desplazador y atraviesa el pistón de potencia, si debía tener tolerancias muy exactas con el objeto de contener el gas dentro del cilindro y moverse con la menor fricción posible (figura 35).

Figura 35. Acople de los pistones, eje del desplazador y buje pasador dentro del cilindro.

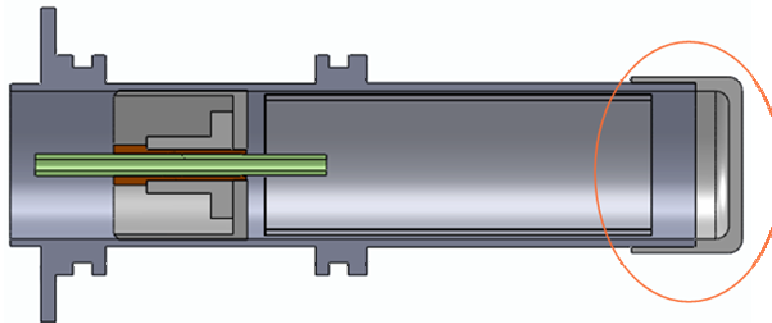


El elemento de color café que se observa en la figura anterior se nombró como *buje pasador* y su función es la de permitir el movimiento lineal del eje del

desplazador a través del pistón de potencia. Esta pieza debe tener un ajuste muy preciso con respecto al eje.

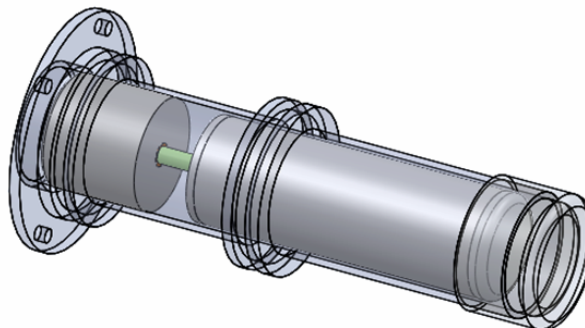
Otro elemento importante es el *tapón del cilindro*, el cual tiene como función contener el gas de trabajo en el otro extremo del cilindro. También es uno de los elementos que se encuentra en la zona de alta temperatura (figura 36).

Figura 36. Acople del tapón del cilindro y el cilindro.



Se observa en la figura anterior que ya se tiene un sello total sobre todo el volumen de trabajo del motor. La figura 37 muestra una vista trimétrica de las piezas que han sido ensambladas hasta el momento (algunas piezas tienen transparencia para facilitar la visualización).

Figura 37. Vista trimétrica ensamblaje cilindro y pistones.



Para lograr la refrigeración del motor se modeló una camisa exterior que se acopla sobre las dos *pestañas* acanaladas que tiene el cilindro. En cada canal está alojado un *O´ring*, el cual tiene como función retener el agua que circula dentro de la camisa, a la vez que permite una buena sujeción de esta al cilindro. La figura 38 muestra el acople de los *O´rings* y la camisa de refrigeración al cilindro.

Figura 38. Acople de los *O´rings* y la camisa de refrigeración al cilindro.

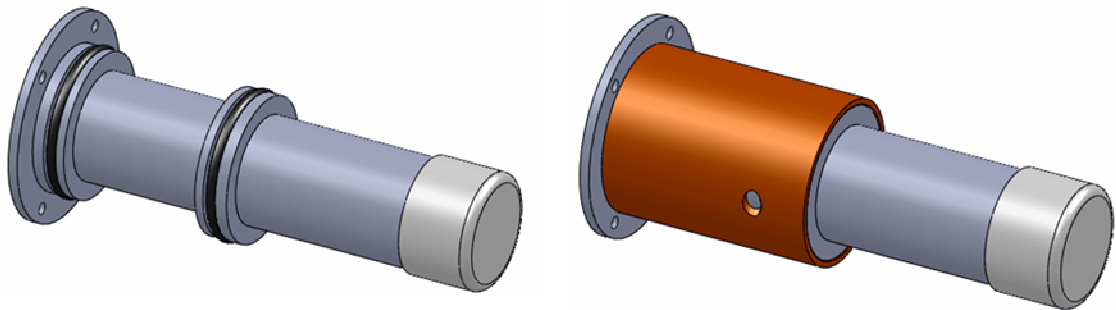
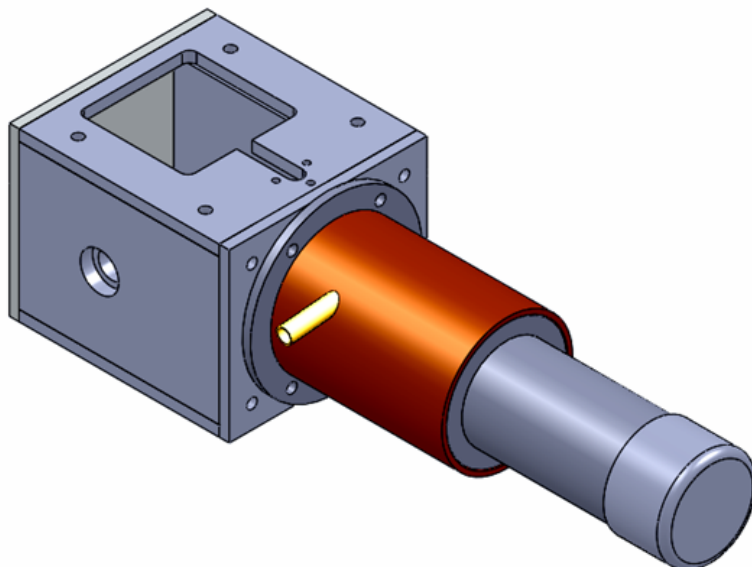


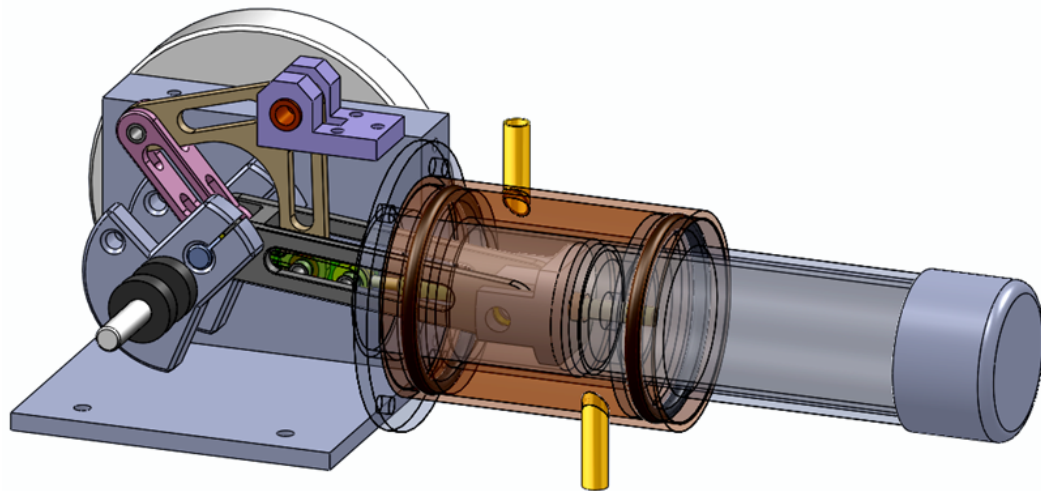
Figura 39. Acople caja soporte y cilindro del motor.



Con la parte termodinámica del motor terminada, lo siguiente era diseñar una *caja de soporte* que uniera al cilindro con la parte de transmisión de potencia y soportara los rodamientos de los ejes para las ruedas volantes. Esta caja de soporte está conformada por 6 placas y se muestra en la figura 39.

El mecanismo de transmisión de potencia, que convierte el movimiento lineal del pistón de potencia en movimiento rotacional en las ruedas volantes, se compone de un brazo rotador, una barra que conecta el pistón con el mecanismo, otra barra que transfiere el movimiento al eje del pistón de desplazamiento y unas bielas balanceadas que convierten el movimiento excéntrico de las barras del mecanismo en movimiento concéntrico en los ejes de las ruedas volantes. Este mecanismo, a excepción de unos cambios que se hicieron en las barras, es idéntico al que tiene el motor que sirvió de guía para el diseño de este⁷. La figura 40 muestra el modelo 3D de este mecanismo y su acople con el motor. Algunas piezas han sido removidas o puestas en transparencia para facilitar su visualización.

Figura 40. Modelo 3D del motor con el mecanismo de transmisión de potencia.



⁷ Este motor se encuentra en el libro *Stirling and Hot Air Engines: Designing and Building Experimental Model Stirling Engines* (DARLINGTON - STRONG).

Además de las partes o piezas descritas anteriormente, el motor se compone de otros elementos como bujes, rodamientos, tornillos y elementos de conexión. Los planos de taller con las dimensiones, tolerancias y detalles de construcción de todas las piezas, así como los ensambles del motor, se encuentran en el anexo A.

En la tabla 15 se listan los nombres de las piezas del motor, el número del plano correspondiente, la función que cumple en el motor y número de piezas fabricadas.

Tabla 15. Piezas del motor con su función, plano correspondiente y número de piezas.

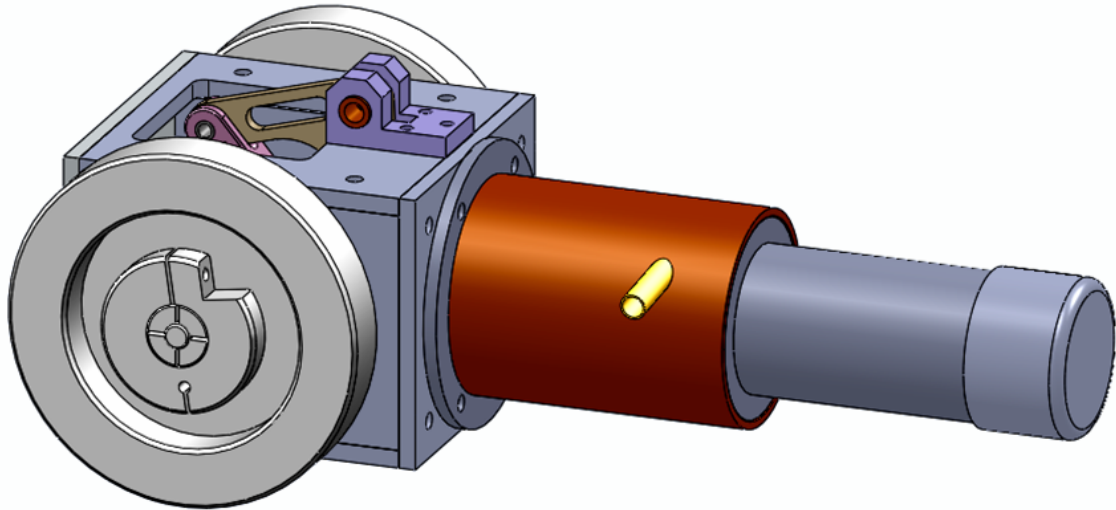
Plano No.	Nombre de la pieza	Función	No. Piezas
1	Cilindro fundición	Contener pistones y fluido de trabajo	1
2	Pistón de potencia	Contener fluido de trabajo y entregar presión	1
3	Pistón de desplazamiento	Desplazar el fluido de trabajo entre zonas	1
4	Tapón cilindro	Contener el fluido de trabajo en el cilindro	1
5	Camisa refrigeración	Contener el fluido de refrigeración	1
6	Eje del desplazador	Soportar el pistón de desplazamiento	1
7	Buje pasador	Soportar el eje del desplazador	1
8	Clevis pistón potencia	Soportar pistón potencia y buje pasador	1
9	O´ring	Contener fluido de refrigeración	2
10	Placa soporte frontal	Unir el cilindro a la caja de soporte del motor	1
11	Placa soporte lateral	Alojar rodamientos ejes y soportar motor	2
12	Placa soporte superior	Soportar motor y bloque pivote	1
13	Placa soporte inferior	Soportar motor	1
14	Placa soporte posterior	Soportar motor	1
15	Bloque pivote	Soportar el Brazo rotador del mecanismo	1
16	Brazo rotador mecanismo	Accionar el eje del pistón de desplazamiento	1
17	Barra mecanismo	Transmitir movimiento excéntrico al brazo r.m.	1
18	Conector eje-brazo	Transmitir movimiento del brazo al eje del pistón	1
19	Buje conector	Unir el conector del brazo con el eje del pistón	1
20	Barra pistón potencia	Transmitir el movimiento pistón - mecanismo	1
21	Biela balanceada	Convertir movimiento excéntrico en concéntrico	2
22	Volante	Almacenar energía rotacional	2
23	Clamp	Fijar las volantes a los ejes concéntricos	2
24	Collet	Fijar las volantes a los ejes concéntricos	2
25	Bujes	Reducir la fricción en elementos de rotación	9

Tabla 15. (Continuación)

Plano No.	Nombre de la pieza	Función	No. Partes
26	Ejes	Transmitir movimiento rotacional	7
27	Rodamientos	Reducir la fricción en elementos de rotación	4
28	Tornillos 5mm	Fijar placas y cilindro a la caja soporte	20
29	Tornillos 3mm	Fijar el bloque pivote a la caja soporte	3
30	Tubos camisa refrigeración	Unir la camisa de refrigeración a los ductos	2

La figura 41 muestra el modelo 3D del ensamble final del motor con todos sus componentes.

Figura 41. Modelo 3D del ensamble final del motor.



8. CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR STIRLING TIPO BETA

Después de tener lista la modelación 3D del motor, haberlo analizado mediante simulaciones de movimiento en SOLIDWORKS (con el fin de encontrar interferencias en el funcionamiento) y haber dibujado los planos de taller; se procedió con la construcción de este.

La manufactura del motor se llevó a cabo (en su mayoría) en el laboratorio de *Modelos de* la universidad EAFIT, y en el laboratorio de *Máquinas Herramientas* se realizó el proceso de *rectificado* del cilindro y del pistón de potencia.

El proceso de maquinado se vio afectado por variables como el material, tamaño, forma y tolerancias de cada pieza. Mientras algunas piezas se podían realizar rápidamente en una sola máquina (como los bujes), otras necesitaron del uso de las tres máquinas herramientas para su fabricación (como las placas laterales de la caja soporte) ó de un proceso más especializado (como el rectificado para el cilindro y el pistón de potencia).

8.1 MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR

Naturalmente, el material elegido para la elaboración de cada pieza, depende de la función que esta vaya a desempeñar dentro del motor y de su interacción con los demás componentes.

Las características por las cuales se escogieron los materiales para construir las piezas se describen a continuación. Adicionalmente en la tabla 16 se indica el material usado para cada componente del motor.

Hierro Gris:

El hierro gris es fácil de maquinar, tiene alta capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción. El hierro gris se utiliza bastante en aplicaciones como bases o pedestales para máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada, y bloques de cilindros para motores de vehículos, discos de frenos, herramientas agrícolas entre otras [Galeano].

Bronce Fosforado:

Este bronce, aunque sin ninguna norma internacional, tiene excelentes características físicas, gran maquinabilidad y resistencia a la tensión y al esfuerzo. Su principal característica es la resistencia al desgaste por fricción, haciendo también la función de cojinete, alargando la vida de los aceros que friccionan en él. Recomendaciones de uso: para trabajos ligeros, como en la elaboración de casquillos y chumaceras pequeñas [Tecniaceros].

Aluminio:

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero [Wikipedia].

Acero A36:

Es fundamentalmente una aleación de hierro (mínimo 98 %), con contenidos de carbono menores del 1 % y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, para mejorar su resistencia, y fósforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie. Es un material usado para la

construcción de estructuras, de gran resistencia, producido a partir de materiales muy abundantes en la naturaleza. Entre sus ventajas está la gran resistencia a tensión y compresión y el costo razonable [UNAL].

8.2 PROCESOS DE MANUFACTURA

Las máquinas herramientas usadas para la construcción de las piezas fueron fundamentalmente el torno (figura 42), la fresadora (figura 43) y la cortadora de plasma (figura 44).

En cuanto a procesos de manufactura especializados, las piezas *cilindro* y *pistón de potencia* se sometieron a un proceso de rectificado, el cual fue llevado a cabo en el laboratorio de máquinas herramientas de la universidad.

La razón por la cual era necesario el rectificado del cilindro y el pistón de potencia, era para garantizar una cilindridad y ajuste especiales entre estas piezas.

Figura 42. Fotografía torno convencional.



Fuente: http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/metalwork/lathe/intro/index_e.html

Figura 43. Fotografía fresadora convencional.



Fuente: http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/metalwork/milling/intro/index_e.html

Figura 44. Fotografía de una cortadora de plasma.



Fuente: http://www.mitsacnc.com/images/img_cnc.jpg

En la tabla 16 se indican los procesos de mecanizado necesarios para la elaboración de cada pieza.

Tabla 16. Material y máquinas utilizadas en la fabricación de las piezas del motor.

Plano No.	Nombre de la pieza	Material	Máquinas Utilizadas
1	Cilindro fundición	Hierro Gris	Torno y Rectificadora
2	Pistón de potencia	Hierro Gris	Torno y Rectificadora
3	Pistón de desplazamiento	Aluminio	Torno
4	Tapón cilindro	Hierro Gris	Torno
5	Camisa refrigeración	Tubería Cobre	Torno y Taladro
6	Eje del desplazador	Acero Plata	Torno
7	Buje pasador	Bronce Fosforado	Torno
8	Clevis pistón potencia	Aluminio	Torno y Fresadora
9	O´ring	Silicona	COMERCIAL
10	Placa soporte frontal	Acero A36	C.Plasma, fresadora y torno
11	Placa soporte lateral	Acero A36	C.Plasma y fresadora
12	Placa soporte superior	Acero A36	C.Plasma y fresadora
13	Placa soporte inferior	Acero A36	C.Plasma y fresadora
14	Placa soporte posterior	Acero A36	C.Plasma y fresadora
15	Bloque pivote	Acero A36	Fresadora
16	Brazo rotador mecanismo	Aluminio	C.Plasma y fresadora
17	Barra mecanismo	Aluminio	C.Plasma y fresadora
18	Conector eje-brazo	Aluminio	C.Plasma y fresadora
19	Buje conector	Bronce Fosforado	Torno
20	Barra pistón potencia	Aluminio	Fresadora
21	Biela balanceada	Aluminio	Torno y Fresadora
22	Volante	Aluminio	Torno
23	Clamp	Aluminio	Torno y Fresadora
24	Collet	Aluminio	Torno y Fresadora
25	Bujes	Bronce Fosforado	Torno
26	Ejes	Acero Plata	Torno
27	Rodamientos	NA	COMERCIAL
28	Tornillos 5mm	Acero	COMERCIAL
29	Tornillos 3mm	Acero	COMERCIAL
30	Tubos camisa refrigeración	Tubería Cobre	Torno

Las figuras 45 a la 48 muestran fotografías de algunas piezas del motor siendo fabricadas por los diferentes procesos mencionados anteriormente.

Figura 45. Cilindro fundición: material, proceso de rectificado y pieza terminada.

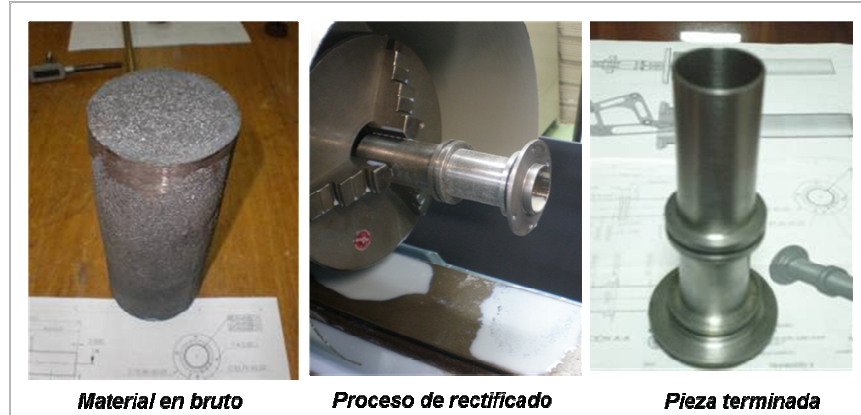


Figura 46. Proceso de manufactura en el torno.



Figura 47. Proceso de manufactura en la fresadora.

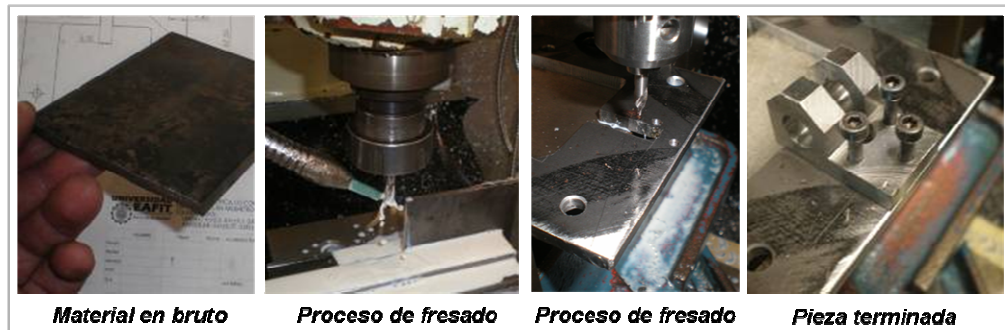
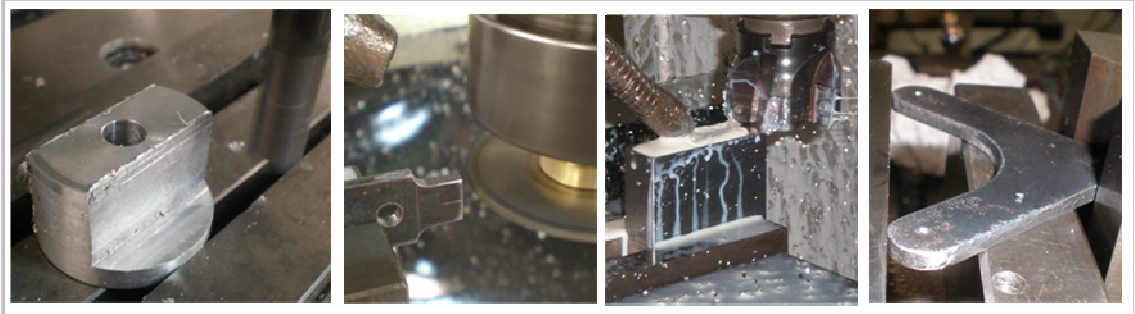


Figura 48. Piezas en procesos de fresado.

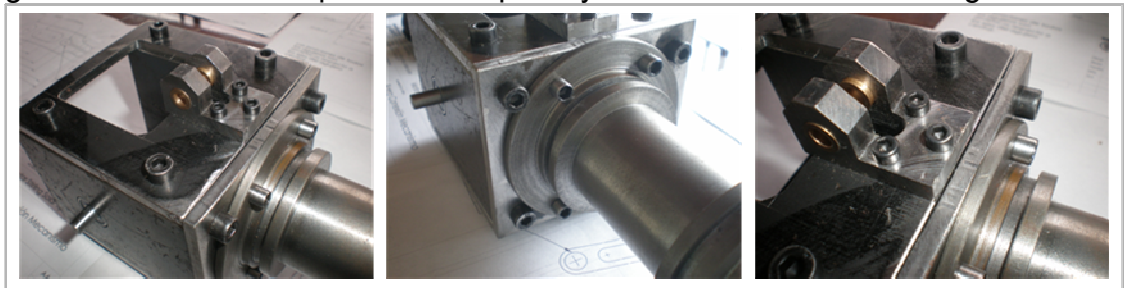


8.3 ENSAMBLE DEL MOTOR

Para unir las diferentes partes del motor se usaron tornillos tipo *allen* (hexagonales) y pegamentos especiales de Loctite (640 y 277)⁸.

La unión de las placas que conforman la caja soporte y el bloque pivote se hizo con tornillos de 5mm y de 3mm respectivamente (figura 49).

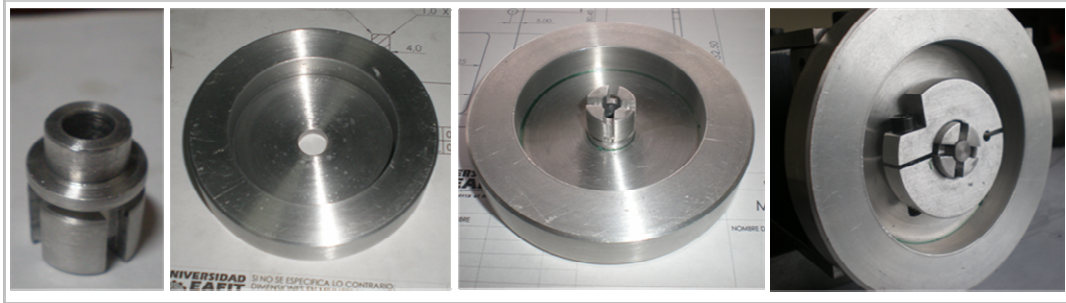
Figura 49. Unión de las placas de soporte y cilindro con tornillos hexagonales.



La unión de la volante a los elementos que permiten su sujeción al eje concéntrico se hizo con el producto Loctite 640 (figura 50).

⁸ Loctite 640 es un retenedor de piezas cilíndricas y Loctite 277 es un producto para unir piezas roscadas.

Figura 50. Piezas unidas con Loctite 640.



El cilindro y el tapón del cilindro se unieron con Loctite 277 para garantizar la contención del gas de trabajo en el interior del cilindro (figura 51).

Figura 51. Piezas unidas con Loctite 277.



En el anexo A, además de los planos de taller de las piezas, se encuentran los sub ensambles de cada sistema para comprender su funcionamiento. En la figura 52 se observa como se acopla el pistón de desplazamiento a otros componentes, la figura 53 hace lo mismo con el mecanismo de transmisión de potencia, en la 54 están acoplados los dos elementos anteriores juntos con el pistón de potencia y en la figura 55 se observa la imagen del motor ensamblado en su totalidad.

Figura 52. Sub ensamble pistón de desplazamiento.

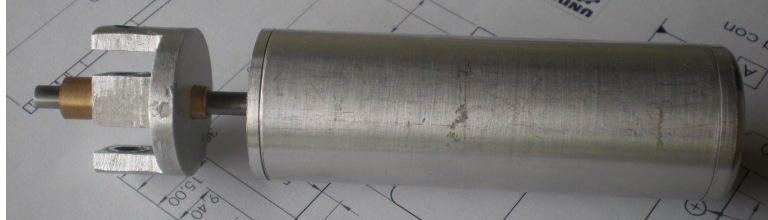


Figura 53. Sub ensamble mecanismo.

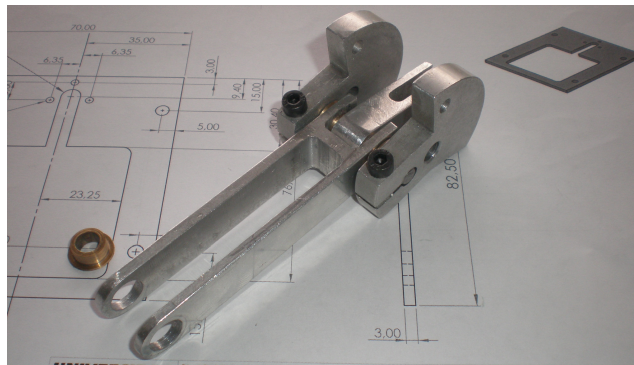


Figura 54. Sistema completo de transmisión de potencia.

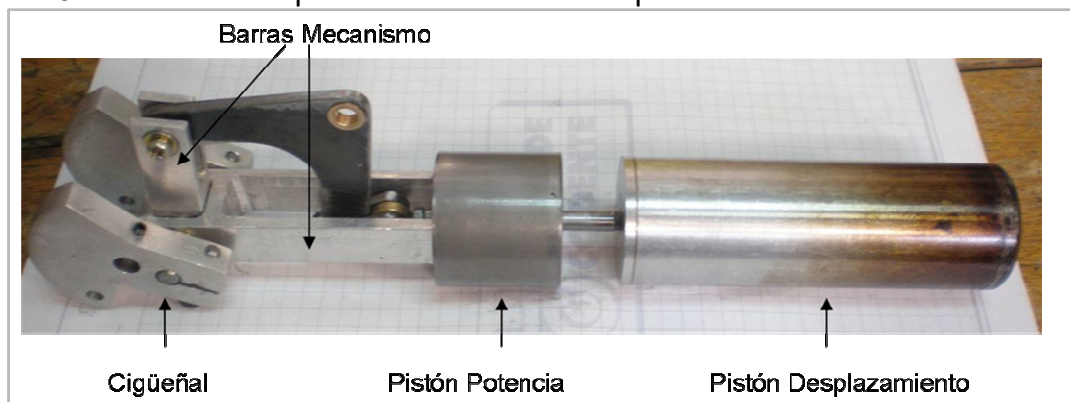
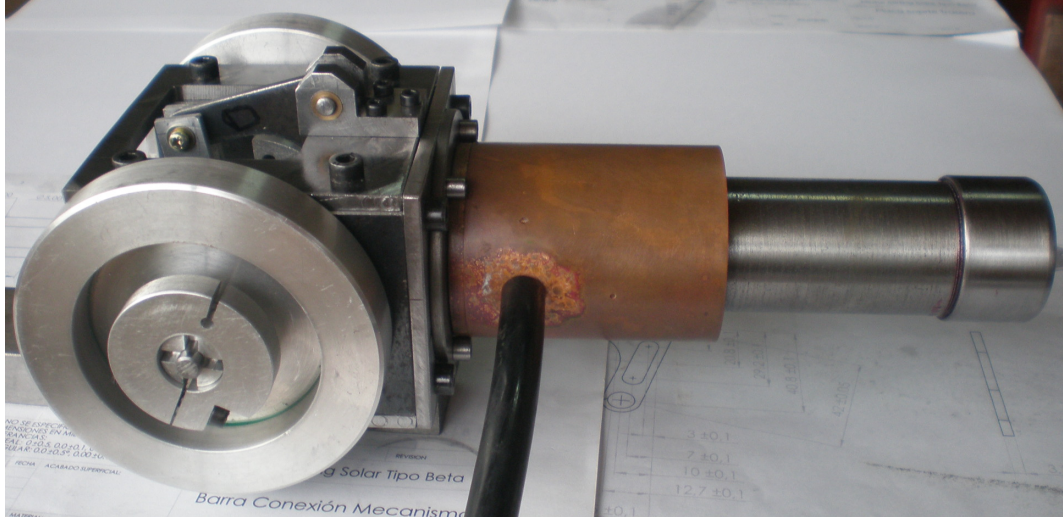


Figura 55. Motor terminado completamente y ensamblado.



9. PRUEBAS DEL SISTEMA

Las pruebas para determinar las características del sistema se hicieron primero en cada uno de los componentes (concentrador y motor) y luego se evaluó el sistema en conjunto.

9.1 PRUEBAS DEL CONCENTRADOR SOLAR

El concentrador se expuso a diferentes intensidades de radiación solar y se hicieron dos tipos de evaluaciones para determinar sus características. La primera fue evaluar la temperatura en diferentes puntos con el fin de determinar el radio de intensificación de esta. El segundo tipo de evaluación se hizo mediante una celda solar fotovoltaica conectada a un multímetro, con el fin de identificar las variaciones en la corriente en diferentes puntos del concentrador a medida que cambiaba la radiación solar incidente.

9.1.1 Pruebas de variación de temperatura del concentrador. Las pruebas de evaluación de temperatura del concentrador se hicieron tomando los valores en el área de captación y en el área de concentración (figura 56), para diferentes intensidades de radiación.

Los valores de la temperatura se obtuvieron mediante una termocupla conectada a un multímetro UNIT-T UT33C. La información recopilada en esta prueba se encuentra en la tabla 17, en la cual se muestran las temperaturas de captación y concentración correspondientes al grado de nubosidad. El valor de nubosidad se asignó según una escala de 1 a 5, en la que 1 corresponde a un cielo totalmente despejado y 5 a un cielo cubierto.

Figura 56. Concentrador solar y puntos de medición de temperatura.



Tabla 17. Evaluación de la temperatura en el disco y en la región de concentración.

Temperatura Captación (°C)	Temperatura Concentración (°C)	Nubosidad
25,0	25,0	4
26,0	31,1	4
27,0	37,3	4
28,0	43,4	3
29,0	49,6	3
30,0	55,7	3
31,0	61,8	3
32,0	68,0	3
33,0	109,3	2
34,0	150,5	2
35,0	191,8	1
36,0	233,0	1

9.1.2 Pruebas de variación de corriente del concentrador. Como se mencionó anteriormente, la variación de la corriente debido a la radiación incidente en el lugar de evaluación se determinó por medio del uso de una celda fotovoltaica conectada a un multímetro (figura 57) y se examinó en dos puntos.

Uno de estos puntos fue sobre un plano perpendicular a los rayos solares incidentes y el otro fue en la zona de concentración de la energía solar. Este método se utilizó tratando de simular la función de un medidor de radiación solar, ya que no fue posible la consecución de este tipo de instrumentos. La tabla 18 muestra la información obtenida en esta prueba, en la cual se utiliza el mismo factor de nubosidad de la tabla 17.

Figura 57. Celda fotovoltaica y multímetro para medir variaciones de radiación.



Tabla 18. Evaluación de la corriente producida por la radiación solar.

Corriente Captación (mA)	Corriente Concentración (mA)	Nubosidad
16,3	5,9	4
16,0	6,0	4
16,6	6,3	4
14,9	14,1	4
19,8	21,6	4
20,9	35,4	4
21,0	40,0	3
22,0	50,0	3
18,9	50,4	3
22,7	61,8	3
12,9	133,3	2
42,1	160,0	2
23,4	160,0	2
34,0	180,0	1

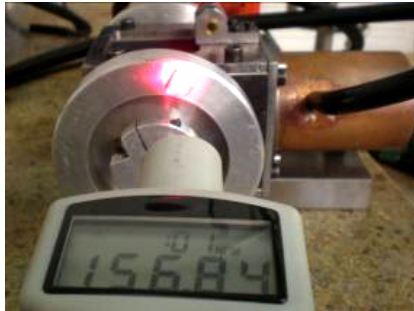
9.2 PRUEBAS DEL MOTOR STIRLING

Las variables para medir el comportamiento de motor fueron temperatura y revoluciones por minuto, mediante las cuales y con la ayuda de la ecuación 25 se pudo estimar la potencia.

La fuente de alta temperatura se suministró mediante un soplete, se tomaron diferentes medidas de temperatura en las zonas de calentamiento y refrigeración del motor y se evaluaron las RPM⁹ correspondientes a los incrementos de temperatura.

La medición de las RPM se hizo mediante un tacómetro digital, el cual proyecta un rayo de luz hacia un papel adhesivo reflectivo ubicado en una de las volantes del motor (figura 58).

Figura 58. Imagen de la medición de las RPM del motor.



La información obtenida de las temperaturas y RPM del motor, así como el cálculo de la potencia y el torque obtenidos se encuentra en la tabla 19.

9.3 PRUEBAS DEL SISTEMA COMPLETO ACOPLADO

Una vez ensamblados el concentrador solar y el motor Stirling (figura 59), se procedió a hacer las pruebas correspondientes.

⁹ RPM: Revoluciones por minuto de las ruedas volantes del motor.

Tabla 19. Datos obtenidos de la medición de temperaturas, RPM, torque y potencia del motor.

TH (°C)	TL (°C)	RPM	Torque (N*m)	Potencia (W)
25	25	0	0	0
50	26	0	0	0
75	27	0	0	0
100	28	0	0	0
125	29	0	0	0
150	30	0	0	0
175	31	800	0,081	6,78
200	32	842	0,082	7,24
225	33	844	0,083	7,35
250	34	850	0,084	7,50
275	35	853	0,085	7,61
300	36	859	0,086	7,74

Figura 59. Sistema completo acoplado.



En esta etapa se evaluaron las mismas variables que se analizaron con cada componente, pero esta vez en conjunto. De esta forma se obtuvieron las temperaturas incidente y proyectada del concentrador, las temperaturas en las zonas de calentamiento y refrigeración del motor, así como las RPM, torque y potencia producidas por el motor. La tabla 20 contiene los datos de las pruebas efectuadas al sistema completo.

Tabla 20. Datos obtenidos del sistema completo.

Temperatura Captación (°C)	Temperatura Concentración TH(°C)	TL (°C)	RPM	Torque (N*m)	Potencia (W)
25,2	25,0	25,4	0	0	0
26,4	31,1	25,6	0	0	0
27,3	37,2	26,8	0	0	0
28,3	43,4	26,2	0	0	0
29,5	49,5	27,5	0	0	0
30,6	55,7	28,8	0	0	0
31,4	61,8	28,5	0	0	0
32,9	68,0	28,3	0	0	0
33,7	109,2	29,1	0	0	0
34,2	150,5	30,4	0	0	0
35,5	175,0	31,3	800	0,081	6,78
35,4	191,7	31,7	842	0,082	7,24
36,8	233,0	32,7	844	0,083	7,35

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto a la medición de las temperaturas del concentrador, se observa en la tabla 17 que el valor en la zona de captación es muy similar al de la zona de proyección para valores de temperatura bajos, sin embargo a medida que se capta mayor radiación directa el incremento de la temperatura en la zona de concentración crece exponencialmente.

En la tabla 18 se observa una variable llamada *nubosidad*, este valor corresponde a la cantidad de luz que permiten pasar las nubes a través de ellas. La escala de este valor se tomó de 1 a 5, siendo 1 el valor para un cielo despejado totalmente y 5 para un cielo nublado completamente. Se puede ver en la tabla 18 que para valores en donde el factor de nubosidad es mayor que 3 la energía en el área de concentración es *menor* que la del área de captación, contrario a los valores de 1 a 3 en los cuales el valor en de la radiación proyectada era mucho mayor que la captada. Con esto se confirma el hecho de que los concentradores solares son aptos solo para *radiación solar directa* ya que cuando se obtuvieron los valores de 4 en adelante solo había *radiación solar difusa*.

En las pruebas realizadas al motor se observa que este empieza a funcionar solo a partir de los 175°C en la zona de alta temperatura (tabla 19). La potencia y torque obtenidas se hallaron por medio de las temperaturas, las RPM y aplicando la ecuación 25 (con un número de Beale de 0,15). La bibliografía investigada garantiza que esta ecuación ofrece una buena aproximación a datos de medición reales para hallar la potencia del motor.

El Motor se estabiliza en las 850 RPM alrededor de los 300°C (tabla 19). Después de estos valores, los incrementos de temperatura dieron como resultado un descenso gradual en las RPM hasta que el motor se detuvo por completo. La

potencia entregada por el motor es de 8W aproximadamente lo cual es cercano a lo esperado, sin embargo hay varios factores que se pueden mejorar y de esta forma optimizar el desempeño del motor.

En el sistema completo acoplado el comportamiento del motor es similar al observado en las pruebas individuales, llegando a alcanzar una potencia máxima de 7,5W a una temperatura máxima de 233°C (tabla 20). Este desempeño también puede mejorar en una época del año en la que se pueda captar una mayor radiación solar y bajo unas condiciones climáticas más favorables.

11. CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto se basó en la investigación, formulación y materialización de varios conceptos correspondientes principalmente a las áreas de la termodinámica y de la energía solar. Sin embargo, para concluirlo con satisfacción, fue necesario profundizar en temas de otras áreas tales como transferencia de calor, procesos de manufactura, dibujo, modelación geométrica, física de la luz, mecanismos, materiales, diseño de máquinas, geometría, entre otras; las cuales hacen parte de la formación en ingeniería mecánica de la universidad EAFIT.

La etapa de investigación fue un poco compleja al momento de conseguir información sobre los motores Stirling, ya que es solo hasta ahora que la industria se ha vuelto a interesar por este tipo de motores. Por parte de la energía solar, la información disponible relacionada con este proyecto fue suficiente y su consecución no representó ningún problema.

La investigación sobre las características que posee la energía solar en Colombia, permitió establecer que existe un gran potencial de explotación, ya que el país se encuentra en una posición geográfica privilegiada y cuenta con zonas de alta intensidad como La Guajira, en donde la radiación solar promedio es de 6,0 a 6,5 KWh/m² por día.

A nivel local, Medellín cuenta también con un alto potencial de energía solar, observándose un valor de radiación promedio de 4,0 a 4,5 KWh/m² por día. Esto significa que una casa en la ciudad podría autoabastecerse energéticamente por medio del Sol, si cuenta con la tecnología adecuada.

Para transformar la energía solar en energía térmica, se construyó un sistema de concentración conformado principalmente por un disco parabólico metálico con un área de $0,31 \text{ m}^2$. Este disco se obtuvo de un receptor de televisión satelital y se pulió su superficie para dar el mayor brillo posible, obteniendo como resultado un factor de reflexión para la luz blanca de 65% y una temperatura máxima de aproximadamente 240°C . El concentrador tiene la capacidad de incrementar en 103 veces la energía captada (radio de concentración x factor de reflexión = $158,16 \times 0,65 = 103$).

El material ideal para construir el concentrador solar habría sido un espejo parabólico debido a que posee un mayor factor de reflexión (90% aproximadamente), sin embargo esto no se pudo lograr, ya que los constructores de vidrios y espejos de la ciudad no cuentan con la tecnología y técnica necesarias para llevar a cabo esta tarea.

La transformación de energía térmica en potencia mecánica se obtuvo gracias al diseño y construcción de un motor Stirling tipo beta, el cual se ubicó de manera que su zona de alta temperatura coincidiera con la región de alta intensidad del concentrador solar. Para la zona de baja temperatura se utilizó como refrigerante agua a temperatura ambiente. El fluido de trabajo del motor fue aire a presión atmosférica ($0,085 \text{ MPa}$ en Medellín).

En las pruebas realizadas al motor se utilizaron 3 fuentes de energía independientemente para evaluar su funcionamiento. Estas fuentes fueron gas natural (estufa de gas), energía eléctrica (resistencias eléctricas) y energía solar (concentrador solar). El mayor rendimiento se obtuvo con gas natural debido a que la distribución del calor era más uniforme, mientras que el menor resultado se obtuvo con resistencias eléctricas ya que no se contaba un acople y aislamiento adecuados.

Las variables medidas en el motor durante las pruebas fueron temperaturas y revoluciones por minuto (RPM). Gracias a estas mediciones y al uso de la ecuación de *Beale* se pudo estimar la potencia entregada por el motor.

El motor Stirling construido entregó una potencia máxima (estimada) de 7,74 W a 859 RPM y con una temperatura máxima de 300°C en las pruebas con gas natural como fuente de energía. En las pruebas con el concentrador solar, la temperatura máxima fue de 233°C con lo que se obtuvo una potencia de 7,35 W a 844 RPM.

Los materiales usados en la manufactura del motor Stirling se obtuvieron a nivel local y este *se construyó en su totalidad* en el laboratorio de Proyectos Metal Mecánicos y el laboratorio de Máquinas Herramientas de la universidad EAFIT. Esto demuestra que se cuenta con las instalaciones y la tecnología adecuadas para desarrollar proyectos de ingeniería de este tipo.

La importancia de este proyecto, además de los resultados obtenidos, radica en que se concibió como un primer paso hacia el desarrollo de tecnologías, que contribuyan a satisfacer las necesidades energéticas del país y puedan competir con las tecnologías ofrecidas a nivel internacional.

12. RECOMENDACIONES

Se considera que el mayor aprendizaje se obtuvo en la parte de puesta en práctica del proyecto, ya que allí es donde se observó como se relaciona la teoría con la realidad y la complejidad de materializar ideas y conceptos. A continuación se mencionarán las dificultades halladas durante el proyecto y se plantea su posible solución.

En cuanto a la construcción del concentrador de rayos solares, la información obtenida sobre la radiación solar sería más precisa y confiable si se contara con un *piranómetro* ó un elemento comercial diseñado para el cálculo directo de la radiación.

Un factor importante en la eficiencia del sistema es el nivel de reflexión del concentrador. Si se contará con una superficie con un mayor nivel de reflexión como un espejo curvo, el cual no fue posible de conseguir para este proyecto, la reflexión de la luz en el concentrador se podría incrementar en un 30%.

Otro elemento que se podría mejorar sería en la parte de captación de radiación solar del motor, ya que el cilindro puede ser pintado con pintura *solar selectiva* la cual mejora la absorción de radiación solar y tiene un factor de reflexión menor que la pintura negra común.

Otra modificación que se podría hacer sería cubrir el cilindro del motor exteriormente con un tubo de vidrio transparente a fin de reducir las pérdidas de calor por convección por contacto con el aire. Estos tubos son conocidos como *Pirex* y según lo investigado, pueden incrementar la entrega de potencia del motor en un 10%.

La eficiencia de motor se podría mejorar también usando aluminio en todas las piezas del mecanismo de potencia. Esto no se realizó por el costo, ya que estas piezas, debido a su función en el motor, no se pueden fabricar en un aluminio crudo sino en uno de mayor dureza conocido como duraluminio, el cual es mucho más costoso.

Otro aspecto a mejorar en el motor, es garantizar un mejor sello en la contención del gas dentro del cilindro en la parte del tapón del cilindro y en el pistón de potencia, ya que se detectaron pequeñas fugas.

El producto Loctite 277 usado para dar sello a la unión entre el cilindro y el tapón, se derritió al ser sometido a altas temperaturas. Esto se corrigió limpiando la superficie y aplicando cinta de teflón en la unión, ya que esta puede soportar temperaturas más elevadas y también proporciona un buen sello. Por esta razón no se recomienda el producto Loctite 277 para temperaturas mayores de 200°C y se aconseja usar mejor Loctite 567 el cual es producido a base de teflón y resiste temperaturas de 450°C aproximadamente.

Otra parte de gran importancia es el ensamble del motor. No es suficiente con construir las piezas según los planos, estas hacen parte de un ensamble y se deben garantizar las relaciones de posición para obtener un buen funcionamiento del motor. Paralelismo, perpendicularidad, concentricidad, cilindridad, tolerancias, etc. son algunas de las relaciones entre piezas que, cuando no se conservaron, el resultado fue problemas serios en el funcionamiento del motor en los cuales se perdió mucho tiempo en busca de una solución.

Por último, es muy importante reconocer que aunque se cuente con herramientas computacionales para simular el comportamiento del motor, como SOLIDWORKS para la modelación geométrica y análisis del movimiento ó Excel para evaluar ecuaciones y pronosticar el comportamiento termodinámico; el paso siguiente

para materializar los diseños requiere bastante esfuerzo y dedicación, pues es un proceso de prueba y error en el que surgen pequeños detalles que no se observan en los diseños y que son los que finalmente definirán el desempeño del motor. Durante el desarrollo de este proyecto hubo que modificar varias piezas ya que por su geometría, tolerancia, material, etc. perjudicaban el funcionamiento apropiado del motor.

BIBLIOGRAFÍA

CAÑAMERO, A. El Rincón de la Ciencia. Espejos parabólicos [en línea]. Madrid (España). Junio 2005, no. 31. Disponible en Internet: <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/rc-83/rc-83.html>.

CENSOLAR, CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA SOLAR. La energía solar [en línea]. Sevilla (España). Disponible en Internet: <http://www.censolar.es/menu2.htm>.

DARLINGTON, Roy. STRONG, Keith. Stirling and Hot Air Engines: Designing and Building Experimental Model Stirling Engines. Crowood Press: 2005.

DELGADO A., Efredy. Aspectos teóricos en el diseño de colectores solares. En: Avances Investigación en Ingeniería. Enero-junio, 2007, no. 6, p. 67-73.

FINKELSTEIN, Theodor. ORGAN, Allan J. Air Engines. USA. American Society of Mechanical Engineers: 2001.

GALEANO PEÑA, Publio. Materiales Metálicos: Fundiciones de hierro - gris [en línea]. Pereira (Colombia), abr. 2010. Disponible en Internet: <http://www.utp.edu.co/~publio17/gris.htm>

HIRATA, Koichi. Elementary Knowledge of Metalworking. National Maritime Research Institute [en línea], Octubre 2002. Disponible en internet: http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/metalwork/index_e.html

INFINIA Corporation. Power Dish [en línea]. Kennewick, (WA). Disponible en Internet: <http://www.infiniacorp.com/powerdish.html>

ISAGEN S.A E.S.P. Fuentes No Convencionales de Generación de Electricidad. Colombia, ISAGEN: 2005.

MARTINI, William R. Stirling Engine Design Manual. Second Edition. Washington D.C., U.S. Department of Energy: 1983.

SERWAY, Raymond. Física. Tomo II. 4 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 1997. p. 1058-1060.

SESUSA, Stirling Engine Society USA [en línea]. USA. Disponible en Internet: <http://www.sesusa.org/types.htm>.

STIRLING ENERGY SYSTEMS. Technology. Sun Catcher [en línea]. Phoenix (Arizona). Disponible en Internet: <http://www.stirlingenergy.com/technology/suncatcher.asp>

TECNIACEROS. Materiales de Ingeniería para un mundo cambiante [en línea]. Guatemala, 2009. Disponible en Internet: <http://www.tecniaceros.com/productos6.htm>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL). El Acero Estructural [en línea]. Manizales (Colombia), 2010. Disponible en Internet: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/ACERO%20ESTRUCTURAL.htm>

UNZA. Talleres Unidos S.A. de C.V [en línea]. México. Maquinaria CNC. Disponible en Internet: <http://www.mitsacnc.com/cnc.php>

UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de Radiación Solar de Colombia [en línea]. Bogotá, 2005. Disponible en Internet: www.upme.gov.co/Atlas_Radiacion.htm.

URIELI, Israel. Stirling Cycle Machine Analisis [en línea]. Disponible en Internet: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/index.html>.

WIEDER, Sol. An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers. EEUU, John Wiley & Sons, Inc: 1982.

WIKIPEDIA La enciclopedia libre. Aluminio [en línea]. Mar. 2010. Disponible en internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>

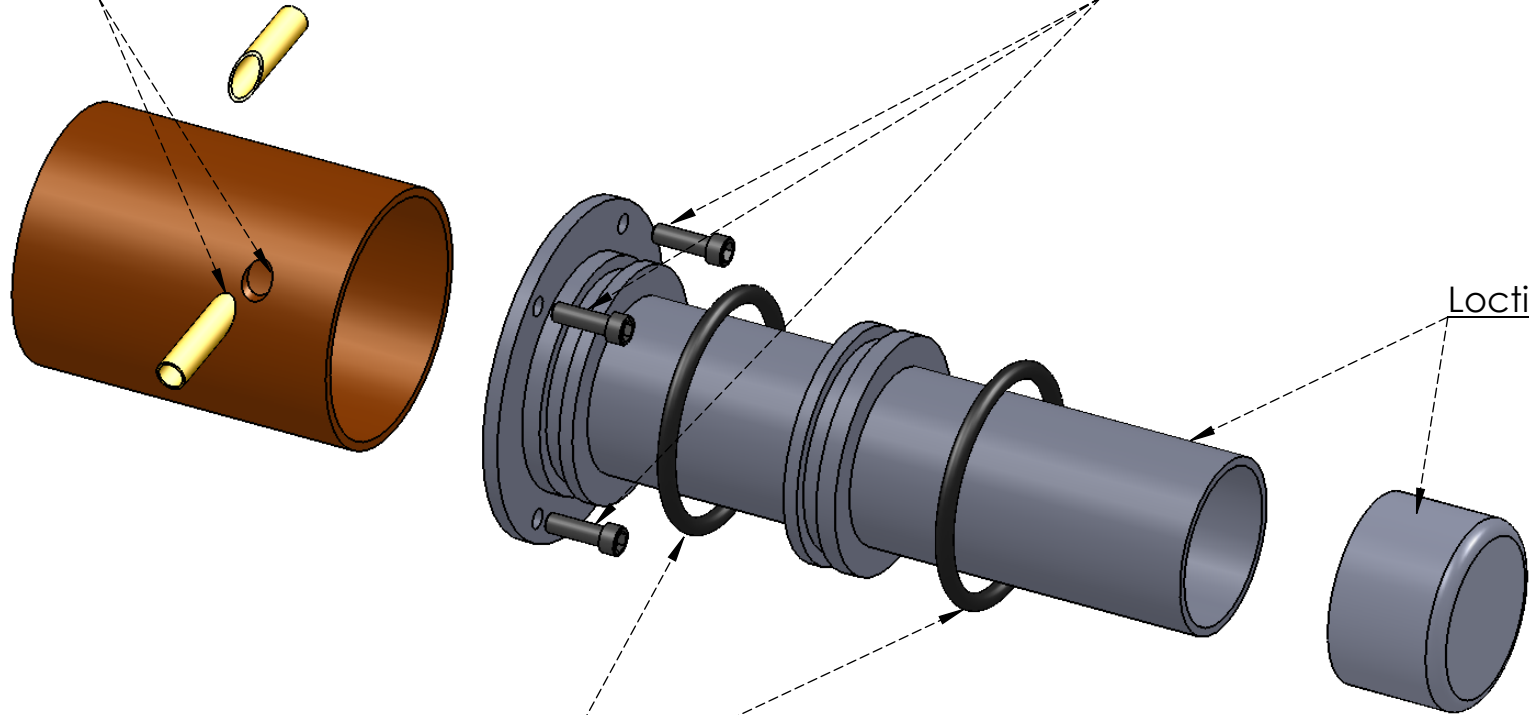
ANEXO A. PLANOS DE TALLER Y ENSAMBLES DEL MOTOR

Soldadura de plata

M5 x 0.8

Loctite 567

O Ring Silicona



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Subensamble Cilindro

DIBUJO NO.

SE 1

A4

PESO:

ESCALA: 1:1.5

HOJA 1 DE 1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				

1 2 3 4 5 6

A

A

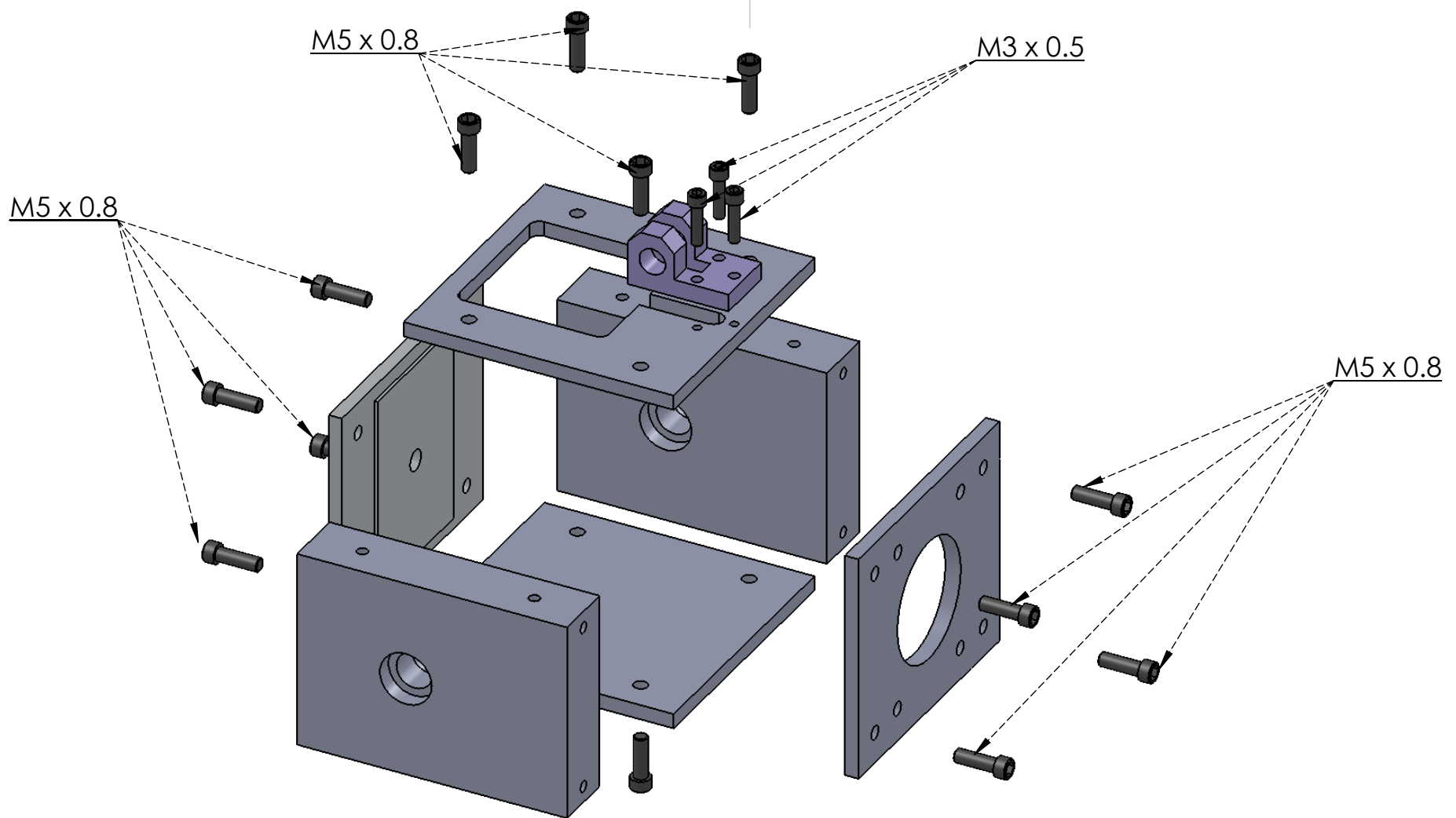
B

B

C

C

D



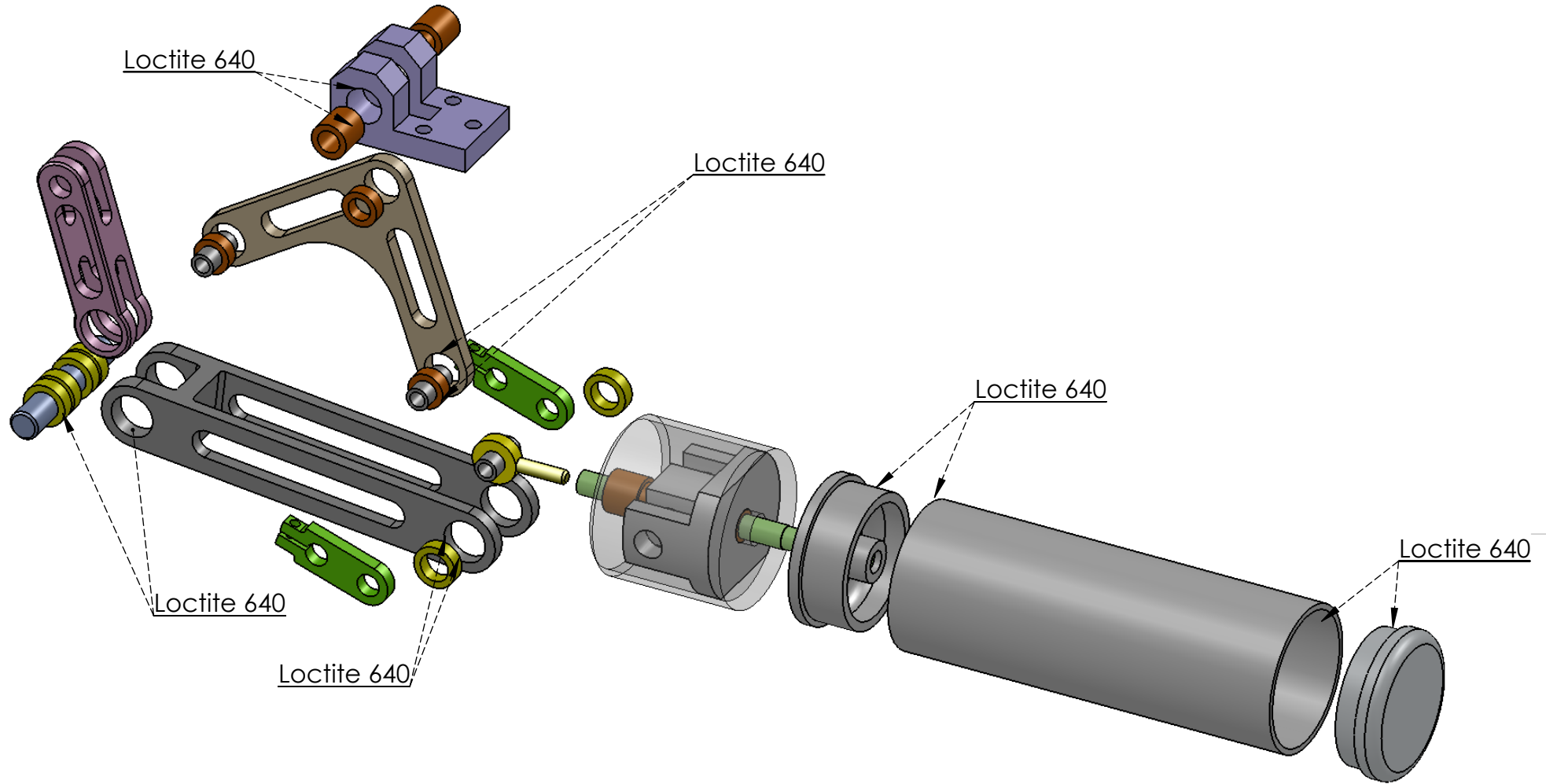
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				

NOMBRE DE LA PIEZA:	
<h1>Subensamble Caja Soporte</h1>	
DIBUJO NO.	<h1>SE 2</h1>



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				MATERIAL:
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:

Subensamblado Pistones y Mecanismo

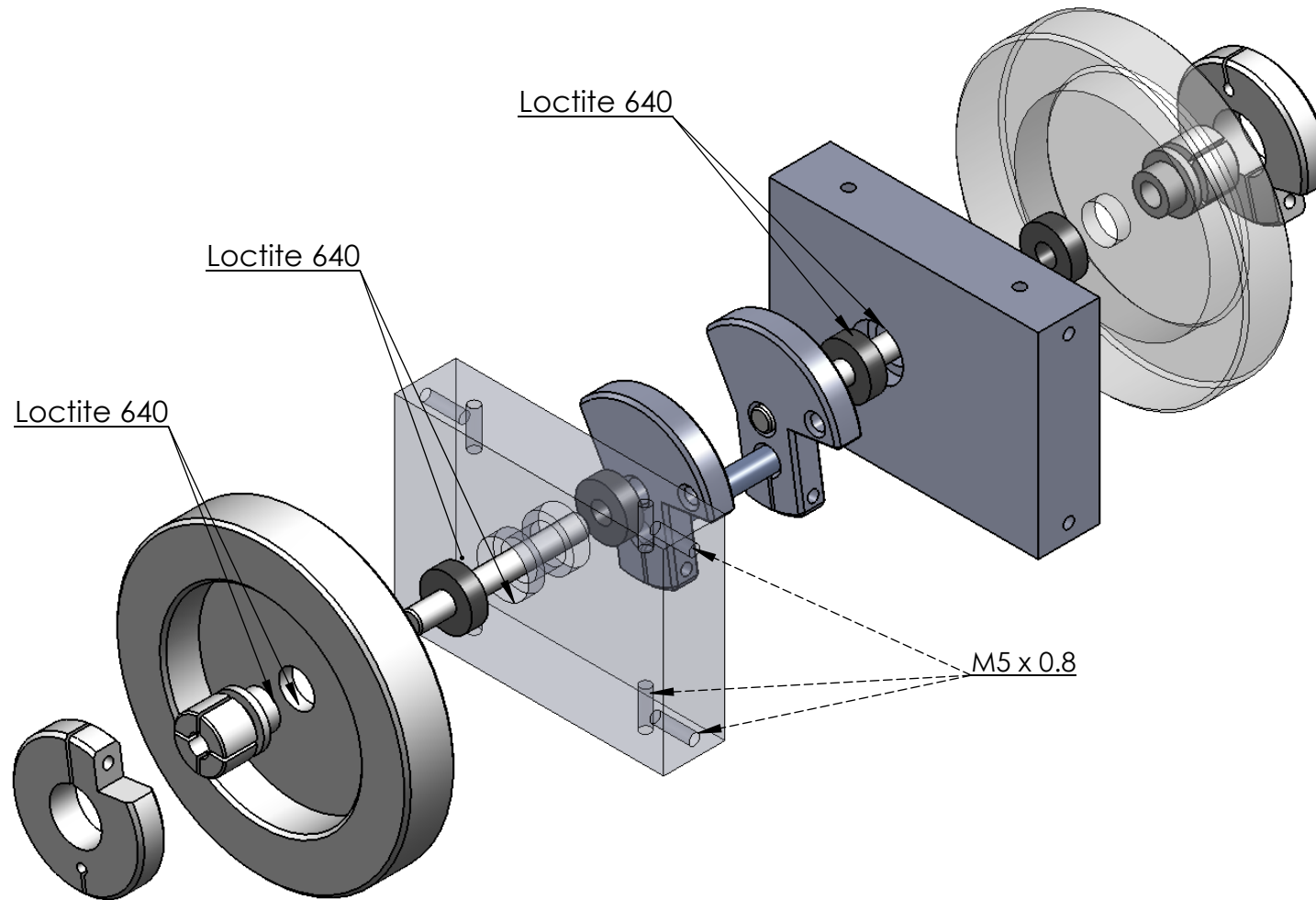
DIBUJO NO.

SE 3

A4

ESCALA: 1:1.5

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Subensamble Volantes, Bielas y Rodamientos

DIBUJO NO.

SE 4

A4

PESO:

ESCALA: 1:1.5

HOJA 1 DE 1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				

1 2 3 4 5 6

A

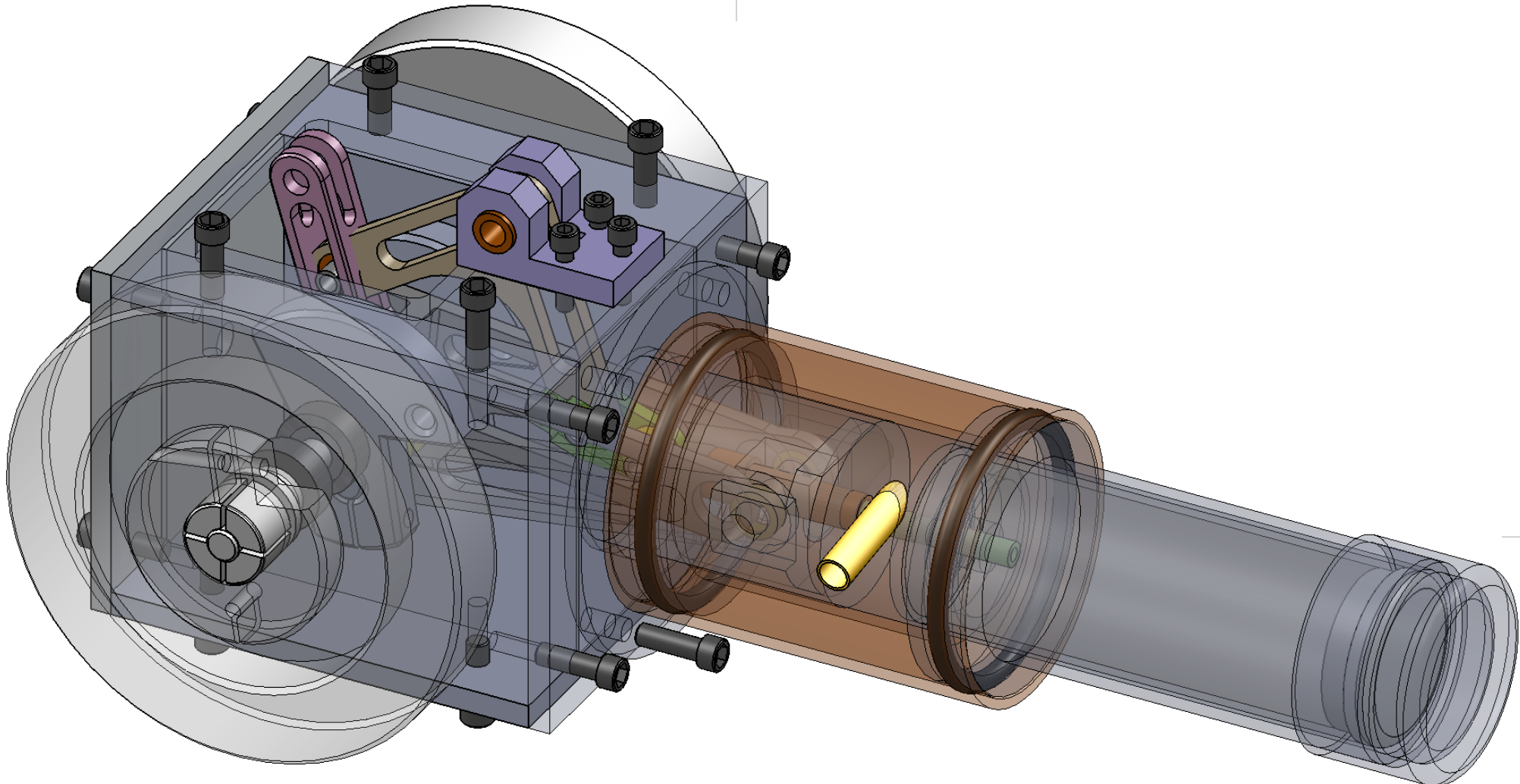
A

B

B

C

C



D



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:

Motor Ensamblado

DIBUJO NO.

SE 5

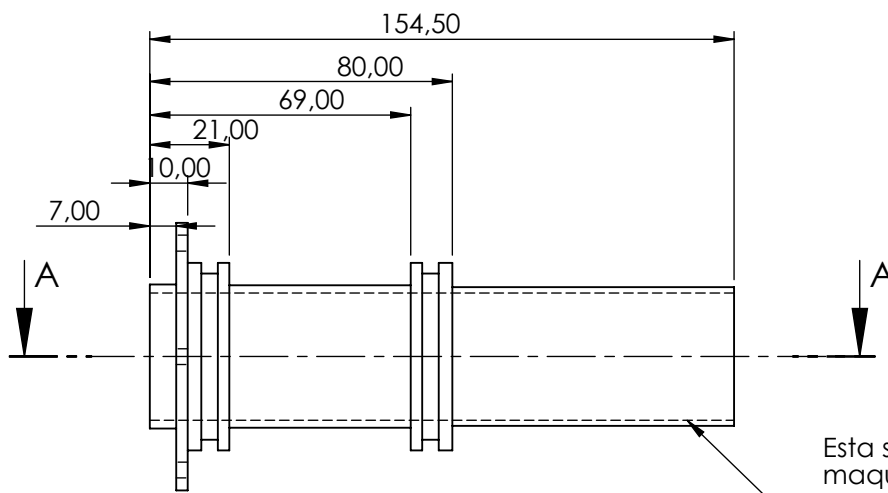
A4

ESCALA: 1:1

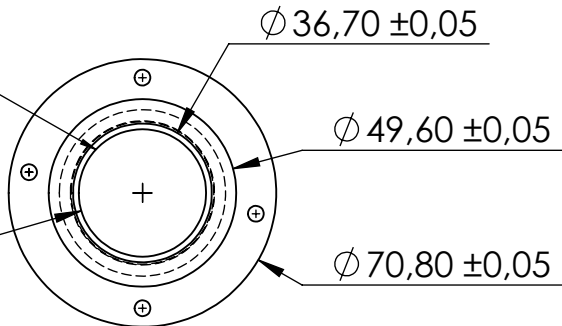
HOJA 1 DE 1

1

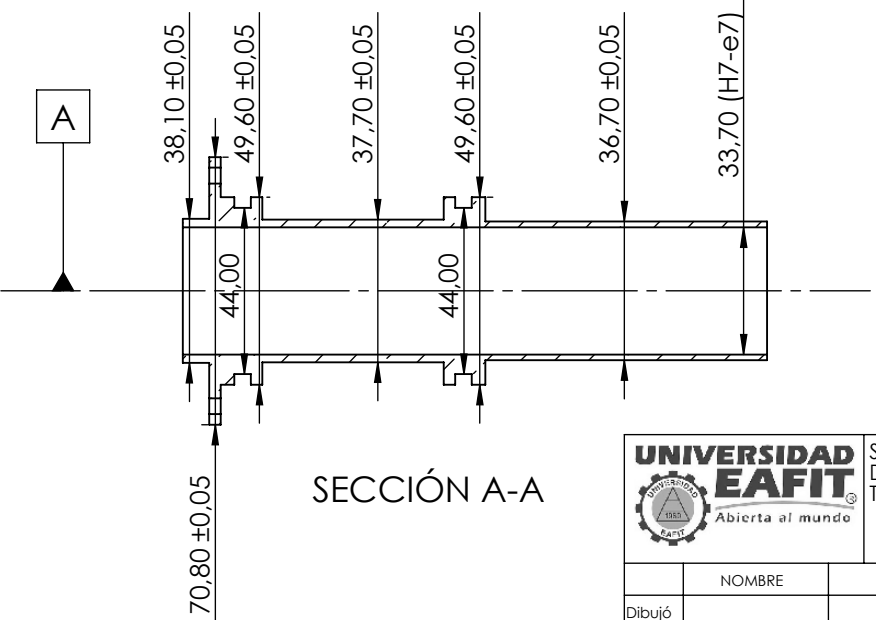
2



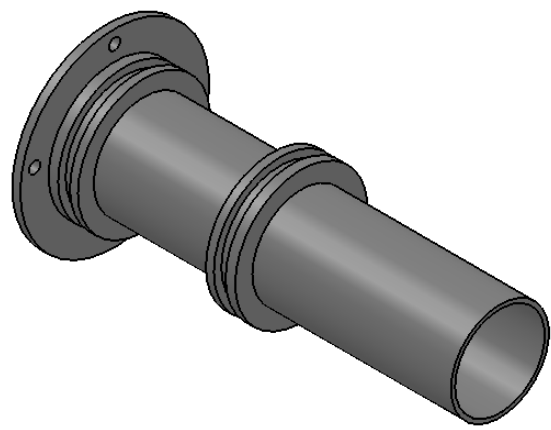
⊙	∅0.025 (M)	A
/	∅0.025 (M)	A
∇	∅0.025 (M)	A



Esta superficie:
maquinado y rectificado
para acoplar con el pistón
de potencia.



SECCIÓN A-A



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó			Rectificado
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			
			MATERIAL:
			Hierro Gris
			PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:	
Cilindro Fundición	
DIBUJO NO.	1
A4	
ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

3,0

1,23

30,0

Chaflán 45°

Ø 31,24 ±0,05

-0,050

Ø 33,70 -0,075 (H7-e7)

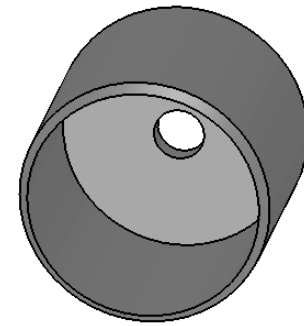
A

+0,018

Ø 6,80 0,000 (H7-g6)

○	Ø 0.025 (M)	A
⊘	Ø 0.025 (M)	A
∫	Ø 0.025 (M)	A

Esta superficie:
maquinado y rectificado
para acoplar con el
cilindro.



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:
Rectificado

MATERIAL:
Hierro Gris

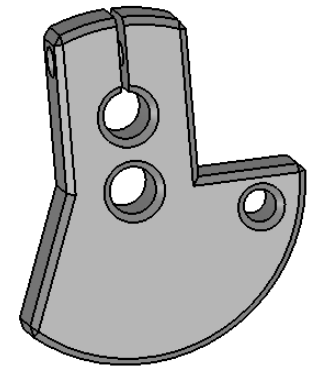
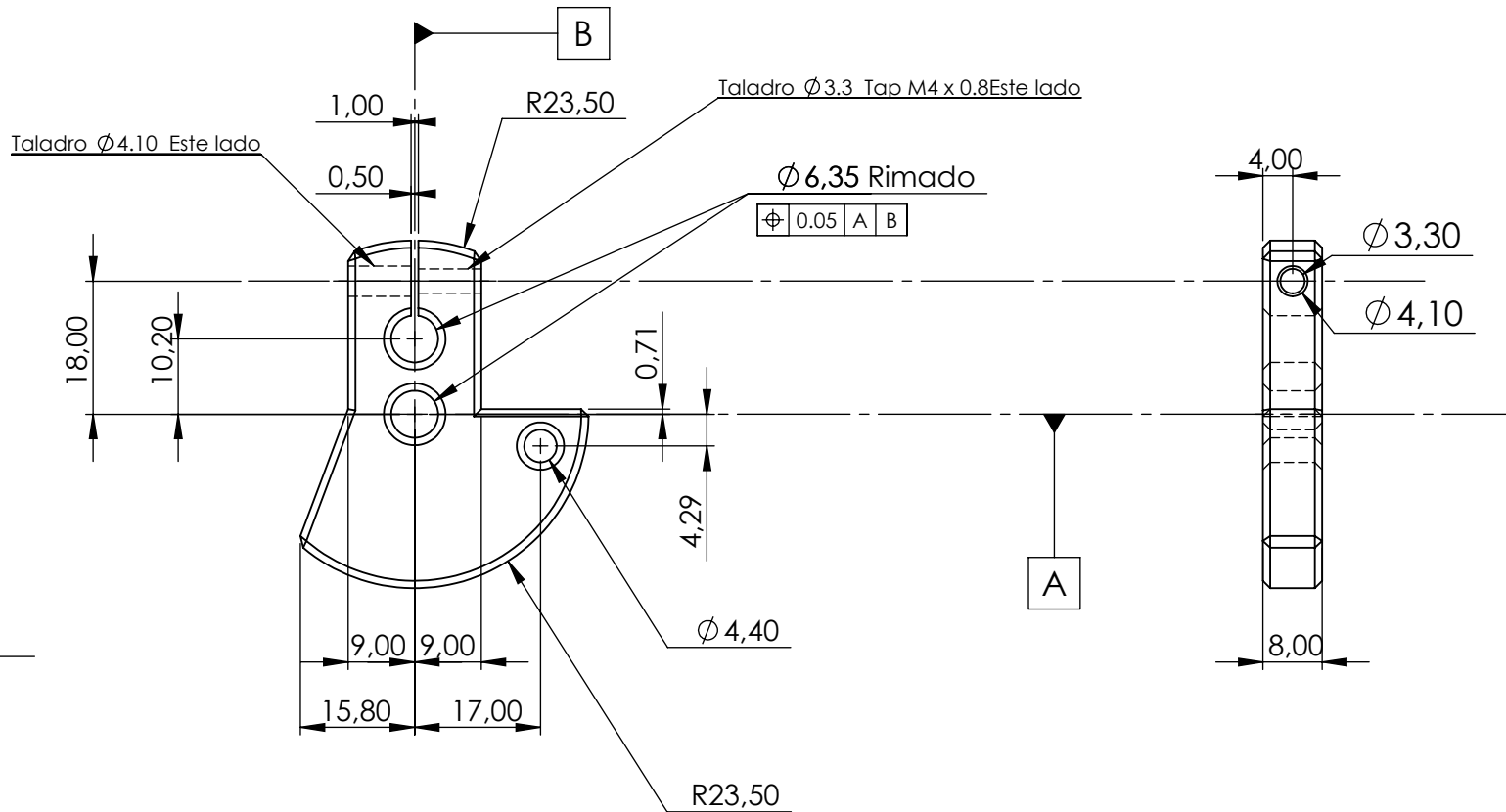
NOMBRE DE LA PIEZA:
Piston Potencia

DIBUJO NO. **2**

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

A4



Todos los chaflanes son de 1x1 a 45°



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

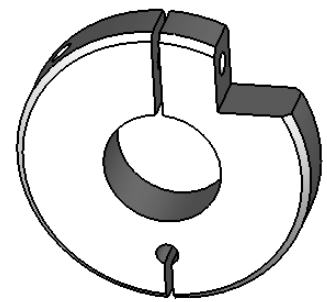
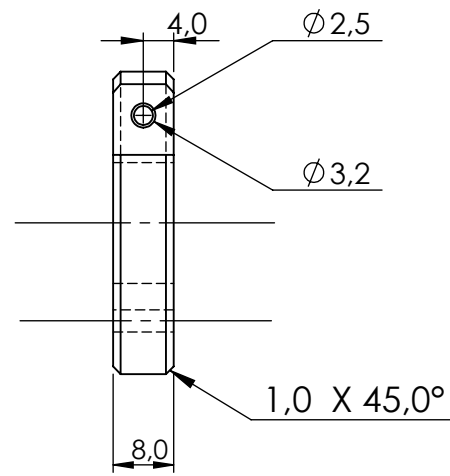
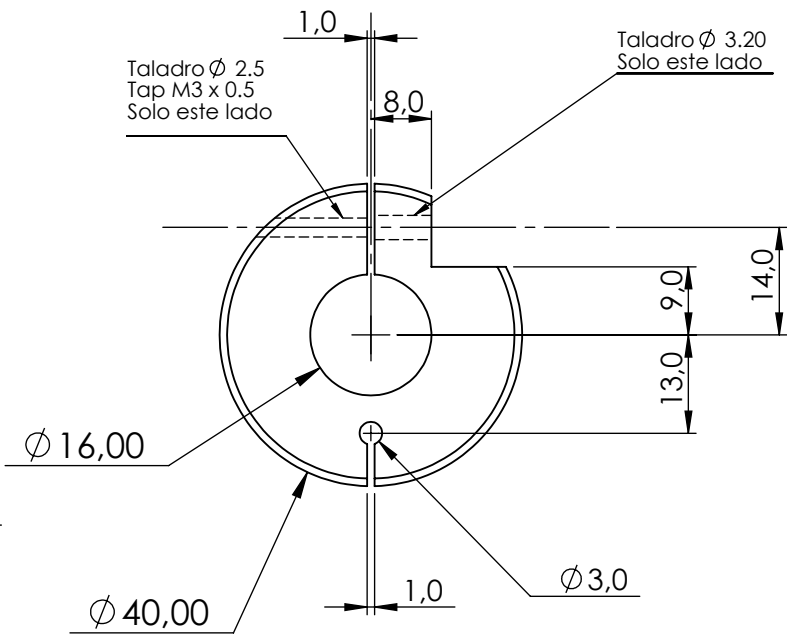
MATERIAL:
Aluminio

PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA: Biela Balanceada	
DIBUJO NO. 3	A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



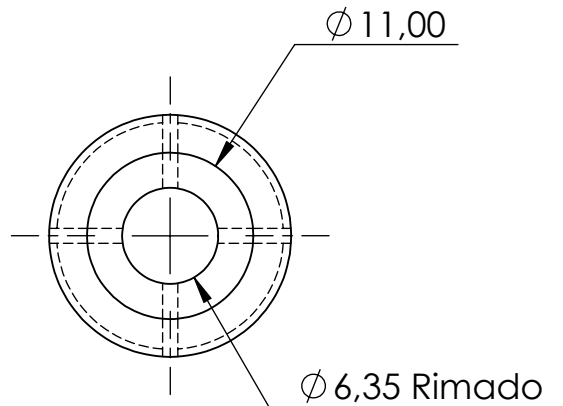
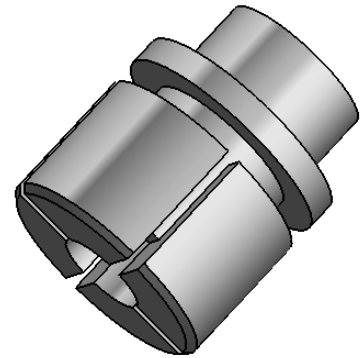
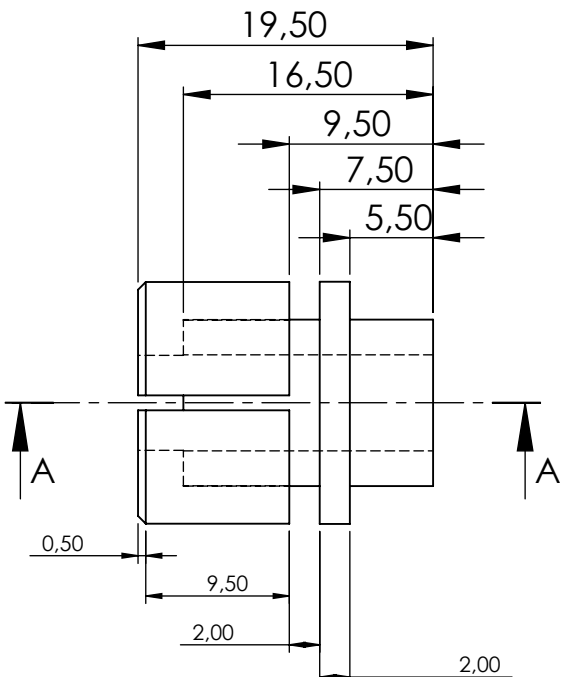
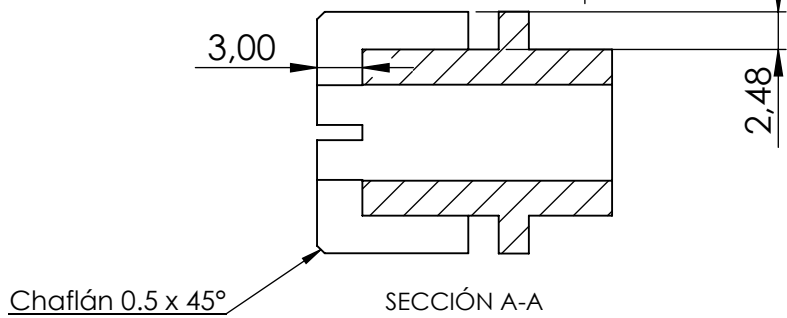
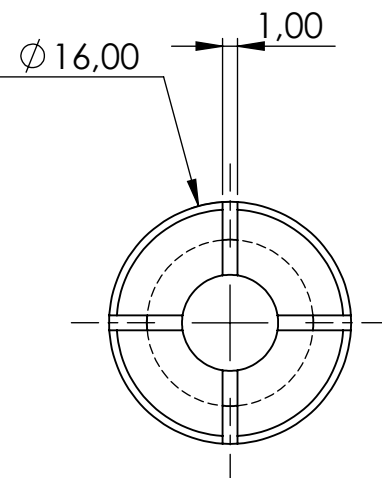
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
 ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				Aluminio

NOMBRE DE LA PIEZA:	
Collet Clamp	
DIBUJO NO.	4
	A4



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

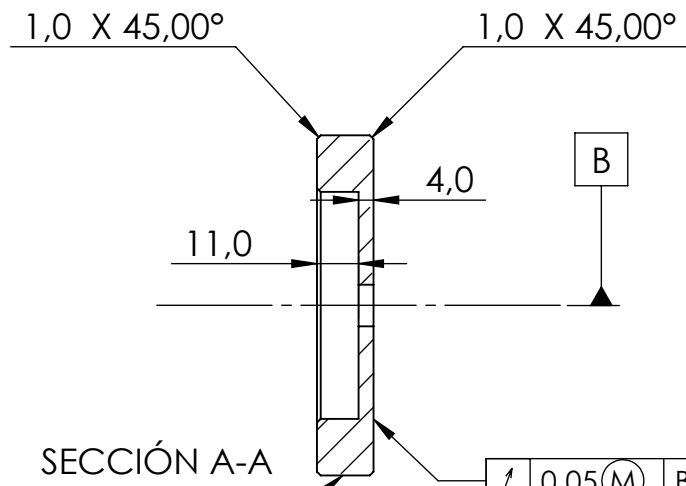
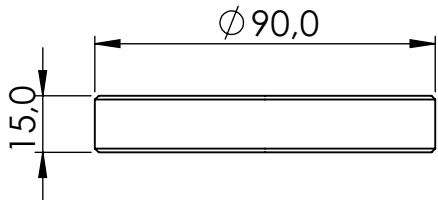
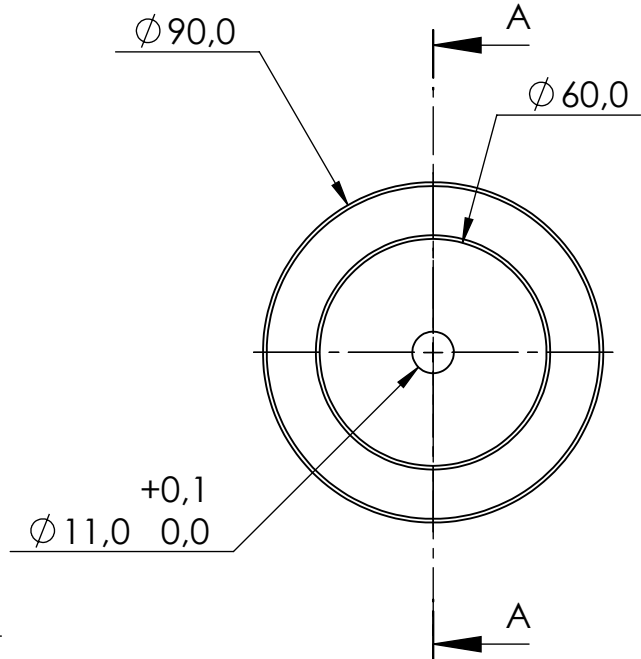
NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

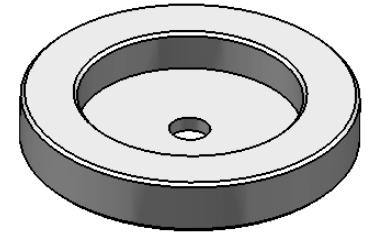
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				MATERIAL: Aluminio
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA: Collet Rueda Volante	
DIBUJO NO. 5	A4
ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1



ϕ	$\phi 0.05 (M)$	B
\odot	$\phi 0.05 (M)$	B

\nearrow	$0.05 (M)$	B
\perp	$0.05 (M)$	B



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: $0 \pm 0.5, 0.0 \pm 0.1, 0.00 \pm 0.05, 0.000 \pm 0.025$
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ, 0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

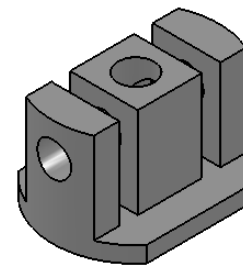
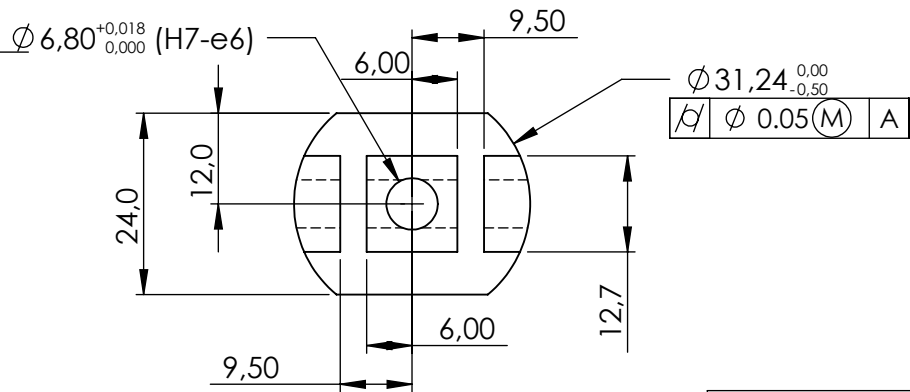
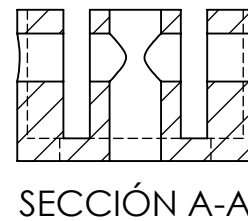
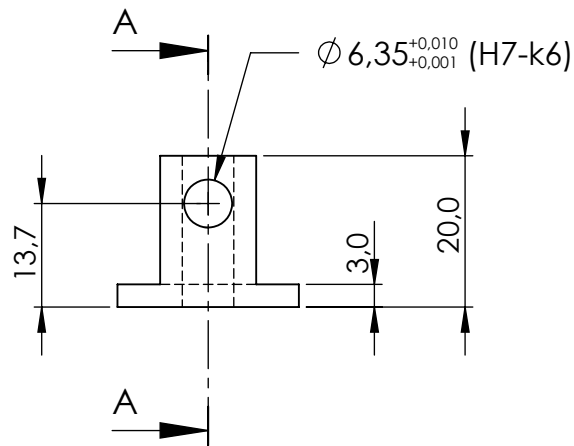
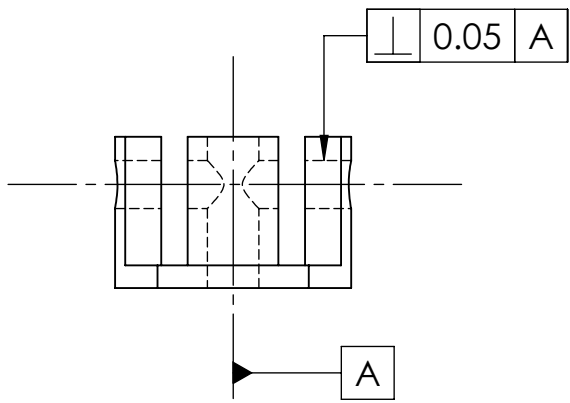
MATERIAL:
Aluminio

NOMBRE DE LA PIEZA:
Rueda Volante (Flywheel)

DIBUJO NO. **6**

ESCALA: 1:2

A4



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: $0 \pm 0,5$, $0,0 \pm 0,1$, $0,00 \pm 0,05$, $0,000 \pm 0,025$
ANGULAR: $0,0 \pm 0,5^\circ$, $0,00 \pm 0,1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Clevis Pistón Potencia

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				Aluminio
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				PESO:

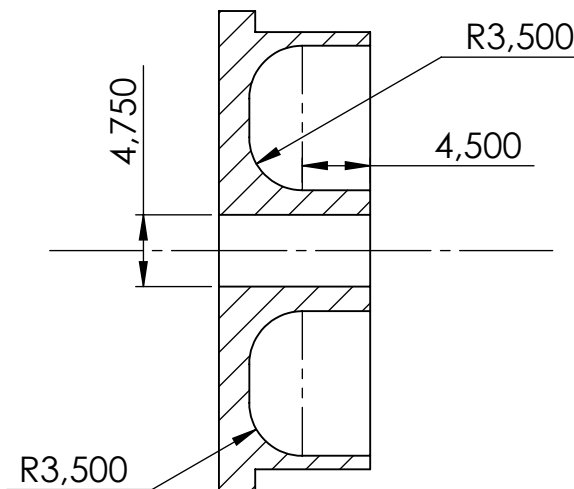
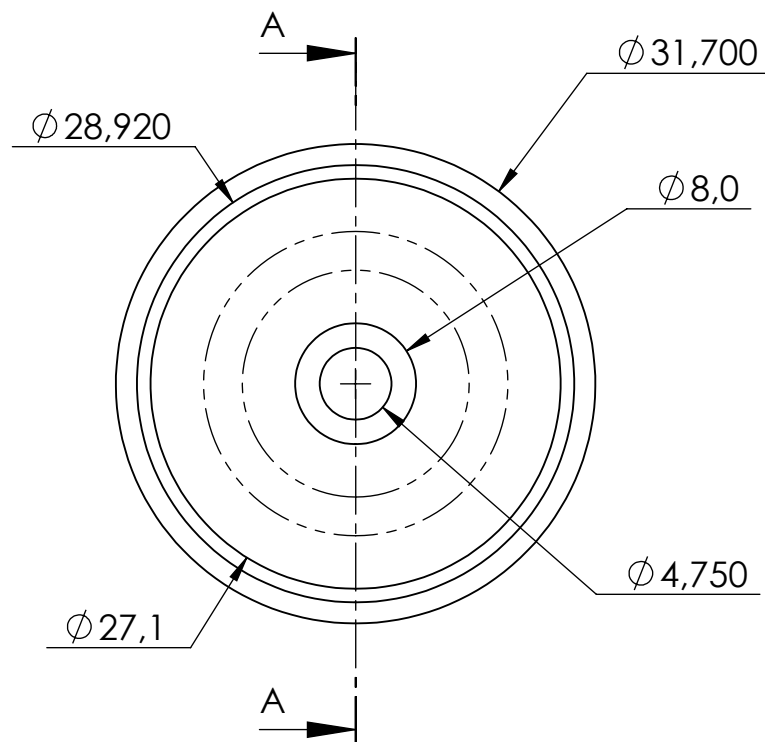
DIBUJO NO.

7

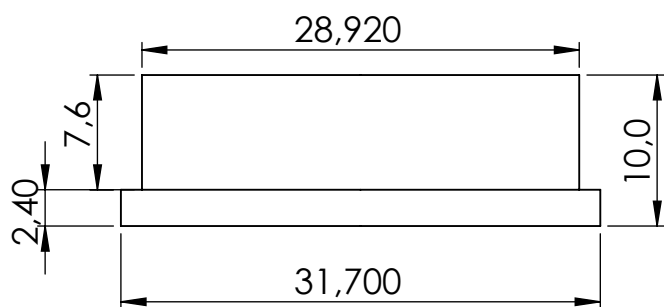
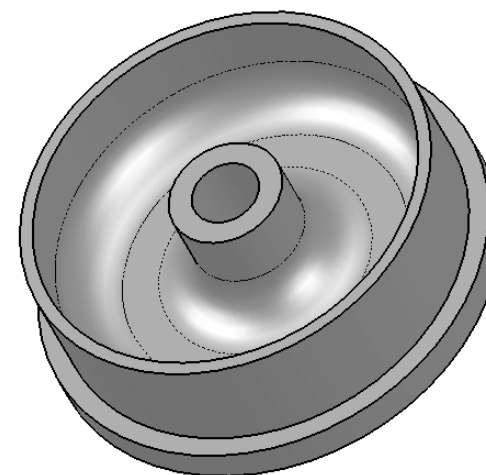
A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SECCIÓN A-A



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

"Plug" Piston Desplazamiento

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				Aluminio
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				PESO:

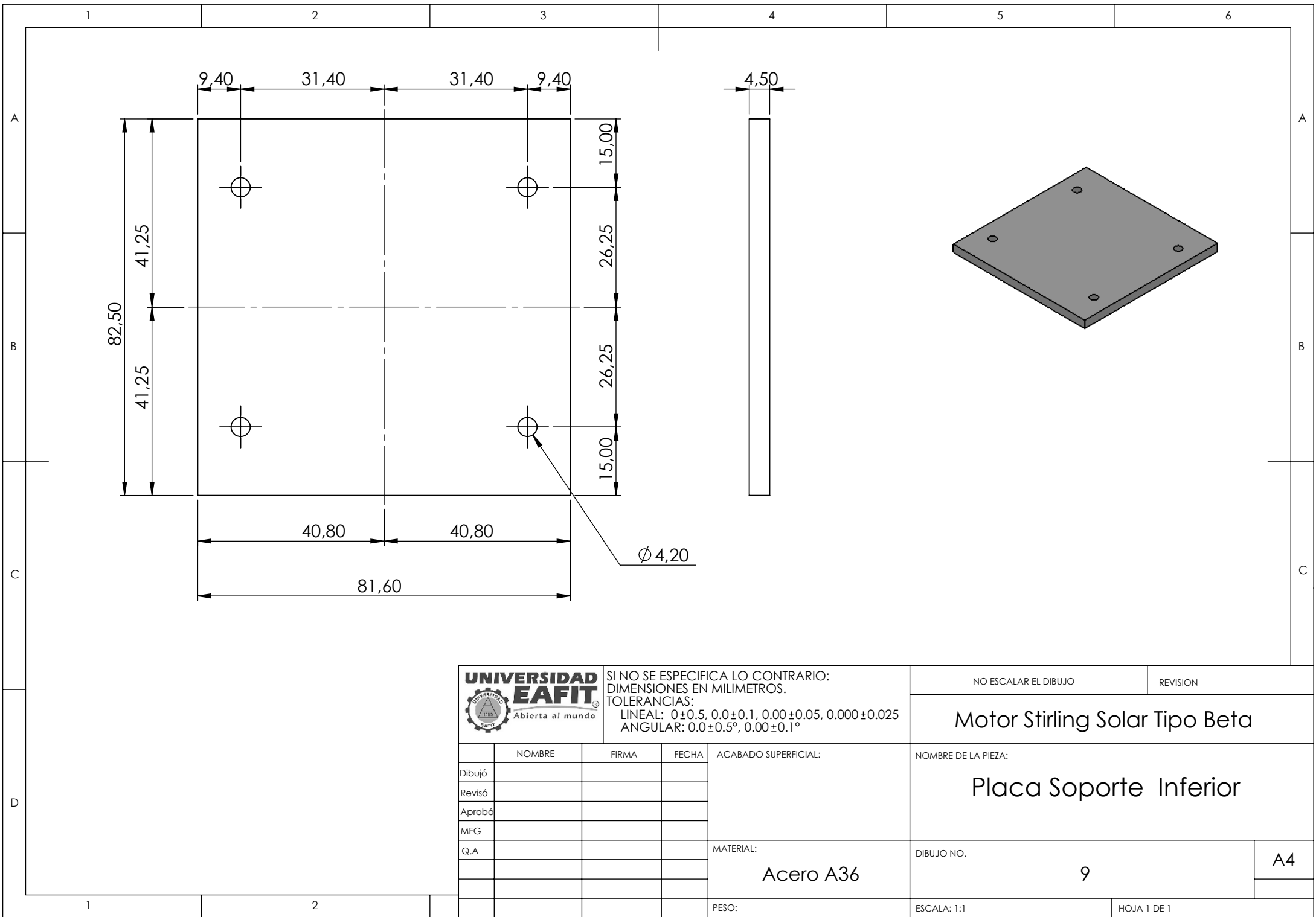
DIBUJO NO.

8

A4

ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
 ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				MATERIAL: Acero A36
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA: Placa Soporte Inferior	
DIBUJO NO. 9	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6

A

B

C

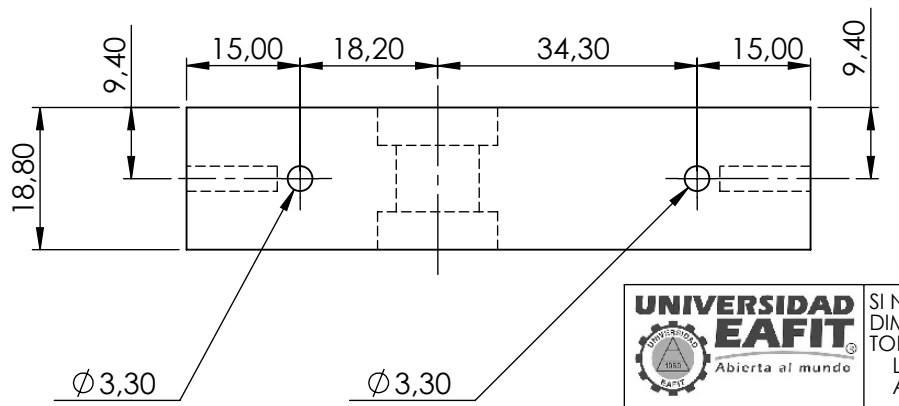
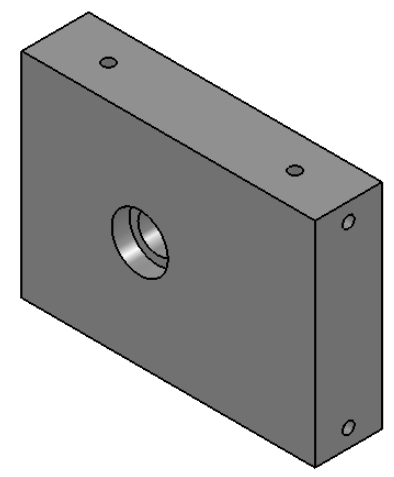
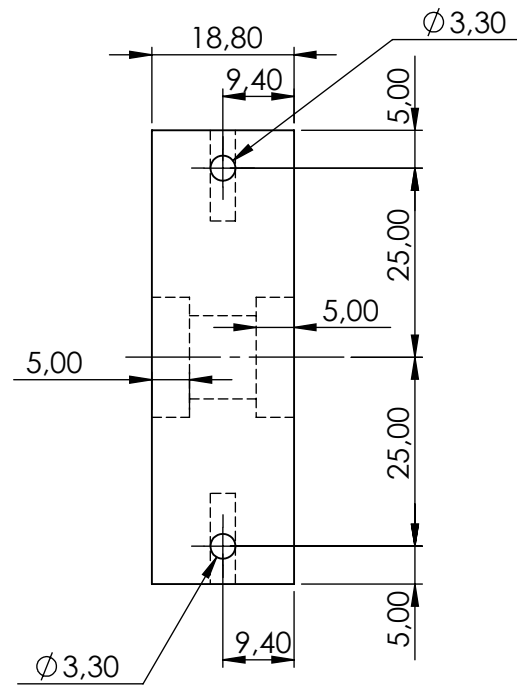
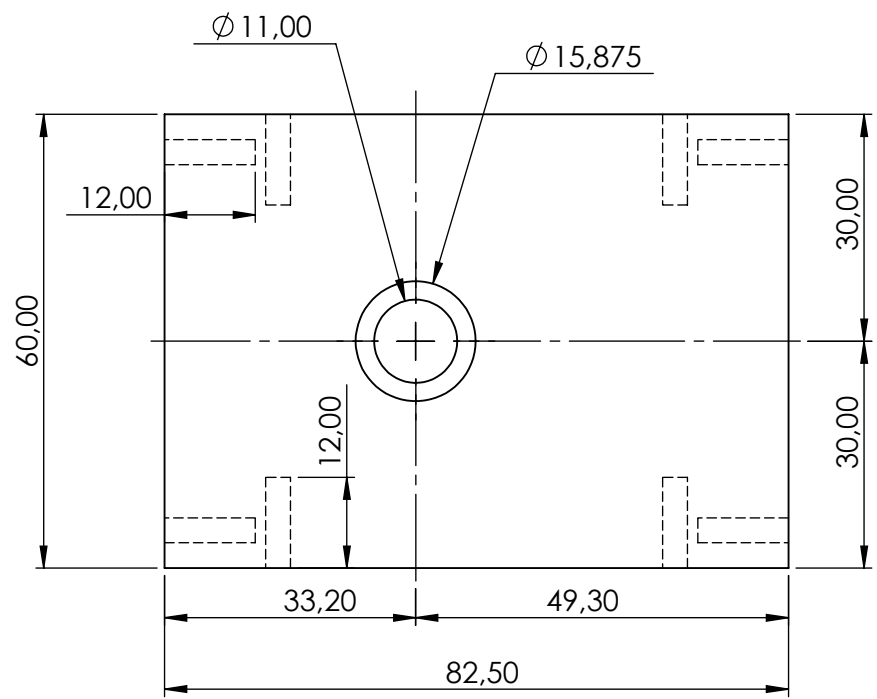
D

A

B

C

D



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO

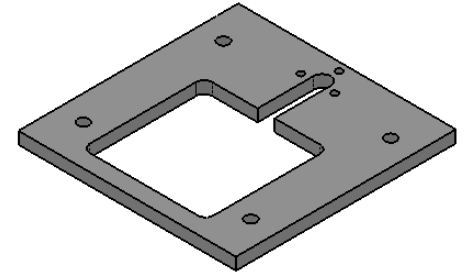
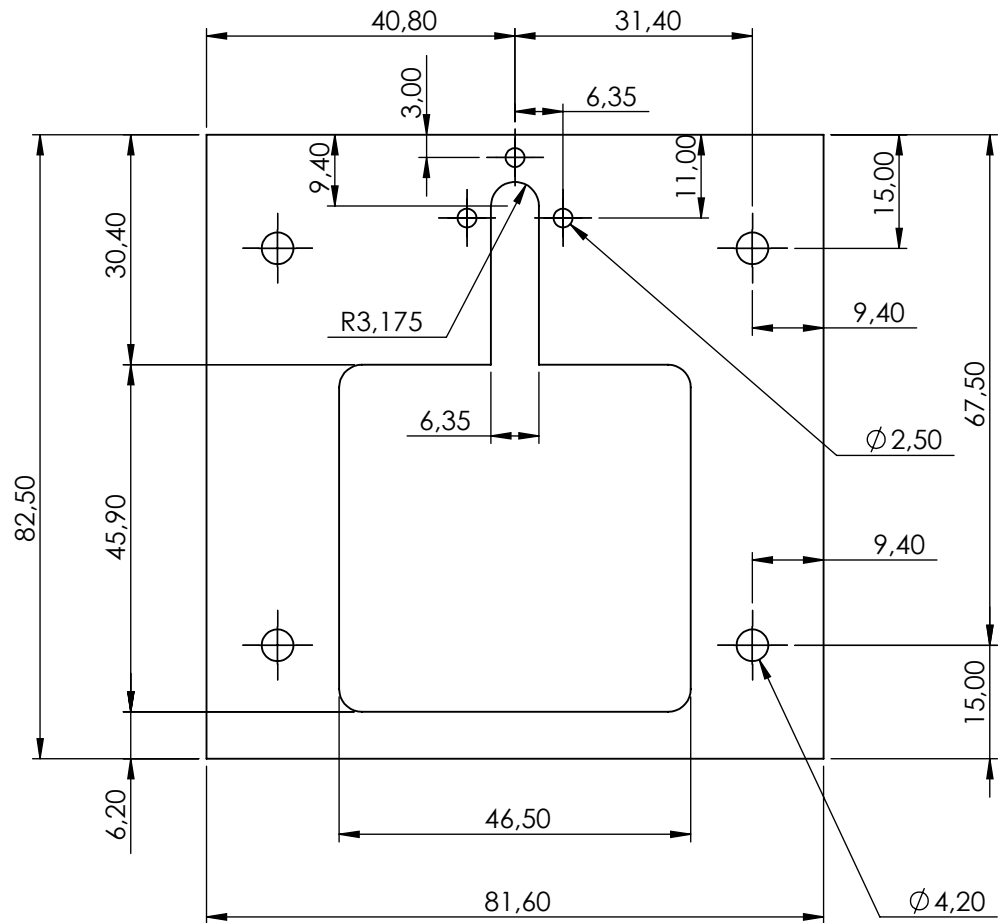
REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				Acero A36
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:	
Placa Soporte Lateral	
DIBUJO NO.	A4
10	
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

1 2



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Placa Soporte Superior

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:

Acero A36

DIBUJO NO.

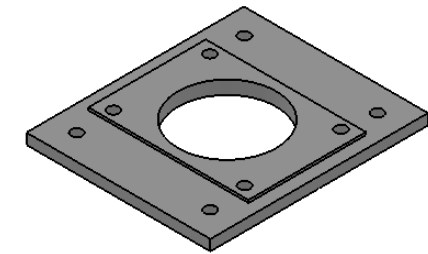
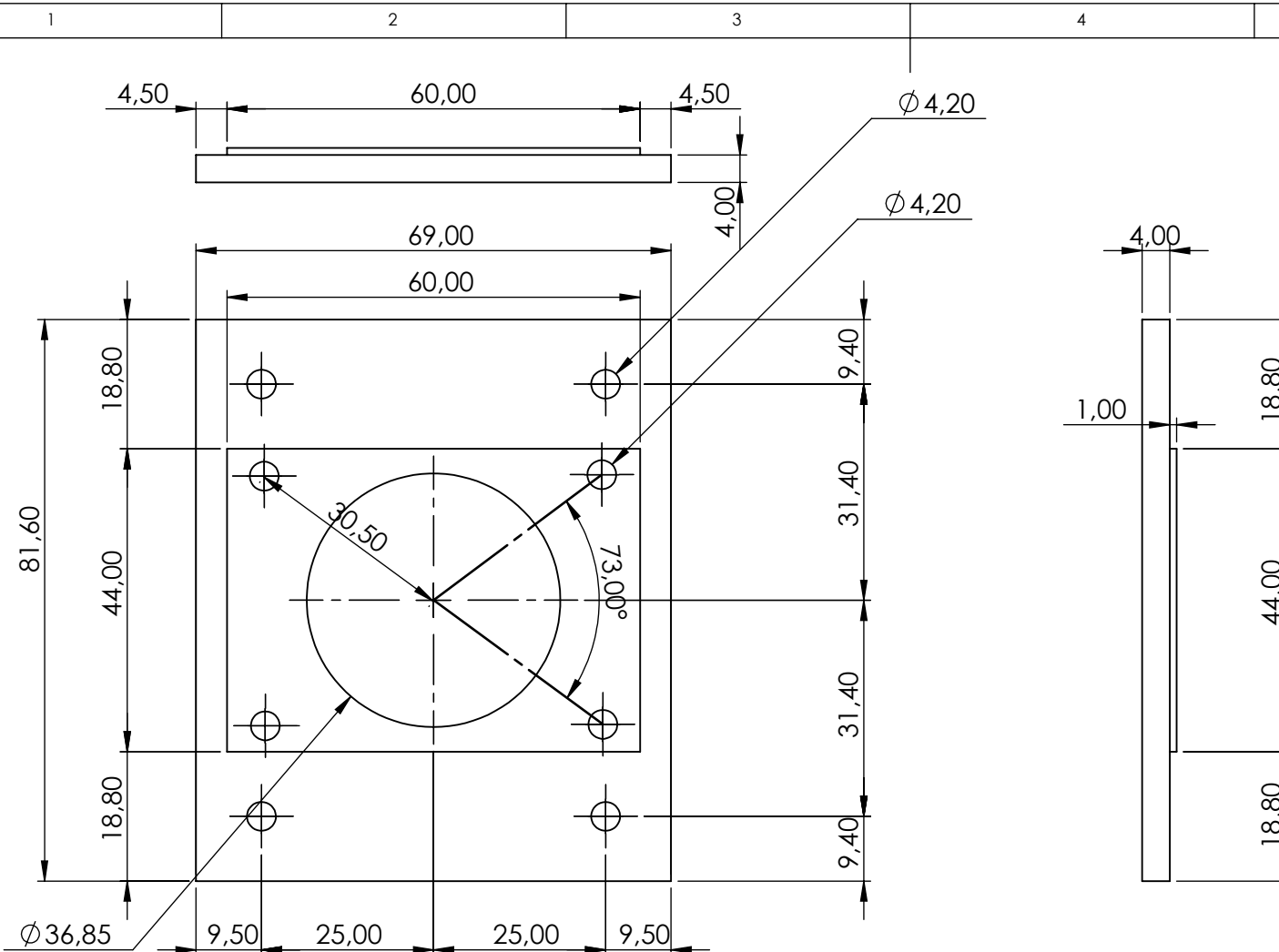
11

A4

PESO:

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



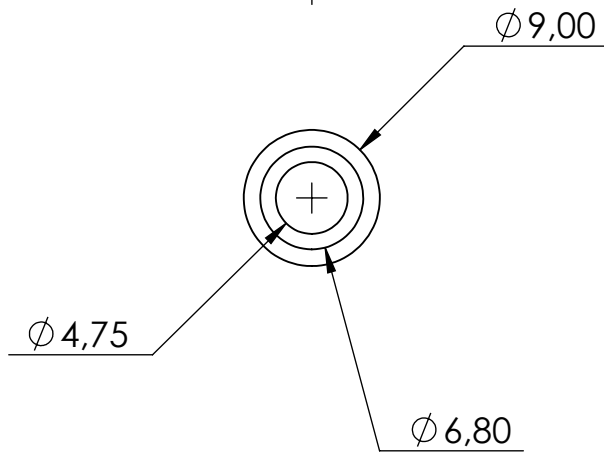
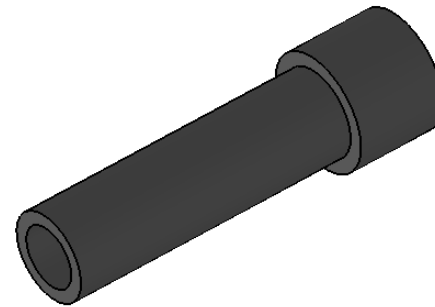
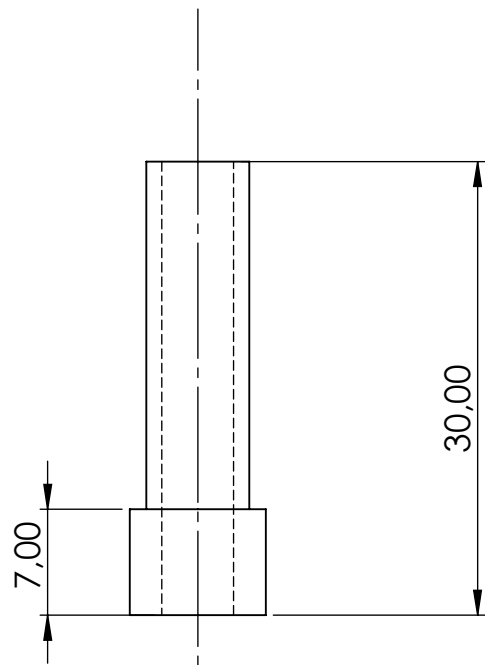
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			
			MATERIAL:
			Acero A36

NOMBRE DE LA PIEZA:	
Placa Soporte Frontal	
DIBUJO NO.	A4
12	



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

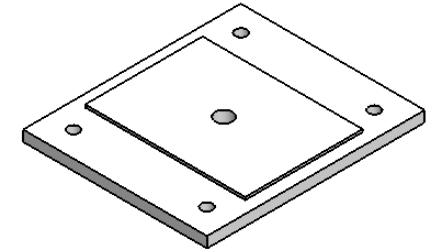
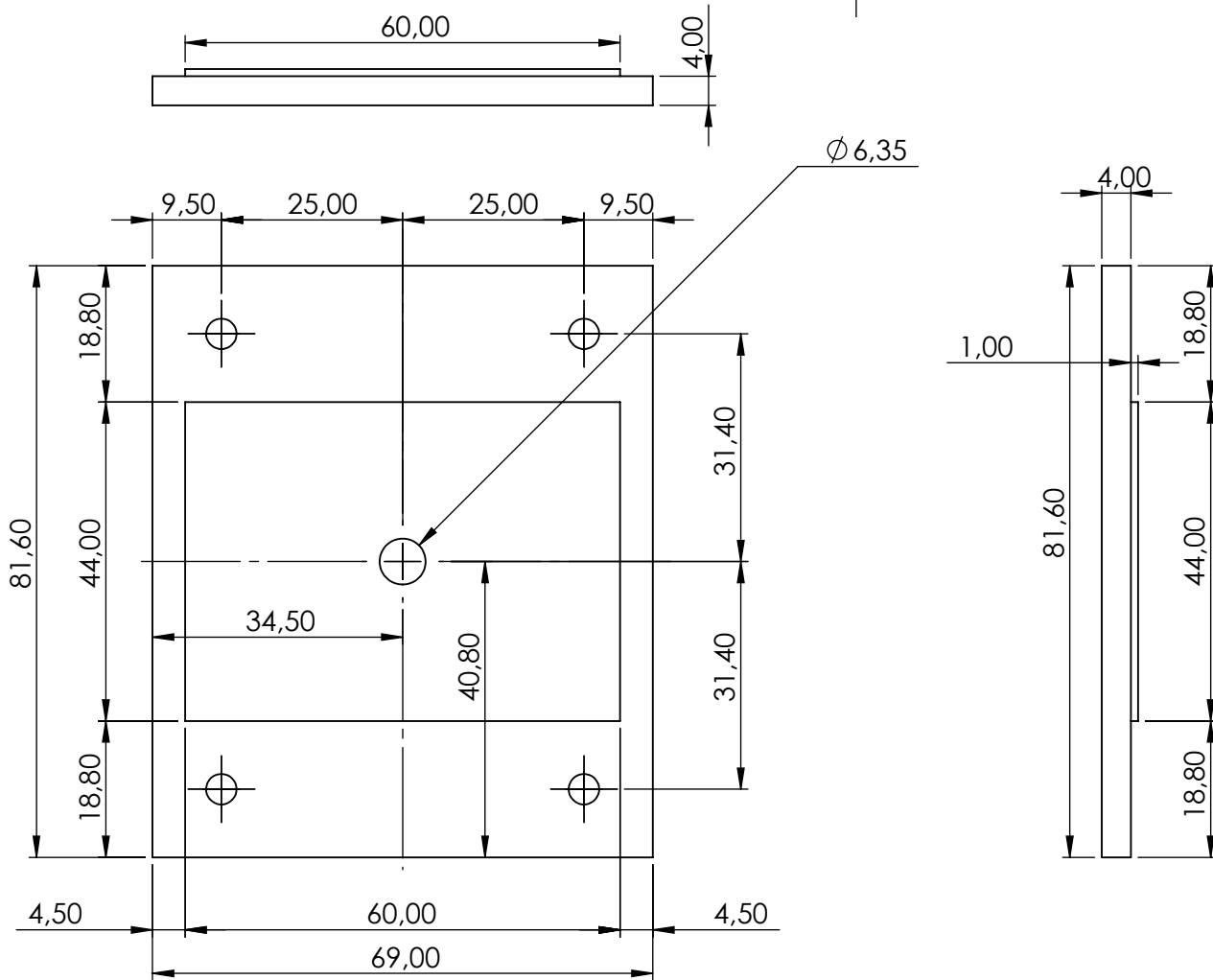
ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
Bronce Fosforoso

PESO:

NO ESCALAR EL DIBUJO	REVISION
Motor Stirling Solar Tipo Beta	
NOMBRE DE LA PIEZA: Buje Piston Potencia	
DIBUJO NO.	13
ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

A4



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Placa Soporte Trasera

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
Acero A36

PESO:

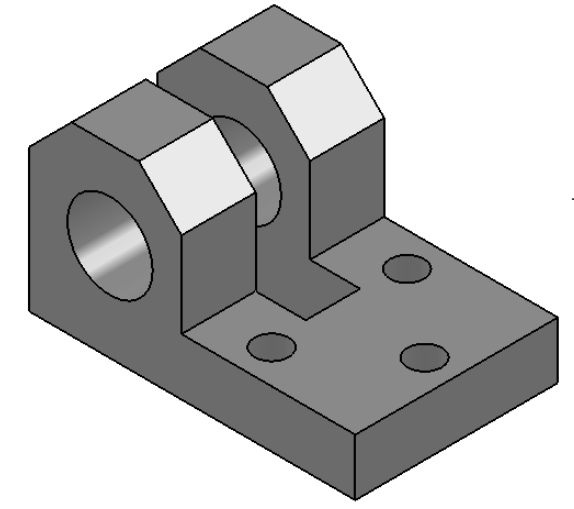
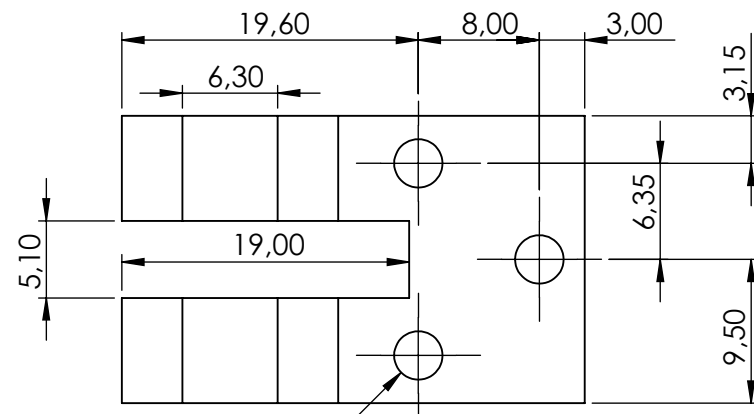
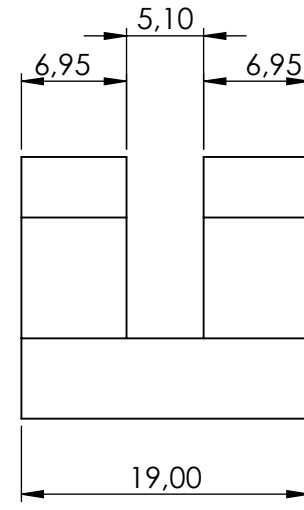
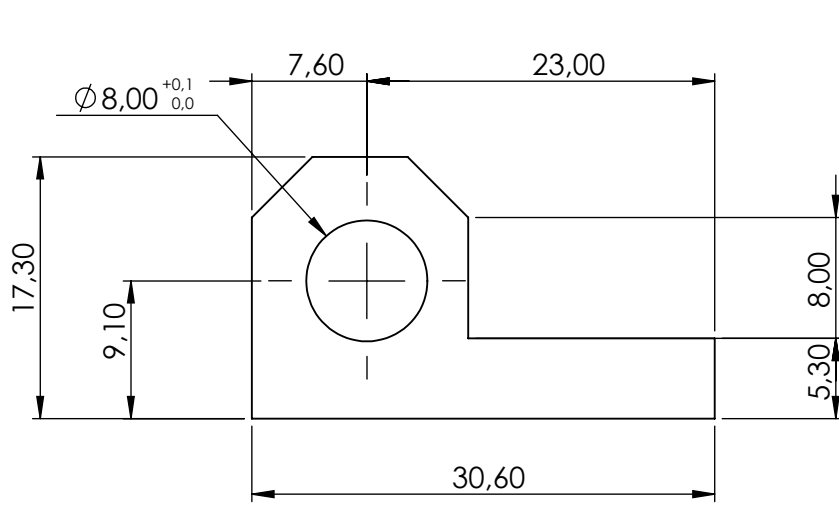
DIBUJO NO.

14

A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
Acero A36

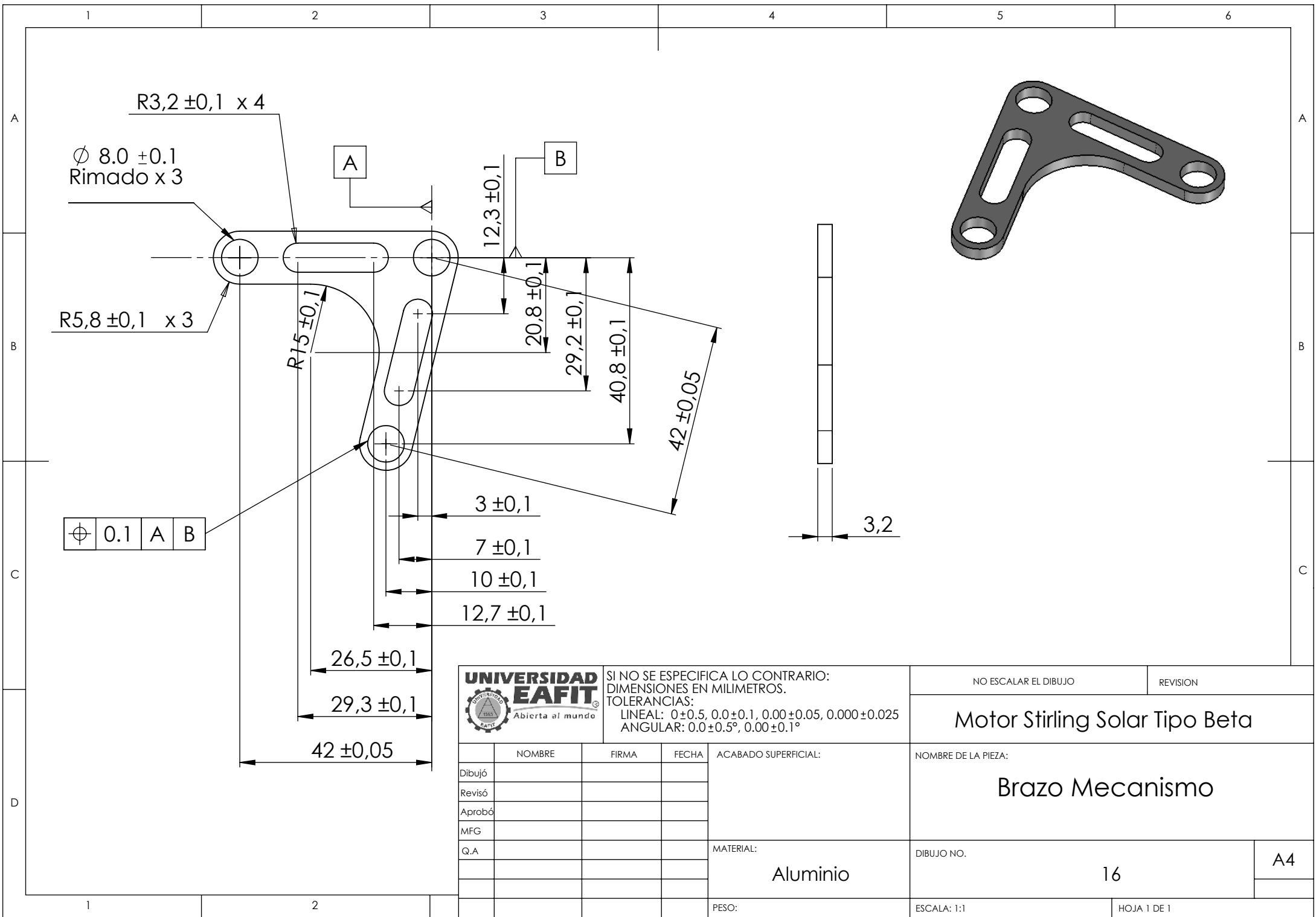
NOMBRE DE LA PIEZA:
Bloque Pivote

DIBUJO NO. **15**

ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1

A4



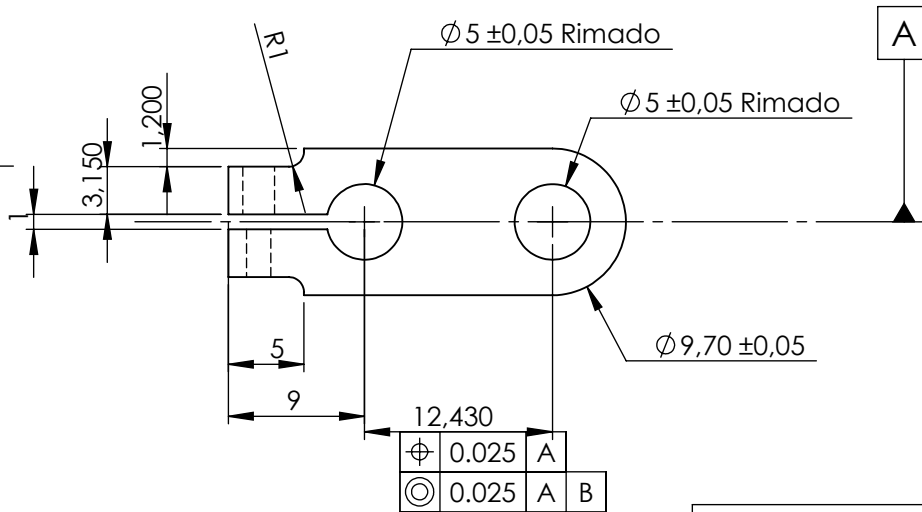
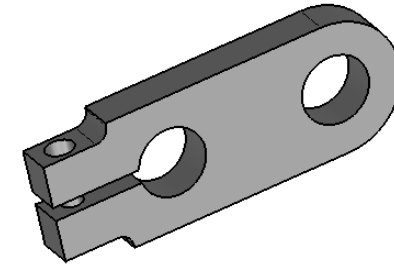
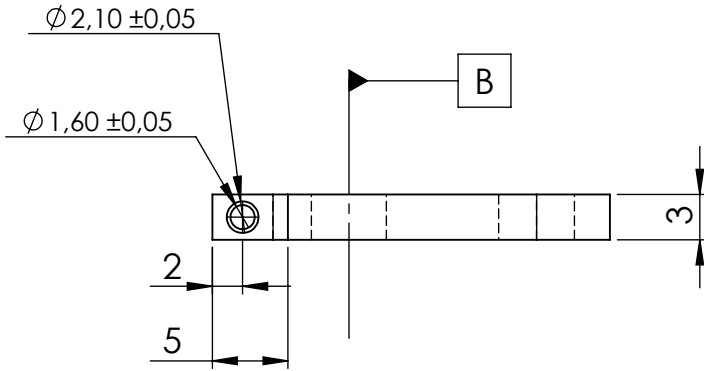
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: $0 \pm 0,5$, $0,0 \pm 0,1$, $0,00 \pm 0,05$, $0,000 \pm 0,025$
 ANGULAR: $0,0 \pm 0,5^\circ$, $0,00 \pm 0,1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				MATERIAL: Aluminio
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA: Brazo Mecanismo	
DIBUJO NO. 16	A4
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



\varnothing	0.025	A
◎	0.025	A B



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: $0 \pm 0,5$, $0,0 \pm 0,1$, $0,00 \pm 0,05$, $0,000 \pm 0,025$
 ANGULAR: $0,0 \pm 0,5^\circ$, $0,00 \pm 0,1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
Aluminio

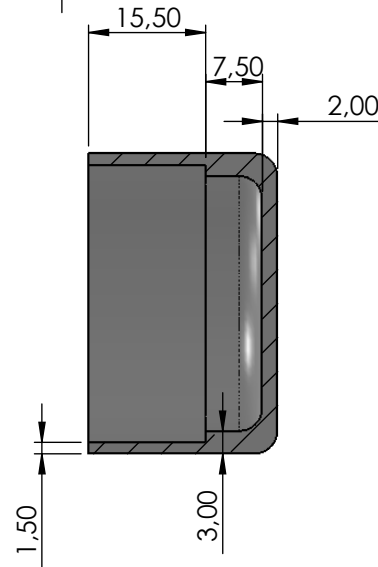
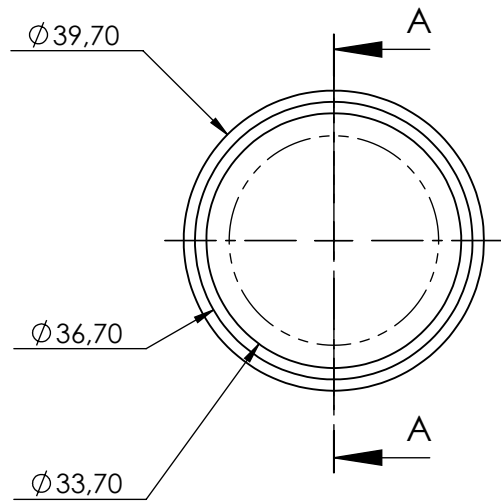
NOMBRE DE LA PIEZA:
Conector Eje-Mecanismo

DIBUJO NO. **17**

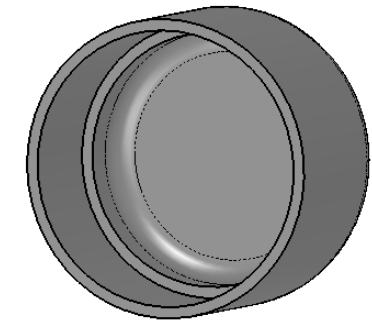
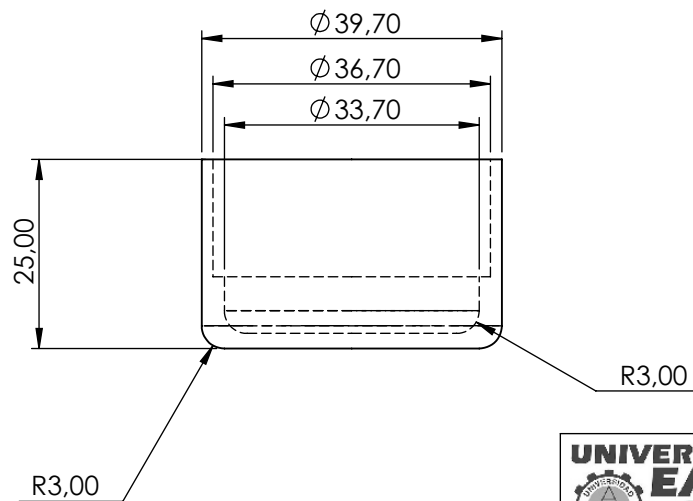
ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1

A4



SECCIÓN A-A



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: $0 \pm 0,5$, $0,0 \pm 0,1$, $0,00 \pm 0,05$, $0,000 \pm 0,025$
ANGULAR: $0,0 \pm 0,5^\circ$, $0,00 \pm 0,1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				MATERIAL: Acero A36
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:

Tapón Cilindro

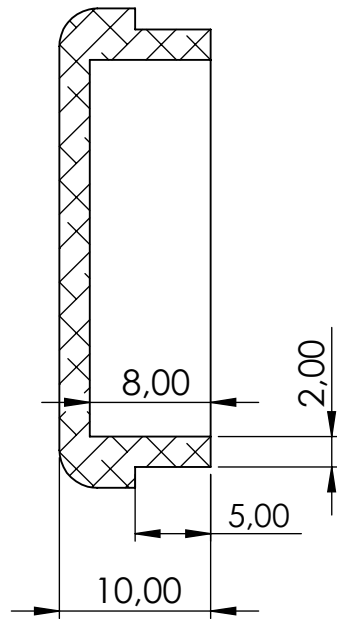
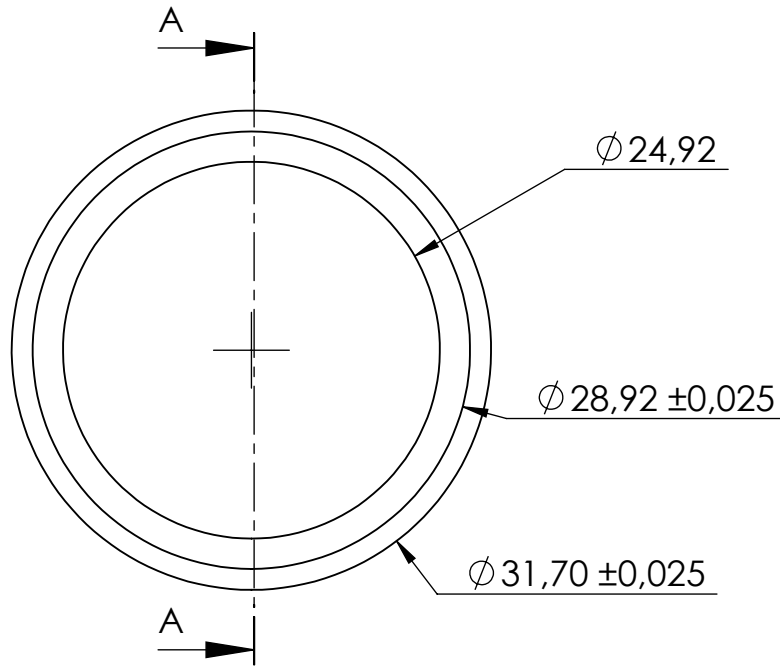
DIBUJO NO.

18

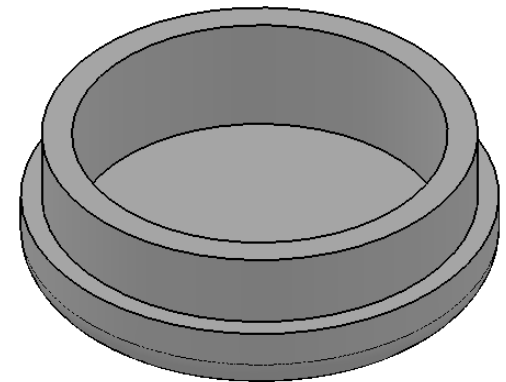
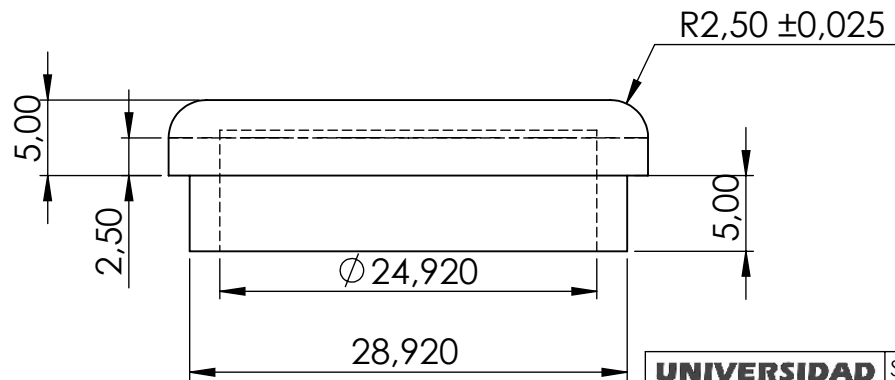
A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SECCIÓN A-A



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

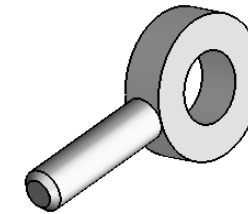
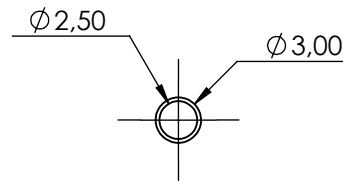
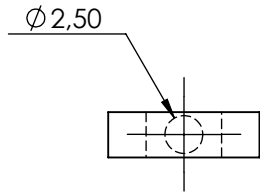
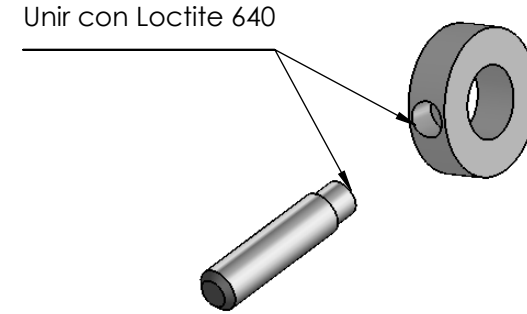
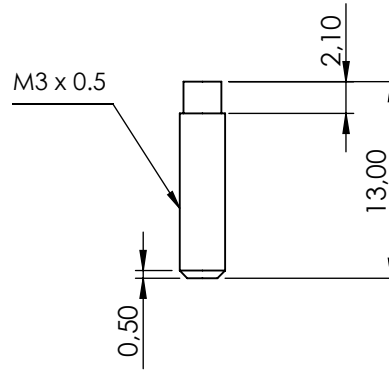
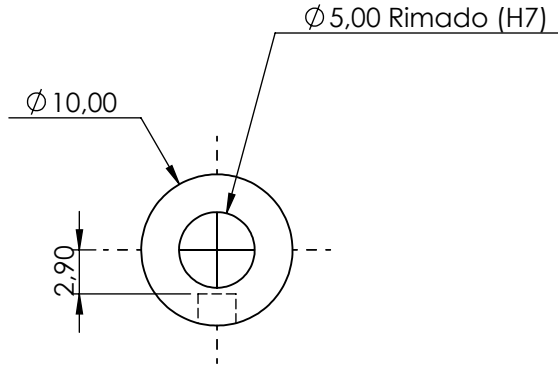
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				Aluminio
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL:
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:
Tapón Pistón Desplazamiento

DIBUJO NO. 19 A4

ESCALA: 2:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0±0.5, 0.0±0.1, 0.00±0.05, 0.000±0.025
 ANGULAR: 0.0±0.5°, 0.00±0.1°

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				N/A
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				
				MATERIAL: Bronce Fosforoso
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:

Buje-Tornillo Conector

DIBUJO NO.

20

A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

A

B

C

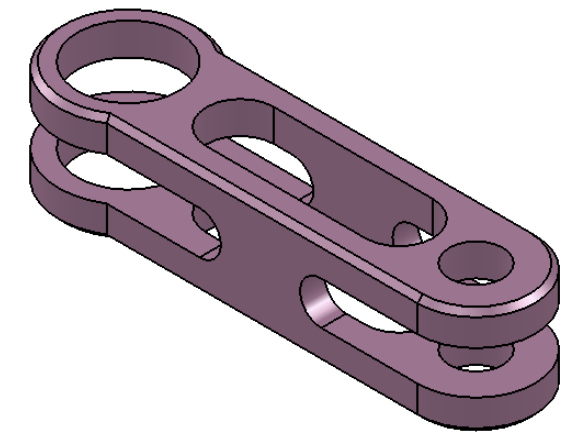
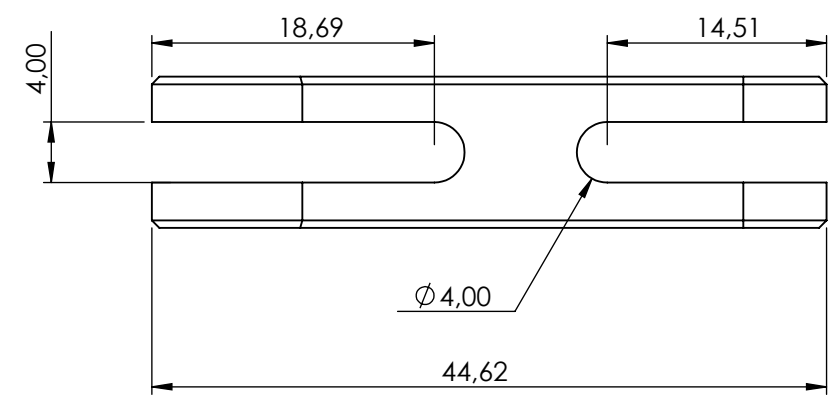
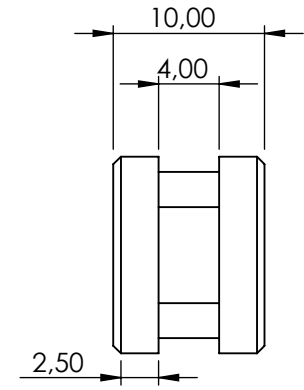
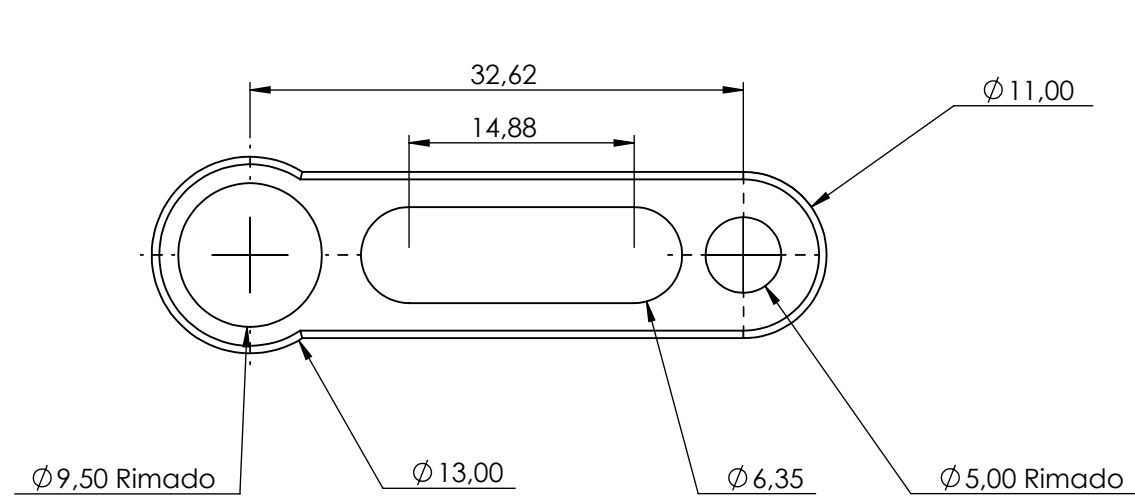
D

A

B

C

D



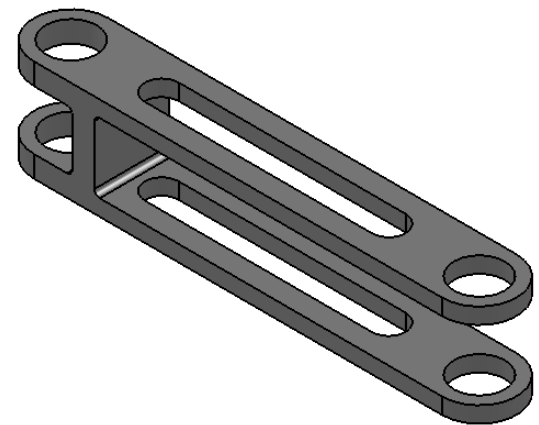
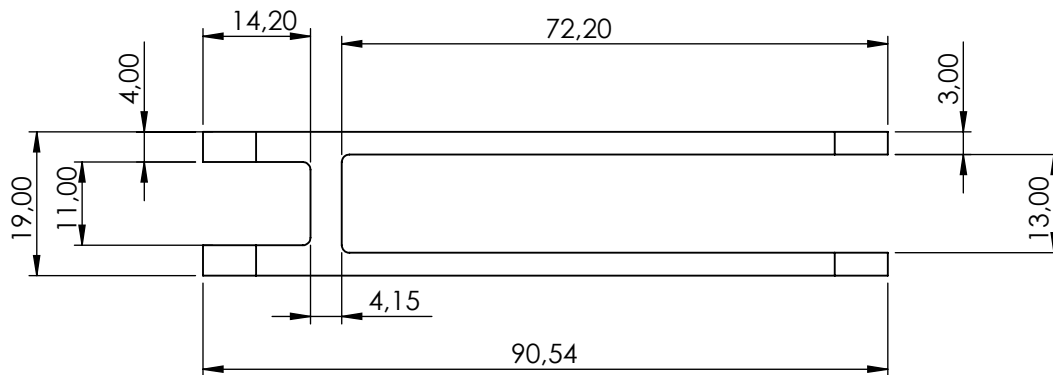
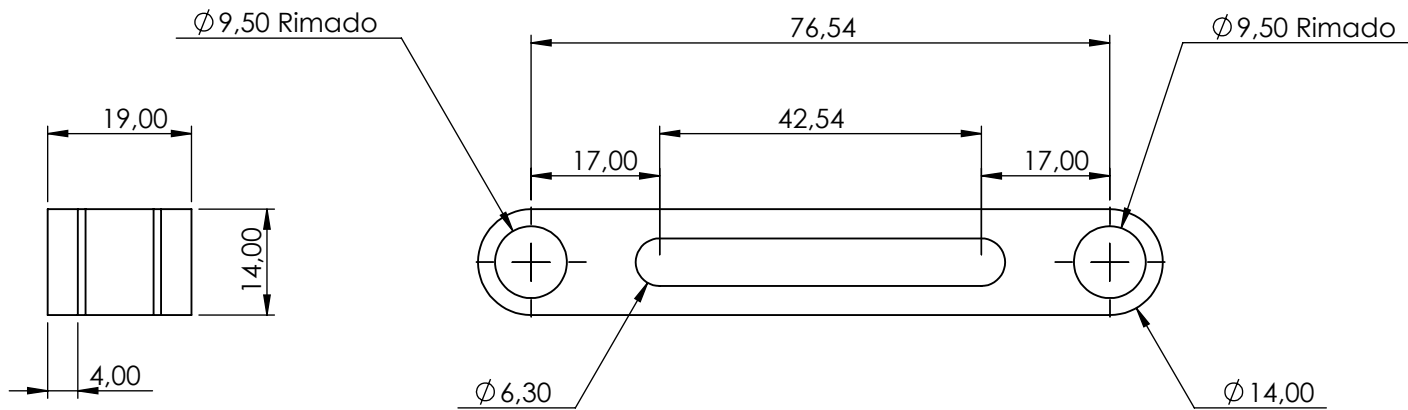
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: $0 \pm 0,5$, $0,0 \pm 0,1$, $0,00 \pm 0,05$, $0,000 \pm 0,025$
ANGULAR: $0,0 \pm 0,5^\circ$, $0,00 \pm 0,1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				N/A
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				MATERIAL:
				Aluminio
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:	
Barra Mecanismo	
DIBUJO NO.	21
ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
DIMENSIONES EN MILIMETROS.
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO SUPERFICIAL:
Dibujó				N/A
Revisó				
Aprobó				
MFG				
Q.A				MATERIAL:
				Aluminio
				PESO:

NOMBRE DE LA PIEZA:

Barra Pistón

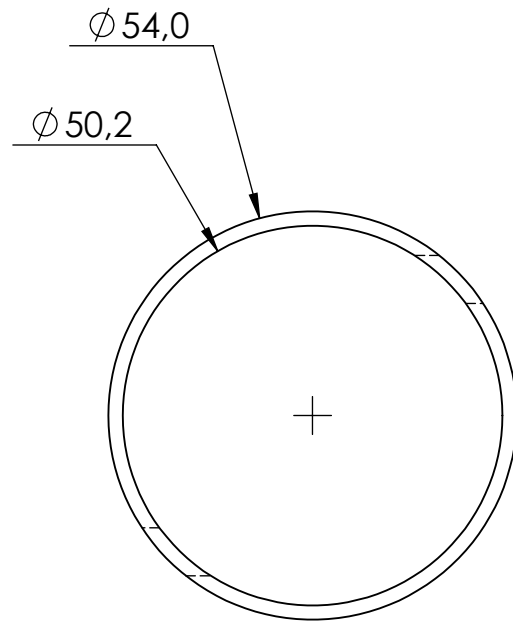
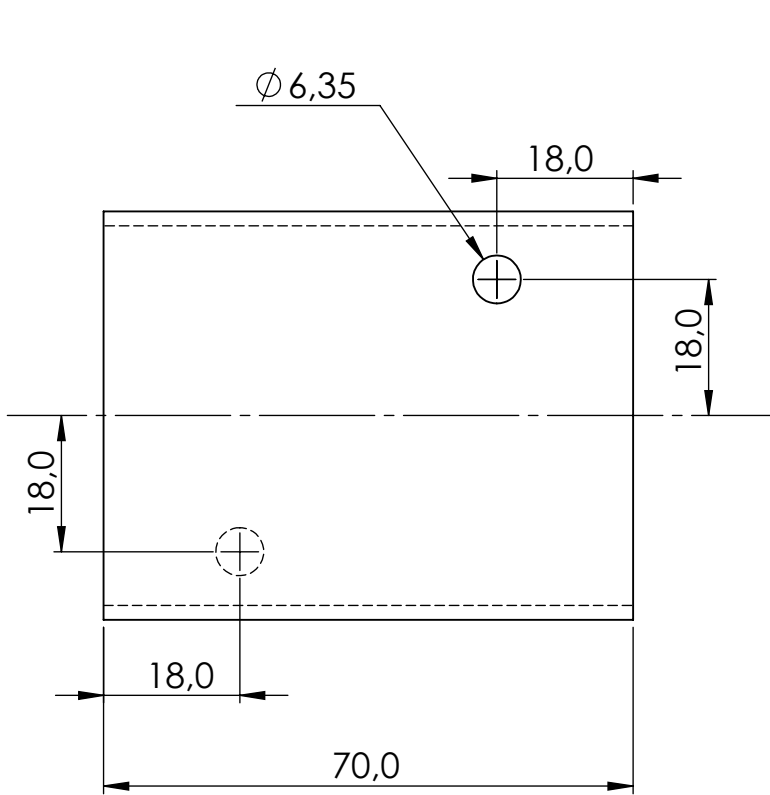
DIBUJO NO.

22

A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Camisa Refrigeración

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
 Tubería de Cobre

PESO:

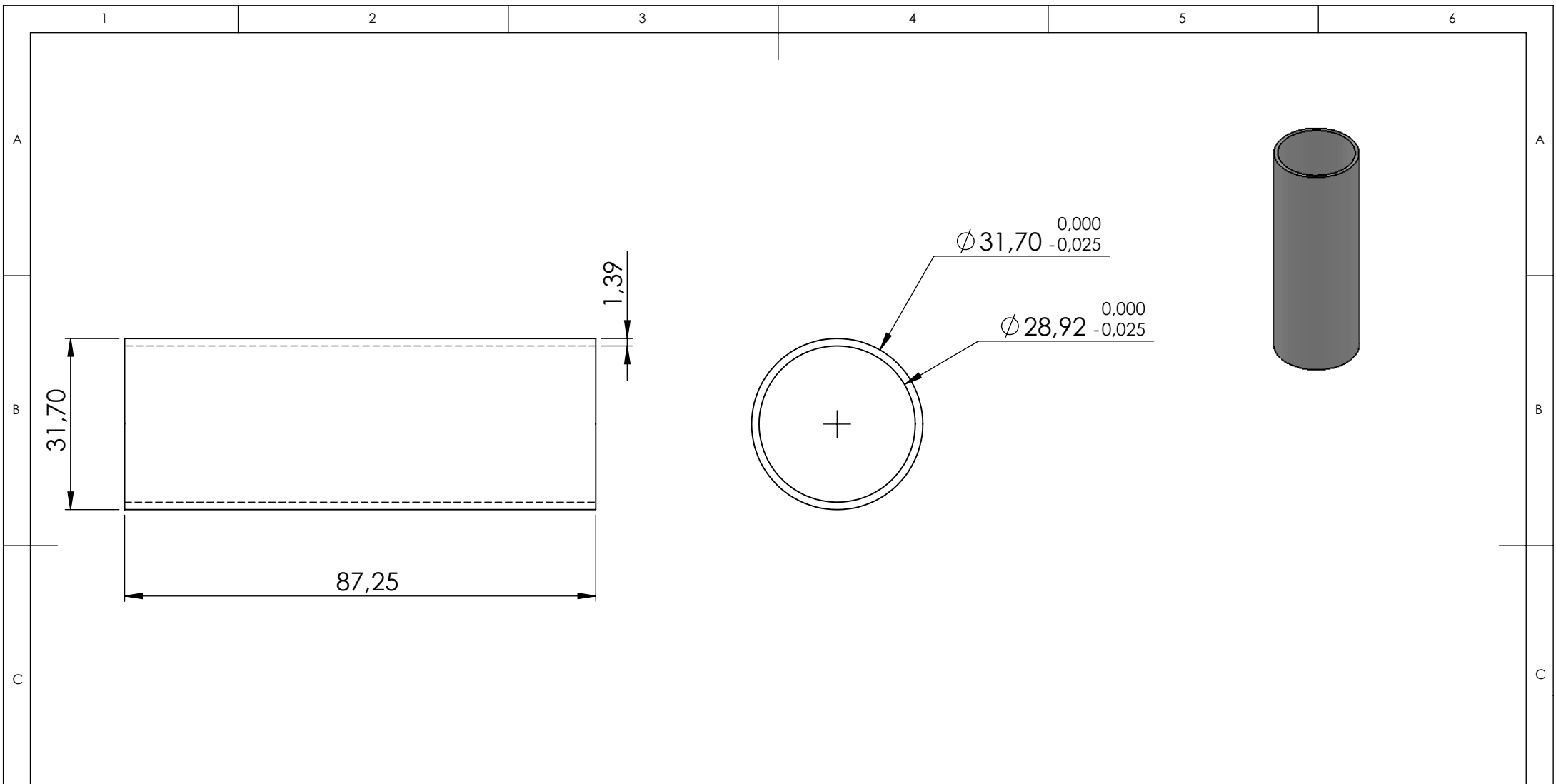
DIBUJO NO.

23

A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO:
 DIMENSIONES EN MILIMETROS.
 TOLERANCIAS:
 LINEAL: 0 ± 0.5 , 0.0 ± 0.1 , 0.00 ± 0.05 , 0.000 ± 0.025
 ANGULAR: $0.0 \pm 0.5^\circ$, $0.00 \pm 0.1^\circ$

NO ESCALAR EL DIBUJO

REVISION

Motor Stirling Solar Tipo Beta

NOMBRE DE LA PIEZA:

Pistón Desplazamiento

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dibujó			
Revisó			
Aprobó			
MFG			
Q.A			

ACABADO SUPERFICIAL:

MATERIAL:
Aluminio

PESO:

DIBUJO NO.

24

A4

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1